T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY SİNİR AĞLARI DESTEKLİ PID İLE KUVVET ALTINDA ROBOT KOL KONTROLÜ VE PERFORMANS ANALİZİ

AYTUĞ BECENEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. GÜRKAN TUNA

EDİRNE- 2023

Aytuğ BECENEN'in hazırladığı "**Yapay Sinir Ağları Destekli PID İle Kuvvet Altında Robot Kol Kontrolü Ve Performans Analizi**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Mekatronik Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Yüksek Lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Prof. Dr. Gürkan TUNA	……
Doç. Dr. Hayrettin TOYLAN	……
Dr. Öğr. Üyesi Özcan ÇETİNKAYA	……

Tez Savunma Tarihi: 18/08/2023

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Gürkan TUNA
Tez Danışmanı ……

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

……..

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

18 / 08 / 2023

Aytuğ BECENEN
İmza

Yüksek Lisans Tezi

Yapay Sinir Ağları Destekli PID İle Kuvvet Altında Robot Kol Kontrolü Ve Performans Analizi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Robot kolları günümüzde birçok iş alanında kullanılmaktadır. Endüstride ve kişisel kullanımda robot kol performansları yapılan işin kalitesini etkilemektedir. Bu tez çalışmasında robot kollarının performansını etkileyen kontrol sistemleri üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu doğrultuda geleneksel bir PID denetleme sistemi ile yapay sinir ağları destekli PID denetleme sistemi karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında Solidworks çizim programında iki serbestlik derecesine sahip bir robot kol tasarlanmıştır. Tasarlanan robot kolun Matlab/Simulink ortamına aktarımı ile fiziksel modelin elde edilmesi sağlanmıştır. Matematiksel denklemlerle sistemin hareket denklemi oluşturulmuş ve Matlab/Simulink ortamında blok diyagramlar ile modellenmiştir. Matematiksel model ve fiziksel model karşılaştırılıp çıktıların eşleştiği kanıtlanmış yani üzerine çalışılan robot kol sisteminin doğruluğu ortaya konulmuştur. Ardından denetim sistemleri tasarlanmıştır. Tasarlanan denetim sistemleri ilk olarak normal şartlarda daha sonra robot uç noktasına dış kuvvet uygulanarak test edilmiştir. Bu testler ilk olarak referans değerler için ardından düz çizgi yörüngesi ve daire yörüngesi oluşturularak iki farklı durum için yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda yapay sinir ağları destekli modern denetim sisteminin geleneksel PID denetleme sistemine göre daha iyi sonuç verdiği ortaya konmuştur. Ayrıca dışarıdan uygulanan kuvvetlere karşı yapay sinir ağları destekli sistemin cevap verme tepkisinin daha iyi olduğu görülmüştür.

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 118

Anahtar Kelimeler : Robot kol, PID, Yapay sinir ağları, Yapay zeka

Master Thesis

Artificial Neural Networks Supported PID Robot Arm Control Under Force and Performance Analysis

Trakya University Institute of Natural Sciences and Applied Sciences

Mechatronics Engineering

ABSTRACT

Robot arms are used in many business areas today. In industry and personal use, robot arm performances affect the quality of the work done. In this thesis, a research on control systems affecting the performance of robot arms has been carried out. In this direction, a conventional PID control system and a PID control system supported by artificial neural networks are compared.

In this thesis, a robot arm with two degrees of freedom is designed in Solidworks drawing program. The physical model was obtained by transferring the designed robot arm to Matlab/Simulink environment. The equation of motion of the system was created with mathematical equations and expressed with block diagrams in Matlab/Simulink environment. The mathematical model and the physical model were compared and it was proved that the outputs matched, that is, the accuracy of the robot arm system studied was demonstrated. Then the control systems were designed. The designed control systems were first tested under normal conditions and then by applying external force to the robot endpoint. These tests were performed first for reference values and then for two different situations by creating a straight line trajectory and a circle trajectory. As a result of the study, it was revealed that the modern control system supported by artificial neural networks gives better results than the conventional PID control system. In addition, it has been observed that the response of the system supported by artificial neural networks against external forces is better.

Year : 2023

Number of Pages : 118

Keywords : Robot arm, PID, Artificial neural networks, Artificial intelligence

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ŞEKİLLER DİZİNİ x
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1
BÖLÜM 2 2
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 2
2.1. Giriş 2
2.2. Robot Kol Araştırılması 2
2.3. Denetim Sistemlerinin İncelenmesi 3
BÖLÜM 3 6
SİSTEM KİNEMATİĞİ 6
3.1. Giriş 6
3.2. Robot Kol Tasarımı 6
3.3. Robot Kolun Kinematik Analizi 8
3.3.1 Düz Kinematik 9
3.3.1.1. Konum 9
3.3.1.2 Hız 10
3.3.2 Ters Kinematik 10
3.3.2.1 Konum 11
3.3.2.2 Hız 12
3.3.3 Hareket Tasarımı 13
3.3.3.1 Düz Çizgi Hareket Tasarımı 13
3.3.3.2 Daire Hareket Tasarımı 14
BÖLÜM 4 16
ROBOT KOL MODELİNİN DİNAMİĞİ 16
4.1. Giriş 16
4.2 Sistemin Toplam Enerjisi 16
4.2.1 Sistemin Toplam Kinetik Enerjisi 17

4.2.2 Sistemin Toplam Potansiyel Enerjisi 19
4.3 Sistemin Hareket Denklemleri: Lagrange-Euler Eşitliği 21
BÖLÜM 5 24
SİSTEMİN MATLAB-SİMULİNK MODELİNİN OLUŞTURULMASI 24
5.1. Giriş 24
5.2. Solidworks 3D Modelinin Oluşturulması 24
5.3 Solidworks Ortamından Matlab-Simulink Ortamına Aktarım 27
5.4 Matlab Modelinin Kinematik ve Kinetik Testlerinin Yapılması 28
5.4.1 Matematiksel ve Fiziksel Modellerin Kinematik Çıktılarının Karşılaştırılması 28
5.4.1.1 Düz Kinematik Çıktılarının Karşılaştırılması 29
5.4.1.2 Ters Kinematik Çıktılarının Karşılaştırılması 31
5.4.2 Matematiksel ve Fiziksel Modellerin Kinetik Çıktılarının Karşılaştırılması 36
BÜLÜM 6 39
DENETİM SİSTEMLERİ TASARIMI 39
6.1 Giriş 39
6.2 PID Denetim Sisteminin Tasarlanması 39
6.2.1 PID Modeli 39
6.2.2 PID Denetleyicinin Fiziksel Modele Dahil Edilmesi 40
6.2.2.1 PID Katsayılarının Belirlenmesi 42
6.2.3 PID Denetleyicinin Benzetim Çıktıları 43
6.3 Hibrit Denetim Sistemi (PID+ Yapay Sinir Ağları) 47
6.3.1 PID Denetleyici Sistemine Yapay Sinir Ağlarının Dahil Edilmesi 49
6.3.2 Yapay Sinir Ağlarının Katsayılarının Belirlenmesi 51
6.3.3 Yapay Sinir Ağları Destekli Sistemin Benzetim Çıktıları 52
6.4 Tasarlanan Denetleme Sistemlerinin Karşılaştırılması 55
BÖLÜM 7 60
BENZETİM SONUÇLARI 60
7.1 Giriş 60
7.2 Durum 1: Düz Çizgi Girişi 60
7.2.1 PID Denetleme Çıktıları 61
7.2.2 Hibrit Denetim Sistemi (PID + Yapay Sinir Ağları) Çıktıları 70
7.3 Durum 2: Daire Girişi 79
7.3.1 PID Denetleme Çıktıları 79
7.3.2 Hibrit Denetim Sistemi (PID + Yapay Sinir Ağları) Çıktıları 88

BÖLÜM 8 97
SONUÇ 97
Öneriler 100
KAYNAKLAR 101

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

K_d	Türev Katsayısı
K_i	İntegral Katsayısı
e	Hata Değeri
I	Atalet Momenti
J	Jakobiyan Matrisi
KKK	Kayan Kipli Kontrol
L-E	Lagrange Euler
MLP	Ayrık Zamanlı Genelleştirilmiş Sinir Ağı
N-E	Newton Lagrange
p	Kontrol Katsayısı
P	Parametreler Vektörü
PID	Preportional Integral Derivative
R-L	Recursive Lagrange
T	Kinetik Enerji
U	Potansiyel Enerji
V	Giriş Ve Gizli Katmanları Bağlayan Ağırlıklar
W	Gizli Katmanları Ve Çıktı Katmanlarını Bağlayan Ağırlıklar
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Robot kolun taban parçası..... 5
Şekil 3.2. Robot kolun 1. uzvu..... 5
Şekil 3.3. Robot kolun 2. uzvu..... 5
Şekil 3.4. Robot kol Solidworks tasarımı..... 6
Şekil 3.5. Robot kol şematik gösterimi..... 7
Şekil 3.6. Robot kol kinematiği şeması..... 8
Şekil 3.7. Robot kol kinematiği trigonometrisi..... 9
Şekil 3.8. Referans düz çizgi yörüngesi..... 13
Şekil 3.9. Referans daire yörüngesi..... 14
Şekil 4.1. Robot kolun birinci uzvunun kinetik enerji geometrisi..... 17
Şekil 4.2. Robot kolun ikinci uzvunun kinetik enerji geometrisi..... 18
Şekil 4.3. Robot kolun birinci uzvunun potansiyel enerji geometrisi..... 19
Şekil 4.4. Robot kolun ikinci uzvunun potansiyel enerji geometrisi..... 20
Şekil 5.1. Taban parçası teknik çizimi..... 25
Şekil 5.2. Birinci uzuv üst görünüş..... 25
Şekil 5.3. Birinci uzuv yan görünüş..... 25
Şekil 5.4. İkinci uzuv üst görünüş..... 26
Şekil 5.5. İkinci uzuv yan görünüş..... 26
Şekil 5.6. Robot kolun montajlanmış görünüşü..... 26
Şekil 5.7. Robot kol temel blok diyagramı..... 27
Şekil 5.8. Düz kinematik model Simulink blok diyagram şeması..... 29
Şekil 5.9. Robot kol uç noktası yörünge grafiği..... 30
Şekil 5.10. Robot kol çizgisel hız grafiği..... 30
Şekil 5.11. Ters kinematik model Simulink blok diyagram şeması..... 31
Şekil 5.12. Kinematik model için robot kol bloğu iç modellemesi..... 31
Şekil 5.13. Düz çizgi yörüngesi için giriş pozisyonları..... 32
Şekil 5.14. Düz çizgi yörüngesi takip edilirken açısal pozisyon grafiği..... 32
Şekil 5.15. Daire yörüngesi için giriş pozisyonları..... 33

