



DÖRT SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN 2-DOF PID İLE KONTROLÜ

Gamze YÜKSEL

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇELİK

Ağustos-2018

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRT SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN 2-DOF PID İLE KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gamze YÜKSEL

(151134103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Temmuz 2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Ağustos 2018

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇELİK (F.Ü.)



Diğer Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Temel ÖZDEMİR (F.Ü.)



Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK (B.Ü.)



AĞUSTOS-2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamda emeği geçen, bilgilerini ve tecrübesini benimle paylaşan değerli hocam ve danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇELİK'e katkılarından ve eksik etmediği desteğinden dolayı çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Temel ÖZDEMİR'e ve Arş. Gör. Tevfik YİĞİT hocalarıma da tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim.

GAMZE YÜKSEL

ELAĞİ-2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	XII
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti.....	2
2. ROBOTLAR VE KULLANIM ALANLARI	7
2.1. Robot Kavramı	7
2.2. Robotların Kullanım Alanları.....	8
2.2.1. Endüstriyel Robotlar.....	8
2.2.2. Operasyonel Robotlar	8
2.2.3. Tıp ve Sağlık Alanında Robotlar	9
2.2.4. Siberetik Robotlar.....	10
2.2.5. Askeri Robotlar	10
2.3. Robot Hareketleri	11
2.3.1. Kartezyen Koordinat Sistemi.....	11
2.3.2. Silindirik Koordinat Sistemi	12
2.3.3. Küresel Koordinat Sistemi	12
2.3.4. Döner Koordinat Sistemi	13
3. ROBOT KİNEMATİĞİ	15
3.1. Düz Kinematik.....	15
3.1.1. Denavit-Hartenberg Yöntemi	16
3.2. Ters Kinematik	20
3.2.1. Ters Kinematik Analiz ile Eklem Açılarının Tespiti.....	20
4. DÖRT SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN MATLAB/SimMechanics MODELİ VE KONTROLÜ	22
4.1. Robot Kolun PID Kontrolör ile Kapalı Çevrim Kontrolü	25
4.1.1. PID Parametrelerinin PSO ile Optimizasyonu	32
4.2. Robot Kolun 2-DOF PID Kontrolör ile Kapalı Çevrim Kontrolü.....	39

5. DA MOTOR TAHRİKLİ DÖRT SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN KONTROLÜ	48
5.1. Klasik PID Kontrolör ile Kapalı Çevrim Kontrol	52
5.2. 2-DOF PID Kontrolör ile Kapalı Çevrim Kontrol	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	71



ÖZET

Bu çalışmada, dört serbestlik dereceli robot kolunun uç elemanının pozisyon (konum) kontrolü yapılmıştır. Robot kolun uç noktasının referans konum değerleri ters kinematik denklemlere uygulanarak referans konum açıları belirlenmiş ve bu açılar kapalı çevrim olarak kontrol edilmiştir.

Çalışmada robot kolun her bir eklemine hareketi için Doğru Akım (DA) motoru kullanılmıştır. İlk olarak robot kolu Matlab/SimMechanics ortamında modellenmiştir. Robot kol RoboAnalyzer programında modellenerek her bir eklem için gereken torklar belirlenmiş ve bu tork değerlerine göre DA motorun seçimi yapılmıştır. Seçilen DA motor parametrelerine uygun transfer fonksiyonu elde edilerek bu modele eklenmiştir. Robot kolu hem klasik PID kontrolör hem de 2-DOF PID kontrolör ile kontrol edilmiştir. Hem klasik PID hem de 2-DOF PID parametreleri parçacık sürü optimizasyonu yöntemi ile belirlenmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde 2-DOF PID kontrolör performansının klasik PID kontrolörün performansından daha iyi olduğu görülmüştür. Böylelikle 2-DOF PID kontrolör ile robot kol performansı iyileştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Robot kol, Kinematik denklemler, Konum kontrolü, PSO, 2-DOF PID

SUMMARY

2-DOF PID Control of Four Degrees of Freedom Robotic Arm

In this study, the position of the end element of the robot arm with four degrees of freedom is controlled by the 2-DOF PID controller. The reference position values of the end point of robot arm are applied to the inverse kinematic equations, the reference position angles are determined and these angles are controlled in closed loop.

Direct current (DC) motor is used for the movement of each joint of the robot arm in this study. The robot arm is modeled in the Matlab/SimMechanics environment. The robot arm is modeled in the RoboAnalyzer program and the required torques for each joint are determined and the DA motor is selected according to these torque values. The transfer function corresponding to the selected motor parameters is obtained and this function is added to model. The robot arm was controlled by both a classical PID controller and a 2-DOF PID controller. Both the classical PID and the 2-DOF PID parameters are determined by the particle swarm optimization method. When the results are analyzed, it's seen that 2-DOF PID controller performance is better than classical PID's.

Key Words: Robot arm, Kinematics equations, Position control, PSO, 2-DOF PID

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Endüstride kullanılan robotlar	8
Şekil 2.2. Madencilikte kullanılan operasyonel robotlar	9
Şekil 2.3. Ameliyat robotu	9
Şekil 2.4. İnsansı robot	10
Şekil 2.5. Askeri alanda kullanılan robotlar	11
Şekil 2.6. Kartezyen Koordinat Sistemine Sahip Robot	12
Şekil 2.7. Silindirik koordinat sistemine sahip robot	12
Şekil 2.8. Küresel Koordinat Sistemine Sahip Robot	13
Şekil 2.9. Döner koordinat sistemine sahip robot	13
Şekil 2.10. Scara tipi robot	14
Şekil 3.1. Robot kol üzerindeki koordinat eksenleri	15
Şekil 3.2. Robot kolun şematik gösterimi	16
Şekil 3.3. Robot kolun yerel koordinat sistemi	16
Şekil 4.1. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun Matlab/SimMechanics modeli	22
Şekil 4.2. Robot kolun ters kinematik analizi için Matlab/Simulink alt modeli	23

Şekil 4.3. Robot kolun çalışma uzayı	24
Şekil 4.4. Joint Actuator ile tahrik edilen açık çevrim kontrollü robot kolun tutucu uç koordinatları	25
Şekil 4.5. Açık çevrim kontrol sistemi	26
Şekil 4.6. Kapalı çevrim kontrol sistemi	26
Şekil 4.7. PID kontrolörlü kapalı çevrim kontrol sistemi.....	26
Şekil 4.8. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun klasik PID ile kapalı çevrim kontrolünün Matlab/SimMechanics modeli.....	28
Şekil 4.9. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (Klasik PID)	29
Şekil 4.10. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (Klasik PID).....	30
Şekil 4.11. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (Klasik PID)	31
Şekil 4.12. Parçacık Sürü Optimizasyonu akış diyagramı	34
Şekil 4.13. PSO algoritması maliyet değerinin değişimi (Klasik PID)	35
Şekil 4.14. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (Klasik PID-PSO).....	36
Şekil 4.15. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (Klasik PID-PSO).....	37
Şekil 4.16. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (Klasik PID-PSO) ..	38
Şekil 4.17. 2-DOF PID kontrolörlü kontrol yapısı	40

Şekil 4.18. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun 2-DOF PID ile kapalı çevrimli kontrolünün Matlab/SimMechanics modeli	41
Şekil 4.19. PSO algoritması maliyet değerinin değişimi (2-DOF PID)	41
Şekil 4.20. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (2-DOF PID-PSO)	43
Şekil 4.21. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (2-DOF PID-PSO)	44
Şekil 4.22. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (2-DOF PID-PSO) .	45
Şekil 4.23. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kol için klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör sonuçlarının karşılaştırılması	46
Şekil 5.1. Serbest uyarımlı DA motorun eşdeğer devresi a) Endüvi devresi b) Uyarım devresi	48
Şekil 5.2. DA motorun blok diyagramı	50
Şekil 5.3. RoboAnalyzer programında robot kolun hareketi.....	51
Şekil 5.4. RoboAnalyzer programından elde edilen tork değerleri.....	51
Şekil 5.5. DA motor ile tahrik edilen robot kolun klasik PID ile kapalı çevrim kontrolünün Matlab/SimMechanics modeli	52
Şekil 5.6. PSO algoritması maliyet değerinin değişimi (Klasik PID)	53
Şekil 5.7. DA motor ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (Klasik PID-PSO)	54
Şekil 5.8. DA motor ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (Klasik PID-PSO)	55
Şekil 5.9. DA motor ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (Klasik PID-PSO).....	56
Şekil 5.10. DA motor ile tahrik edilen robot kolun hareketini sağlayan motor torkları (Klasik PID-PSO)	57

Şekil 5.11. DA motor ile tahrik edilen robot kolun 2-DOF PID ile kapalı çevrim kontrolünün Matlab/SimMechanics modeli	58
Şekil 5.12. PSO algoritması maliyet değerinin değişimi (2-DOF PID)	59
Şekil 5.13. DA motor ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (2-DOF PID-PSO).....	60
Şekil 5.14. DA motor ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (2-DOF PID-PSO).....	61
Şekil 5.15. DA motor ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (2-DOF PID-PSO).....	62
Şekil 5.16. DA motor ile tahrik edilen robot kolun hareketini sağlayan eklem torkları (2-DOF PID-PSO).....	63
Şekil 5.17. DA motor ile tahrik edilen robot kol için Klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör sonuçlarının karşılaştırılması	64

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Dört serbestlik dereceli robot kolun D-H tablosu.....	17
Tablo 3.2. Robot kolun parametreleri	17
Tablo 4.1. PSO parametreleri	34
Tablo 4.2. 2-DOF PID kontrolör parametreleri	42
Tablo 4.3. Klasik PID kontrolör ve 2-DOF PID kontrolör performanslarının karşılaştırılması.....	47
Tablo 5.1. DA motor parametreleri.....	51
Tablo 5.2. 2-DOF PID kontrolör parametreleri	59
Tablo 5.3. Klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör performanslarının karşılaştırılması.....	65

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

D-H	: Denavit-Hartenberg
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
DOF	: Degree of freedom (Serbestlik Derecesi)
DA	: Doğru Akım
P_x	: Robot kolun x eksenindeki konumu
P_y	: Robot kolun y eksenindeki konumu
P_z	: Robot kolun z eksenindeki konumu
K_p	: Oransal kazanç ayar parametresi
K_i	: İntegral kazanç ayar parametresi
K_d	: Türevsel kazanç ayar parametresi
b	: Oransal ağırlık katsayısı
c	: İntegratör ağırlık katsayısı
N	: Filtre katsayısı

1. GİRİŞ

Bu tezin amacı, robotik sistemler ve robot kol hakkında genel bilgiler vererek bu sistemlerin kontrolünü gerçekleştirmektir. Bu çalışmada bir robot kolun tutucu ucunun istenilen pozisyona gidebilmesi için eklem açılarının en doğru ve en uygun kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada eklemlerin tahrik edilmesi için Doğru Akım (DA) motoru kullanılmıştır. Kontrolör olarak da son yıllarda kontrol sistemlerinde klasik PID kontrolöre göre daha iyi bir performansa sahip olan 2-DOF PID kontrolör kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kontrolörlerin parametreleri, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak belirlenmiştir. Sistem Matlab/SimMechanics ortamında modellenmiş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Bu sonuçlara göre 2-DOF PID kontrolör ile robot kolun performansı arttırılmıştır.

Yapılan tez çalışmasının içeriği özetlenecek olursa;

Birinci bölümde, tez konusu ile ilgili literatür özeti verilmiş ve tezin amacı ve içeriği ile ilgili kısaca bilgilendirme yapılmıştır.

İkinci bölümde, robotlar ve kullanım alanları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca endüstride kullanılan robotik sistemlerden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, robot kinematiği ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra tez çalışmasında kullanılan dört serbestlik dereceli bir robot kolun kinematik denklemlerinin oluşturulmasına yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, robot kolun Matlab/SimMechanics modelinin oluşturulması ve Joint Actuator ile kontrolü yer almaktadır.

Beşinci bölümde, Matlab/SimMechanics’de modellenen robot kolun her bir eklemi DA motoru ile tahrik edilmiştir. Elde edilen sistem klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör ile kontrol edilerek benzetim sonuçları verilmiştir.

Tezin son bölümü olan altıncı bölümde ise çalışmayla ilgili sonuçlar ve bundan sonra yapılacak çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

1.1. Literatür Özeti

Literatürde robotlar ve robot kol üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazılarına aşağıda yer verilmiştir.

Ege Üniversitesinde yapılan bir yüksek lisans çalışmasında TQ MA2000 isimli robot kolun kameradan alınan görüntü ile nesnelerin konumunun tespit edilmesi ve nesneleri bulunduğu konumdan alıp başka konuma taşınması işlemi gerçekleştirilmiştir. Görüntü işlemeye dayalı bu çalışmada OpenCv kütüphaneleri kullanılmış ve robot kolun eklemlerinin hareketi için kinematik analizler yapılmıştır [1].

Dokuz Eylül Üniversitesinde yapılan bir yüksek lisans çalışmasında 3 serbestlik dereceli bir robot kolun pozisyon kontrolü yapılmıştır. Beş farklı servo motor ile robot kolun hareketi sağlanmıştır. Mikrodenetleyici olarak Arduino işlemcisinin Atmega 2560 versiyonu kullanılmıştır [2].

Dokuz Eylül Üniversitesinde yapılan başka bir yüksek lisans çalışmasında ise genel amaçlı bir robot kol tasarımı yapılmıştır. Robot kola insansı el duyarlılığı kazandırmak için ivmeölçer sensörler kullanılmış ve sistemin kontrolü PIC mikroişlemcisi ile sağlanmıştır [3].

Gazi Üniversitesindeki bir yüksek lisans çalışmasında 5 eksenli bir robot kolun simülasyonu ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ters kinematik hesaplamalar ve yörünge planlaması yapılmış ve robot hareket ettiği sırada önüne çıkabilecek engelleri tanıyabilecek bir sistem geliştirilmiştir [4].

Başka bir çalışmada total diz replasmanı (TKR) cerrahisi için bir "hands-on" robotik sistem oluşturulmuştur. Prosedürü doğru şekilde planlamak için bilgisayarlı tomografi tabanlı bir preoperatif planlama yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada intraoperatif olarak cerrah, konumlandırma cihazına monte edilen Acrobot adlı küçük ve özel amaçlı olan bir robotu yönlendirir. Acrobot, hareketi önceden belirlenmiş bir bölgeyle sınırlandıran aktif kısıtlama kontrolünü kullanır ve böylelikle cerrahın diz kemiklerini güvenli bir şekilde TKR protezine yüksek hassasiyetle uyacak şekilde kesmesine izin verir. Noninvaziv bir anatomik kayıt yöntemi tarif edilmiştir [5].

Dokuz Eylül Üniversitesinde yapılan bir diğer yüksek lisans çalışmasında yapay sinir ağlarıyla bir robot kol kontrolü yapılmıştır. Robot kol eklemleri doğru akım motoru ile tahrik edilen bu çalışmada farklı kontrolör sistemleriyle kontrol işlemleri

gerçekleştirilmiştir. Matlab ve Simulink yardımıyla TMS320F28335 işlemcisinin programlanması ve yapay sinir ağıyla kontrolü üzerine çalışılmıştır [6].

Ogata, yayınlamış olduğu bir kitabında kontrol sistemlerinin tasarımını, Laplace dönüşümlerini, dinamik sistemlerin durum uzay modelini ve kontrol tekniklerini açıklamıştır. PID kontrolden bahsetmiş ve sistemlerde nasıl kullanılacağını açıklamıştır [7].

Bir yüksek lisans tez çalışmasında Kartezyen koordinatlı pnömatik bir robotun SMC ile kontrolü yapılmıştır. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan pnömatik robot üzerinde yapılan çalışmalarda açık ve kapalı döngü testleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır [8].

Başka bir yüksek lisans tez çalışmasında ise robotun kinematik denklemleri elde edilmiştir. Kartezyen koordinat sistemindeki yörüngenin takibi için yörünge planlaması yapılarak robot hareketinden kaynaklanan titreşimler engellenmeye çalışılmıştır. Böylece eklemlere gelen yükler azaltılmış ve yörüngede meydana gelebilecek hatalar da minimuma indirilmiştir. Ayrıca robotun dinamik analizi de yapılarak eklem motorlarına ait tork ifadeleri de bulunmuştur [9].

Diğer bir yüksek lisans tez çalışmasında lineer olmayan iki serbestlik dereceli bir robotik sisteminin dinamik modeli oluşturulmuş ve konum kontrolü yapılmıştır. Kontrolör olarak PID kontrolör kullanılmıştır [10].

Bir diğer çalışmada otobanların bakım onarım ve yapım işlemlerinde kullanılan bir mobil robot tasarlanmıştır. Robotun kontrolünde ise servo sistem kontrol kullanılmıştır [11].

Bir yüksek lisans tez çalışmasında kartezyen bir robot üzerinde internet tabanlı bir kontrol yapılmıştır. Bu kontrolde PLC kontrolcü kullanılmıştır. Farklı renklerdeki topların farklı konumlara taşınmasını sağlayabilecek bir program yüklenmiştir ve böylece istenen işlem gerçekleştirilmiştir [12].

Bir başka yüksek lisans tez çalışmasında ise farklı serbestlik derecelere sahip olan robot kollar üzerinde belirli yörüngeleri izlemeleri için farklı kontrolcüler sinirsel bulanık mantık kontrolörü yapısı altında birleştirilmiştir. Öğrenme yeteneği kazandırılan bu kontrolör ile sistemin performansı yükseltilmiştir [13].

Yapılan başka bir çalışmada bir robotu hareket ettirebilmek için ultrasonik motorlar kullanılmıştır. Robotun kinematik analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık

ayarlamalı PID kontrolör kullanılmıştır. Bu kontrolör geliştirilerek robotun yeni pozisyonlarındaki hızının ölçülmesi için geri beslemeli stratejileri önerilmiştir ve uygulanmıştır. Böylece kullanılan kontrolörün geçerliliği yapılan çalışmalarla doğrulanmıştır [14].

Bir diğer çalışmada iki eklemlili bir robot kol sisteminin matematiksel modeli oluşturulmuştur ve kontrolü için de bulanık mantık denetleyicisi (BMD) kullanılmıştır. Denetleyici Matlab/Simulink ortamında modellenerek gerekli incelemeler yapılmıştır. BMD ile klasik PI denetleyicinin performansları karşılaştırılarak en iyi sonuca BMD ile ulaşılmıştır [15].

Başka bir yüksek lisans tez çalışmasında altı serbestlik dereceli PUMA 560 robotunun PD kontrolör ile hesaplanan moment yöntemi metodu ile yörünge kontrolü yapılmıştır [16].

Bir çalışmada beş serbestlik dereceli bir Edubot robotun düz kinematik ve ters kinematik analizleri yapılmış ve yörünge planlaması için de beşinci dereceden polinomlar oluşturularak sistemin kontrolü sağlanmıştır [17].

Bir yüksek lisans tez çalışmasında, omni directional mobil robot Matlab'da tasarlanmıştır. Mobil robotun kontrolü FPGA geliştirme kartıyla sağlanmıştır. Bu çalışmada, Altera Stratix-II GX FPGA geliştirme kartı kullanılmıştır [18].

Dokuz Eylül Üniversitesinde yapılan bir yüksek lisans tez çalışmasında dört eksenli bir robotun kontrolü, PIC mikroişlemcisi kullanılarak servo motor sürücü kartı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada altı adet servo motor sürücü kartı üretilmiştir. Robot kolun kontrolü bilgisayarda oluşturulan bir ara yüzle sağlanmıştır [19].

Başka bir çalışmada üç serbestlik dereceli SCARA tipi bir robotun kinematik analizleri yapılmıştır. Daha sonra bu robotun çalışmasını engelleyecek şekilde çalışma uzayına bir engel koyulmuştur ve robot kol hareket ederken engele çarpıp çarpmadığı incelenmiştir. Bu inceleme çok sayıda örnek oluşturularak devam etmiştir. Bu örnekler doğrultusunda hedef nokta ve engelin bulunduğu koordinatlar yapay sinir ağı ile eğitilmiştir. Sonuç olarak eklemlerin açı değerleri belirlenmiştir [20].

Bir doktora tezinde dört tekerli bir araç modeli üretilmiş ve bu araç üzerine çeşitli algılayıcılar, veri toplama ve kontrol üniteleri yerleştirilmiştir. Üretilen bu dört tekerli

gezgin robot, bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile kontrol edilerek, yapay sinir ağları kullanmanın avantajları ortaya koyulmuştur [21].

Bir diğer çalışmada ise Scara tipi robotun matematiksel modeli oluşturulmuştur. Robot hareketinin analizi için kinematik analiz yapılmıştır. Robot kol DA servo motorlarla tahrik edilmiştir. Sistemin hareketleri için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. Çalışmanın son aşamasında simülasyon sonuçları gösterilmiştir [22].

Başka bir çalışmada üç serbestlik dereceli bir Puma robotunun tutucu ucunun PID ile yörünge kontrolü yapılmıştır. Bu çalışmada robotun dinamik ve kinematik denklemleri elde edilmiştir. Daha sonra dinamik analiz sonunda elde edilen motor torkları sisteme eklenmiştir. Sisteme farklı yol alma fonksiyonları (harmonik, polinom, sikloid) giriş olarak verilmiştir ve sistem cevabının istenen yörüngeye ulaşması açısından bu giriş fonksiyonlarının performansı karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre harmonik fonksiyonun daha iyi olduğu görülmüştür [23].

Başka bir proje de, FPGA ile 5 eksenli bir mobil robot kolu tasarlanmış ve uygulaması yapılmıştır. Mobil arabanın üzerine bir robot kol ve ultrasonik sensör yerleştirilmiştir. Cisimleri bu ultrasonik sensör ile tanıyarak boyutlarına göre ayırabilen bir mobil robot kol yapılmıştır [24].

Yapılan diğer bir çalışmada ise, tek ekleme sahip olan bir esnek robot kolu (ERK) tasarlanmış ve sistemin konum ve yörünge kontrolü bulanık mantık kontrolör kullanılarak yapılmıştır [25].

Kahramanmaraş Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisinde yayınlanan çalışmada, Simulink modeli oluşturulan MBR-01 mobil robotun kontrolünde kullanılan PID parametreleri hem klasik yöntemlerle hem de PSO ile belirlenmiştir. Bu parametreler aynı sistem üzerinden karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre PSO ile belirlenen kontrolör parametrelerinin kullanıldığı sistemde ortaya çıkan hata oranı çok daha az olmuştur [26].