Şekil 5.16. Daire yörüngesi takip edilirken açısal pozisyon grafiği..... 33
Şekil 5.17. Düz çizgi yörüngesi için giriş hızları..... 34
Şekil 5.18. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız grafiği..... 34
Şekil 5.19. Daire yörüngesi için giriş hızları..... 35
Şekil 5.20. Daire yörüngesi için açısal hız grafiği..... 35
Şekil 5.21. Robot kol kinetik model Simulink diyagram şeması..... 36
Şekil 5.22. Kinetik model için robot kol bloğu iç modellemesi..... 36
Şekil 5.23. Kinetik sistem açısal pozisyon grafiği..... 37
Şekil 5.24. Kinetik sistem açısal hız grafiği..... 38
Şekil 6.1. Sisteme PID denetleyici eklenmiş blok diyagram şeması..... 40
Şekil 6.2. Sisteme ters kinematik fonksiyonun ve hareket yörüngelerinin eklendiği blok diyagram şeması..... 41
Şekil 6.3. Sisteme grafik ekranlarının eklendiği blok diyagram şeması..... 41
Şekil 6.4. PID denetleyici..... 42
Şekil 6.5. Referans girişler için açısal pozisyon grafiği (PID)..... 43
Şekil 6.6. Referans giriş değerleri ile oluşan robot uç noktası yörünge grafiği (PID) 44
Şekil 6.7. Referans giriş değerleri ile açısal hız grafiği (PID)..... 45
Şekil 6.8. 8 Newton büyüklüğünde bozucu etki yaratan dış kuvvet..... 45
Şekil 6.9. Referans giriş değerleri için 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (PID)..... 46
Şekil 6.10. 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında referans giriş değerleri ile robot uç noktası yörünge grafiği (PID)..... 46
Şekil 6.11. 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında referans giriş değerleri ile oluşan açısal hız grafiği (PID)..... 47
Şekil 6.12. Biyolojik sinir ağları..... 48
Şekil 6.13. Yapay sinir ağı hücresi..... 48
Şekil 6.14. Yapay sinir ağı katmanları..... 49
Şekil 6.15. Yapay sinir ağları bloğu..... 50
Şekil 6.16. Sisteme yapay sinir ağı eklenmesi ile oluşan blok diyagram şeması 50
Şekil 6.17. Yapay sinir ağları bloğu parametreleri..... 51
Şekil 6.18. Referans girişler için açısal pozisyon grafiği (YSA)..... 52
Şekil 6.19. Referans giriş değerleri ile oluşan robot uç noktası yörünge grafiği (YSA)..... 53
Şekil 6.20. Referans giriş değerleri ile açısal hız grafiği (YSA)..... 53

Şekil 6.21. Referans giriş değerleri için 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (YSA)..... 54
Şekil 6.22. 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında referans giriş değerleri ile robot uç noktası yörünge grafiği (YSA)..... 54
Şekil 6.23. 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında referans giriş değerleri ile oluşan açısal hız grafiği (YSA)..... 55
Şekil 6.24. İlk ekleme uygulanan 8 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi..... 56
Şekil 6.25. İkinci ekleme uygulanan 8 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi..... 56
Şekil 6.26. İlk ekleme uygulanan 40 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi..... 57
Şekil 6.27. İkinci ekleme uygulanan 40 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi..... 57
Şekil 6.28. İlk ekleme uygulanan 80 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi..... 58
Şekil 6.29. İkinci ekleme uygulanan 80 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi..... 58
Şekil 6.30. İlk ekleme uygulanan 80 N büyüklüğündeki devamlı kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi..... 59
Şekil 6.31. İkinci ekleme uygulanan 80 N büyüklüğündeki devamlı kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi..... 59
Şekil 7.1. Referans düz çizgi yörüngesi..... 60
Şekil 7.2. Düz çizgi yörüngesi için açısal pozisyon grafiği (PID)..... 61
Şekil 7.3. Düz çizgi yörüngesi için açısal pozisyon hataları (PID)..... 62
Şekil 7.4. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız grafiği (PID)..... 62
Şekil 7.5. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız hataları (PID)..... 63
Şekil 7.6. Düz çizgi yörüngesi çizgisel pozisyon grafiği (PID)..... 63
Şekil 7.7. Düz çizgi yörüngesi çizgisel hız grafiği (PID)..... 64
Şekil 7.8. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (PID).... 64
Şekil 7.9. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon hataları (PID)... 65
Şekil 7.10. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal hız grafiği (PID)..... 65
Şekil 7.11. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal hız hataları (PID)..... 66
Şekil 7.12. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında çizgisel pozisyon grafiği (PID). 67

Şekil 7.13. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında çizgisel hız grafiği (PID)..... 67
Şekil 7.14. Referans düz çizgi yörüngesi..... 68
Şekil 7.15. PID denetiminde robot kol uç noktası düz çizgi yörüngesi..... 68
Şekil 7.16. PID denetiminde kuvvet altında robot kol düz çizgi yörüngesi..... 68
Şekil 7.17. Robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (PID)..... 69
Şekil 7.18. Kuvvet altında robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (PID)..... 69
Şekil 7.19. Düz çizgi yörüngesi için açısal pozisyon grafiği (YSA)..... 70
Şekil 7.20. Düz çizgi yörüngesi için açısal pozisyon hataları (YSA)..... 71
Şekil 7.21. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız grafiği (YSA)..... 71
Şekil 7.22. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız hataları (YSA)..... 72
Şekil 7.23. Düz çizgi yörüngesi çizgisel pozisyon grafiği (YSA)..... 72
Şekil 7.24. Düz çizgi yörüngesi çizgisel hız grafiği (YSA)..... 73
Şekil 7.25. Düz çizgi yörüngesi kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (YSA)..... 73
Şekil 7.26. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon hataları (YSA). 74
Şekil 7.27. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal hız grafiği (YSA)..... 74
Şekil 7.28. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal hız hataları (YSA)..... 75
Şekil 7.29. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında çizgisel pozisyon grafiği (YSA)..... 75
Şekil 7.30. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında çizgisel hız grafiği (YSA)..... 76
Şekil 7.31. Referans düz çizgi yörüngesi..... 77
Şekil 7.32. YSA destekli PID denetiminde robot kol uç noktası düz çizgi yörüngesi 77
Şekil 7.33. YSA destekli PID denetiminde kuvvet altında robot kol düz çizgi yörüngesi..... 78
Şekil 7.34. Robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (YSA)..... 78
Şekil 7.35. Kuvvet altında robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (YSA)..... 78
Şekil 7.36. Referans daire yörüngesi..... 79
Şekil 7.37. Daire yörüngesi için açısal pozisyon grafiği (PID)..... 80
Şekil 7.38. Daire yörüngesi için açısal pozisyon hataları (PID)..... 80
Şekil 7.39. Daire yörüngesi için açısal hız grafiği (PID)..... 81
Şekil 7.40. Daire yörüngesi için açısal hız hataları (PID)..... 81

Şekil 7.41. Daire yörüngesi çizgisel pozisyon grafiği (PID)..... 82
Şekil 7.42. Daire yörüngesi çizgisel hız grafiği (PID)..... 82
Şekil 7.43. Daire yörüngesi kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (PID)..... 83
Şekil 7.44. Daire yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon hataları (PID)..... 83
Şekil 7.45. Daire yörüngesi kuvvet altında açısal hız grafiği (PID)..... 84
Şekil 7.46. Daire yörüngesi için kuvvet altında açısal hız hataları (PID)..... 84
Şekil 7.47. Daire yörüngesi için kuvvet altında çizgisel pozisyon grafiği (PID)..... 85
Şekil 7.48. Daire yörüngesi için kuvvet altında çizgisel hız grafiği (PID)..... 85
Şekil 7.49. Referans daire yörüngesi..... 86
Şekil 7.50. PID denetiminde robot kol uç noktası daire yörüngesi..... 86
Şekil 7.51. PID denetiminde kuvvet altında robot kol daire yörüngesi..... 86
Şekil 7.52. Robot kolun istenilen daire yörüngesini izlemesi için gerekli tork (PID) 87
Şekil 7.53. Kuvvet altında robot kolun istenilen daire yörüngesini izlemesi için gerekli tork (PID)..... 87
Şekil 7.54. Daire yörüngesi için açısal pozisyon grafiği (YSA)..... 88
Şekil 7.55. Daire yörüngesi için açısal pozisyon hataları (YSA)..... 89
Şekil 7.56. Daire yörüngesi için açısal hız grafiği (YSA)..... 89
Şekil 7.57. Daire yörüngesi için açısal hız hataları (YSA)..... 90
Şekil 7.58. Daire yörüngesi çizgisel pozisyon grafiği (YSA)..... 90
Şekil 7.59. Daire yörüngesi çizgisel hız grafiği (YSA)..... 91
Şekil 7.60. Daire yörüngesi kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (YSA)..... 91
Şekil 7.61. Daire yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon hataları (YSA)..... 92
Şekil 7.62. Daire yörüngesi kuvvet altında açısal hız grafiği (YSA)..... 92
Şekil 7.63. Daire yörüngesi için kuvvet altında açısal hız hataları (YSA)..... 93
Şekil 7.64. Daire yörüngesi için kuvvet altında çizgisel pozisyon grafiği (YSA)..... 93
Şekil 7.65. Daire yörüngesi için kuvvet altında çizgisel hız grafiği (YSA)..... 94
Şekil 7.66. Referans daire yörüngesi..... 95
Şekil 7.67. YSA destekli PID denetiminde robot kol uç noktası daire yörüngesi..... 95
Şekil 7.68. YSA destekli PID denetiminde kuvvet altında robot kol daire yörüngesi 95
Şekil 7.69. Robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (YSA)..... 96
Şekil 7.70. Kuvvet altında robot kolun istenilen daire yörüngesini izlemesi için gerekli tork (YSA)..... 96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Sistemin Fiziksel Özellikleri..... 8
Çizelge 6.1. PID Katsayılarının İstenilen Çıktıya Etkileri..... 42
Çizelge 6.2. PID Katsayı Değerleri..... 43

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Robotik, robot kol ve kontrol sistemleri teknolojik alandaki yeniliklerle birlikte gelişme göstermiş ve insan hayatında birçok alanda kendisine yer bulmuştur. Robot kol sistemleri yapılan işte kolaylık sağlamakta, yapılan işin hızını arttırmakta, ağır ve tehlikeli işlerde iş güvenliği konusunda çalışanlara fayda sağlamaktadır. Bu sebeple endüstride ve kişisel kullanımda birçok alanda robot kollar tercih edilmektedir.