Marmara Üniversitesinde yapılan bir yüksek lisans tez çalışması kapsamında bir robot kolun kontrolü görmeye dayalı olarak sağlanmıştır. Kameradan alınan görüntü FPGA kartında işlenerek istenilen cismin konumu tespit edilmiştir. Tespit edilen konuma göre robot kolun cismi bulunduğu konumdan alması sağlanmıştır [27].

Verilen literatür özeti incelendiğinde, robot kolun klasik PID kontrolör ve Yapay Zekâ (Bulanık Mantık, Yapay Sinir Ağları vb.) yöntemlerle kontrol edildiği bir çok çalışma bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında literatürdeki çalışmalardan farklı olarak robot kolun kontrolü için parametreleri PSO ile belirlenen 2-DOF PID kontrolör kullanılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.



2. ROBOTLAR VE KULLANIM ALANLARI

2.1. Robot Kavramı

Robot kelimesi, Çek asıllı yazar olan Karel Capek'in yazdığı "R.U.R. - Rossum's Universal Robots" isimli tiyatro oyununda 1920 yılında ilk olarak kullanılmıştır. Bu tiyatro oyununda robot olarak adlandırılan makineler, mekanik ve insani duyguları olmayan cihazlardır [1, 2].

Robotik kelimesi ise 1941 yılında ilk kez Isaac Asimov tarafından kullanılmıştır. Asimov, robotik bilimine birtakım kurallar koymuştur. "Üç Temel Robot Etik Yasası" olan bu kurallar aracılığıyla robot biliminin gün geçtikçe ilerleyeceğini ve gelişeceğini ileri sürmüştür [1, 2]

Üç Temel Robot Etik Yasası [2];

- Bir robot bir insana kesinlikle zarar veremez ve zarar görmesine de izin veremez, durumlar ne olursa olsun bu değişmez,
- İnsanlar tarafından verilen görevlere ya da emirlere birinci kuralla zıt düşmediği sürece bir robot uymak zorundadır,
- Birinci ve ikinci kurallara zıt düşmediği müddetçe robotlar, kendi varlığını himaye etmek zorundadır.

Robotlar, insanlar gibi çeşitli işleri yapabilen makinalar olarak tanımlanabilir. Canlılara benzer işlevleri olan makinelerdir. Bir robotun canlıların yaptığı gibi işlevsel görevleri yerine getirebilmeleri için birtakım yetileri olmak zorundadır. Bu yetiler; işlem yapma, işlemin sonucunu belirleme ve karar verme yetisidir. Bu yapıları bulunduran sisteme robot denilebilir [1-3].

Robot bilimi birçok dala ayrılabilir. Bu bilim dallarından biri de robot kollarıdır. Robot kollar tıpkı insan koluna benzer şekilde oluşturulmuş işlevleri yerine getirebilen makinelerdir [1-4]. Günümüzde kullanım alanı giderek artmakta ve gelecek zamanda da insan gücünün yerine kullanılacağı tahmin edilmektedir [3].

Robotlarla insanlar arasında bir iyi bir iş birliği vardır. Örneğin robotlar; insanların taşıyamayacağı kadar ağır olan yükleri taşıyarak insan gücüne olan bağımlılığı azaltabilir

ya da insanların çalışamayacağı kadar zor ortamlarda kullanılarak insan sağlığı açısından da faydalı olabilir. Böylece robotların yer aldığı sahalarda insana olan bağılılık azalır ve insandan kaynaklanabilecek hatalar minimuma indirilebilir. Ayrıca insan gücüyle yapılan işler robotlarla daha kısa sürede ve daha az hata ile yapılabilir [1-4].

2.2. Robotların Kullanım Alanları

2.2.1. Endüstriyel Robotlar

Endüstriyel robotlar, daha çok insanların çalışmadığı ya da insan gücüyle yapılınca zaman alabilecek olan sistemlerin yapımında kolaylıkla yer alabilir. Otomotiv sanayisi buna örnek olarak verilebilir. Robotlar birçok alanda kullanılabilir. Bunlar boyamada, sızdırmazlıkta, parçaların üretiminde ve birleştirilmesindedir. Endüstriyel robotlar kullanılacakları yerlere göre bir insanın yapabileceğinden daha büyük işleri yapabilirler [4].



Şekil 2.1. Endüstride kullanılan robotlar

2.2.2. Operasyonel Robotlar

İnsanlar için tehlikeli olabilecek işlemlerde (radyasyon, su altı, madencilik vb.) operasyonel robot sistemleri kullanılabilir. İnsanların çalışmasını zorlayan koşullarda, örneğin yanıcı patlayıcı sistemler üzerinde çalışarak insan hayatını riske atmaktan kurtarmış olurlar [4]. Bu sistemler daha çok uzaktan kontrollüdür. İleri teknoloji gerektirirler ve çalışma prensipleri amaca özeldir.



Şekil 2.2. Madencilikte kullanılan operasyonel robotlar

2.2.3. Tıp ve Sağlık Alanında Robotlar

Sağlık alanında kullanılan robotlar cerrahi ve ortopedi alanlarında kullanılmaktadır. Ortopedi alanında kullanılan robotik protezler, beyinden gelen komutları algılayarak, parmaklara veya eklemlere güç gönderirler. Beyinden gelen bu sinyaller ile fiziksel hareketlerin robot kol tarafından yerine getirilmesi sağlanabilmektedir [4].

Cerrahide kullanılan ameliyat robotları ise tamamen adımli motorlar ve hassas kontroller ile yapılan sistemlerden oluşmakta; ülkeler arası iletişim ile cerrahların ameliyatlara katılmasını bile sağlayabilmektedir [5].



Şekil 2.3. Ameliyat robotu

2.2.4. Sibernetik Robotlar

Sibernetikteki temel amaçlardan biri, insanla robot arasındaki farkın azaltılmasıdır. Bu robotlar, insana ait işlevleri yapabilen, insana benzer şekilde düşünebilen robotlardır. İnsansı robotlara örnek olarak Mitsubishi firması tarafından üretilen ve yaşlı veya engelli insanlara refakat eden Wakamaru gösterilebilir. Basit ev işlerini yapan evcil robotlar da bu tekniğin gelişmesiyle, değişerek çeşitli insani özellikler kazanmaya başlamıştır [4].



Şekil 2.4. İnsansı robot

2.2.5. Askeri Robotlar

Askeri alanda robotik özellikle insansız uçak ve tank denemelerinde yaygın olarak yer almaktadır. Robotların casusluk ve keşif görevleriyle birlikte savunma yıkıcı ve yok edici olarak da tasarlanıyor olduğu bilinmektedir. Mayın arama robotları da bu kategoriye dahil edilebilir [4].



Şekil 2.5. Askeri alanda kullanılan robotlar

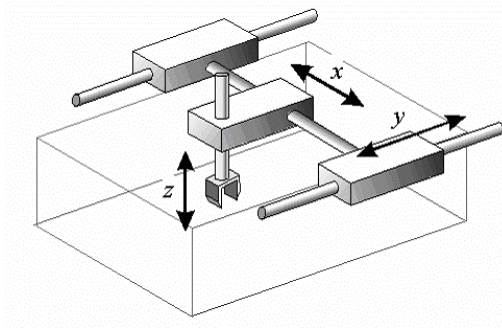
2.3. Robot Hareketleri

Robotların farklı boyutlarda ve farklı şekillerde üretimi yapılmaktadır. Bir robotun hareketi, kontrol edilebilen eksenlerindeki hareketlerle belirlenir. Robotlar eklem yapısına göre şöyle sınıflandırılırlar [3, 4]:

- Kartezyen koordinat sistemi,
- Silindirik koordinat sistemi,
- Küresel koordinat sistemi,
- Döner koordinat sistemi.

2.3.1. Kartezyen Koordinat Sistemi

Bu sistemde hareketler birbirine karşı dik şekilde olur. Hareketli kısımlar x, y ve z kartezyen koordinat sistemine paralel hareket ederler. Bu koordinat sistemine sahip olan robotlar CNC tezgahlarında veya yük taşıma işlemlerinde kullanılabilirler [3, 4].



Şekil 2.6. Kartezyen Koordinat Sistemine Sahip Robot

2.3.2. Silindirik Koordinat Sistemi

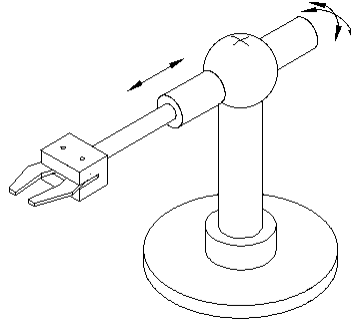
Bu robotun ilk eklemi kendi etrafında döner. Diğer eklemler farklı şekilde dönme hareketleri yapabilirler. Gövdesi silindirik bir harekete sahiptir ve mekanik özelliklerden dolayı 360 derece dönemeyebilirler. Montaj yapmada, malzeme boşaltma ya da yükleme gibi işlerde yaygın kullanıma sahiptirler [3, 4].



Şekil 2.7. Silindirik koordinat sistemine sahip robot

2.3.3. Küresel Koordinat Sistemi

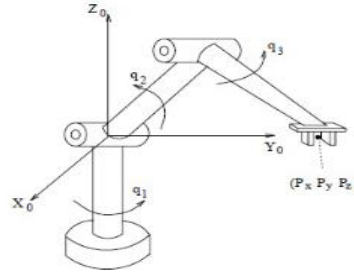
Küresel koordinat sisteminin iki tane dairesel ve bir de doğrusal ekseni olmak üzere üç tane ekseni vardır. Genelde yatay ve düşey dönme olarak iki hareketi vardır. Üçüncü hareket ise doğrusal harekettir. Hassas uygulamalarda kullanımı yaygındır [3, 4].



Şekil 2.8. Küresel Koordinat Sistemine Sahip Robot

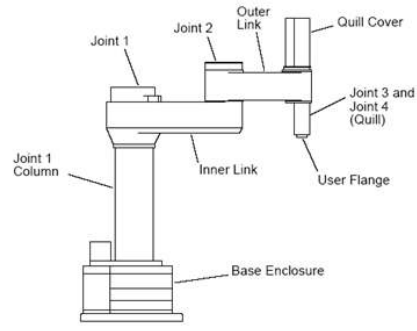
2.3.4. Döner Koordinat Sistemi

Bir robot bir iş yaparken dairesel bir hareketle yapıyorsa, bu tip robotlara döner koordinat sistemli robotlar denir. Bu robotlar paketleme, test ve araştırma işlemlerinde, eşya kavramada, lazer kesicilerde, yükleme ve boşaltma gibi birçok alanda kullanıma sahiptir [3, 4].



Şekil 2.9. Döner koordinat sistemine sahip robot

Şekil 2.10’da verilen Scara tipi robot bu koordinat sistemine sahip robotlardan biridir. Çok yüksek hıza ve en yüksek tekrarlılama kabiliyetine sahip olan bir robot çeşididir [9].

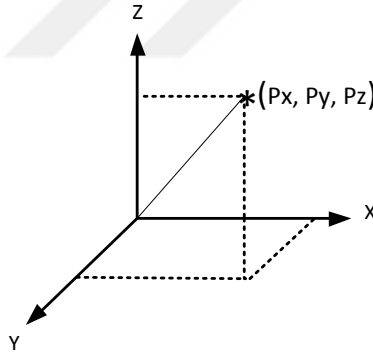


Şekil 2.10. Scara tipi robot

3. ROBOT KİNEMATİĞİ

Kinematik, bir sistemin yapısını ve hareketini inceleyen bilim dalıdır. Bir robotik sistem tasarlarken kinematik analiz yapılmalıdır. Robot kolun kinematiği onun hareketleriyle ve çalışma uzayıyla ilgilidir. Robot kolun tutucu ucunun hareketlerini veya konumunu saptayabilmek amacıyla kinematik analizden yararlanılır. Kinematik analiz yapabilmek için de öncelikle sistemdeki her bir eklemi 3 boyutlu uzayda ifade etmek gerekir çünkü robotlar 3 boyutlu uzayda çalışırlar. Bunun için de her bir ekleme Şekil 3.1'deki gibi koordinat eksenleri yerleştirilir. Bu eksenler sayesinde sistemin bütünü ile arasında bir ilişki tanımlanabilir. Kinematik analiz de düz kinematik ve ters kinematik olmak üzere ikiye ayrılır [1, 6, 28].

Kinematik analiz yapılırken genelde Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemi kullanılmaktadır [1, 6, 28, 29].



Şekil 3.1. Robot kol üzerindeki koordinat eksenleri

3.1. Düz Kinematik

Düz kinematikte, robot koluna rastgele açı değerleri verilir ve bu açı değerlerine göre uç noktanın hangi x, y, z koordinatlarında olduğu belirlenir. Eklemler arasındaki ilişki homojen dönüşüm matrisleri ile bulunur. Her bir eklem için oluşturulan homojen dönüşüm matrisleri çarpılarak robot kolun diğer elemanlarıyla olan bağlantı ilişkileri elde edilmiş olur. Düz kinematik analizde en yaygın kullanılan yöntem Denavit-Hartenberg yöntemidir [1-6].

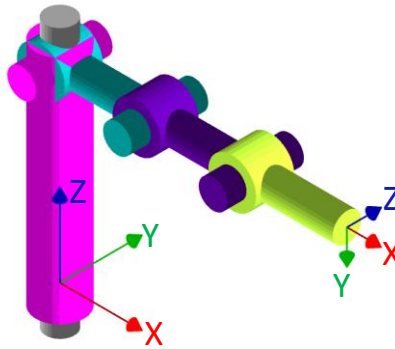
3.1.1. Denavit-Hartenberg Yöntemi

Denavit-Hartenberg yöntemi robot kolların kinematik analizinde kullanılır. Her bir eklem için homojen dönüşüm matrisi oluşturulur ve bu matrisler birbirleriyle çarpılarak kinematik analiz yapılır. Bu yöntemde dört değişken vardır ve hesaplar bu değişkenler aracılığıyla yapılır [1-6, 28].

Bu değişkenler; [1]

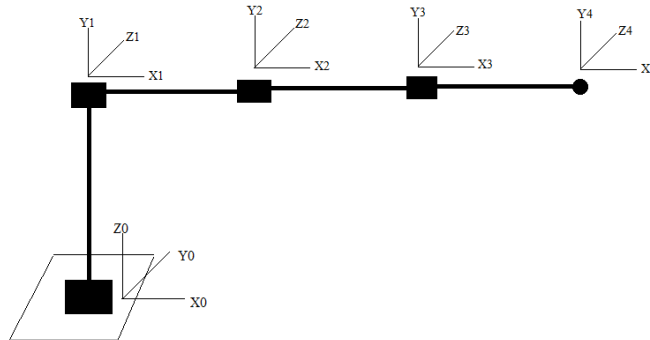
- İki eksen arasındaki kol uzunluğu a_{i-1} ,
- İki komşu eksen arasındaki eksen açısı α_{i-1} ,
- Üst üste çıkan bağlar arasındaki eklem kayması (açıklığı) d_i ,
- İki komşu uzuv arasındaki eklem açısı θ_{i-1} .

Bu çalışma kapsamında analizi gerçekleştirilen robot kol Şekil 3. 2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Robot kolun şematik gösterimi

Şekil 3.3.’ de analizi gerçekleştirilen robot kolun eksenlerinin yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Robot kolun yerel koordinat sistemi

Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi z eksenleri dönmenin olduğu eksenlerdir. Başlangıç eksenine sıfırıncı eksen denilmiştir. Sırayla eksenler numaralandırılmıştır.

Belirtilen Denavit-Hartenberg yöntemine göre bu robotun D-H tablosu Tablo 3. 1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Dört serbestlik dereceli robot kolun D-H tablosu

Link	θ_i	α_i	d_i	a_i
1	θ_1	$-\pi/2$	L_1	0
2	θ_2	0	0	L_2
3	θ_3	0	0	L_3
4	θ_4	0	0	L_4

Çalışmada kullanılan dört serbestlik dereceli robot kolun parametreleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Robot kolun parametreleri

Uzuvlar	Uzunluklar (cm)	Kütleler(kg)	Kütlesel atalet momentleri(kg.m ²)
L_1	20	1	[1 0 0; 0 1 0; 0 0 0]. 0,0033
L_2	10	0,5	[0 0 0; 0 1 0; 0 0 1].0,00041667
L_3	10	0,5	[0 0 0; 0 1 0; 0 0 1].0,00041667
L_4	10	0,5	[0 0 0; 0 1 0; 0 0 1].0,00041667

Robot kolun verilen parametreler doğrultusunda oluşturulan dönüşüm matrislerinin bulunması aşağıda gösterilmiştir. Robot kolun hareketlerini ifade eden matrisler denklem (3.1)'de verildiği gibi; z-ekseni etrafında dönme matrisi (**Rot z, Θ_i**), eklemin z-ekseni boyunca öteleme matrisi (**Trans 0,0, d_i**), eklemin x eksenini boyunca öteleme matrisi (**Trans a_i ,0,0**), eklemler arasındaki z eksenlerinin birbirine olan açı izdüşümlerini ifade eden matris (**Rot x, α_i**) çarpılarak homojen dönüşüm matrisi elde edilir.

$$A_i = Rot(z, \theta_i) * Trans(0,0, d_i) * Trans(a_i, 0,0) * Rot(x, \alpha_i) \quad (3.1)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Bu matrisler sondan başlanarak çarpılacak olursa:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

şeklinde olur.

Homojen dönüşüm matrisi denklem (3.5)'deki gibi elde edilir. Daha sonra her bir link için (i=1, 2, 3, 4) parametreler denklem (3.5)'de yerine yazılarak i=1, 2, 3, 4 no'lu eksenler için dönüşüm matrisleri oluşturulur.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_2 * \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2 * \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_3 * \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & L_3 * \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & L_4 * \cos\theta_4 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & L_4 * \sin\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Denklem (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) ve denklem (3.10)'da yerine yazılırsa T temel matrisi elde edilir.

$${}^0_4T = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 \quad (3.10)$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) * \cos\theta_1 & -\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) * \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 * (L_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 * \cos(\theta_2) + L_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \\ \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) * \sin\theta_1 & -\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) * \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 * (L_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 * \cos(\theta_2) + L_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \\ -\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & -\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 & L_1 - L_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_2 * \sin(\theta_2) - L_4 * \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'de verilen T temel matrisinin son sütununun elemanları robotun uç noktasının bulunduğu koordinatları verir. P_x , P_y , P_z olarak adlandırılan bu koordinatlar sırayla aşağıda verilmiştir.

$$P_x = \cos\theta_1 * (L_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 * \cos(\theta_2) + L_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \quad (3.12)$$

$$P_y = \sin\theta_1 * (L_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 * \cos(\theta_2) + L_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \quad (3.13)$$

$$P_z = L_1 - L_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_2 * \sin(\theta_2) - L_4 * \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (3.14)$$

Böylece dört serbestlik dereceli robot kolun P_x , P_y , P_z koordinatları düz kinematik analiz ile elde edilir.

Bu denklemlerdeki trigonometrik ifadeleri kısaltırsak,

$$C_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$S_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$C_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$S_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

olur.

3.2. Ters Kinematik

Robot kolun referans uç noktasının konumuna erişilmesi için gerekli eklemlere ait açı değerleri ters kinematik analiz ile hesaplanarak elde edilir. Ters kinematik hesaplarda sistem doğrusal olmadığı zaman sonuca ulaşabilmek için birden fazla çözüm üretilebilir ve robot kol referans noktaya farklı eklem açılarıyla da ulaşabilir [1-6, 28, 29].

3.2.1. Ters Kinematik Analiz ile Eklem Açılarının Tespiti

Robot kolun düz kinematiği dönüşüm matrisi ile elde edildikten ve P_x , P_y , P_z koordinatları trigonometrik olarak belirlendikten sonra bu parametreleri ve hesapları kullanarak robot kolun hareketinin kontrolü için gerekli olan her bir eklem açısını hesaplamak amacıyla ters kinematik analiz yapılır.

Ters kinematikte bu açıların belirlenmesi için merkez koordinat düzleminin robotun uç noktasının koordinat düzlemine olan iz düşümünü ifade eden bir dönüşüm matrisinden yararlanılmaktadır [1-6, 28, 29].

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Ters kinematik analiz yapılırken matrislerin tersinden yararlanılır.

$$A_1^{-1} * {}^0_4T = A_2 * A_3 * A_4 \quad (3.16)$$

A_1 matrisinin tersi alınarak 0_4T temel dönüşüm matrisiyle çarpılır ve $A_2 * A_3 * A_4$ matrisine eşit olduğu belirtilir. Böylece trigonometrik ifadelerin olduğu bir sonuç elde edilmiş olur ve çözüm buna göre yapılır.

$$A_1^{-1} * {}^0_4T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & L_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Bu matrislerin çarpımı yapılarak $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ eklem açıları,

$$\theta_1 = \tan^{-1}(P_y / P_x) \quad (3.18)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{(-P_z - L_4 * S_{234} - L_3 * S_3 * C_2 + L_1)}{(P_x * C_1 + P_y * S_1 - L_4 * C_{234} + L_3 * S_2 * S_3)} \quad (3.19)$$

$$K = P_x * C_1 + P_y * S_1 - L_4 * C_{234} \quad (3.20)$$

$$E = -P_z - L_4 * S_{234} + L_1 \quad (3.21)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{(K^2 + E^2 - L_3^2 - L_2^2)}{2 * L_2 * L_3} \quad (3.22)$$

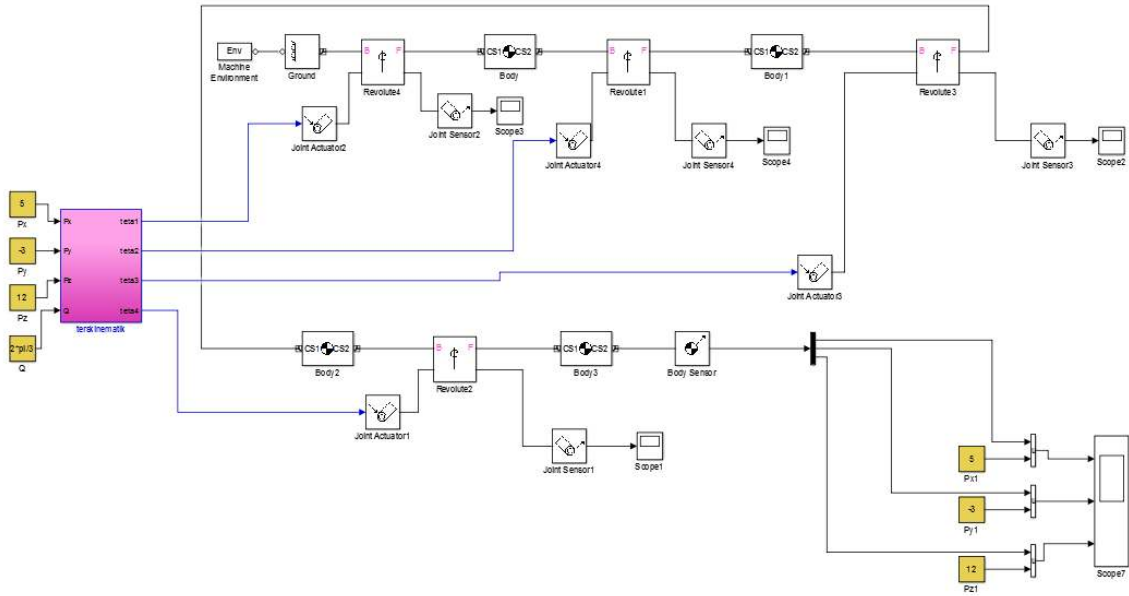
olarak bulunur. Ters kinematik analiz ile θ_4 eklem açısını bulabilmek için denklem (3.23)'de verildiği gibi bir kabul yapmak gerekir [28].

$$Q = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (3.23)$$

Burada Q robot kolun çalışma uzayına göre belirlenen sabit bir açı değeridir.

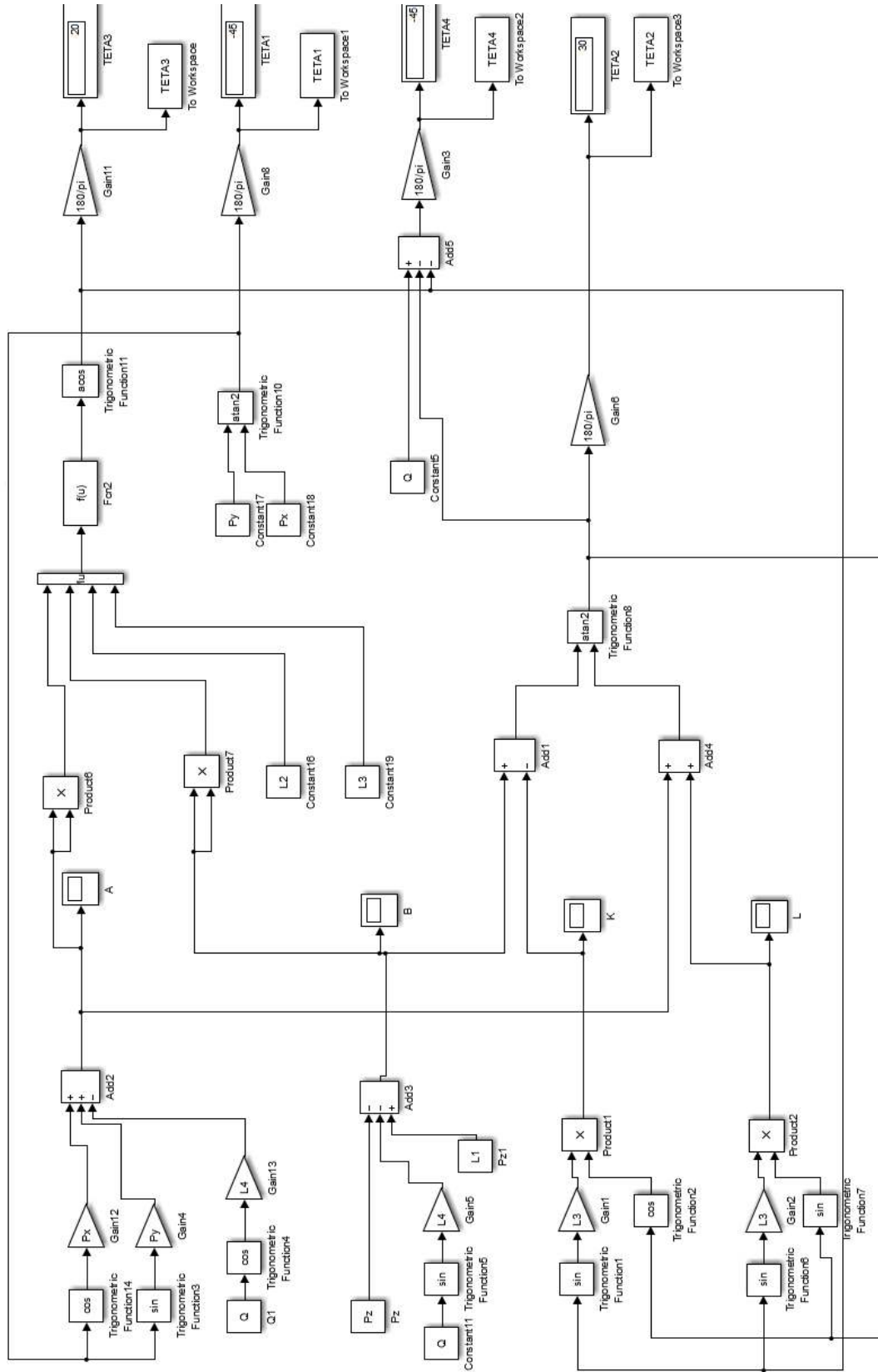
4. DÖRT SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN MATLAB/SimMechanics MODELİ VE KONTROLÜ

Bu bölümde, parametreleri Tablo 3.2’de verilen dört serbestlik dereceli bir robot kolun Matlab/SimMechanics modeli oluşturulmuştur. Bu modelde robot kolun her bir eklemi Joint Actuator bloğu ile tahrik edilmiştir. Joint Actuator bloğu gövde ve bağlantılara hareket vermek için kullanılan bir bloktur. Bu robot kol sisteminde eklemleri tahrik etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu bloğun girişine referans konum açısı girilmekte, eklemlerin bu açıda hareketini sağlamak için gereken tork değeri üretilmektedir.



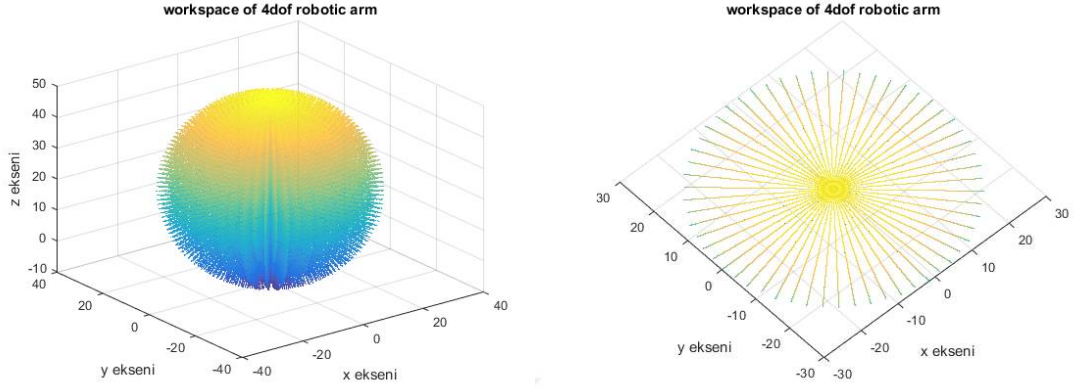
Şekil 4.1. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun Matlab/SimMechanics modeli

Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun Matlab/SimMechanics modeli Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu modeli çalıştırmak için P_x , P_y , P_z referans uç konum koordinatları ve Q değeri ters kinematik analizde sisteme giriş olarak verilmiştir. Ters kinematik analiz sonucunda elde edilen açı değerlerinin açık çevrimli kontrolü sağlanmıştır. Ters kinematik analizin Matlab/Simulink alt modeli Şekil 4.2’de verilmiştir.



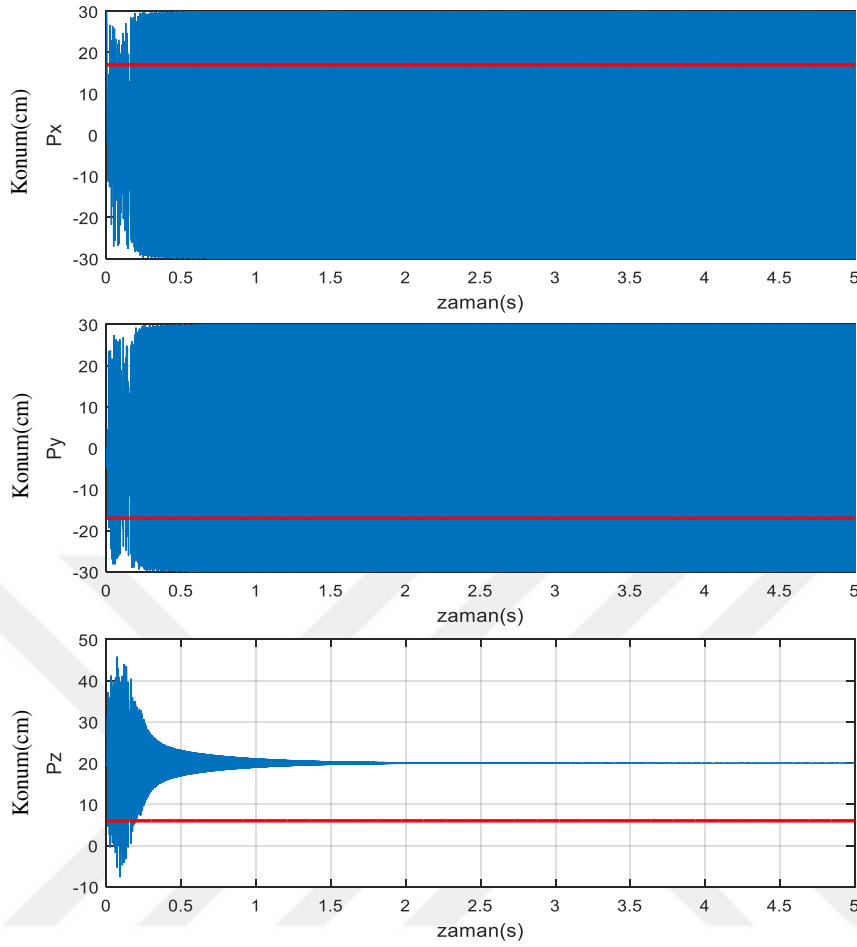
Şekil 4.2. Robot kolun ters kinematik analizi için Matlab/Simulink alt modeli

Şekil 4.1’de Matlab/SimMechanics modeli verilen robot kolun çalışma uzayı Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Robot kolun çalışma uzayı

Şekil 4.1’de verilen robot kol modeline $P_x=17$, $P_y=-17$, $P_z=6$ ve $Q=\pi/36$ referans değerleri giriş olarak uygulanmış ve Şekil 4.4’deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Joint Actuator ile tahrik edilen açık çevrim kontrollü robot kolun tutucu uç koordinatları

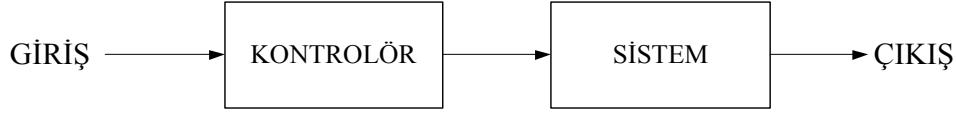
Şekil 4.4’de verilen açık çevrimli kontrol sonuçları incelendiğinde robot kolun istenen tutucu uç konum koordinatlarına erişemediği görülmektedir. Bu nedenle kapalı çevrimli kontrolün uygulanması zorunlu hale gelmiştir.

4.1. Robot Kolun PID Kontrolör ile Kapalı Çevrim Kontrolü

Kontrol ve otomasyon insana ihtiyaç duymadan işleri yapabilmeyi amaçlar [7]. İyi yetişmiş bir elemanın birkaç saatte ürettiği bir ürün, otomatik sistemlerde sadece dakikalar içinde üretilebilmektedir.

İyi bir kontrol sistemi arzu edilen hedeflere erişebilen ve istenen değerde tutabilen sistemlerdir [7].

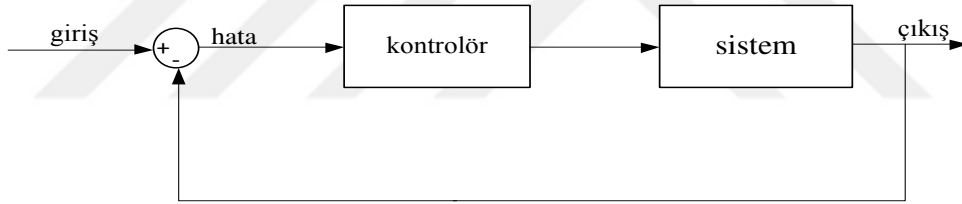
Kontrol sistemlerinin iki türü mevcuttur. Bunlar açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol sistemleri olarak isimlendirilir.



Şekil 4.5. Açık çevrim kontrol sistemi

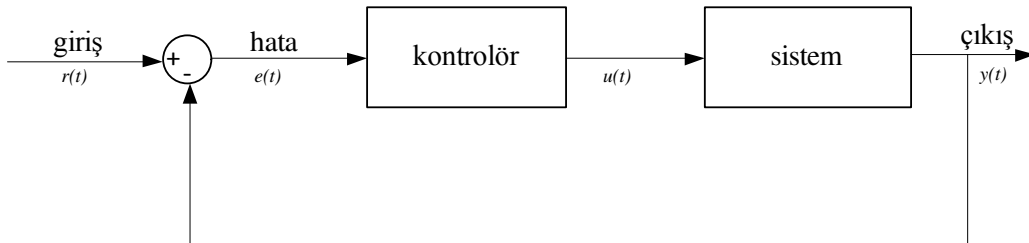
Şekil 4.5’de verilen açık çevrim kontrol sisteminde giriş, bağımsız bir değişkendir. Çıkışın, giriş üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Çıkış, girişin bir fonksiyonudur.

Şekil 4.6’da verilen kapalı çevrim kontrol sisteminde ise, çıkıştan alınan bir geri besleme ile giriş her zaman kontrol altına alınır. Çıkış, giriş ile geri beslemenin toplamının bir fonksiyonudur. Diğer bir değişle bu tip sistemlerde çıkış girişi denetlemektedir, geri besleme işlemi vardır.



Şekil 4.6. Kapalı çevrim kontrol sistemi

Kapalı çevrim kontrol sistemine geri beslemeli kontrol sistemi de denilmektedir. Bu kontrol sistemlerinde en çok kullanılan kontrolör tipi PID kontrolördür.



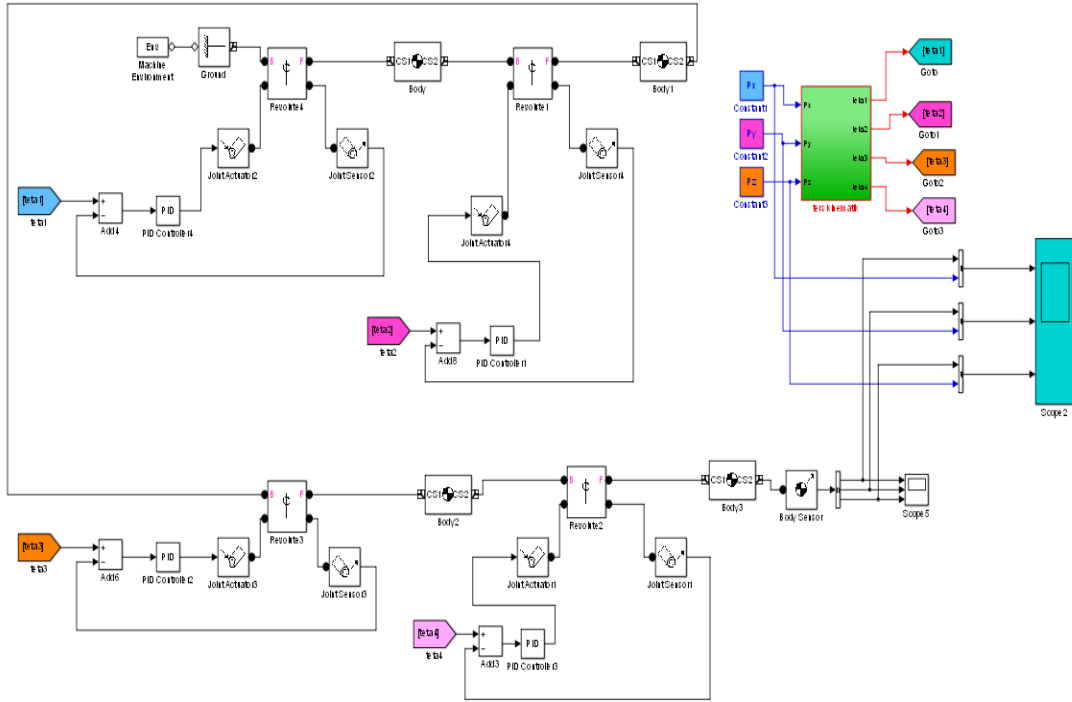
Şekil 4.7. PID kontrolörlü kapalı çevrim kontrol sistemi

PID kontrolörün ifadesi denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

PID kontrolörde tek giriş ve tek çıkış elemanı vardır. Buradaki hedef herhangi bir kontrol sisteminde olduğu gibi bozucuları yok etmek ve referansı izlemektir. Bunu yaparken de giriş (referans) ile çıkış arasındaki farkı kontrol etmek ve kontrolör kazancını kullanarak girişi, hata ile orantılı olarak düzeltmektir [7].

Şekil 4.8'de Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun kapalı çevrim kontrolünün Matlab/SimMechanics modeli verilmiştir. Bu model daha önce Şekil 4.1'de verilen robot kolun Matlab/SimMechanics modeline her bir eklem için PID kontrolörlerin eklenmesiyle oluşturulmuştur. Bu modelde robot kolun referans tutucu uç noktasının koordinatları Şekil 4.2'de verilen ters kinematik analiz için oluşturulan Matlab/Simulink alt modeline uygulanmış ve referans eklem açıları elde edilmiştir. Daha sonra bu eklem açıları klasik PID kontrolör ile kapalı çevrim olarak kontrol edilmiştir. Benzetim çalışmalarında her bir eklem için özdeş (aynı parametrelere sahip) PID kontrolör kullanılmıştır.

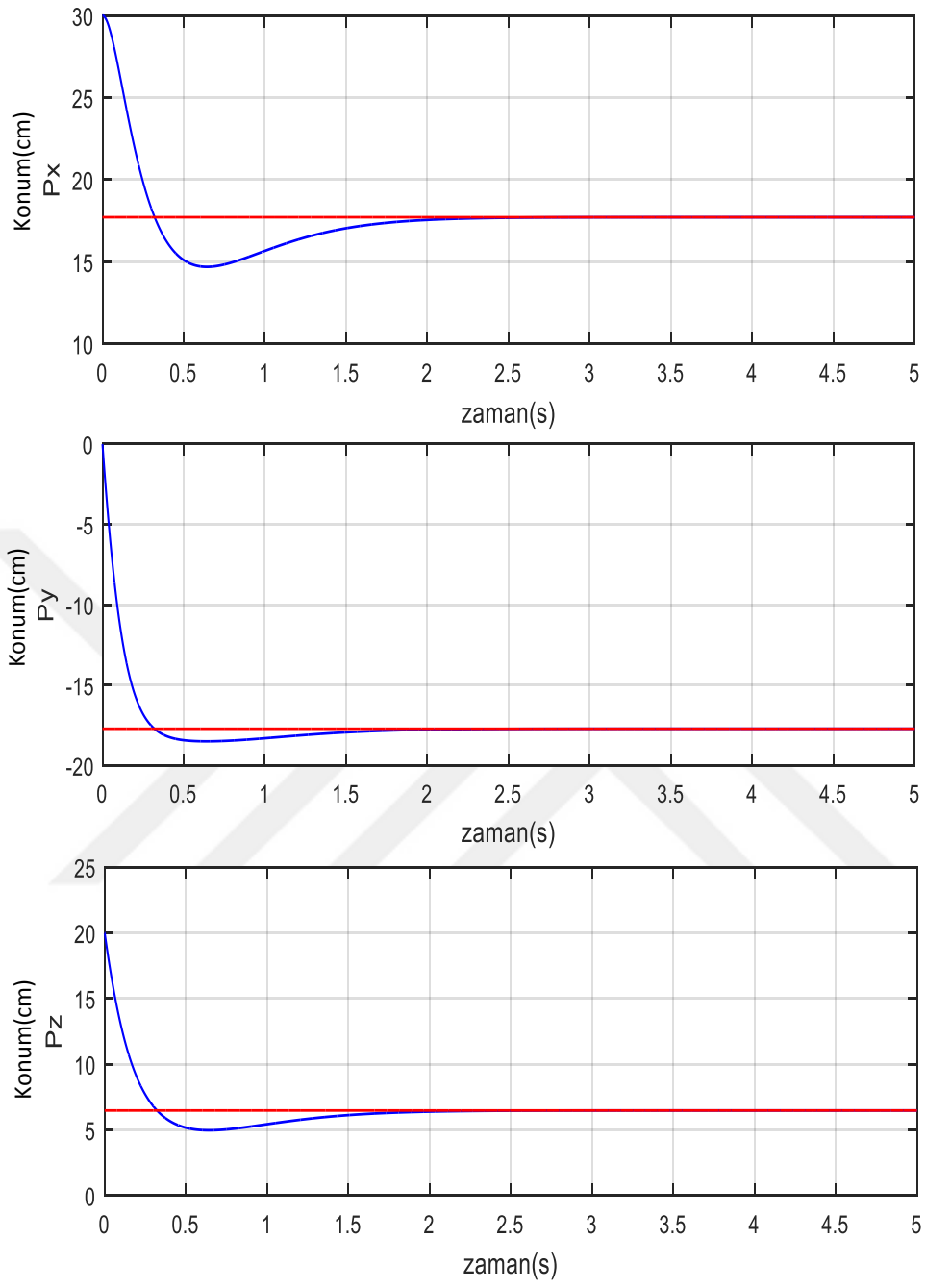


Şekil 4.8. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun klasik PID ile kapalı çevrim kontrolünün Matlab/SimMechanics modeli

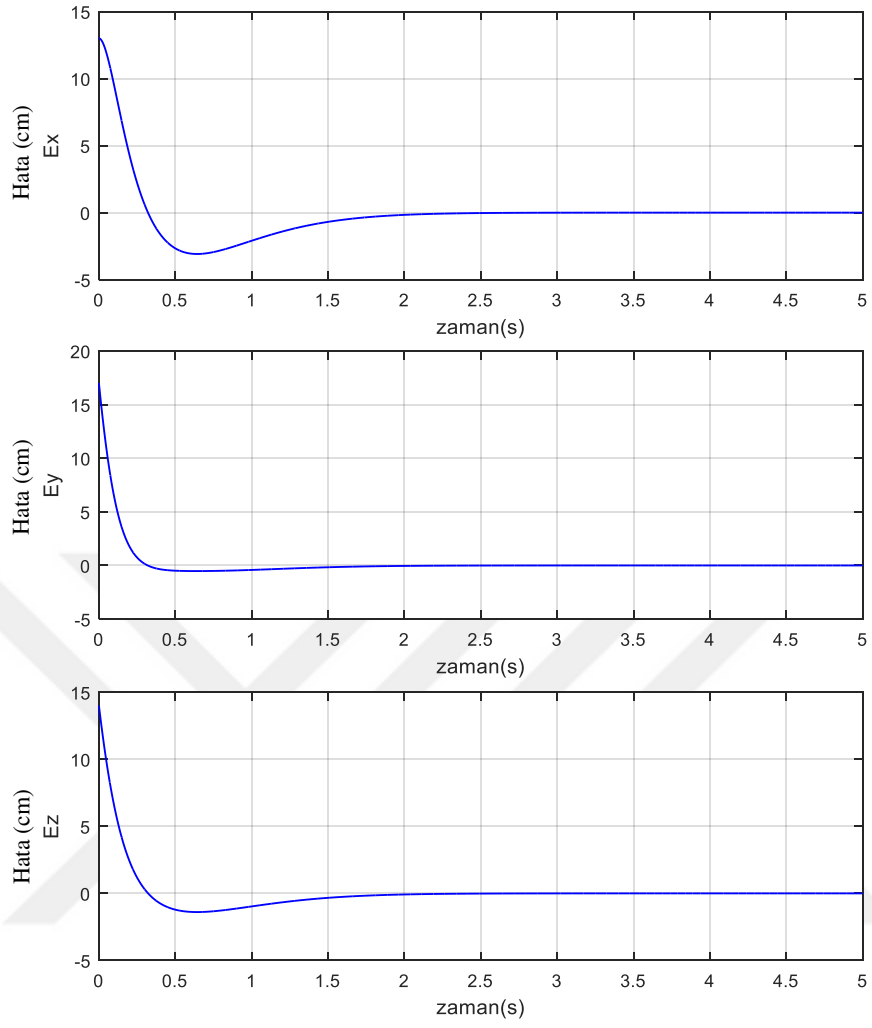
Şekil 4.8'deki robot kol modeline $P_x=17$, $P_y=-17$, $P_z=6$ ve $Q=\pi/36$ referans değerleri giriş olarak uygulanmıştır.