Robot kolların popülerleşmesi ve kullanım alanlarının artması ile birlikte daha verimli nasıl kullanılabileceği de araştırma konusu haline gelmiştir. Bu nedenle robot kol kontrolü üzerine yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu doğrultuda, bu tez çalışmasında iki serbestlik derecesine sahip bir robot kolun geleneksel bir PID denetleme sistemi ile modern yapay zeka algoritmaları uygulanmış bir PID denetleme sisteminin karşılaştırılması ve hangi kontrol sisteminin daha iyi sonuç vereceğinin kıyaslanması amaçlanmıştır. Böylece hem endüstriyel alana hem de akademik çalışmalara ve araştırmalara katkı sağlamak hedeflenmiştir.

Bu tez çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümü olup tez çalışmasının amacı ve bölümleri hakkında bilgiler içermektedir. İkinci bölümde konu ile ilgili literatür araştırmalarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde sistem kinematiği, düz kinematik ve ters kinematik olmak üzere iki adımda işlenmiştir. Ayrıca hareket tasarımı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde robot kol modelinin dinamiği anlatılmıştır ve sistemin hareket denklemleri verilmiştir. Beşinci bölümde robot kol sisteminin Matlab/Simulink modelinin oluşturulması anlatılmış ve sistemin matematiksel modeli ile fiziksel modeli karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümünde denetim sistemlerinin tasarımı anlatılmıştır. Yedinci bölümde benzetim sonuçları verilmiştir. Sekizinci bölümde ise sonuç bölümüdür.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Giriş

Robot kol sistemleri teknolojik gelişmelerle beraber birçok alanda kullanılmaya başlamıştır. Bu durum robot kol sistemlerinin popüler hale gelmesine ve bu konu üzerine yapılan araştırmaların artmasına sebep olmuştur. Bu nedenle robot kol sistemleri ile ilgili yapılan akademik çalışmalarda artış göstermiştir. Bu bölümde robot kol sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir.

2.2. Robot Kol Araştırılması

Robot kol sistemleri günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanların başında endüstri, askeri çalışmalar, sanayi üretim bandı, tıp gibi sektörler gelmektedir. Robot kollar sahip oldukları eklem yapıları, kullanım alanları, özellikleri, sistemlerinde kullanılan kontrolcü türü ve yöntemleri ya da çalışma prensiplerine göre sınıflandırılabilirler (Gürgüze & Türkoğlu, 2019). Fakat robot kolları genel olarak üç başlık altında incelemek mümkündür. Bu başlıklar endüstriyel robotlar, mobil robotlar ve haptik sistemli robotlar olarak sıralanabilir (Yıldırım, 2021).

Endüstriyel robotlar, uzvunun yapısına göre kartezyen robotlar, silindirik robotlar, küresel robotlar, mafsallı robotlar ve scara tip robotlar şeklinde sınıflandırılmaktadır (Sciavicco & Siciliano, 1996).

Mobil robotlar ise insansı robotlar, sürü robotları, çoklu robotlar, işbirlikçi robotlar, mikro nano robotlar ve biyo ilhamlı robotlar olarak sıralanabilir.

Haptik sistemli robotlar ise insan bilgisayar etkileşimin duyularla sağlandığı, geliştirilmiş 3 boyutlu sanal ortamların veya sisteme bağlı aygıtların çeşitli arayüz aygıtlarıyla manipüle edildiği robot teknolojisidir (Gürgüze & Türkoğlu, 2019).

2.3. Denetim Sistemlerinin İncelenmesi

Robot kol sistemlerine ilgi arttıkça bu konu ile ilgili yapılan çalışmalarda artmıştır. Robot kol sistemleri ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar robot kol sistemlerinin tasarımı, modellenmesi ve kontrolü üzerinde yoğunlaşmıştır.

Yapılan bir yüksek lisans tez çalışmasında üç serbestlik derecesine sahip bir scara robot kol farklı denetleyici türleri (P, PI, PD VE PID) kullanarak hangi denetleyicinin daha verimli çalıştığı bakımından incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda en verimli yöntemin PID kontrol yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Yıldırım, 2021).

Yapılan bir başka yüksek lisans tez çalışmasında altı eksenli bir robot kolun Sugeno bulanık mantık kontrolcü, Mamdani bulanık mantık kontrolcü ve PID kontrolcü ile konum kontrolü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbiri ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmada uygulanan kontrol yöntemlerinden en iyi cevaplar Sugeno tipi bulanık mantık denetleyici ile elde edilmiştir (Ebioğlu, 2021).

Bir diğer çalışmada iki serbestlik dereceli robotik kolun modellenmesi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin benzetimi dinamik denklemler üzerinden oluşturulmuş ve Kayar Mod Kontrol (SMC) ve Oransal İntegral-Türev (PID) kontrol yöntemlerinin performansları test edilmiştir. Çalışma sonucunda SMC yönteminin en iyi sonuçları verdiği görülmüştür (Hüseyinoğlu & Abut, 2018).

Başka bir çalışmada iki serbestlik dereceli robot kolunun modellenmesi, benzetimi ve kontrolü üzerine çalışılmıştır. Sistemin, MATLAB/Simulink kullanılarak benzetimi yapılmış ve PID denetleyici yardımı ile konum kontrolü yapılmıştır. Çalışma sonucunda parametre değerlerindeki değişiklikle ilişkili aşım ve salınımı önlemek için PID denetleyicilerinin kazançlarının her an ayarlanması ve döndürülmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Ghaleb & Aly, 2018).

Yapılan bir başka çalışmada 3 DOF mafsallı robot kolu için konum kontrolü araştırılmıştır. Testleri Matlab/Simulink ortamında yapılan çalışmada robot kolun gerçek

konumunu elde etmek için PID denetleyici kullanılmıştır. PID kazançları Ziegler Nichol yöntemi kullanılarak ayarlanan çalışmada konum kontrolü için en iyi katsayı değerlerinin seçilebilmesi amaçlanmıştır (Naing, Aung, & Thike, 2018).

Yapılan bir çalışmada bir PID parametresi seçerek robot kolunun konum denetleyicisi tasarlanmıştır. Ardından PID kontrolörü için iki çeşit parametre ayarlama yöntemini karşılaştırmıştır. Birincisi genetik algoritma ile kontrolör tasarımı, ikincisi ise Ziegler ve Nichols yöntemi ile kontrolör tasarımıdır. Çalışmanın sonucunda önerilen PID parametrelerinin genetik algoritma ile ayarlanmasının Ziegler & Nichols yönteminden daha iyi olduğu bulunmuştur (Youns, Attya, & Abdulla, 2013).

Yapılan bir tez çalışmasında üç serbestlik dereceli bir robot kolun arduino ile pozisyon kontrolü sağlanmıştır. Yapılan çalışmada Matematiksel olarak hesaplanan ileri ve ters kinematik denklemlerin gerçeklenen robot kol ile eşleşip eşleşmediği kontrol edilmiştir. Teorik olarak hesaplanan uç nokta konumu ile referans açı verilerek çalıştırılan robot kol uç noktasının birbirine yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Katipoğlu, 2013).

Bir tez çalışmasında üç serbestlik dereceli bir robot kolun geri beslemeli kontrol, PID kontrol ve yapay sinir ağları ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Üç farklı kontrol yönteminin sonuçları karşılaştırılmış ve yapay sinir ağları ile kontrolün daya iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir (Berki, 2013).

Yapılan bir yüksek lisans tez çalışmasında dört serbestlik derecesine sahip bir robot kolun PID kontrolcü ve 2-DOF PID kontrolcü ile konum kontrolü yapılmıştır. Her iki kontrolcünün de parametreleri parçacık sürü optimizasyonu yöntemi ile belirlenmiş ve çalışma sonucunda 2 DOF PID kontrolcünün performansının PID kontrolcüye göre daha iyi olduğu kanısına varılmıştır (Yüksel, 2018).

Bir çalışmada iki serbestlik derecesine sahip robot kolun pozisyon kontrolü yapılmıştır. Öncelikle PID kontrolcü tasarlanmış ardından kontrol parametreleri ilk olarak deneme yanılma yoluyla elde edilmiştir. Daha sonra PID parametrelerinin belirlenmesinde Genetik Algoritma ve Arı Algoritması kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda Arı Algoritmasının daha verimli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Karakoyun, Çakan, & Kalyoncu, 2022).

Yapılan bir çalışmada robot kol 3 boyutlu olarak modellenmiş ve Matlab ortamında gerçek zamanlı olarak benzetimi yapılmıştır. Robot kolun eklem hareketlerini

kontrol etmek amacı ile yapay sinir ağını optimize eden yapısal genetik algoritma kullanılmıştır. Genetik Algoritma optimizasyon yöntemi ve sinir ağları 5 serbestlik dereceli robot kol için birleştirilerek elde edilen sonuçlar 150 popülasyon boyutunun en iyi sonuçları verdiğini göstermiştir (Pajaziti & Cana, 2014).