İlk olarak klasik PID kontrolör parametreleri deneme-yanılma yöntemiyle elde edilmiştir. Deneme-yanılma yöntemiyle klasik PID kontrolör parametreleri,

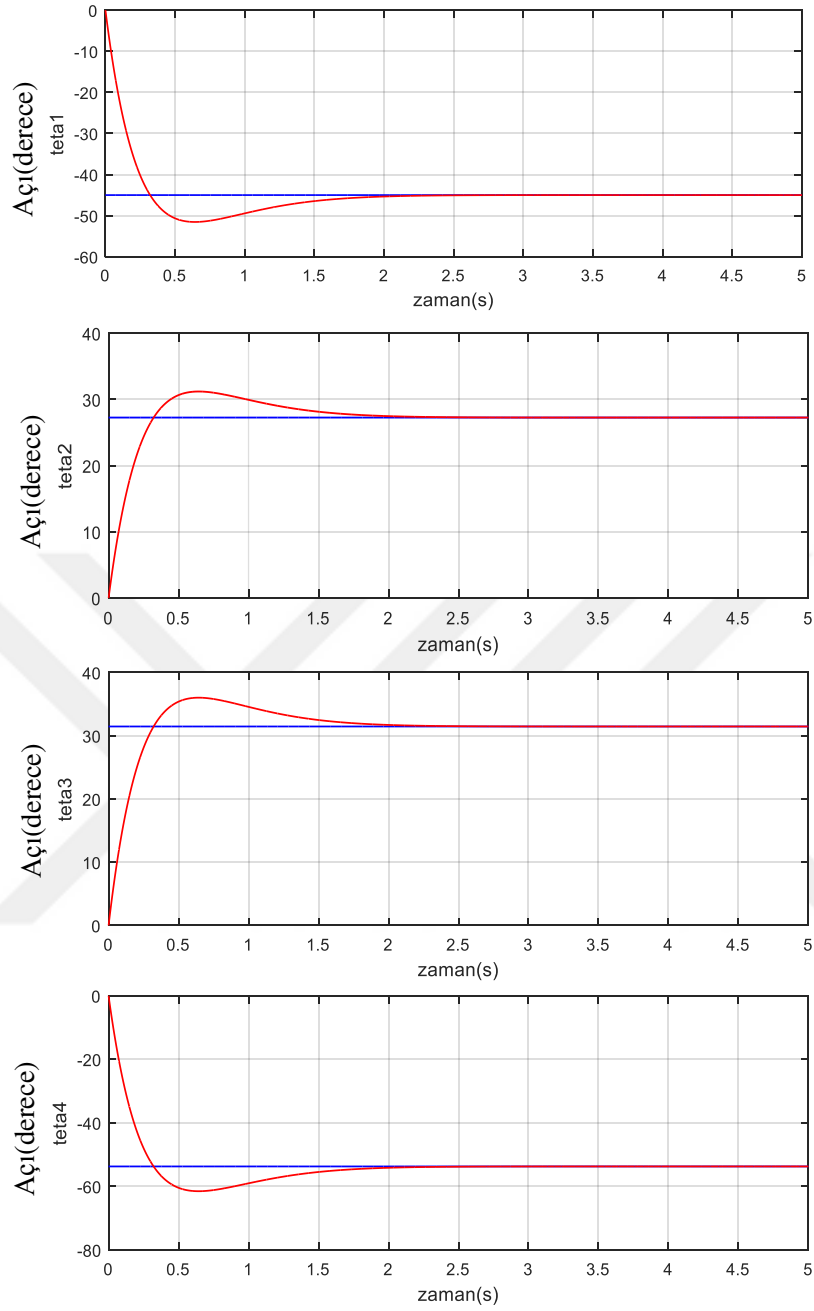
$K_p=30$, $K_i=50$, $K_d=5$, olarak belirlenmiştir. Bu parametrelere göre elde edilen benzetim sonuçları Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (Klasik PID)



Şekil 4.10. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (Klasik PID)



Şekil 4.11. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (Klasik PID)

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen benzetim sonuçları incelendiğinde robot kolun P_x , P_y , P_z referans konum değerlerini yakaladığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar açık çevrim sonuçlarına göre çok daha iyi olmasına rağmen, PID kontrolör parametreleri deneme-yanılma yöntemi ile bulunduğu için yerleşme süresi ve maksimum aşma değerleri kabul edilebilir sınırlar içinde değildir.

4.1.1. PID Parametrelerinin PSO ile Optimizasyonu

Optimizasyon, bir problemin en iyi, en verimli ve en uygun maliyet ile çözümünü için özel yöntemlerin kullanılması olarak tanımlanabilir. Temel olarak optimizasyon, herhangi bir amaç için en uygun çözümün elde edilmesidir. Optimizasyonda asıl amaçlardan biri yüksek kâr ve düşük maliyeti sağlamak ve aynı zamanda her zaman en iyiye ulaşmaktır [30-34].

Gelişen ve değişen teknoloji ile rekabetin artması ve kaynakların sınırlı olması karmaşık sistemlerin oluşturduğu sorunların çözümünün giderek zorlaşması optimizasyon terimini ortaya çıkarmıştır [33].

Optimizasyon birçok bilim dalını ve çalışma alanını kapsamaktadır. Bunlar mühendislik, sanayi, işletme, ulaştırma, ekonomi gibi alanlardır. Optimizasyonun bu alanlarda da uygulamaları bulunur [31, 32].

Optimizasyon konusundaki çalışmalar 20. Yüzyılın başlarında başlamıştır. Fakat ilk dönemlerde gelişimi yavaş olmuştur. Daha çok 1950'li yıllardan sonra teknolojik gelişmelere bağlı olarak optimizasyonda da ilerlemeler meydana gelmiştir [34].

Günümüzde optimizasyon yöntemleri geliştirmek için doğadaki olaylar örnek alınmıştır [35-39]. Bu optimizasyon algoritmaları birkaç farklı türde bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, Genetik Algoritmalar (GA), Diferansiyel Evrim Algoritması, PSO ve Karınca Koloni Algoritması'dır [35].

Bu çalışmada robot kolun uç konum koordinatlarını kontrol etmek amacıyla kullanılan PID kontrolörün parametreleri PSO ile belirlenmiştir.

PSO diğer birçok optimizasyon tekniği gibi doğada sürü halinde hareket eden canlılardan esinlenerek Kenedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir [35, 38]. Doğada kalabalık ya da sürü halinde hareket eden canlıların amaçlarına daha kolay bir şekilde ulaştıkları gözlemlenmiştir. Sürü davranışlarını taklit eden PSO yöntemi de bu nedenle geliştirilmiştir.

PSO, mühendislik ve bilimsel araştırmalarda uygulanabilen ve sürü zekâsına dayanan bir yöntemdir [35-37, 40]. PSO, genellikle parametre sayısı ve değişken sayısı fazla olan problemlere çözüm bulmak için kullanılmaktadır [39, 40-42].

PSO, sürüde bulunan bireylerin pozisyonunun, sürünün en iyi pozisyona sahip olan bireyine yaklaştırılmasına dayanır. PSO’da her bir üyeye parçacık denir ve parçacıklardan oluşan popülasyona da sürü denir [35, 38]. PSO’da bireyler arasında bilgi alışverişi bulunur. Her parçacık kendi konumunu sürüdeki en iyi konuma ayarlamaya çalışır. Bu işlemi gerçekleştirirken bir önceki tecrübesinden de yararlanır [35, 41]. Sürü içinde bulunan bireyler yeni hareketlerinde bir önceki konumlarından daha iyi bir konuma gelirler ve bu durum hedefe ulaşınca kadar devam eder [38].

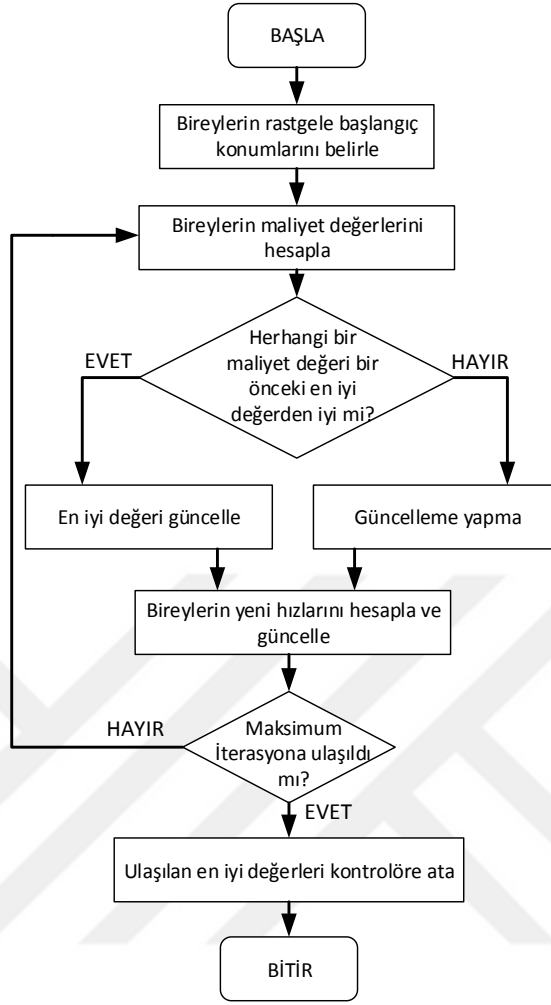
PSO algoritmasında parçacıkların her biri, parçacığın en iyi kendi çözümü (pbest) ve tüm parçacıkların en iyi çözümü (gbest) kullanılarak güncellenir. Her parçacık mevcut konumunu ve hızını mevcut konumu ile pbest arasındaki mesafeye ve mevcut konumu ile gbest arasındaki mesafeye göre değiştirmeye çalışır [35, 41].

$$V_{n+1} = V_n + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_n - X_n) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest_n - X_n) \quad (4.2)$$

$$X_{n+1} = X_n + V_{n+1} \quad (4.3)$$

Burada X_n ve X_{n+1} parçacıkların mevcut ve bir sonraki konumları, V_n ve V_{n+1} ise parçacıkların hızını verir. c_1 ve c_2 öğrenme katsayılarıdır [41, 42].

Çalışmalarda kullanılan PSO algoritmasının akış diyagramı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Parçacık Sürü Optimizasyonu akış diyagramı

Klasik PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan PSO parametreleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

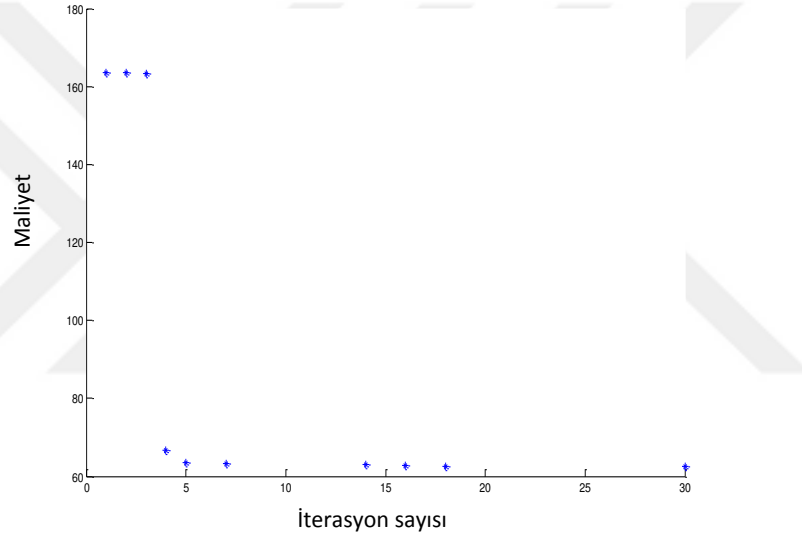
Tablo 4.1. PSO parametreleri

Parametreler	Değerleri
Birey sayısı	100
İterasyon sayısı	30
Aranan Parametre Sayısı	3
C_1 hız parametresi	Her bir iterasyonda 0,12
C_2 hız parametresi	Her bir iterasyonda 1,2
Atalet/momentum katsayısı	0,9

PSO ile PID kontrolör parametreleri belirlenirken matematiksel ifadesi denklem (4.4)'de verilen zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) kullanılmıştır.

$$ITAE = \int_0^{inf} t|e(t)| dt \quad (4.4)$$

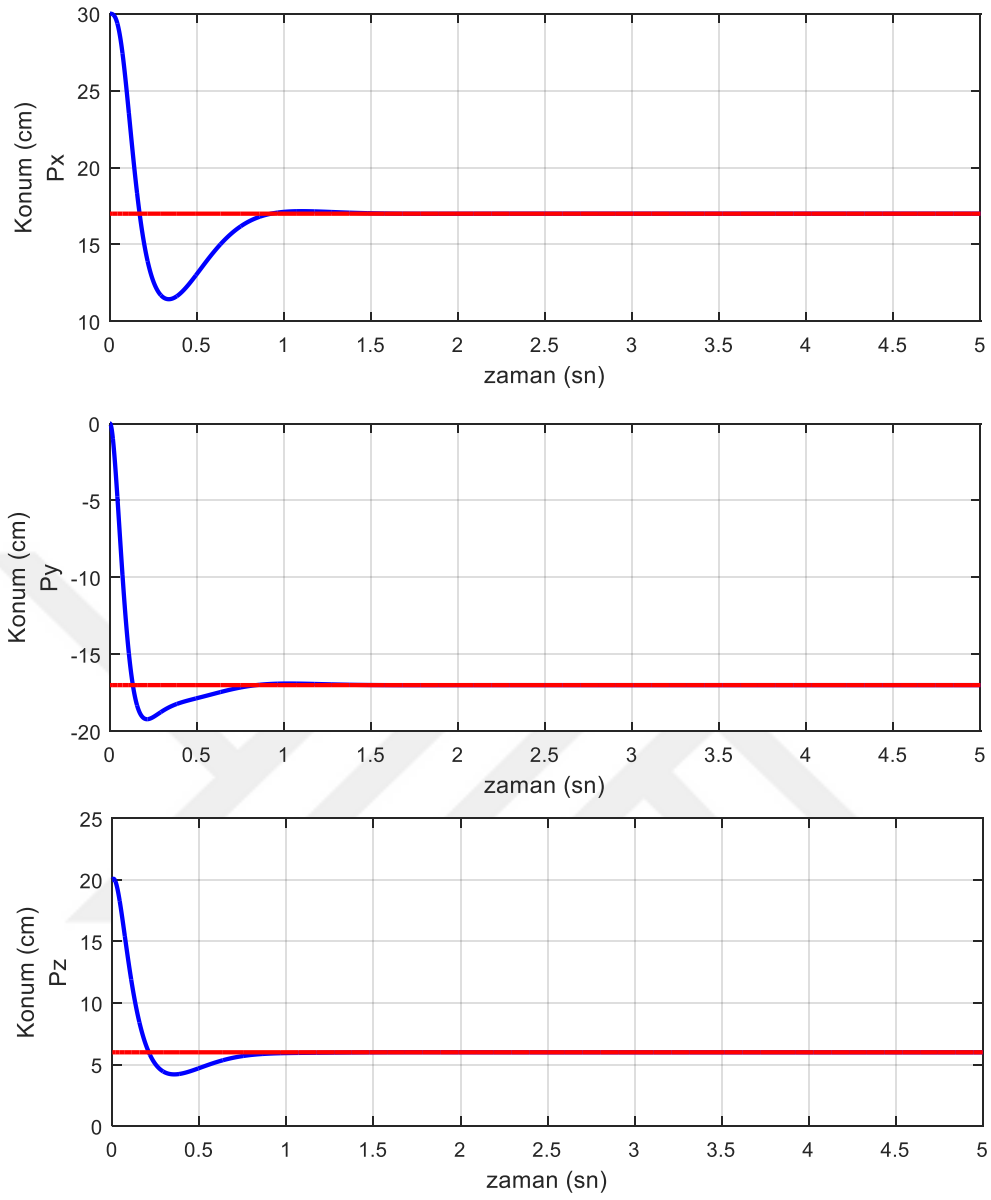
Burada t zaman $e(t)$ ise zamana bağlı olarak hatayı ifade etmektedir. Klasik PID parametrelerin belirlenmesi için oluşturulan PSO algoritmasında hesaplanan maliyet değerinin değişimi Şekil 4.13'de verilmiştir.



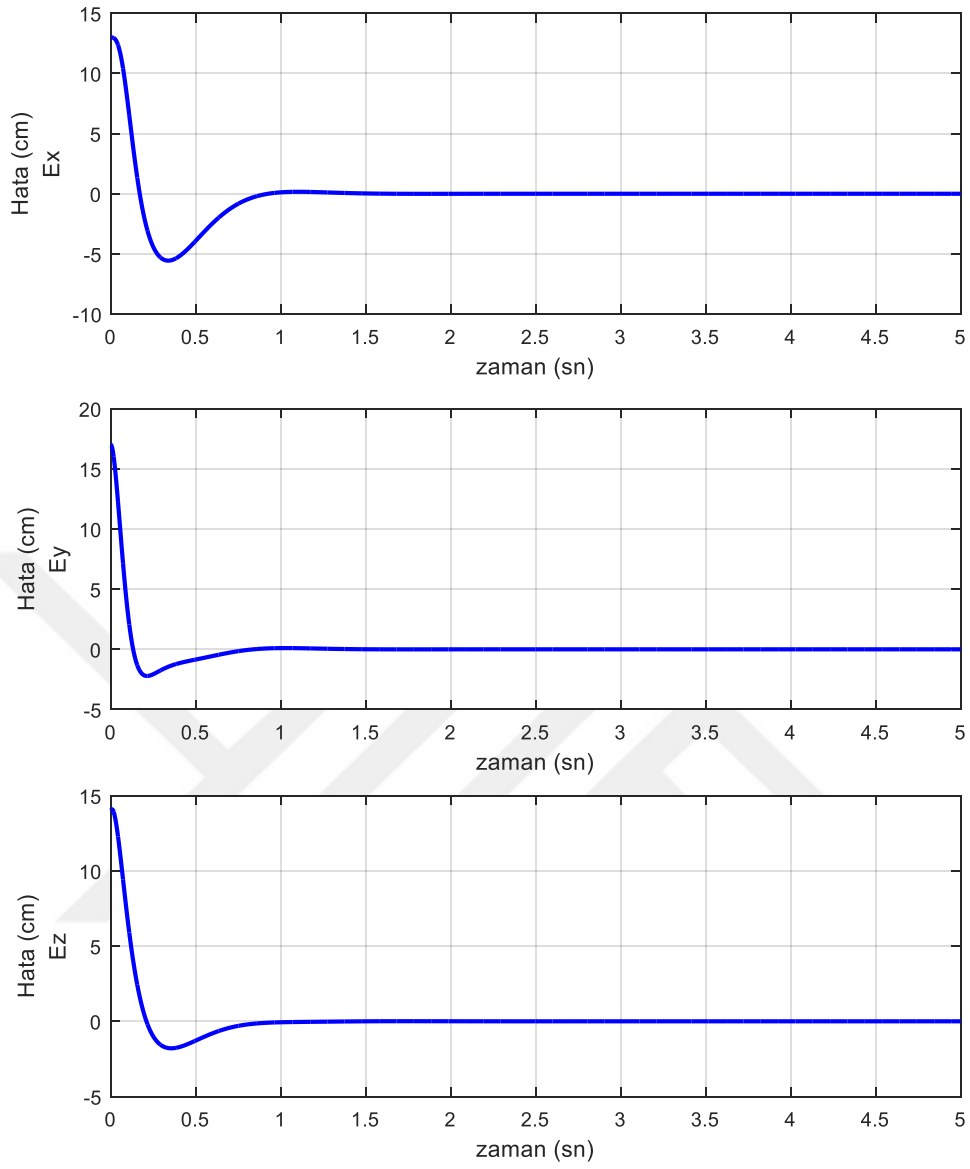
Şekil 4.13. PSO algoritması maliyet değerinin değişimi (Klasik PID)