Yapılan bir çalışmada iki serbestlik dereceli bir robot kolun bozucu etki altında yörünge kontrolü yapılmıştır. Robot kol sistemine ait kontrolcü tasarımı MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Robot kolun dışarıdan gelen etki altında kontrolü için Kayan Kipli Kontrol (KKK) yapısı tasarlanmış. Bu çalışmanın sonucunda KKK sayesinde iki serbestlik derecesine sahip robot kolun yörünge izlemesini dışarıdan uygulanan bozucu etkilere rağmen başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir (İlgen, Durdu, Gülbahçe, & Çakan , 2020).

Yapılan bir başka çalışmada dikey iniş kalkış yapabilen (VTOL) bir sistemin eğim açısının kontrol edilebilmesi için YSA tabanlı PID denetleme sistemi ile bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. VTOL sisteminin modellemesi Matlab/Simulink ortamında yapılmıştır ve test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda YSA tabanlı PID denetleme sisteminin geleneksel PID denetleme sistemine göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir (Taşören, Gökçen, Soydemir, & Şahin, 2020).

Yapılan bir çalışmada Matlab/Simulink kullanarak PID denetleyicinin otomatik ayarı yapılmıştır. Ardından otomatik ayarlı PID denetleyici ve yapay sinir ağları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda otomatik ayarlı PID denetleyicinin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Özellikle çok sayıda denetleyicinin aynı anda ayarlanması gereken durumlarda otomatik ayarlı PID'nin daha avantajlı olduğu ifade edilmiştir (Kadu, Bhusal, & Lukare, 2015).

Yapılan bir çalışmada yük taşıma görevleri için çift kollu bir robotik sistem üzerine çalışılmıştır. Kayan kip denetleyici (SMC) ile PID denetleyicinin karşılaştırıldığı bu sistemde SMC'nin geleneksel PID denetleyiciden daha iyi performans gösterdiğini ve daha doğru bir yörünge takibi sağladığı ortaya koymuştur (Yağız, Hacıoğlu , & Arslan, 2010).

BÖLÜM 3

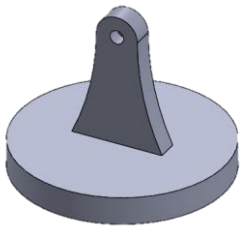
SİSTEM KİNEMATİĞİ

3.1. Giriş

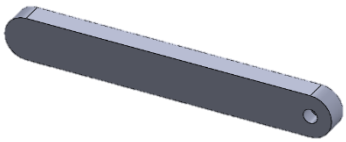
Bu bölümde, bu tez çalışması için tasarlanan robot kolun tanıtımı yapılacaktır. Robot kola ait sistem kinematiği anlatılacaktır. Robot kolun kinematik denklemlerinin oluşturulması, ileri ve ters kinematik denklemlerinin elde edilmesi üzerinde durulacaktır. Ayrıca robot kol hareket alanının tanımlanması ve istenilen hareket durumlarının oluşturulması ve uygulanmasından bahsedilecektir.

3.2. Robot Kol Tasarımı

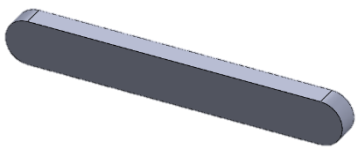
Bu tez çalışmasında kullanılmak üzere Solidworks katı çizim programında bir taban ve iki uzuvdan oluşan üç parçalı iki serbestlik derecesine sahip bir robot kol tasarlanmıştır. Robot kolun her bir parçasının ve birleştirilmiş halinin çizim programı ortamında görünüşü Şekil 3.1. ile Şekil 3.4. arası verilen numaralı görsellerdeki gibidir.



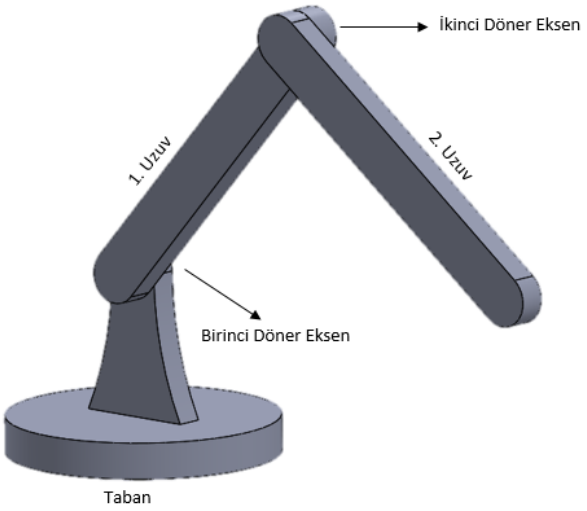
Şekil 3.1. Robot kolun taban parçası



Şekil 3.2. Robot kolun 1. uzvu

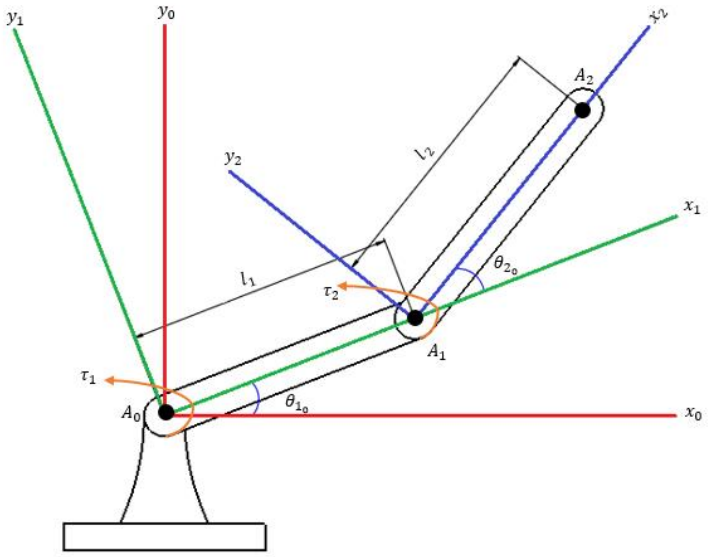


Şekil 3.3. Robot kolun 2. uzvu



Şekil 3.4. Robot kol Solidworks tasarımı

Robot kolun tabanı hareketsiz parçadır ve yere sabitlenmiştir. Birinci ve ikinci uzuvlar ise hareketli parçalardır. Taban ile birinci uzvun bağlandığı yer birinci dönel eksen, birinci uzuv ile ikinci uzvun bağlandığı yer ise ikinci dönel eksendir. Birinci uzvun hareket ettirilebilmesi için birinci dönel eksene, ikinci uzvun hareketi için ise ikinci dönel eksene hareket ya da tork uygulanabilir. Birinci uzuv θ_1 açısı ile ikinci uzuv ise θ_2 açısı ile hareket ettirilmektedir. Bir başka deyişle θ_1 ve θ_2 döner eksenin açısal pozisyonunu ifade etmektedir. İki serbestlik derecesine sahip robot kolun şematik gösterimi Şekil 3.5'te ve parametrelerine ait Çizelge 3.1'de verilmiştir.



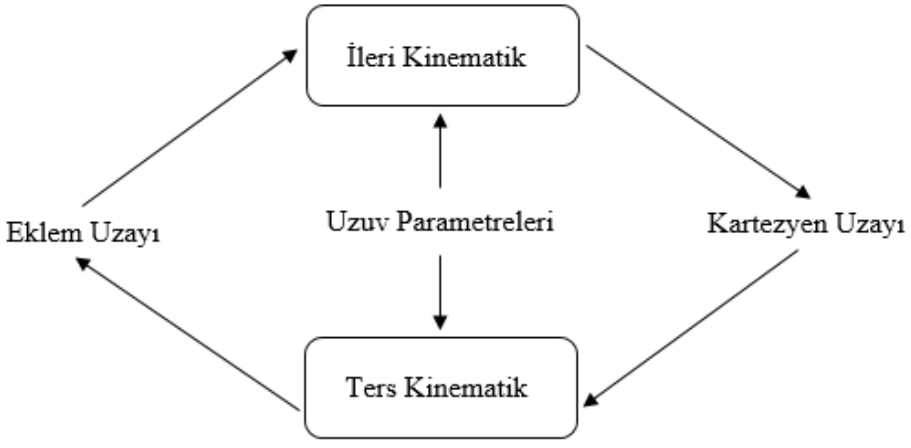
Şekil 3.5. Robot kol şematik gösterimi

Çizelge 3.1. Sistemin Fiziksel Özellikleri

Parametreler	Semboller	Büyüklük	Birim
1. uzvun uzunluğu	l_1	0.2	Metre
2. uzvun uzunluğu	l_2	0.2	Metre
1. uzvun ağırlığı	m_1	0.10060	Kg
2. uzvun ağırlığı	m_2	0.10139	Kg
1. eklemin başlangıç pozisyonu	θ_{1_o}	60	Derece
2. eklemin başlangıç pozisyonu	θ_{2_0}	240	Derece
1. mafsal torku	τ_1	2.5884	Nm
2. mafsal torku	τ_2	5.3480	Nm
1. uzvun atalet momenti	I_1	$427.226*10^{-6}$	Kg.m^2
2. uzvun atalet momenti	I_2	$435.274*10^{-6}$	Kg.m^2

3.3. Robot Kolun Kinematik Analizi

Robot kol kinematiği eklem konumları ile robot kolunun uç nokrasının kartezyen konumu arasındaki matematiksel ilişkiyi tanımlar (Angel & Viola, 2018). Bir başka deyişle robot kolun döner eklemlerine uygulanan açı ile uzvun son noktası arasındaki bağlantının matematiksel olarak açıklanmasını sağlamaktadır. Robot kol kinematiği ileri kinematik ve ters kinematik olarak ikiye ayrılmaktadır. İleri kinematik eklem uzayından kartezyen uzayına ulaşılmasını sağlarken, ters kinematik kartezyen uzayından eklem uzayına ulaşılmasını sağlar. Robot kol kinematiği şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.

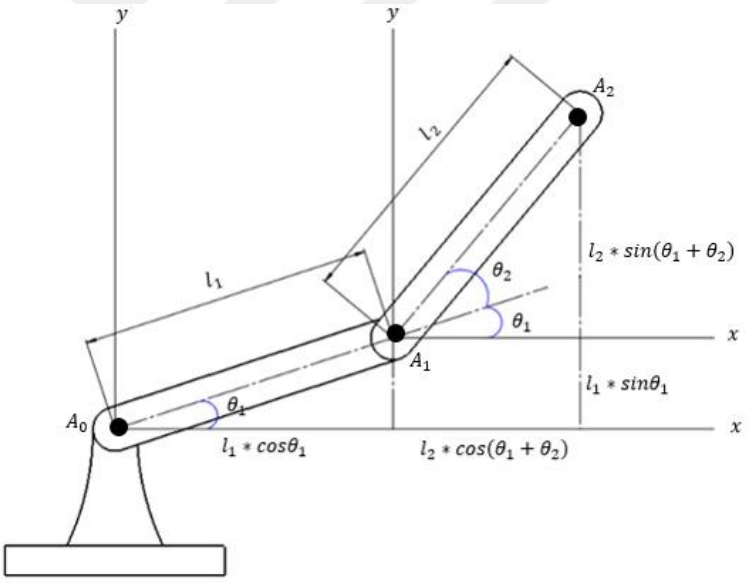


Şekil 3.6. Robot kol kinematiği şeması

Bir başka ifade ile ileri kinematik robot kol eklemine uygulanan açı ile uzvun son noktasını belirlemeyi sağlarken ters kinematik uzvun son noktasından yola çıkarak uygulanması gereken açıyı bulmayı sağlamaktadır. Robot kol kinematiği sayesinde robot kola ait konum, hız, ivme, tork ve kuvvet analizleri yapılabilir.

3.3.1 Düz Kinematik

Düz kinematik ya da ileri kinematik olarak ifade edilen yöntem robot kolun dönel eksenlerinin sahip olduğu açılardan yola çıkarak robot kolun uç noktasının konumunun belirlenmesini sağlayan yöntemdir. Robot kolun dönel eksenlerine uygulanan açılar robot kolun son uzvunun uç noktasının ulaştığı konumu bulmak için kullanılır. İleri kinematik denklemler sayesinde robot kola ait konum analizi, hız analizi ve ivme analizi yapılabilmektedir. İki serbestlik dereceli robot kola ait ileri kinematik denklemlerin trigonometrik olarak hesaplanışı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Robot kol kinematiği trigonometrisi

3.3.1.1. Konum

İleri kinematik denklemlerinin ilk adımı robot kolun son uzvunun dönel eksenlere uygulanan açılara bağlı olarak ulaştığı konumu belirlemektir. Şekil 3.7'de iki serbestlik dereceli robotun konum denklemlerinin trigonometri yardımı ile nasıl hesaplanabileceği gösterilmiştir. Birinci dönel eksene uygulanan θ_1 açısı ve ikinci dönel eksene

uygulanan θ_2 açısının robot kolun uç noktasını ulaştırdığı konum (3.1) ve (3.2) numaralı eşitliklerdeki denklemler ile hesaplanabilmektedir.

$$x = l_1 * \cos\theta_1 + l_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.1}$$

$$y = l_1 * \sin\theta_1 + l_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.2}$$

Başka bir deyişle (3.1) ve (3.2) denklemleri iki serbestlik dereceleri robot kolun ileri kinematik konum denklemleridir. Bu denklemlerin matris formunda gösterimi ise (3.3) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$A_2 = \begin{bmatrix} A_{2_x} \\ A_{2_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 * \cos\theta_1 + l_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 * \sin\theta_1 + l_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

3.3.1.2 Hız

Robot kola ait ileri kinematik konum denklemleri için giriş parametreleri θ_1 ve θ_2 iken hız denklemleri için giriş parametreleri $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$'dir. Başka bir ifade ile hız denklemleri konum denklemlerinin zamana göre türev alınmış halleridir. Hız denklemleri robot kolun uç noktasının hızlarını vermektedir. İki serbestlik derecesine sahip robot kolun ileri kinematik hız denklemleri (3.4) ve (3.5) numaralı eşitliklerde verilmiştir.

$$V_x = -l_1 * \sin\theta_1 * \dot{\theta}_1 + (-l_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) * (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \tag{3.4}$$

$$V_y = l_1 * \cos\theta_1 * \dot{\theta}_1 + l_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) * (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \tag{3.5}$$

Hız denklemlerinin matris formunda gösterimi ve Jakobiyan matrisi (3.7) numaralı eşitlikteki gibidir. V, uç noktasının doğrusal hız vektörüdür. J, Jakobiyan matrisi ifade etmektedir, $\dot{\theta}$ ise açısal hızı ifade etmektedir.

$$V = J * \dot{\theta} \tag{3.6}$$

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 * \sin\theta_1 - l_2 \sin(\theta_2 + \theta_1) & -l_2 * \sin(\theta_2 + \theta_1) \\ l_1 * \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_1) & l_2 * \cos(\theta_2 + \theta_1) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

3.3.2 Ters Kinematik

Robot kol ters kinematik analizi robot kola ait son uzvun uç noktasının pozisyonundan yola çıkarak robot kolun o konumda bulunabilmesi için dönel eksenlere hangi açıların uygulanmış olabileceğinin bulunmasını sağlamaktadır. İleri kinematik

analizde dönel eksenlere uygulanan açılardan yola çıkarak konum bulunurken ters kinematik analizde ise konumdan yola çıkarak açılar elde edilmektedir. Yani bir robotik kolun ters kinematiği, robot kolun uç noktasının kartezyen koordinatları verilen konumunun robot kolun eklem değişkenlerine uygulanan açının bulunmasını sağlayan çözümüdür.

3.3.2.1 Konum

İki serbestlik dereceli bir robot kolun ters kinematik denklemlerine ulaşmak için ileri kinematik denklemlerinden yola çıkılır. (3.1) ve (3.2) numaralı ileri kinematik denklemleri kullanılarak hesaplamalar (3.8) ile (3.32) numaralı denklemlerde ifade edilen şekilde yapılır.

$$x - l_1 * \cos\theta_1 = l_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.8}$$

$$y - l_1 * \sin\theta_1 = l_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.9}$$

$$(x - l_1 * \cos\theta_1)^2 = (l_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2))^2 \tag{3.10}$$

$$(y - l_1 * \sin\theta_1)^2 = (l_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2))^2 \tag{3.11}$$

$$x^2 - 2l_1 * \cos\theta_1 * x + (l_1)^2 * \cos^2\theta_1 = (l_2)^2 * \cos^2(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.12}$$

$$y^2 - 2l_1 * \sin\theta_1 * y + (l_1)^2 * \sin^2\theta_1 = (l_2)^2 * \sin^2(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.13}$$

$$x^2 + y^2 + (l_1)^2 - 2l_1(x * \cos\theta_1 + y * \sin\theta_1) = (l_2)^2 \tag{3.14}$$

(3.12) ve (3.13) numaralı denklemler alt alta toplandığında (3.14) numaralı denklem elde edilmektedir. Böylece θ_2 değişkeninden kurtulmuş olunur. Bu sayede (3.14) numaralı denklemde θ_1 hariç tüm değişkenler bilinmektedir. Yani θ_1 yalnız bırakılarak denklem tek denklem tek bilinmeyen durumuna getirilir. θ_1 bulunduktan sonra (3.8) veya (3.9) numaraları denklemde yerine yazılarak θ_2 'ye kolaylıkla ulaşılabilinir.

$$\frac{x^2 + y^2 + (l_1)^2 - (l_2)^2}{2l_1} = (x * \cos\theta_1 + y * \sin\theta_1) \tag{3.15}$$

$$\frac{x^2 + y^2 + (l_1)^2 - (l_2)^2}{2l_1} = K \tag{3.16}$$

$$K = (x * \cos\theta_1 + y * \sin\theta_1) \tag{3.17}$$

$$K = (p * \sin\emptyset * \cos\theta_1 + p * \cos\emptyset * \sin\theta_1) \tag{3.18}$$

$$K = p[\sin\emptyset * \cos\theta_1 + \cos\emptyset * \sin\theta_1)] \tag{3.19}$$

$$K = p * \sin(\emptyset + \theta_1) \tag{3.20}$$

$$\frac{K}{p} = \sin(\emptyset + \theta_1) \tag{3.21}$$

(3.22) numaralı eşitlikte ifade edilen toplam fark formüllerinden yararlanılarak (3.24) numaralı denklem (3.25) numaralı denklem şeklinde ifade edilebilir.

$$\sin^2(\theta_1 + \emptyset) + \cos^2(\emptyset + \theta_1) = 1 \tag{3.22}$$

$$\sin^2(\theta_1 + \emptyset) = 1 - \cos^2(\emptyset + \theta_1) \tag{3.23}$$

$$\left(\frac{K}{p}\right)^2 = \sin^2(\emptyset + \theta_1) \tag{3.24}$$

$$\left(\frac{K}{p}\right)^2 = 1 - \cos^2(\emptyset + \theta_1) \tag{3.25}$$

$$\cos^2(\emptyset + \theta_1) = 1 - \left(\frac{K}{p}\right)^2 \tag{3.26}$$

$$\cos(\emptyset + \theta_1) = \sqrt{1 - \left(\frac{K}{p}\right)^2} \tag{3.27}$$

$$\tan(\emptyset + \theta_1) = \frac{K/p}{\sqrt{1-\left(\frac{K}{p}\right)^2}} \tag{3.28}$$

$$\emptyset + \theta_1 = atan2\left(K/p, \sqrt{1 - \left(\frac{K}{p}\right)^2}\right) \tag{3.29}$$

$$\theta_1 = atan2\left(K/p, \sqrt{1 - \left(\frac{K}{p}\right)^2}\right) - \emptyset \tag{3.30}$$