PSO ile klasik PID kontrolör parametreleri,

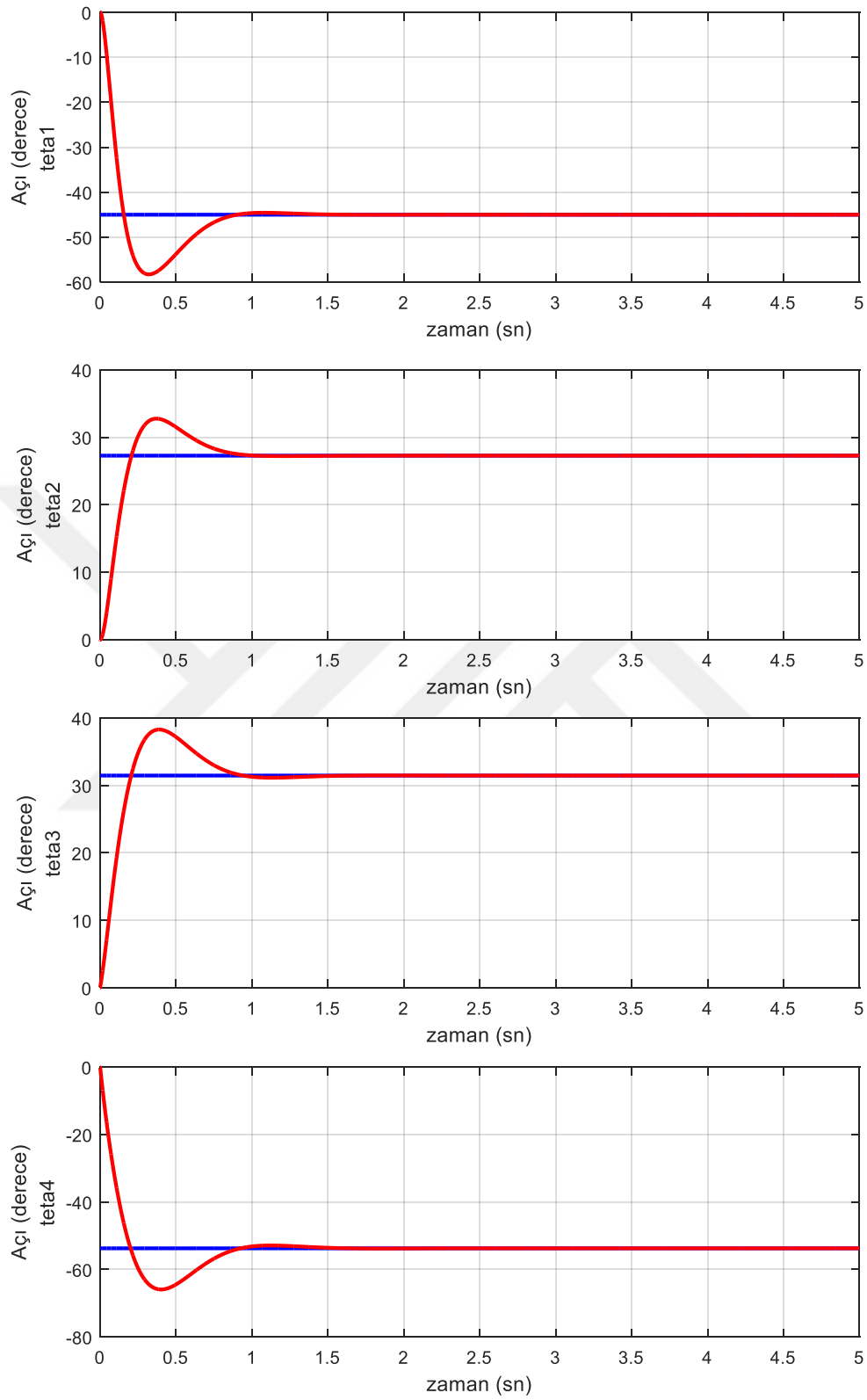
$K_p=0,239136$, $K_i=1,059580$, $K_d=0,03226471$, olarak belirlenmiştir. Bu kontrolör parametreleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.14, Şekil 4. 15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.14. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (Klasik PID-PSO)



Şekil 4.15. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (Klasik PID-PSO)



Şekil 4.16. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (Klasik PID-PSO)

PID kontrolör parametrelerinin deneme-yanılma yolu ile belirlendiği kapalı çevrimli kontrol sonuçları ile PID kontrolör parametrelerinin PSO ile belirlendiği kapalı çevrim sonuçları karşılaştırıldığında, PSO'lu sonuçların daha iyi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak PSO ile PID parametrelerinin belirlenmesi durumunda robot kolun performansı arttırılmıştır.

4.2. Robot Kolun 2-DOF PID Kontrolör ile Kapalı Çevrim Kontrolü

PID kontrolörler, performansı, birçok sisteme uygulanabilirliği, yapı olarak basit ve sade oluşuyla en çok tercih edilen kontrolörlerden biridir [43].

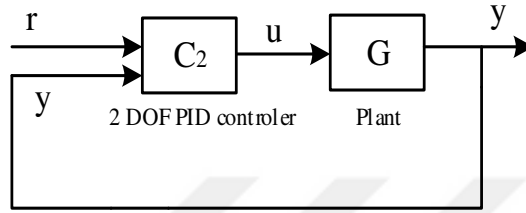
Horowitz, bir kontrol sisteminin serbestlik derecesini şu şekilde tanımlamıştır: “Bir kontrol sisteminin serbestlik derecesi bağımsız olarak ayarlanabilen kapalı çevrim transfer fonksiyonlarının sayısıdır” [44]. Bu durumda klasik PID olarak adlandırılan PID kontrolör 1-DOF PID olarak da isimlendirilebilir. 1-DOF PID birçok sistem için arzu edilen referansı izleme açısından ve bozucu etkileri azaltması ya da yok etmesi açısından uygun bir çıkış vermektedir [43].

Endüstriyel kontrol uygulamalarının çoğunda kontrol değişkenin arzu edilen değeri sabit kalır ancak değiştirilmesi gereklidir [45]. 1-DOF PID'nin performansının yeterli gelmediği bazı uygulamalarda son yıllarda araştırılan başka bir yapı olan 2-DOF PID kullanılabilir. Bu 2-DOF yapının çeşitli formları birçok araştırmacı tarafından tartışılmaktadır. Özellikle de Araki ve Taguchi' nin yaptığı detaylı çalışmalar literatürde çokça yer almaktadır [45-47]. Araki'ye göre, 2-DOF kontrol algoritmasının tercih edilme sebepleri; fazladan parametre sayısı, düzenleyici kontrol performansı ve kapalı döngü kontrol sistemi sağlamlığıdır [45-47]. Bu 2-DOF özelliği hem PI hem de PID kontrol algoritmasına dahil edilebilir.

Kontrol sistemlerinin tasarımı çok yönlü bir problemdir. Çünkü bir kontrol sistemi tasarlarlarken bazı performans kriterlerinin yerine getirilmesi gerekir ve bu yüzden de iki serbestlik dereceli (2-DOF) kontrol sistemi, bir serbestlik dereceli (1-DOF) kontrol sistemine göre daha avantajlıdır [48]. İki serbestlik dereceli (2-DOF) kontrolörün, klasik tek serbestlik dereceli kontrolöre göre bazı üstünlükleri vardır. Bu üstünlükler referansı izlemede yüksek performans sağlaması ve bozucu girişlerin etkisini azaltması olarak sayılabilir [46-48]. 2-DOF kontrolör, bir referans sinyal ve ölçülen bir sistem çıkışı

arasındaki farka dayalı olarak bir çıkış sinyali üretir. Belirtilen ağırlıklarına göre oransal, integral ve türev işlemlerinin her biri için ağırlıklı bir fark sinyali hesaplar. Kontrolör çıkışı, ilgili fark sinyalleri üzerindeki oransal, integral ve türev eylemlerin toplamıdır, burada her eylem seçilen kazanım parametrelerine göre ağırlıklandırılır [45-48].

2-DOF PID kontrolörünün kullanıldığı kontrol yapısı Şekil 4.17’ da verilmiştir:



Şekil 4.17. 2-DOF PID kontrolörlü kontrol yapısı

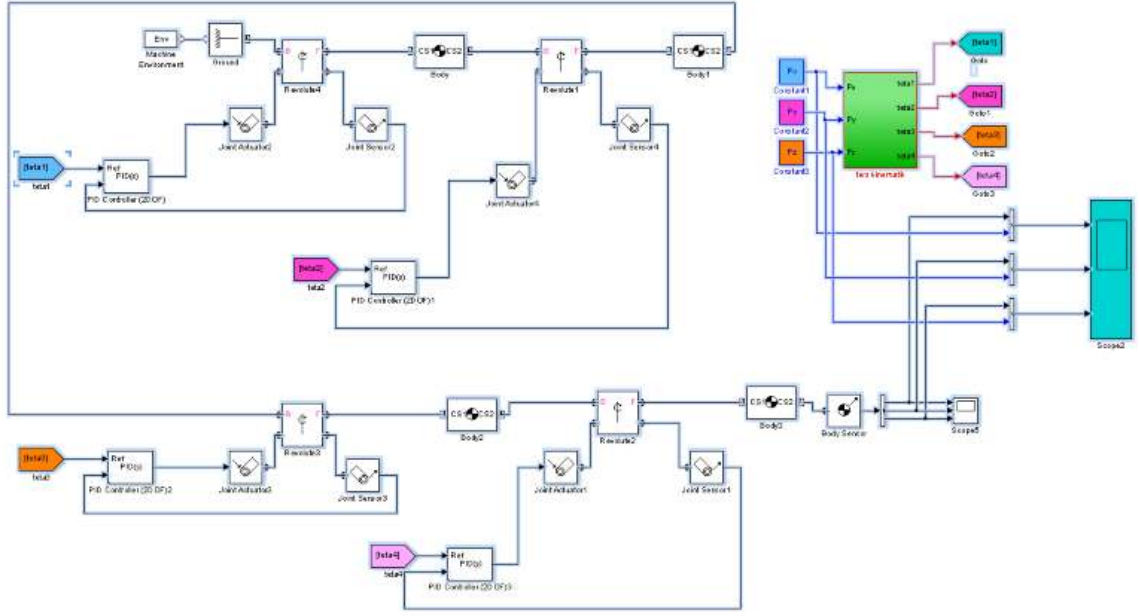
2-DOF PID kontrolörün ifadesi denklem (4.5)’de verilmiştir:

$$u(t) = P(b.r - y) + I \frac{1}{s}(r - y) + D \frac{N}{1+N\frac{1}{s}}(c.r - y) \quad (4.5)$$

Bu denklemde;

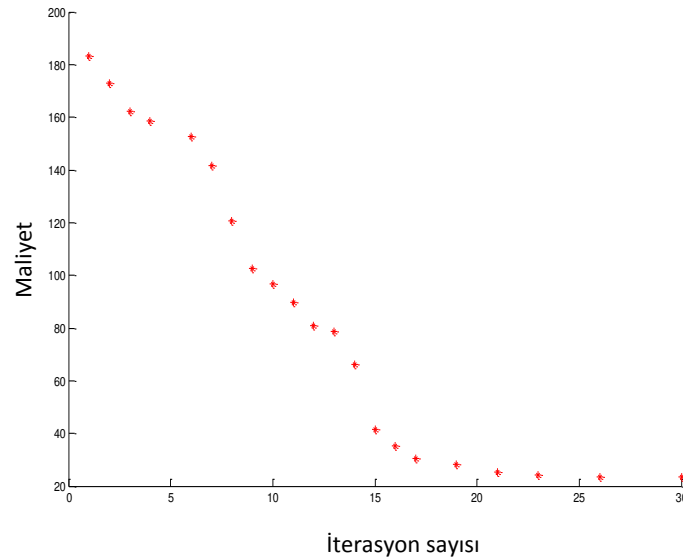
Bu denklemde $u(t)$ kontrol sinyali, P oransal kazanç, I integral kazancı, D türevsel kazanç, b oransal ağırlık katsayısı, r referans giriş değeri, y sistem çıkışı, N filtre katsayısı ve c integratör ağırlık katsayısıdır.

Robot kolun kapalı çevrim kontrolü için oluşturulan Matlab/SimMechanics modelinde klasik PID bloklarının yerine özdeş (aynı parametrelere sahip) 2-DOF PID bloklarının yerleştirilmesiyle Şekil 4.18’de verilen model elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun 2-DOF PID ile kapalı çevrimli kontrolünün Matlab/SimMechanics modeli

Klasik PID kontrolör parametrelerinin belirlendiği PSO algoritması 2-DOF PID kontrolör için de aynı şartlarda çalıştırılmış ve hesaplanan maliyet değerinin değişimi Şekil 4.19’da verilmiştir.



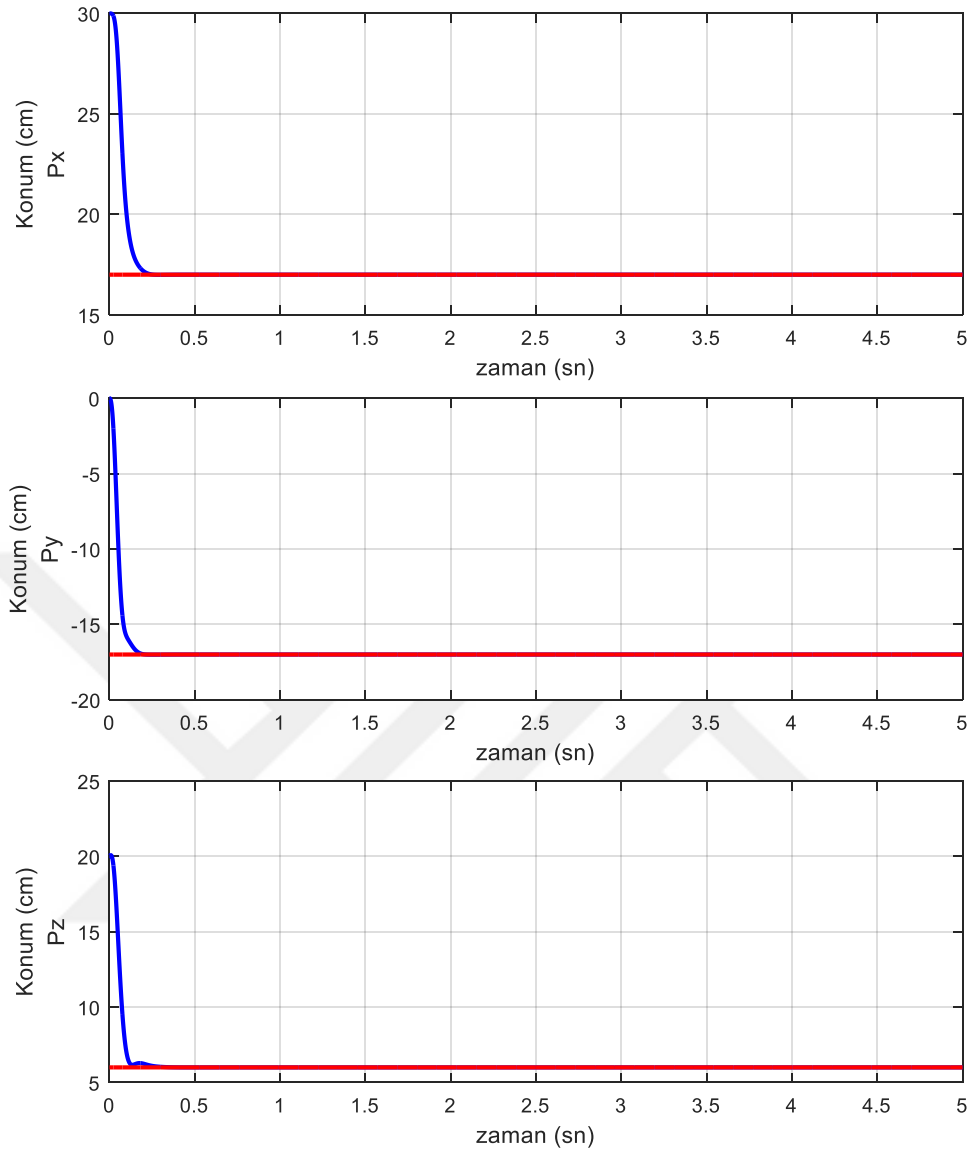
Şekil 4.19. PSO algoritması maliyet değerinin değişimi (2-DOF PID)

PSO ile belirlenen 2-DOF PID kontrolör parametreleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

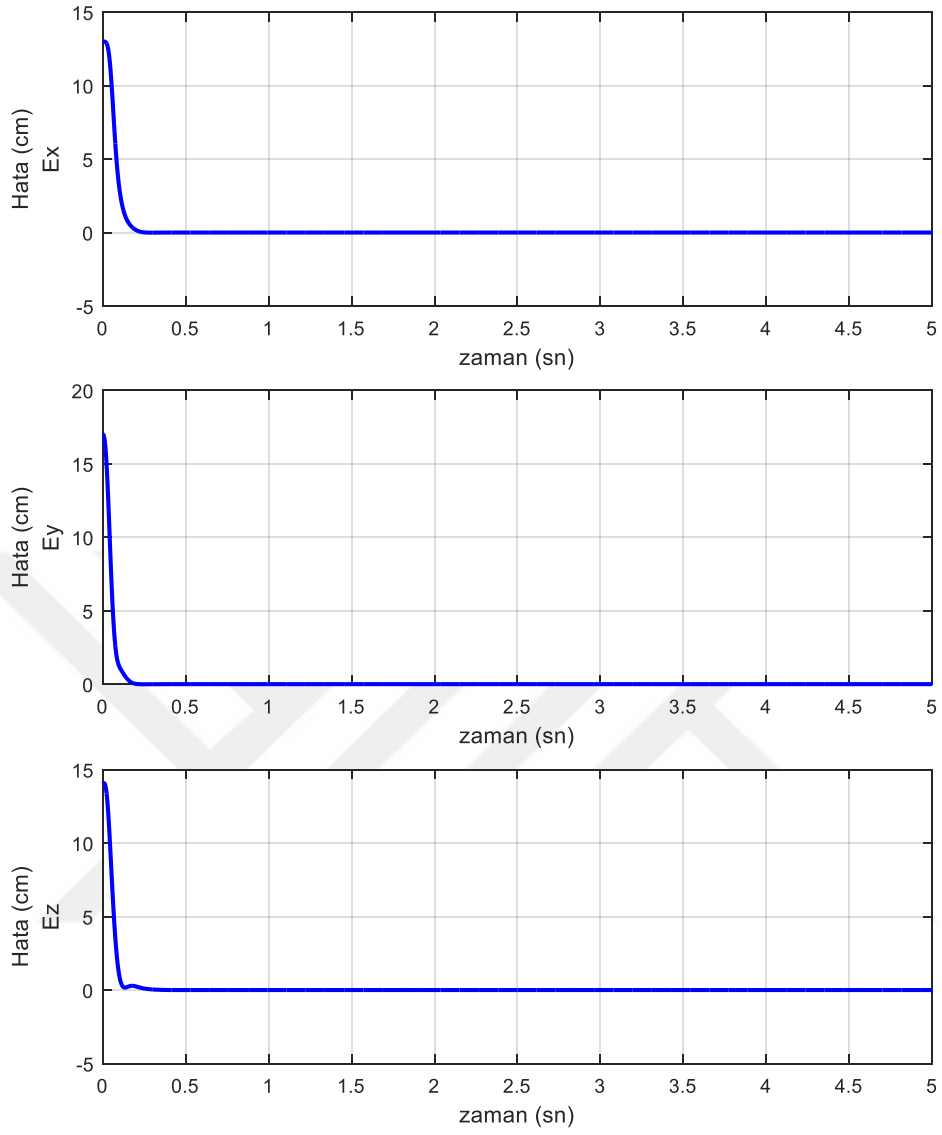
Tablo 4.2. 2-DOF PID kontrolör parametreleri

Parametreler	Değerleri
P	2,317363
I	35,40788
D	0,05244880
b	0,004625935
c	0,004499897
N	199,6316

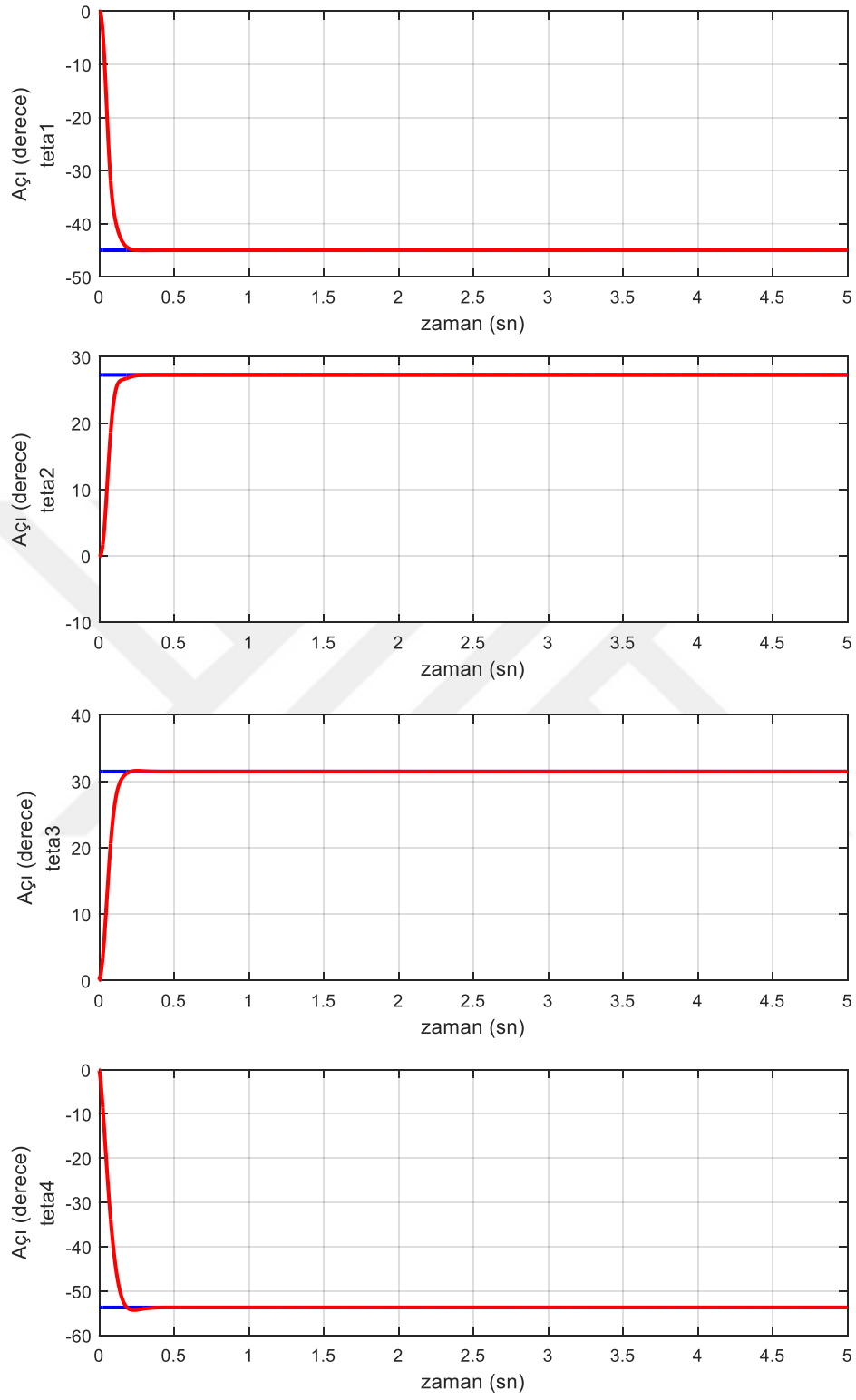
Şekil 4.18'deki robot kol modeline klasik PID kontrolörlü durum için kullanılan referans değerler giriş olarak uygulanmış ve Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.20. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (2-DOF PID-PSO)