(3.30) numaralı denklemde $\emptyset$ yerine konulduğunda θ_1'e ulaşmamızı sağlayan eşitlik bulunmuş olur. (3.32) numaralı denklemde θ_1 yerine konulduğunda ise θ_2' ye ulaşılabilir.

$$\theta_1 = atan2\left(K/p, \sqrt{1 - \left(\frac{K}{p}\right)^2}\right) \pm \text{atan}(x, y) \tag{3.31}$$

$$\theta_2 = atan2(y - l_1 * sin\theta_1, x - l_1 * cos\theta_1) - \theta_1 \tag{3.32}$$

3.3.2.2 Hız

Ters kinematik hız denklemleri robot kolun uç noktasındaki çizgisel hızdan yola çıkarak robot kol eklemlerine uygulanmış olan açısal hızın bulunmasını sağlamaktadır. İki serbestlik dereceli robot kolun açısal hızları $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ şeklinde ifade edilmektedir. Bu tez çalışmasında açısal hızlar bulunurken Jakobiyan matristen yararlanılmıştır. Düz

kinematik hız denklemleri anlatılırken; V'nin, uç noktasının doğrusal hız vektörü olduğu J'nin, Jakobiyan matrisi ifade ettiği, $\dot{\theta}$'nın ise açısal hızı ifade ettiği anlatılmıştır. Ters kinematik hız denklemleri ise eşitlikte $\dot{\theta}$'ın yalnız bırakılmasıyla elde edilmektedir. Yani ters kinematik hız denklemi (3.34) numaralı denklemdeki gibi ifade edilir.

$$\dot{\theta}=J^{-1}*V \tag{3.33}$$

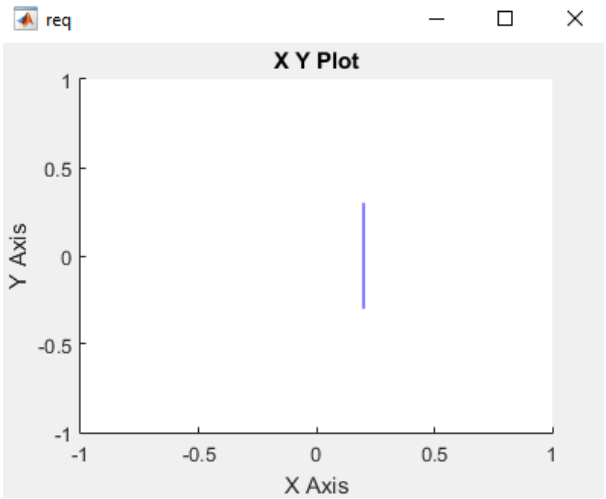
$$\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\ \dot{\theta}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-l_1*\sin\theta_1-l_2\sin(\theta_2+\theta_1) & -l_2*\sin(\theta_2+\theta_1)\\ l_1*\cos\theta_1+l_2\cos(\theta_2+\theta_1) & l_2*\cos(\theta_2+\theta_1)\end{bmatrix}^{-1}*\begin{bmatrix}V_x\\ V_y\end{bmatrix} \tag{3.34}$$

3.3.3 Hareket Tasarımı

Bu tez çalışmasında iki serbestlik derecesine sahip robot kolun takip etmesi istenilen iki farklı hareket tasarımı oluşturulmuştur. Bu hareket tasarımları düz çizgi ve daire şeklindedir. Bu sayede robot kol kontrolünün daha verimli gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Robot kolun geleneksel PID ve yapay sinir ağlarıyla desteklenmiş PID ile oluşturulan bu hareket tasarımlarını ne şekilde gerçekleştirdiği araştırılmıştır.

3.3.3.1 Düz Çizgi Hareket Tasarımı

Robot kolun bir düz çizgi üzerinde hareket etmesi için Matlab-Simulink ortamında bir fonksiyon oluşturulmuştur. Oluşturulan fonksiyon, robot kolun Şekil 3.8'de verilen grafikte olduğu gibi hareket etmesi için referans veridir. Yani bir başka deyişle robot kolun Şekil 3.8'de verilen referans çizgi gibi hareket etmesinin sağlanabilmesi için kontrol algoritması oluşturulmuştur.



Şekil 3.8. Referans düz çizgi yörüngesi

Bu düz çizgi birçok noktanın bir araya gelmesi ile oluşturulmuş olup konum ve hız Matlab kodu şu şekildedir.

Konum:

$$x = .2 * ones(l, length(t));\tag{3.35}$$

$$y = .3 * \sin(2 * pi * (1/5) * t);\tag{3.36}$$

$$r_{pos} = [x; y];\tag{3.37}$$

Hız:

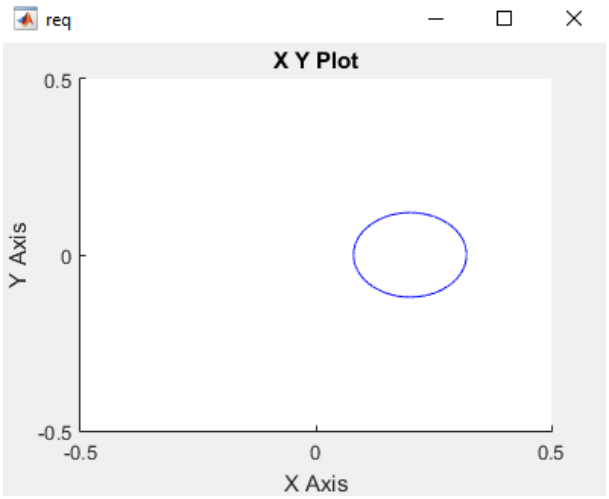
$$V_x = zeros(l, length(t));\tag{3.38}$$

$$V_y = .3 * 2 * pi * (1/5) * \cos(2 * pi * (1/5) * t);\tag{3.39}$$

$$r_{vel} = [V_x, V_y];\tag{3.40}$$

3.3.3.2 Daire Hareket Tasarımı

Robot kolun istenilen daire şeklinde hareket edebilmesi için bir referans daire tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrı bir fonksiyon bloğu ile istenilen referans daire hareketi tasarlanmıştır. Böylece referans tasarımla kontrol algoritması uygulanmış robot kolun takip ettiği yolun kıyaslaması rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Referans daire tasarımı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Referans daire yörüngesi

Bu daire birçok noktanın bir araya gelmesi ile oluşturulmuş olup konum ve hız Matlab kodu şu şekildedir.

Konum:

$$w = pi/2; \tag{3.41}$$

$$r = .12; \tag{3.42}$$

$$x = .2 + r * \sin(w * t)\,; \tag{3.43}$$

$$y = r * \cos(w * t)\,; \tag{3.44}$$

$$r_{pos} = [x; y]; \tag{3.45}$$

Hız:

$$V_x = r * w * \cos(w * t)\,; \tag{3.46}$$

$$V_y = -r * w * \sin(w * t)\,; \tag{3.47}$$

$$r_{vel} = [V_x, V_y]; \tag{3.48}$$

BÖLÜM 4

ROBOT KOL MODELİNİN DİNAMİĞİ

4.1. Giriş

Robot kol kontrolü önemli bir problemdir. Bu problemi çözmek için, robot kol sisteminin doğru dinamik modelin elde olması gerekir (Al-Qahtani, Mohammed, & Sunar, 2017). Bir robot kolun dinamiği robot kola ait hareket denklemlerinden oluşmaktadır. Hareket denklemleri dönel eklemlere uygulanan kuvvet veya torkla robot kolun konumunun hızının ve ivmesinin nasıl değiştiğini ifade eden denklemlerdir. Dönel eklemlere kuvvet ve tork uygulanarak zamana bağlı konum, hız, ivme değişimleri görülebileceği gibi konumu hızı ya da ivmesi bilinen robotun dönel eksenlerine uygulanan kuvvet ve torkta hesaplanabilmektedir.

Robot kolun dinamik denklemlerinin oluşturulabilmesi için izlenebilecek birden fazla yol vardır. Bunlar Lagrange-Euler (L-E), Recursive Lagrange (R-L), Newton-Euler (N-E), Genelleştirilmiş D'Alambert (G-D) prensibi gibi yaklaşımlardır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanlar L-E ve N-E yaklaşımlarıdır (Adar, Ören, & Kozan, 2013).

Bu tez çalışmasında dinamik denklemlerin oluşturulabilmesi için L-E metodu kullanılmıştır. Bu metot ayrıntılı olarak (4.3) numaralı başlık altında anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde L-E metodundan faydalanabilmek için gerekli olan sistemin toplam enerjisinin nasıl bulunduğu, sistemin toplam kinetik enerjisinin ve sistemin toplam potansiyel enerjisinin nasıl hesaplandığı açıklanmıştır.

4.2 Sistemin Toplam Enerjisi

Bu tez çalışmasında kullanılan dinamik denklemlerin oluşturulmasını sağlayan L-E metodunun prensibi sistemin toplam enerjisinin bulunmasından yola çıkmaktadır. İki

serbestlik derecesine sahip robot kol sisteminin toplam enerjisi robot kola ait birinci ve ikinci uzvun toplam kinetik ve toplam potansiyel enerjilerinin farkına eşittir. Sistemin toplam kinetik enerjisinin ve toplam potansiyel enerjisinin nasıl hesaplandığı ve L-E metoduyla hareket denklemlerinin nasıl oluşturulduğu alt başlıklar altında açıklanmaktadır.

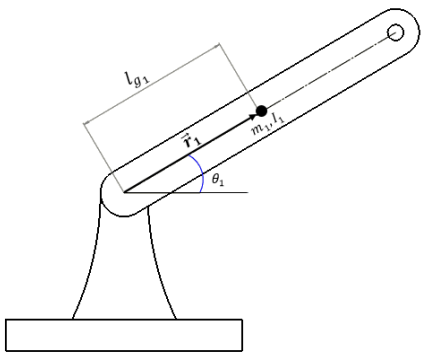
4.2.1 Sistemin Toplam Kinetik Enerjisi

Robot kol sisteminin toplam kinetik enerjisi robot kola ait tüm uzuvların ayrı ayrı kinetik enerjilerinin toplamına eşittir. Bu tez çalışmasında iki serbestlik dereceli bir robot kol kullanıldığı için toplam kinetik enerji hesaplanırken birinci ve ikinci uzvun ayrı ayrı kinetik enerjileri bulunup toplanarak toplam kinetik enerji elde edilmiştir.