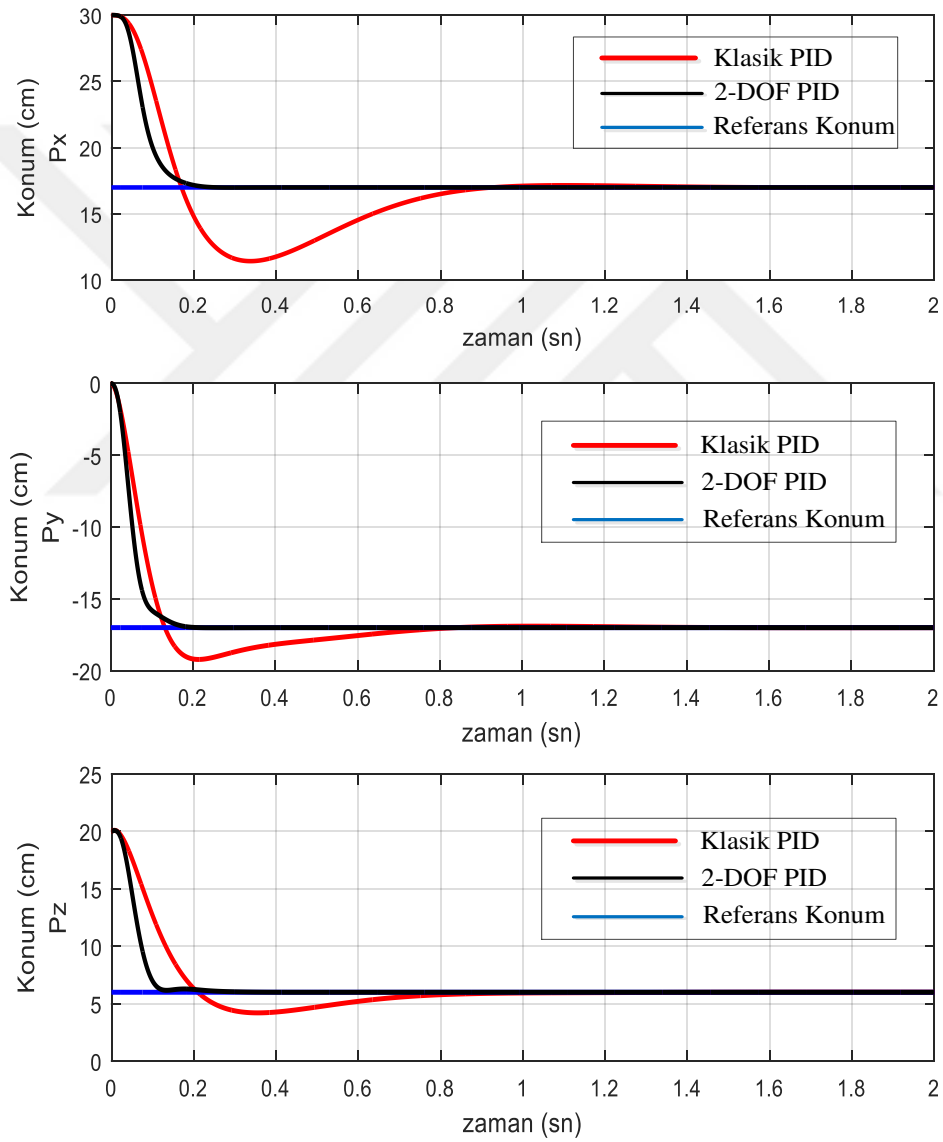
Şekil 4.21. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (2-DOF PID-PSO)



Şekil 4.22. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (2-DOF PID-PSO)

Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'deki sonuçlar incelendiğinde 2-DOF PID kontrolörün kullanılması durumunda robot kolun referans tutucu uç koordinatlarını kısa bir sürede çok az bir aşma ile yakaladığı görülmektedir.

Klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör sonuçlarının karşılaştırılması için her iki durum için elde edilen uç konum koordinatları Şekil 4.22'de birlikte çizdirilmiştir. Ayrıca Tablo 4.3'de her iki durum için elde edilen performans kriterleri verilmiştir.



Şekil 4.23. Joint Actuator ile tahrik edilen robot kol için klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör sonuçlarının karşılaştırılması

Tablo 4.3. Klasik PID kontrolör ve 2-DOF PID kontrolör performanslarının karşılaştırılması

	Klasik PID Performans Değerleri			
	t_R	t_S	M_P (%)	ess
P_x	0,1023	0,7318	21,9801	0
P_y	0,0957	0,5845	5,0996	0
P_z	0,1084	0,6708	14,8255	0
	2-DOF PID Performans Değerleri			
	t_R	t_S	M_P (%)	ess
P_x	0,0883	0,1898	0,0223	0
P_y	0,0698	0,1520	0,0477	0
P_z	0,0066	0,1934	0,0020	0

Tablo 4.3’de; t_R yükselme zamanını, t_S yerleşme zamanını, M_P maksimum aşmayı, ess ise sürekli durum hatasını ifade etmektedir.

Şekil 4.23 ve Tablo 4.3 incelendiğinde 2-DOF PID kontrolör performansının klasik PID kontrolörden daha iyi olduğu görülmektedir. Sonuç olarak 2-DOF PID kontrolörün kullanılması ile Joint Actuator ile tahrik edilen robot kolun performansı artırılmıştır.

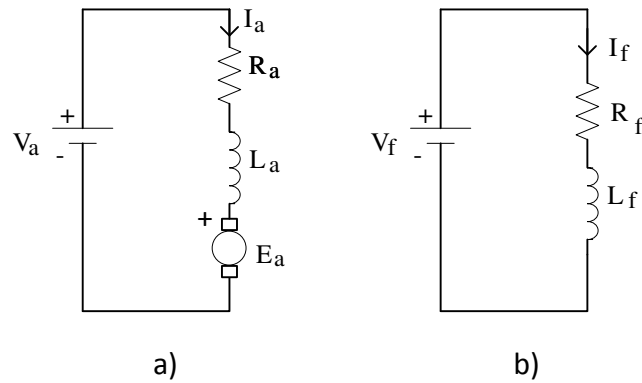
5. DA MOTOR TAHRİKLİ DÖRT SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN KONTROLÜ

DA motor, rotor ve statorda oluşan manyetik akının birbirlerini itmesi ve çekmesi ilkesine göre çalışır. Bu itme ve çekme kuvveti stator ve manyetik alan oluşturan rotordan sağlanır. Rotorun itme ve çekme kuvvetiyle manyetik alan tork üretir ve rotor döner [6, 49].

DA motorların kontrolü kolay ve performansları da yüksektir. Bu nedenle DA motorlar birçok kullanım alanına sahiptir. DA motorları robot kolu, küçük ev aletleri, otomotiv sektörü vb. birçok alanda hız ve konum kontrolü için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. [6, 15, 49].

Bu tez çalışmasında serbest uyarımlı DA motor kullanılmıştır. Bu motorlar yük altında çalışırken devir sayıları çok fazla değişmez ve yüksüz durumdayken de devir kendiliğinden yükselmez. Yol alma momentleri de fazla yüksek değildir [6, 49]. Bu özelliklerinden dolayı bu sistem için serbest uyarımlı DA motor tercih edilmiştir.

Çalışmada kullanılan serbest uyarımlı DA motorun eşdeğer devresi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Serbest uyarımlı DA motorun eşdeğer devresi a) Endüvi devresi
b) Uyarım devresi

Şekil 5.1’de verilen eşdeğer devreye Kirchhof’un gerilim kanunu uygulanırsa; aşağıdaki gerilim denklemleri elde edilir:

$$V_f = I_f R_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (5.1)$$

$$V_a = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a \quad (5.2)$$

olur. Burada V_a endüvi gerilimi, V_f uyarma devresi gerilimi, I_a endüvi akımı, I_f uyartım akımı ve E_a zıt emk gerilimidir. DA motorun zıt emk gerilimi;

$$E_a = k\phi\omega \quad (5.3)$$

olarak verilir. Burada k makina sabiti, ϕ akı, ve ω açısal hız olup, akı değeri denklem (5.4)’de verildiği gibi stator akımı I_f ile doğru orantılıdır.

$$\phi = k_f I_f \quad (5.4)$$

Bu değer denklem (5.3)’de yazılırsa motorun zıt emk'sı;

$$E_a = k k_f I_f \omega \quad (5.5)$$

olur. Bu durumda DA motorda indüklenen moment;

$$T_e = k k_f I_f I_a \quad (5.6)$$

olur. Motora ilişkin hareket denklemi ise;

$$T_e - T_y = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (5.7)$$

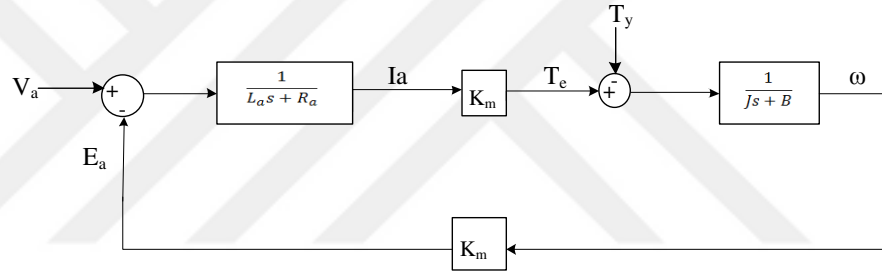
olarak ifade edilir. Burada T_y yük momentidir.

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak DA motorunun transfer fonksiyonları,

$$I_a(s) = \frac{V_a - E_a}{L_a s + R_a} \quad (5.9)$$

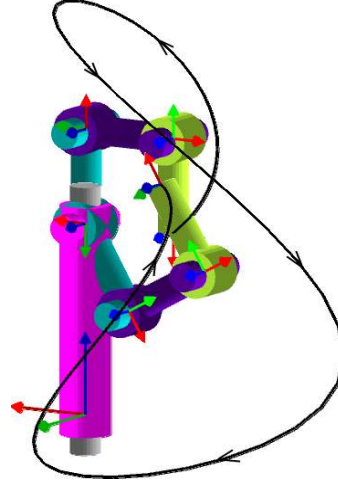
$$\omega(s) = \frac{T_e - T_y}{J s + B} \quad (5.10)$$

olarak elde edilir. Şekil 5.1b'deki alan akımı (I_f) sabit kabul edilerek $K_m = k \cdot k_f \cdot I_f$ değeri hem T_e motor momenti hem de E_a zıt emk denkleminde yerine yazılarak Şekil 5.2'de verilen blok diyagramı elde edilir. Bu blok diyagramında görüldüğü gibi armatür akımı (I_a) ayarlanarak DA motor kontrol edilmiştir.

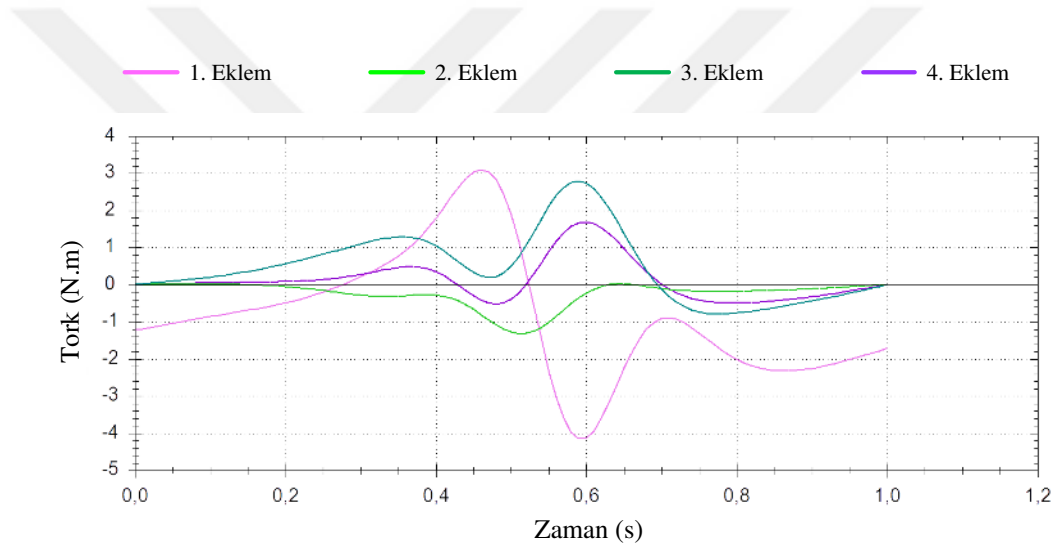


Şekil 5.2. DA motorun blok diyagramı

Çalışmada kullanılan robot kol, RoboAnalyzer programı ile modellenerek Şekil 5.3'de verilen hareketi yapması durumunda her bir eklem için gereken tork değerleri belirlenmiş ve böylece DA motorun seçimi yapılmıştır. RoboAnalyzer programından elde edilen tork değerleri Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.3. RoboAnalyzer programında robot kolun hareketi

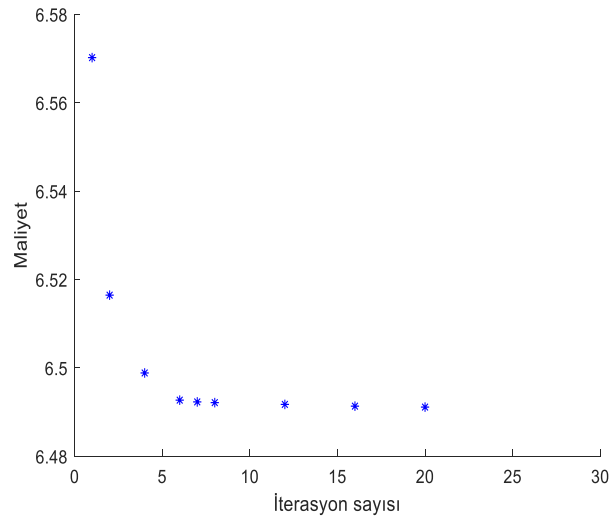


Şekil 5.4. RoboAnalyzer programından elde edilen tork değerleri

Benzetim çalışmalarında kullanılan DA motorun parametreleri Tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1. DA motor parametreleri

Nominal Güç (P_n)	1,5 kW
Nominal Kaynak Gerilimi (V_a, V_f)	200 V
Endüvi Sargısı Direnci (R_a)	0,3 Ω
Endüvi Sargısı İndüktansı (L_a)	12 mH
Atalet momenti (J)	0,1 kg.m ²
Sürtünme Katsayısı (B)	0,001 Nm.s
Makine sabiti (K_m)	0,633 (V/rad).s
Tork (T_e)	4,75 Nm

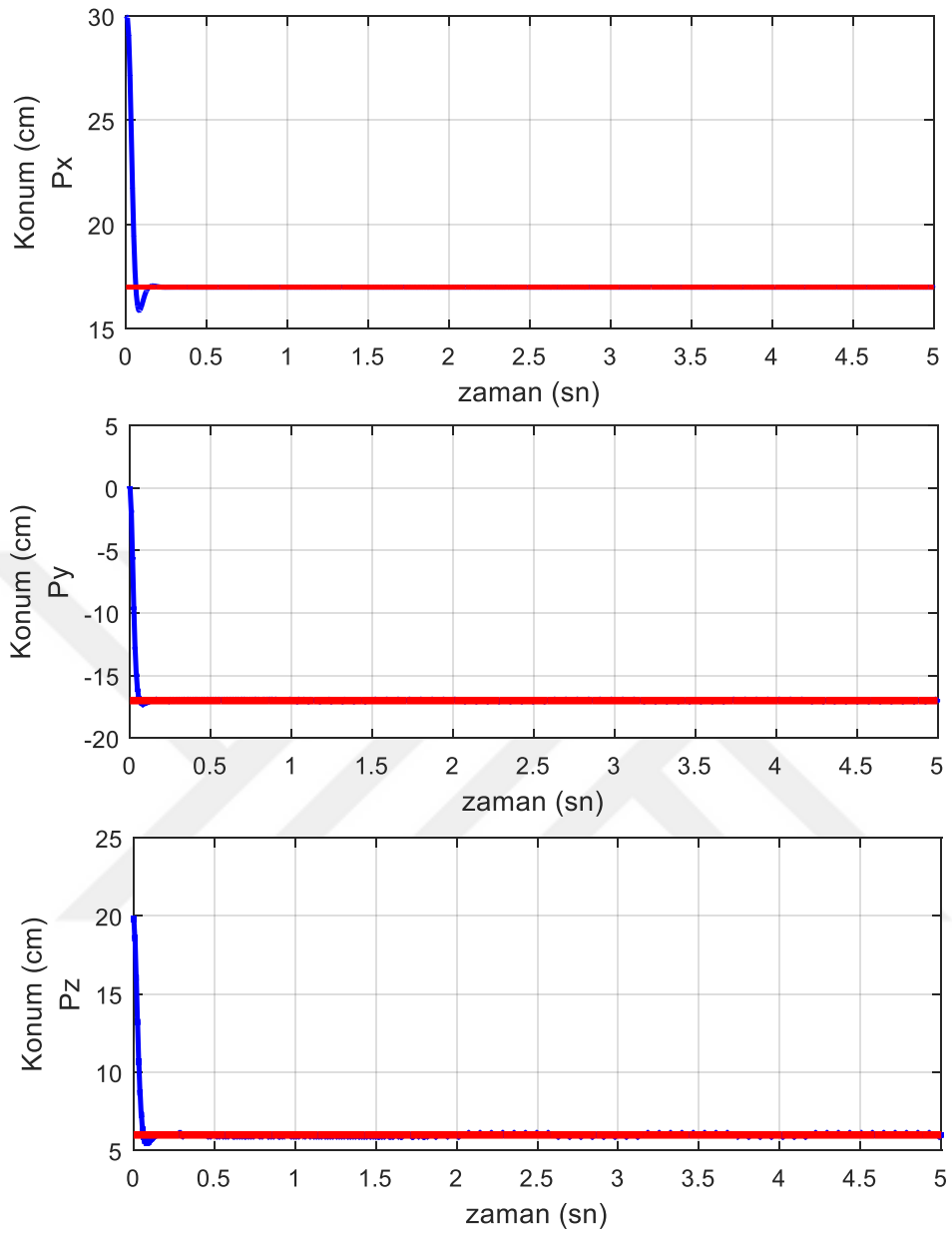


Şekil 5.6. PSO algoritması maliyet değerinin değişimi (Klasik PID)

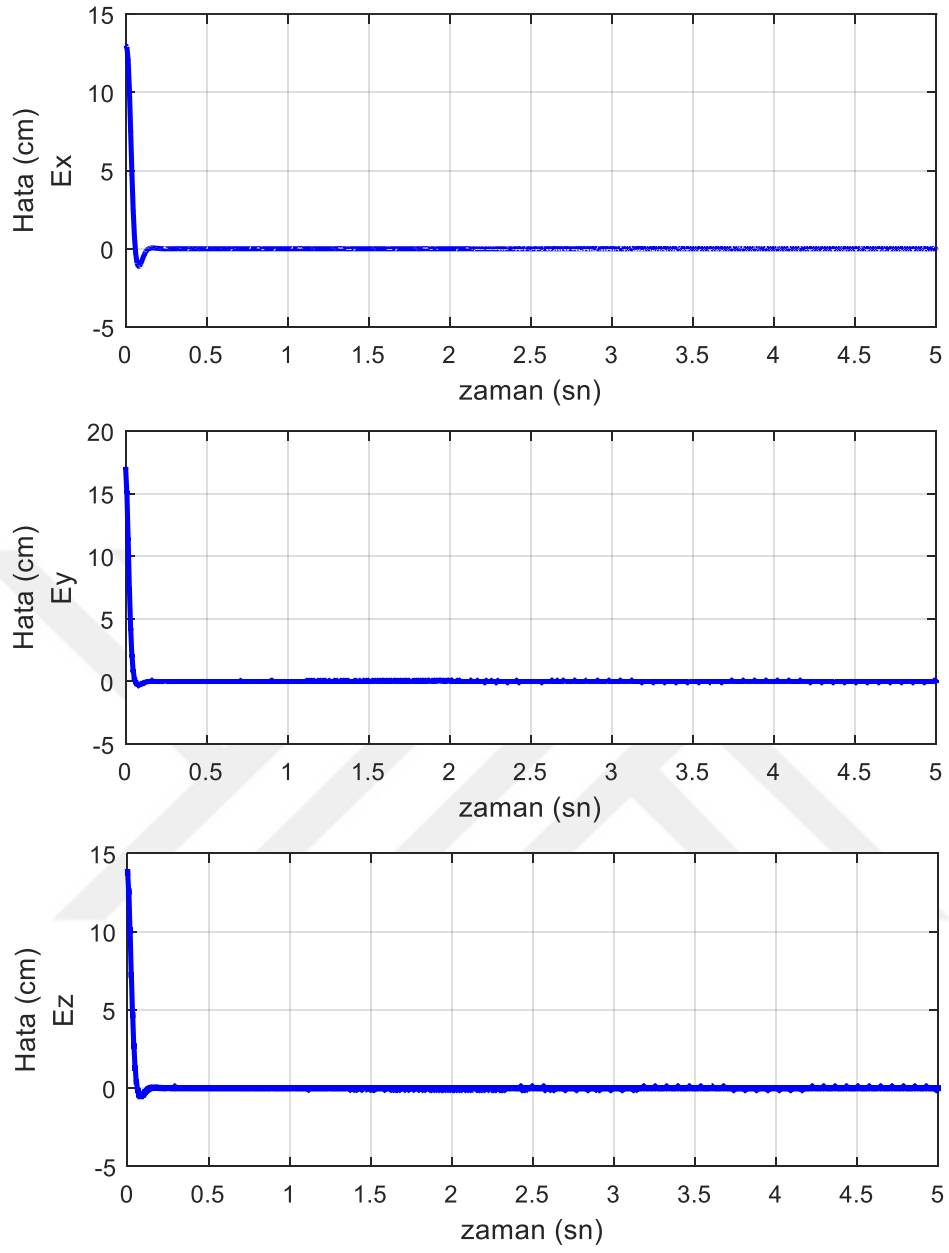
PSO ile klasik PID kontrolör parametreleri;

$K_p=0,0916762$, $K_i=0,4289289$, $K_d=0,0017016$ olarak belirlenmiştir.