Kinetik enerjinin (T) formülü (4.1) numaralı denklemde verildiği gibidir. Kinetik enerji, denklemin birinci kısmında yer alan kütle merkezinin doğrusal hızından kaynaklanan kinetik enerji ve ikinci kısmında yer alan açısal hızından kaynaklanan kinetik enerjinin toplamından oluşur.

$$T_i = \frac{1}{2} m_i {V_i}^2 + \frac{1}{2} I_i {\dot{\theta}_i}^2 \tag{4.1}$$

Bu denklemde V kütle merkezlerinin çizgisel hızlarını ifade etmektedir, kinetik enerjinin hesaplanabilmesi için öncelikli olarak kütle merkezinin çizgisel hızının bulunması gerekmektedir. Denklemin ikinci kısmında bulunan I ifadesi ise uzuvların atalet momentleridir. Bu tez çalışmasında kullanılan robot kolun uzuvlarına ait atalet momentlerinin değerleri üçüncü bölümde Tablo 3.1'de verilmiştir. Yine aynı şekilde uzuvların ağırlıklarını ifade eden m değerleri aynı tabloda verilmiştir. Robot kolun birinci uzvunun kinetik enerjisinin hesaplanması için gerekli olan parametrelerin gösterildiği görsel Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Robot kolun birinci uzvunun kinetik enerji geometrisi

Birinci uzvun kinetik enerjisini bulmak için yapılan hesaplamalar (4.2) ile (4.9) numaralı denklemler arasındaki gibidir. Kinetik enerjinin hesaplanabilmesi için ilk olarak çizgisel hız (V) hesaplanmalıdır.

$$\vec{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{1}} = (l_{g_1} * \cos\theta_1)\vec{\boldsymbol{\imath}} + (\, l_{g_1} * \sin\theta_1)\vec{\boldsymbol{\jmath}} \tag{4.2}$$

$$\vec{V}_1 = -l_{g_1} * \dot{\theta}_1 * \sin\theta_1 * \vec{\boldsymbol{\imath}} + l_{g_1} * \dot{\theta}_1 * \cos\theta_1 * \vec{\boldsymbol{\jmath}} \tag{4.3}$$

$$|V_1|^2 = \left(l_{g_1}\right)^2 * \left(\dot{\theta}_1\right)^2 * \sin^2\theta_1 + \left(l_{g_1}\right)^2 * \left(\dot{\theta}_1\right)^2 * \cos^2\theta_1 \tag{4.4}$$

$$|V_1|^2 = \left(l_{g_1}\right)^2 * \left(\dot{\theta}_1\right)^2 * (\sin^2\theta_1 + \cos^2\theta_1\,) \tag{4.5}$$

$$|V_1|^2 = \left(l_{g_1}\right)^2 * \left(\dot{\theta}_1\right)^2 \tag{4.6}$$

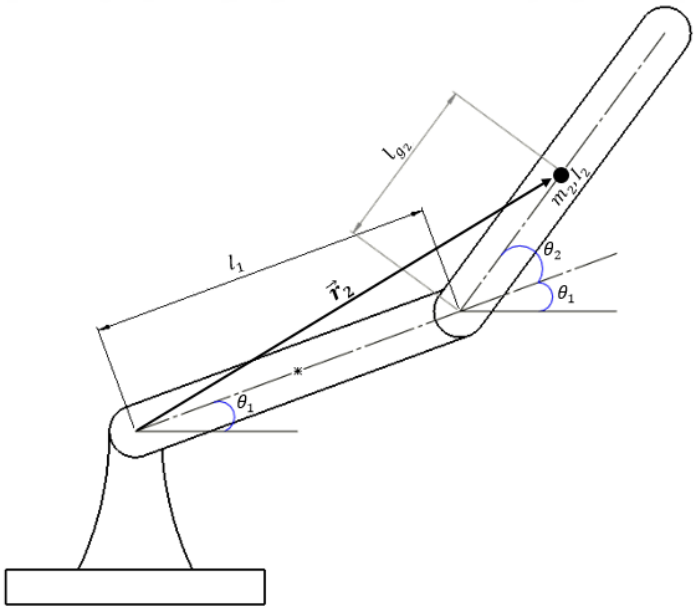
Bulunan ${V_1}^2$ (4.7) numaralı ana denklemde yerine konulduğunda birinci uzvun kinetik enerjisine ulaşılmış olur.

$$T_1 = \frac{1}{2} * m_1 * (V_1)^2 + \frac{1}{2} * I_1 * \left(\dot{\theta}_1\right)^2 \tag{4.7}$$

$$T_1 = \frac{1}{2} * m_1 * \left(l_{g_1}\right)^2 * \left(\dot{\theta}_1\right)^2 + \frac{1}{2} * I_1 * \left(\dot{\theta}_1\right)^2 \tag{4.8}$$

$$T_1 = \frac{1}{2}\left[m_1 * \left(l_{g_1}\right)^2 + I_1\right]\left(\dot{\theta}_1\right)^2 \tag{4.9}$$

Robot kolun ikinci uzvunun kinetik enerjisinin hesaplanması için gerekli olan parametrelerin gösterildiği görsel Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Robot kolun ikinci uzvunun kinetik enerji geometrisi

İkinci uzvun kinetik enerjisi hesaplanırken işlem kolaylığı sağlaması için $\emptyset = \theta_1 + \theta_2$ şeklinde tanımlanmıştır.

$$\vec{r}_2 = \left[l_1 \cos\theta_1 + l_{g_2} \cos\emptyset\right]\vec{\imath} + \left[l_1 \sin\theta_1 + l_{g_2} \sin\emptyset\right]\vec{\jmath} \quad (4.10)$$

$${V_2}^2 = \left[-l_1\dot{\theta}_1 \sin\theta_1 - l_{g_2} \sin\emptyset\,\dot{\emptyset}\right]\vec{\imath} + \left[l_1\dot{\theta}_1 \cos\theta_1 - l_{g_2} \cos\emptyset\,\dot{\emptyset}\right]\vec{\jmath} \quad (4.11)$$

$${V_2}^2 = {l_1}^2{\dot{\theta}_1}^2 + {l_{g_2}}^2\dot{\emptyset}^2 + 2l_2 l_{g_2}\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\cos(\emptyset - \theta_1) \quad (4.12)$$

Bulunan ${V_2}^2$ (4.13) numaralı ana denklemde yerine konulduğunda ikinci uzvun kinetik enerjisine ulaşılmış olur.

$$T_2 = \frac{1}{2} * m_2 * {V_2}^2 + \frac{1}{2} * I_2 * \dot{\emptyset}^2 \quad (4.13)$$

$$T_2 = \frac{1}{2}m_2{l_1}^2{\dot{\theta}_1}^2 + \frac{1}{2}m_2{l_{g_2}}^2\dot{\emptyset}^2 + m_2 l_1 l_{g_2}\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\cos(\emptyset - \theta_1) + \frac{1}{2}I_2\dot{\emptyset}^2 \quad (4.14)$$

Birinci uzvun kinetik enerjisi (T_1) ve ikinci uzvun kinetik enerjisi (T_2) bulunduktan sonra toplam kinetik enerji hesaplanabilir. İki serbestlik dereceli robot kolun toplam kinetik enerjisini (4.16) numaralı denklemde verilmiştir.

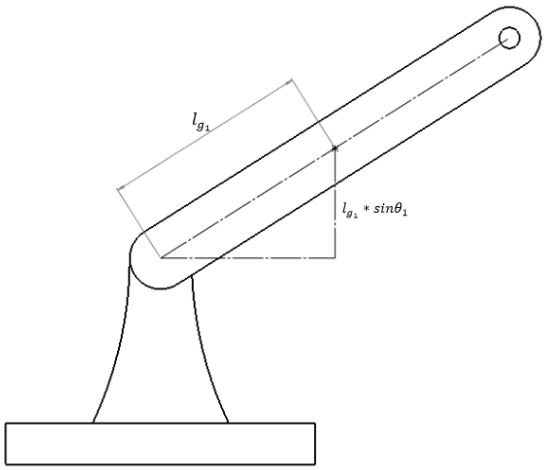
$$\sum T = T_1 + T_2 \quad (4.15)$$

$$\sum T = \frac{1}{2}\left[m_1{l_{g_1}}^2 + I_1 + m_2{l_1}^2\right]{\dot{\theta}_1}^2 + \frac{1}{2}\left[m_2{l_{g_2}}^2 + I_2\right]\dot{\emptyset}^2 + m_2 l_1 l_{g_2}\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\cos(\emptyset - \theta_1) \quad (4.16)$$

4.2.2 Sistemin Toplam Potansiyel Enerjisi

İki serbestlik dereceli robot kola ait toplam potansiyel enerji birinci uzvun ve ikinci uzvun ayrı ayrı potansiyel enerjilerinin hesaplanıp toplanması ile elde edilmektedir.

Robot kolun birinci uzvunun potansiyel enerjisinin hesaplanması için gerekli olan parametreler Şekil 4.3'te verilmiştir.