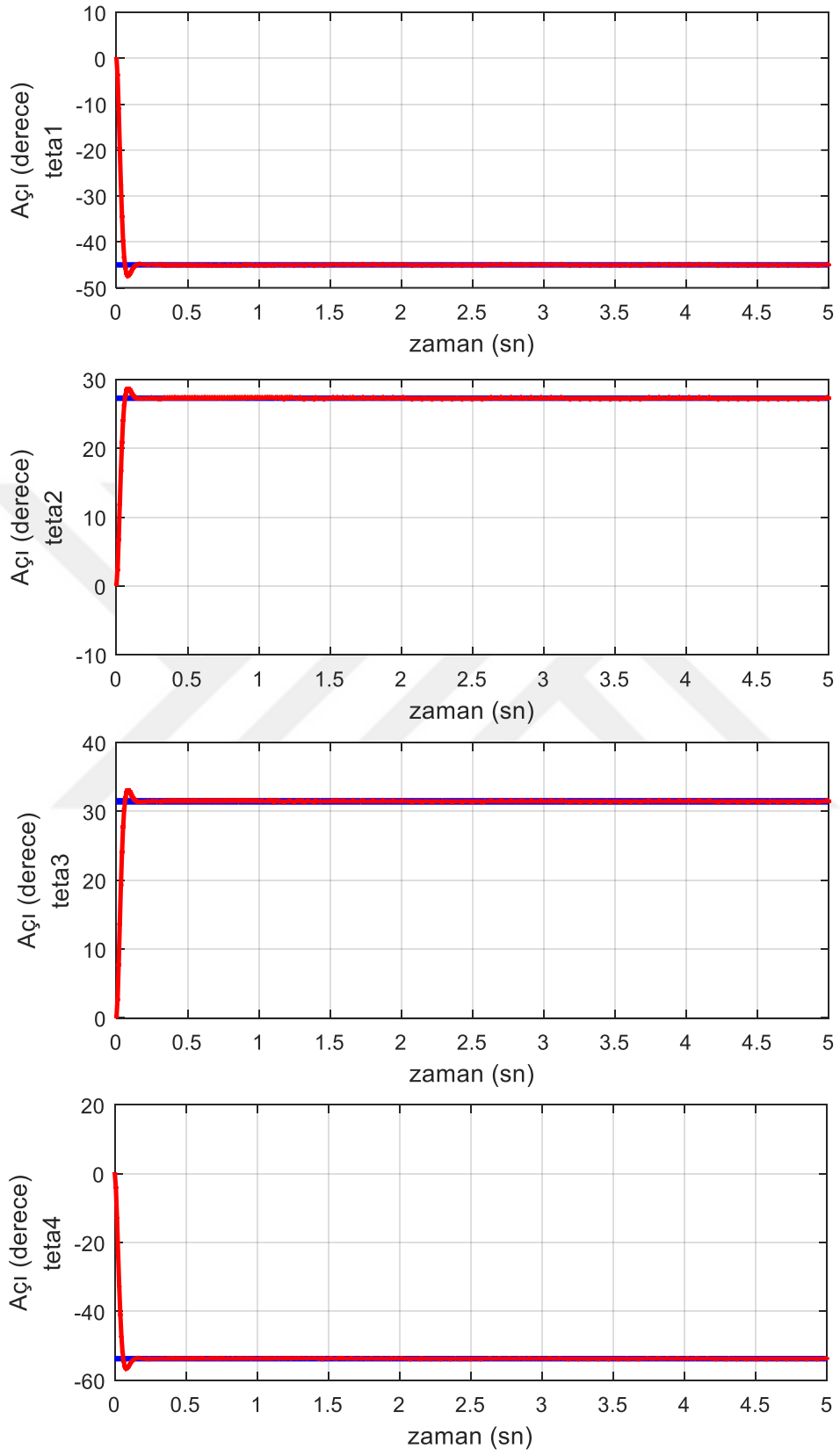
$P_x=17$, $P_y=-17$, $P_z=6$ ve $Q=\pi/36$ referans giriş değerleri için elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilmiştir.



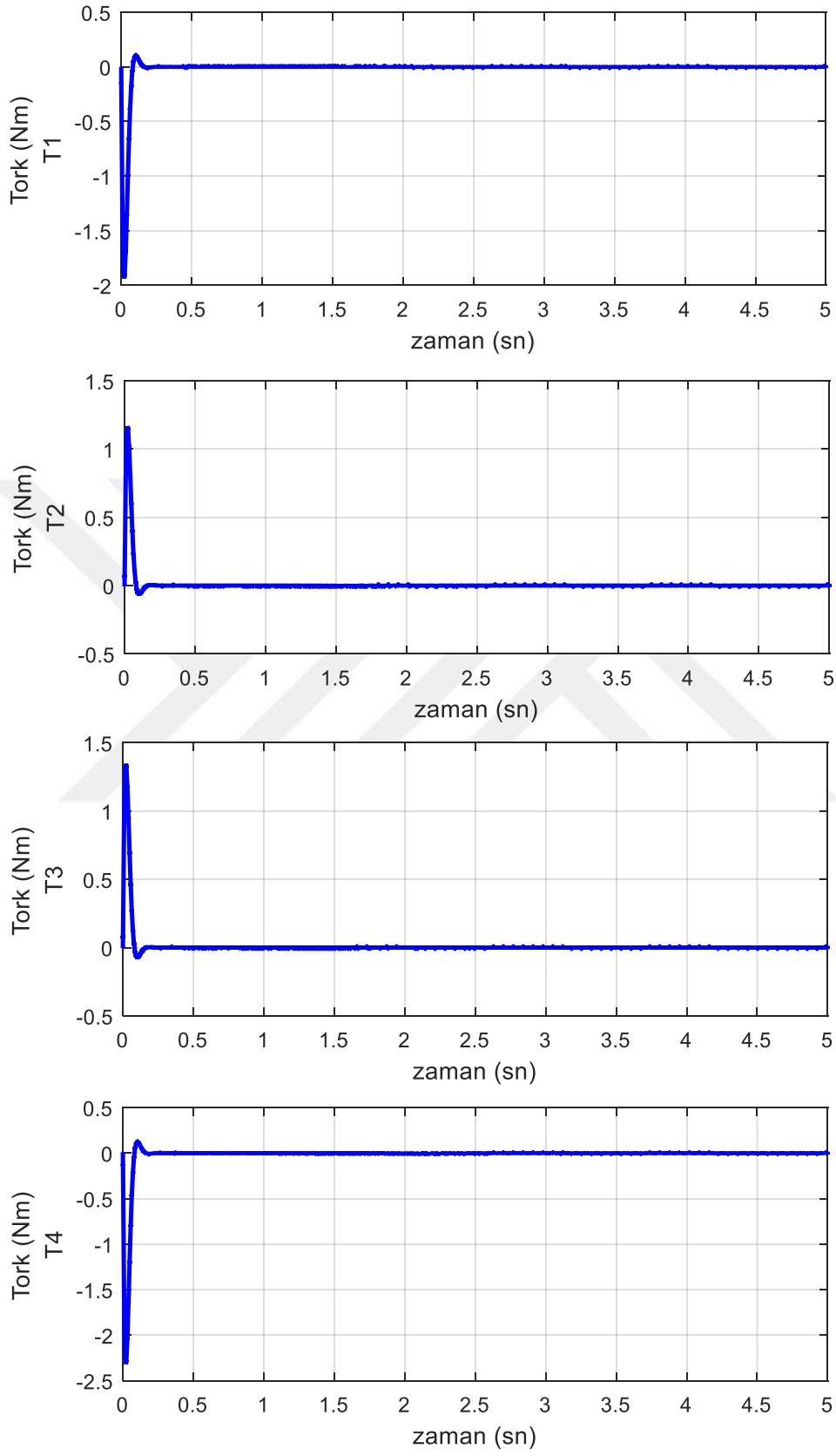
Şekil 5.7. DA motor ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (Klasik PID-PSO)



Şekil 5.8. DA motor ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (Klasik PID-PSO)



Şekil 5.9. DA motor ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (Klasik PID-PSO)

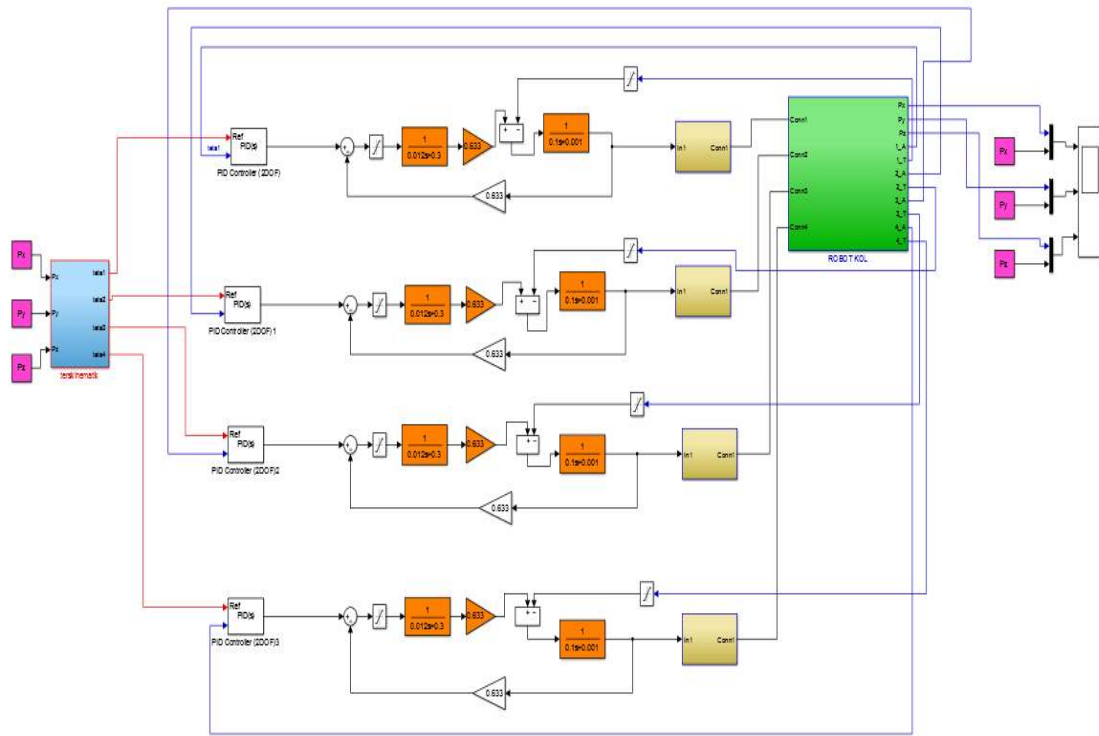


Şekil 5.10. DA motor ile tahrik edilen robot kolun hareketini sağlayan motor torkları (Klasik PID-PSO)

Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilen sonuçlara göre robot kol, parametreleri PSO ile belirlenen klasik PID kontrolör ile kapalı çevrim olarak kontrol edildiğinde, referans konumu kısa sürede çok az bir maksimum aşma değeri ile yakalamıştır.

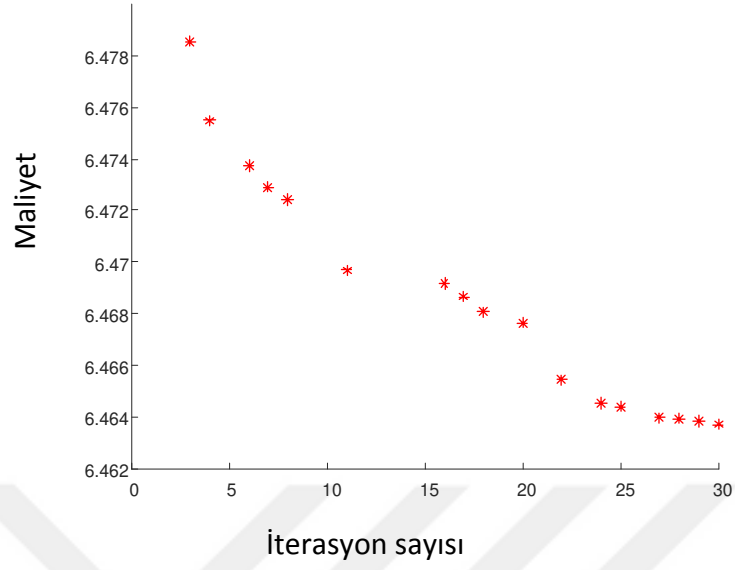
5.2. 2-DOF PID Kontrolör ile Kapalı Çevrim Kontrol

Bu bölümde DA motor tahrikli robot kol, 2-DOF PID kontrolör ile kapalı çevrim olarak kontrol edilmiştir. Şekil 5.4’deki Matlab/SimMechanics modelinde klasik PID kontrolörün yerine 2-DOF PID kontrolör eklenerek Şekil 5.11’de verilen Matlab/SimMechanics modeli elde edilmiştir.



Şekil 5.11. DA motor ile tahrik edilen robot kolun 2-DOF PID ile kapalı çevrim kontrolünün Matlab/SimMechanics modeli

Klasik PID kontrolör parametrelerinin belirlendiği PSO algoritması 2-DOF PID kontrolör için de aynı şartlarda çalıştırılmış ve hesaplanan maliyet değerinin değişimi Şekil 5.12’de verilmiştir.



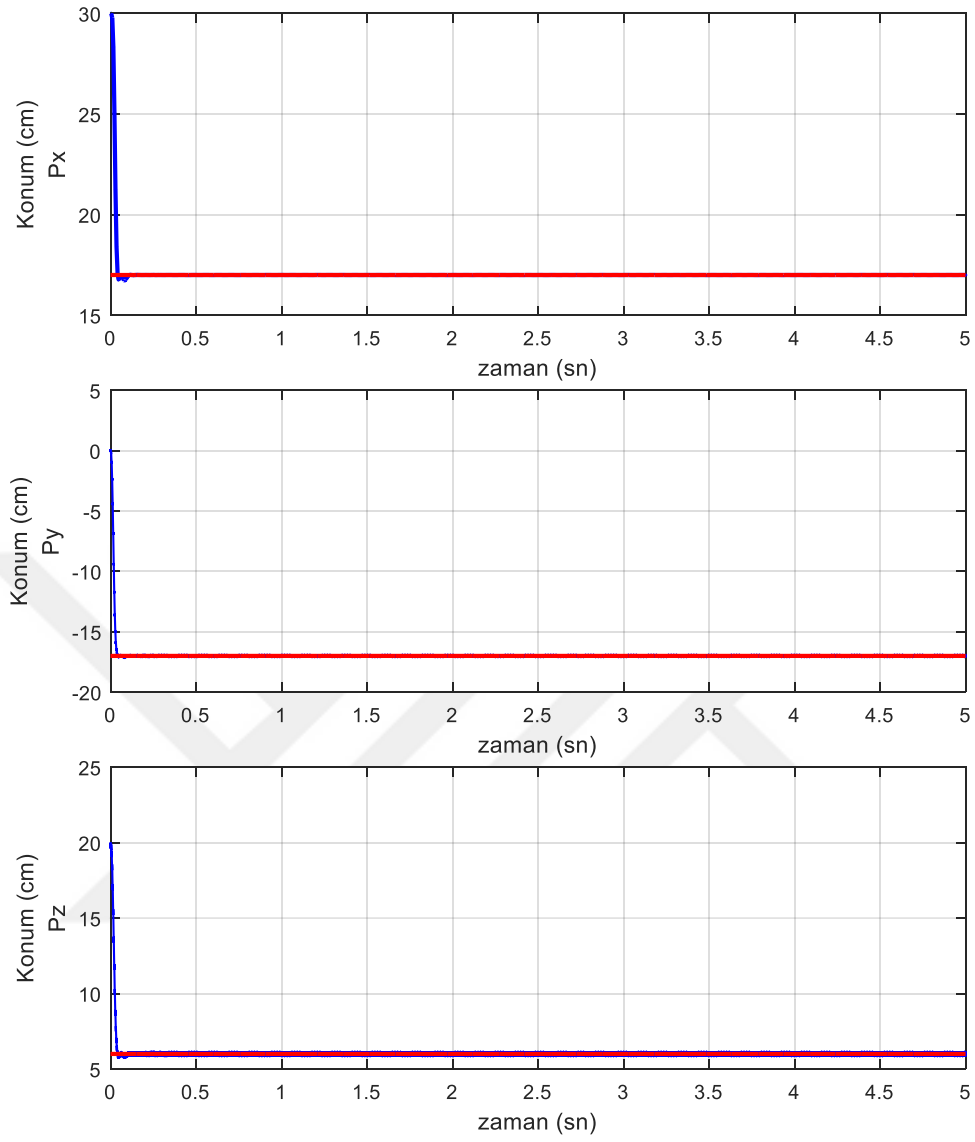
Şekil 5.12. PSO algoritması maliyet değerinin değişimi (2-DOF PID)

PSO ile belirlenen 2-DOF PID kontrolör parametreleri Tablo 5. 2’de verilmiştir.

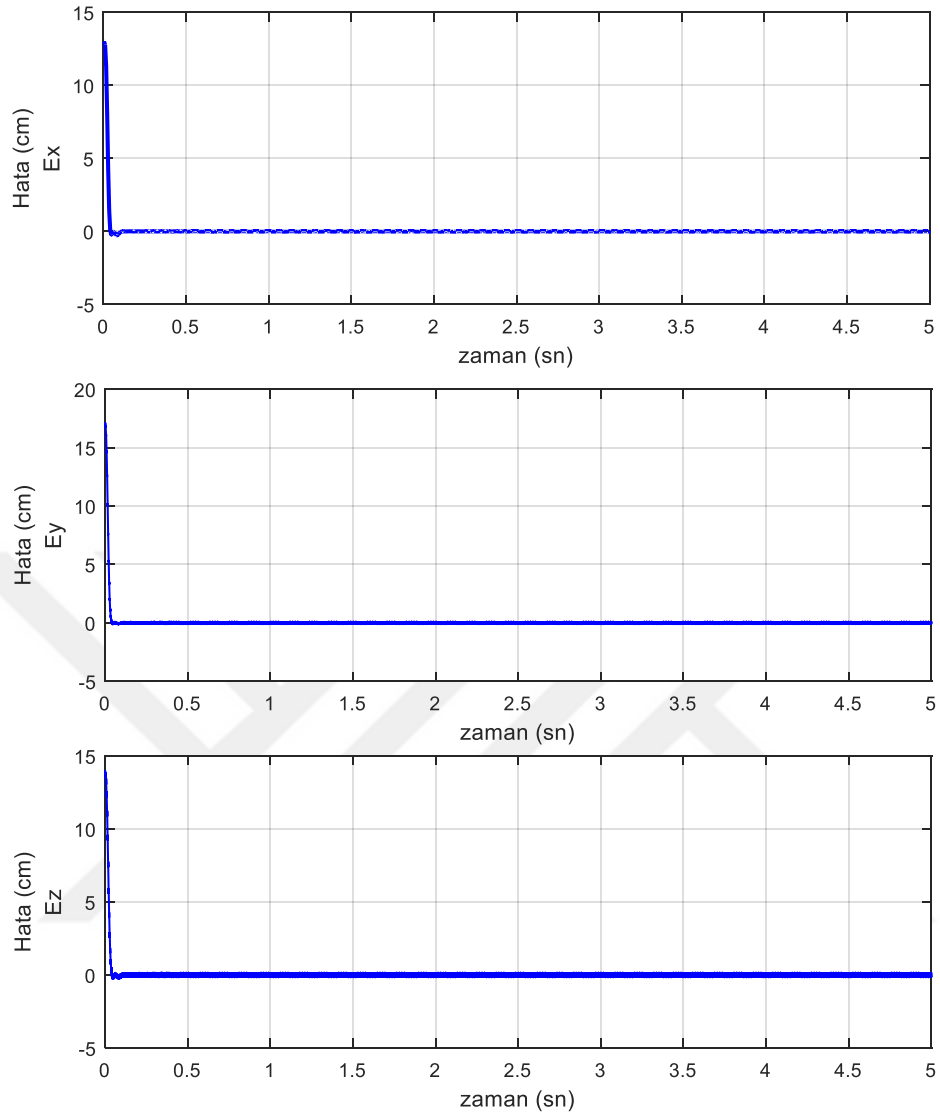
Tablo 5.2. 2-DOF PID kontrolör parametreleri

	2-DOF PID Parametreleri
P	0,3913
I	17,8334
D	0,0034
b	0,0823
c	0,0003
N	196,0547

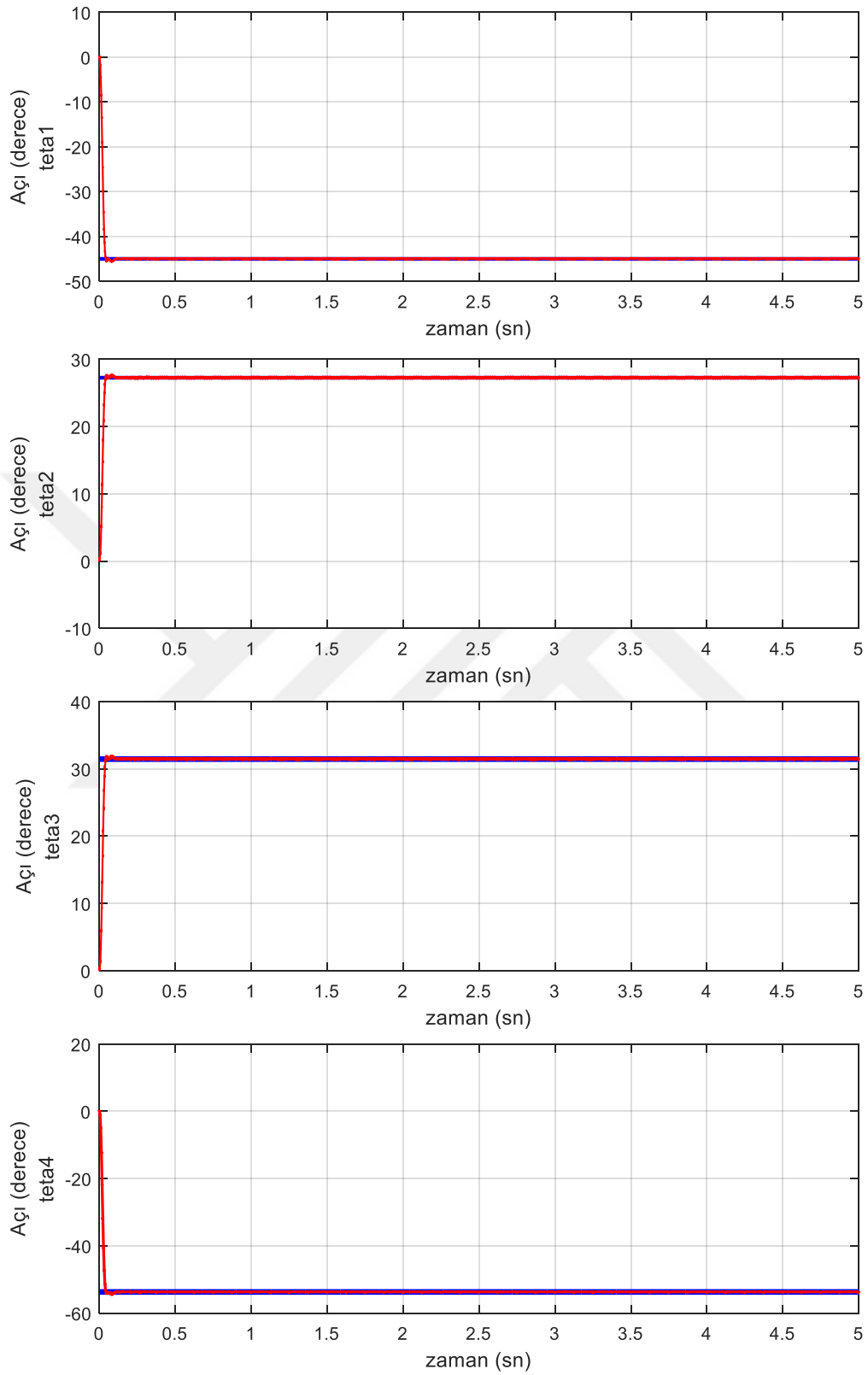
Klasik PID kontrolörlü durum için kullanılan referans değerler giriş olarak uygulanmış ve Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilen sonuçlar elde edilmiştir.



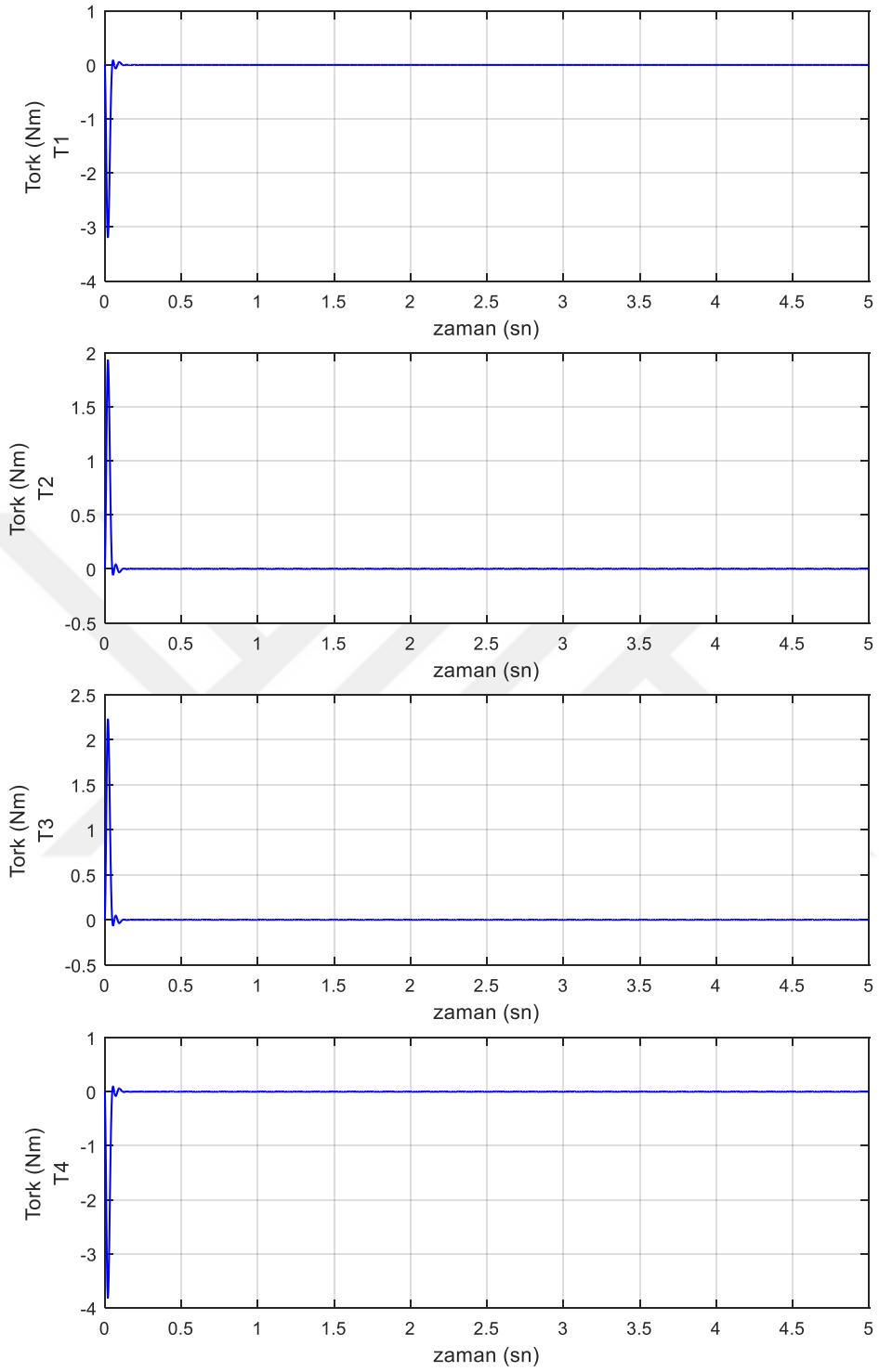
Şekil 5.13. DA motor ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç koordinatları (2-DOF PID-PSO)



Şekil 5.14. DA motor ile tahrik edilen robot kolun tutucu uç konum hataları (2-DOF PID-PSO)



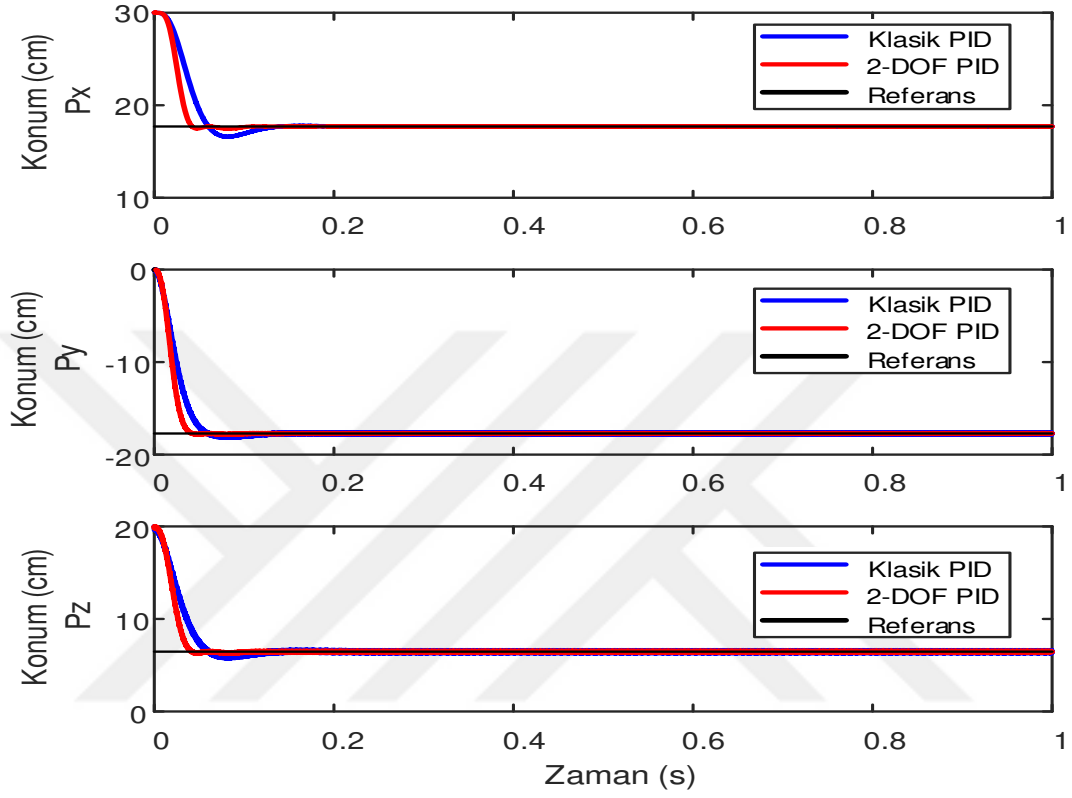
Şekil 5.15. DA motor ile tahrik edilen robot kolun eklem açıları (2-DOF PID-PSO)



Şekil 5.16. DA motor ile tahrik edilen robot kolun hareketini sağlayan motor torkları (2-DOF PID-PSO)

Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilen sonuçlara göre robot kol, parametreleri PSO ile belirlenen 2-DOF PID kontrolör ile kapalı çevrimli olarak kontrol edildiğinde daha önce verilen klasik PID kontrolörlü sonuçlara göre daha kısa sürede ve daha az aşma değeri ile referans konum değerlerine erişmektedir. Klasik PID ve 2-DOF

PID kontrolör sonuçlarının karşılaştırılması için her iki durum için elde edilen uç konum koordinatları Şekil 5.17’de birlikte çizdirilmiştir. Ayrıca hem klasik PID hem de 2-DOF PID kontrolörlü durum için performans kriterleri elde edilerek Tablo 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.17. DA motor ile tahrik edilen robot kol için Klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör sonuçlarının karşılaştırılması

Tablo 5.3. Klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör performanslarının karşılaştırılması

	Klasik PID Performans Değerleri			
	t_R	t_S	$M_P (\%)$	ess
P_x	0,0343	0,1220	6,2548	0
P_y	0,0343	0,1016	2,6553	0
P_z	0,0387	0,1240	5,6058	0
	2-DOF PID Performans Değerleri			
	t_R	t_S	$M_P (\%)$	ess
P_x	0,0199	0,0868	1,4903	0
P_y	0,0211	0,0378	1,1429	0
P_z	0,0234	0,0919	2,5071	0

Şekil 5.17 ve Tablo 5.3’de görüldüğü gibi 2-DOF PID kontrolör klasik PID kontrolörden daha iyi performans göstermiştir. Sonuç olarak 2-DOF PID kontrolörün kullanılması ile DA motor ile tahrik edilen robot kolun performansı artmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dört serbestlik dereceli bir robot kolunun uç elemanının pozisyon (konum) kontrolü yapılmıştır. Çalışmada Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılarak eklem koordinatları ile uç nokta arasındaki düz ve ters kinematik denklemler elde edilmiştir. İlk olarak robot kolun kinematik denklemlere göre Matlab/SimMechanics ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiş ve bu modelde eklemler Joint Actuator ile tahrik edilmiştir. Daha sonra robot kolunun her bir ekleminin tahriki için Doğru Akım (DA) motoru kullanılmıştır. Robot kolun tutucu ucunun kapalı çevrimli konum kontrolü için klasik PID ve 2-DOF PID kontrolör olmak üzere iki farklı kontrolör kullanılmıştır. Her iki kontrolörde de kontrolör parametreleri PSO ile elde edilmiş ve sisteme uygulanmıştır.

Hem Joint Actuator hem de DA motor ile tahrik edilen robot kolun konum kontrolü için elde edilen yerleşme zamanı, yükselme zamanı ve maksimum aşma değerleri incelendiğinde, 2-DOF PID kontrolörün klasik PID kontrolörden daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak parametreleri PSO ile belirlenen 2-DOF PID kontrolör ile robot kolun performansı artırılmıştır.

Daha sonraki çalışmalarda Matlab/SimMechanics ortamında modellenen robot koluna Kesir dereceli kontrolör veya Yapay Zekâ teknikleri uygulanarak robot kolun performansı artırılabilir. Ayrıca önerilen kontrol yapısı gerçek zamanlı olarak DSP veya FPGA geliştirme kartıyla gerçek bir robot koluna uygulanarak elde edilen sonuçlar irdelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yavuz, E.**, 2015. 3 serbestlik dereceli (3R) bir robot manipülatörün kontrolü ve görüntü işlemeye dayalı nesne taşınması, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [2] **Katipoğlu, G.**, 2013. Üç serbestlik dereceli robot kolun pozisyon kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [3] **Alp, O.**, 2012. Genel amaçlı robot kolu tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [4] **Bayrak, A.**, 2007. Beş eksenli bir robot kolunun simülasyonu ve kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [5] **Jakopec, M., Baena F.R., Haris S.J., Gomes P, Cobb J. and Davies B.L.**, 2003. The hands-on orthopaedic robot “Acrobot”: Early clinical trials of total knee replacement surgery, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **19(5)**, 902-911.
- [6] **Berki, K.**, 2013. Yapay Sinir Ağları ile Robot Kolu Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [7] **Ogata, K.**, 1997. Modern Control Engineering, Prentice Hall, 3rd edition, Upper Saddle River, New Jersey.
- [8] **Xia, Y.**, 2001. Continuous sliding mode control of a cartesian pneumatic robot, *Master Thesis*, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- [9] **Şahin Y.**, 2006. Scara tip bir robotun yörünge kontrolünde PID kontrol uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [10] **Yücel, F.**, 2006. Hareketli iki serbestlik dereceli manipülatörün konum kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [11] **Hong, D., Velinsky, S.A. and Yamazaki, K.**, 1997. Tethered mobile robot for automating highway maintenance operations, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **13(4)**, 297-307.
- [12] **Çalışkan, A.** 2004. Mekatronik sistemlerde internet tabanlı kontrol ve kartezyen robot üzerinde bir uygulama, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [13] **Durmaz, U.**, 2007. Bir robot kolunun sinirsel bulanık kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [14] **Sun, Z., Xing, R., Zhao, C. and Huang, W.**, 2007. Fuzzy auto-tuning PID control of multiple joint robot driven by ultrasonic motors, *Ultrasonics*, **46(4)**, 303-312.
- [15] **Görel, G. ve Altaş, İ. H.**, 2011. Bulanık mantık kontrollü çift eklemlili robot kolu, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 5-7 Ekim, s.152-156.

- [16] **Bostan, B.**, 2004. Puma 560 robotunun hesaplanmış moment metoduyla kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [17] **Tonbul, T. ve Sarıtaş M.**, 2003. Beş eksenli bir Edubot robot kolunda ters kinematik hesaplamalar ve Yörünge Planlaması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **18 (1)**, 145-167.
- [18] **Geyik M.**, 2010. Bir mobil robotun gerçek zamanlı modellenmesi ve kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [19] **Tokel, Ç.**, 2009. Dört eksenli RC servo motor tahrikli bir robot manipülatörü tasarımı ve uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [20] **Aksungur, S. ve Kavlak, K.**, 2009. Scara robotun engelli ortamda çarpışmasız hareketinin Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritma kullanılarak gerçekleştirilmesi, *Selçuk-Teknik Dergisi*, **8(2)**, 112-126.
- [21] **Gören, A.**, 2007. Controlling a Non-Holonomic vehicle via Artificial Neural Networks, *Doctor of Philosophy*, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, İzmir.
- [22] **Alshamasin, M. S.**, 2009. Kinematic modeling and simulation of a SCARA robot by using solid dynamics and verification by MATLAB/Simulink, *European Journal of Scientific Research*, **37(3)**, 388-405.
- [23] **Duran, M.A. ve Ankaralı, A.**, 2010. Üç serbestlik dereceli PUMA tipi bir manipülatörün PID kontrolü, *Selçuk-Teknik Dergisi*, **9(1)**, 79-98.
- [24] **Karcı, H. ve Tangel, A.**, 2012. FPGA tabanlı 5 eksenli mobil robot kolu tasarımı ve uygulaması, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2012)*, Bursa, 29 Kasım-1 Aralık, s. 519-523.
- [25] **Kızır, S., Birgül, Z., ve Akyüz, İ.H.**, 2009. Tek eklemlili esnek robot kolunun modellenmesi, tasarımı ve bulanık mantık ile kontrolü, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'09)*, Kocaeli, 13-16 Ekim, s. 301-306.
- [26] **Pekdemir, E. ve Güneş, M.**, 2016. Otonom bir mobil robotun Parçacık Sürü Optimizasyonu ile optimum yörünge kontrolü, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19(3)**, 157-164.
- [27] **Çelik, B.**, 2013. FPGA tabanlı robotik kontrol, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] **Iliukhin V.N., Mitkovskii, K.B., Bizyanova, D.A. and Akopyan, A.A.**, 2017. The modeling of inverse kinematics for 5 DOF manipulator, *Procedia Engineering*, **176(2017)**, 498-505.
- [29] **Tatar, A.B.**, 2015. Dört Ayaklı bir robotun dinamik analizi ve kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [30] **Bunday, B.D.**, 1984. Basic Optimization Methods, Hodder Arnold, London.
- [31] **Himmelblau, D.M. and Edgar, T.F.**, 1988. Optimization of Chemical Processes, McGraw-Hill, New York.
- [32] **Tektaş, M.**, 2010. Optimizasyon tekniklerinin tasnifi ve iki teknik üzerinde inceleme, *e-Journal of New World Sciences Academy*, **5(4)**, 103-115.

- [33] **Kara, İ.**, 1986. Yöneylem Araştırması Doğrusal Olmayan Modeller, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [34] **Rao, S.S.**, 1978. Optimization: Theory and Applications, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- [35] **Özsağlam, M.Y. ve Çunkaş, M.**, 2008. Optimizasyon problemlerinin çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması, *Politeknik Dergisi*, **11(4)**, 299-305.
- [36] **Wilke D. N.**, 2005. Analysis of the particle swarm optimization algorithm, *Master Thesis*, Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, South Africa.
- [37] **Gómez, S., Sánchez, G., Zarama, J., Ramos, M.C., Alcántar, J.E., Torres, J., Núñez, A., Santana, S., Nájera, F., and Lopez, J.A.**, 2015. Design of a 4-DOF robot manipulator with optimized algorithm for inverse kinematics, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, **9(6)**, 929-934.
- [38] **Kennedy, J. and Eberhart, R.C.**, 1995. Particle Swarm Optimization, IEEE, *International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 17 November-1 December, pp. 1942-1948.
- [39] **Kutlu, M.**, 2012. PSO yaklaşımı ile portföy optimizasyonu ve İMKB’de bir uygulama, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
- [40] **Taşgetiren, F., Liang, Y.C., Şevkli, M., and Gençylmaz, G.**, 2007. A particle swarm optimization algorithm for makespan and total flowtime minimization in the permutation flowshop sequencing problem, *European Journal of Operational Research*, **177(2007)**, 1930-1947.
- [41] **Kızıloluk, S., ve Özer, A.**, 2016. Melez elektromanyetizma benzeri PSO algoritması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **7(3)**, 515-526.
- [42] **Rini, D.P., Shamsudding, S.M. and Yuhaniz, S.S.**, 2011. Particle Swarm Optimization: Technique, System and Challenges, *International Journal of Computer Applications*, **14(1)**, 19-27.
- [43] **O’Dwyer, A.**, 2009. Handbook of PI and PID controller tuning rules, Imperial College Press, 3rd Edition, London.
- [44] **Horowitz, I.M.**, 1963. Synthesis of feedback systems, Academic Press, New York and London.
- [45] **Rajinikanth, V. and Latha, K.**, 2012. Setpoint weighted PID controller tuning for unstable system using heuristic algorithm, *Archives of Control Sciences*, **22(4)**, 481-505.
- [46] **Rajinikanth, V. and Latha, K.**, 2012. 2-DOF PID controller tuning for unstable using bacterial foraging algorithm, *Lecture Notes in Computer Science, LNCS(7677)*, 519-527.
- [47] **Araki M. and Taguchi H.**, 2003. Two-Degree-of-Freedom PID controllers, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, **1(4)**, 401-411.

- [48] **Sundaravadivu, K., Sivakumar, S. and Hariprasad, N.,** 2015. 2DOF PID controller design for a class of FOPTD models-An analysis with heuristic algorithms, *Procedia Computer Science*, **4(2015)**, 90-95.
- [49] **Aykaç, B.,** 2011. DC motorla tahrik edilen İki Uzuylu Manipölölörün adım atma Hareketini Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.



ÖZGEÇMİŞ

GAMZE YÜKSEL	
KİŞİSEL BİLGİLER	
ADRES :	<i>Fırat Üniversitesi, 23119 – Elazığ</i>
TELEFON :	<i>+90 (5377056792)</i>
EPOSTA :	<i>gamzeyuksel23@gmail.com</i>
DOĞUM YERİ/TARİHİ:	<i>12 /12/1992</i>
MEDENİ HALİ:	<i>BEKAR</i>
EĞİTİM BİLGİLERİ	
LİSANSÜSTÜ	<i>2018, Fırat Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, ELAZIĞ</i>
LİSANS :	<i>2015, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ</i>
LİSE :	<i>2010, Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesi,ELAZIĞ</i>
İŞ DENEYİMİ	
	<i>Henüz bir iş deneyimim yok</i>
BİLDİĞİ YABANCI DİLLER	
	<i>İngilizce (C2)</i>
ARAŞTIRMA DENEYİMİ	
<i>(C, MATLAB, SOLIDWORKS, PROTEUS)</i>	
İLGİLENDİĞİ DİĞER BİLİMLER	
<i>✓ Sanat, sosyoloji.</i>	