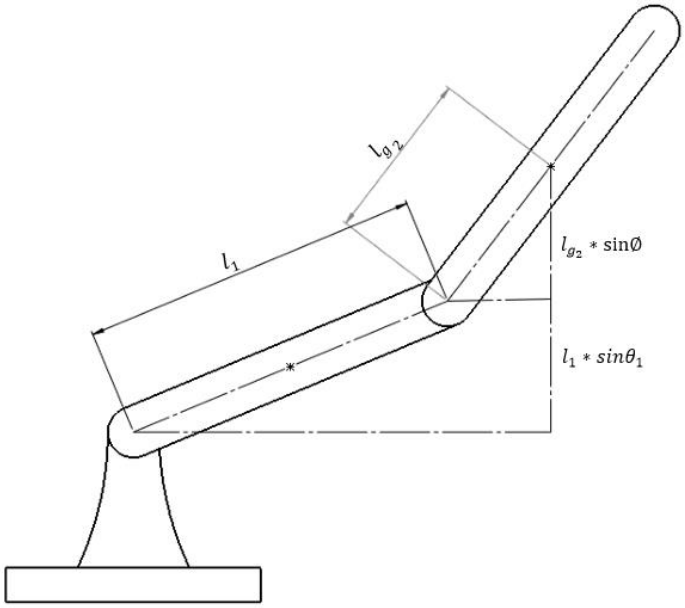
Şekil 4.3. Robot kolun birinci uzvunun potansiyel enerji geometrisi

Birinci uzvun potansiyel enerjisini (U_1) hesaplamak için yapılan işlemler (4.17) ve (4.18) numaralı denklemlerdeki gibidir.

$$U = m * g * h \tag{4.17}$$

$$U_1 = m_1 * g * (l_{g_1} * \sin\theta_1) \tag{4.18}$$

Robot kolun ikinci uzvunun potansiyel enerjisinin hesaplanması için gerekli olan parametreler Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Robot kolun ikinci uzvunun potansiyel enerji geometrisi

İkinci uzvun potansiyel enerjisini (U_2) hesaplamak için yapılması gereken işlem (4.19) numaralı denklemdeki gibidir.

$$U_2 = m_2 * g * (l_1 * \sin\theta_1 + l_{g_2} * \sin\emptyset) \tag{4.19}$$

İki serbestlik dereceli robot kolun toplam potansiyel enerjisi birinci ve ikinci uzunların kinetik enerjilerinin toplamıdır. Yani U_1 ile U_2 toplanarak toplam potansiyel enerji elde edilir. Toplam U, (4.22) numaralı denklemde verilmiştir.

$$\sum U = U_1 + U_2 \tag{4.20}$$

$$\sum U = m_1 g l_{g_1} \sin\theta_1 + m_2 g l_1 \sin\theta_1 + m_2 g l_{g_2} \sin\emptyset \tag{4.21}$$

$$\sum U = [m_1 g l_{g_1} + m_2 g l_1] \sin\theta_1 + m_2 g l_{g_2} \sin\emptyset \tag{4.22}$$

4.3 Sistemin Hareket Denklemleri: Lagrange-Euler Eşitliği

Lagrange-Euler (L-E) eşitliği, mekanik bir sistemin kinetik ve potansiyel enerjisi arasındaki fark olarak tanımlanan Lagrange adı verilen skaler bir fonksiyondan hareket denklemlerini türetmenin bir yolu olan metottur (Craig, 2014). Diğer hareket denklemi oluşturma yöntemlerine göre daha basit ve sistematiktir. Bu sebeple bu tez çalışmasında L-E eşitliği tercih edilmiştir. L-E eşitliği (4.23) numaralı denklemde verilmiştir.

$$L = \sum T - \sum U \tag{4.23}$$

Bu denklemde;

L= Langrange eşitliğini

$\sum T$ =Toplam kinetik enerjiyi

$\sum U$ = Toplam potansiyel enerjiyi

temsil etmektedir.

Sistemin toplam kinetik enerjisi (4.16) numaralı denklemde, toplam potansiyel enerjisi ise (4.22) numaralı denklemde verilmiştir. Bu denklemde işlem kolaylığı sağlaması açısından zamana göre değişken olmayan elemanlar yerine bir harf tanımlaması yapılmıştır ve oluşan yeni denklemler (4.24) ile (4.25) numaralı eşitliklerde verilmiştir.

$$\sum T = \frac{1}{2}K_1\dot{\theta}_1{}^2 + \frac{1}{2}K_2\dot{\emptyset}^2 + K_3\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\cos(\emptyset - \theta_1) \tag{4.24}$$

$$\sum U = K_4 \sin\theta_1 + K_5 \sin\emptyset \tag{4.25}$$

Bu eşitlikler (4.23) numaralı denklemde yerine konulduğunda (4.26) numaralı eşitlik elde edilmiş olur.

$$L = \frac{1}{2}K_1\dot{\theta}_1{}^2 + \frac{1}{2}K_2\dot{\emptyset}^2 + K_3\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\cos(\emptyset - \theta_1) - K_4 \sin\theta_1 - K_5 \sin\emptyset \tag{4.26}$$

Sistemin tork/ kuvvet denklemini bulabilmek için (4.27) numaralı ifade kullanılır. Bir başka deyişle Langrange denkleminin kısmi türevi alınır.

$$\tau = \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} \tag{4.27}$$

Birinci genel koordinat θ_1'in hareketi için birkaç işlem adımı uygulanmıştır ve bu adımlar denklem (4.28) ile (4.31) arasında gösterilmiştir.

$$\tau_1 = \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} \tag{4.28}$$

$$\tau_1 = d\left[K_1\dot{\theta}_1 + K_3\dot{\emptyset}\cos(\emptyset - \theta_1)\right]/dt + K_4\cos\theta_1 - K_3\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\sin(\emptyset - \theta_1) \tag{4.29}$$

$$\tau_1 = K_1\ddot{\theta}_1 + K_3\cos(\emptyset - \theta_1)\ddot{\emptyset} - K_3\dot{\emptyset}\left(\dot{\emptyset} - \dot{\theta}_1\right)\sin(\emptyset - \theta_1) + K_4\cos\theta_1 - K_3\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\sin(\emptyset - \theta_1) \tag{4.30}$$

$$\tau_1 = K_1\ddot{\theta}_1 + K_3\cos(\emptyset - \theta_1)\ddot{\emptyset} - K_3\dot{\emptyset}^2\sin(\emptyset - \theta_1) + K_4\cos\theta_1 \tag{4.31}$$

Genelleştirilmiş ikinci koordinat Ø'nin hareketi için uygulanan Langrangian-Euler eşitliği (4.32) numaralı denklemde verilmiştir. Ve uygulanan işlem adımları (4.32) ile (4.35) arası denklemlerde gösterilmiştir.

$$\tau_2 = \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \dot{\phi}_1} - \frac{\partial L}{\partial \emptyset} \tag{4.32}$$

$$\tau_2 = d\left[K_2\dot{\emptyset}_1 + K_3\dot{\theta}_1\cos(\emptyset - \theta_1)\right]/dt + K_5\cos\emptyset - K_3\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\sin(\emptyset - \theta_1) \tag{4.33}$$

$$\tau_2 = K_2\ddot{\emptyset} + K_3\cos(\emptyset - \theta_1)\ddot{\theta}_1 - K_3\dot{\theta}_1\left(\dot{\emptyset} - \dot{\theta}_1\right)\sin(\emptyset - \theta_1) + K_5\cos\emptyset + K_3\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\sin(\emptyset - \theta_1) \tag{4.34}$$

$$\tau_2 = K_2\ddot{\emptyset} + K_3\cos(\emptyset - \theta_1)\ddot{\theta}_1 + K_3{\dot{\theta}_1}^2\sin(\emptyset - \theta_1) + K_5\cos\emptyset \tag{4.35}$$

Tork eşitliklerinin matris formda gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}K_1 & K_3\cos(\emptyset - \theta_1)\\ K_3\cos(\emptyset - \theta_1) & K_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\emptyset}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}0 & -K_3\dot{\emptyset}\sin(\emptyset - \theta_1)\\ K_3\dot{\theta}_1\sin(\emptyset - \theta_1) & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\ \dot{\emptyset}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}K_4\cos\theta_1\\ K_5\cos\emptyset\end{bmatrix}$$

Sabit parametreler yerine konulduğunda son hareket denklemi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}m_1{l_{g_1}}^2 + I_1 + m_2{l_1}^2 & m_2 l_1 l_{g_2}\cos(\emptyset - \theta_1)\\ m_2 l_1 l_{g_2}\cos(\emptyset - \theta_1) & m_2{l_{g_2}}^2 + I_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\emptyset}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}0 & -(m_2 l_1 l_{g_2})\dot{\emptyset}\sin(\emptyset - \theta_1)\\ m_2 l_1 l_{g_2}\dot{\theta}_1\sin(\emptyset - \theta_1) & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\ \dot{\emptyset}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}m_1 g l_{g_1} + m_2 g l_1\cos\theta_1\\ m_2 g l_{g_2}\cos\emptyset\end{bmatrix}$$

Lagrange dekleminin matris-vektör şeklinde gösterimi ise (4.36) numaralı denklemde verilmiştir.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \tag{4.36}$$

Burada, τ matrisi n×1 boyutunda olup, eklemlere etki eden dönme momentlerini ifade etmektedir. M matrisi atalet kütlelerinin ivmelenmesiyle oluşan etkiyi gösterir ve n×n boyutundadır. Matris C, nx1 boyutundadır, merkezkaç ve Coriolis etkisini gösterir. Matris G ise yerçekimi dolayısıyla eklemlere oluşan dönme momentini ifade etmektedir ve n×1 boyutundadır. Genelleştirilmiş koordinat olarak tanımlanan q sembolü n×1 boyutundadır ve eklemlerin açısal yer değiştirmesini temsil etmektedir. Yani $\dot{q}$ açısal hızı ($\dot{\theta}\ ve\ \dot{\emptyset}$), $\ddot{q}$ ise açısal ivmeyi ($\ddot{\theta}\ ve\ \ddot{\emptyset}$) ifade etmektedir (Caner & Eroğlu, 2004).

Hareket denkleminin son hali ise $\ddot{q}$ yalnız bırakılarak elde edilmektedir. Son noktada ulaşılan hareket denklemi (4.37) numaralı denklemde verilmiştir.

$$\ddot{q} = M^{-1}(\tau - (C * \dot{q}) - G) \tag{4.37}$$

BÖLÜM 5

SİSTEMİN MATLAB-SİMULİNK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

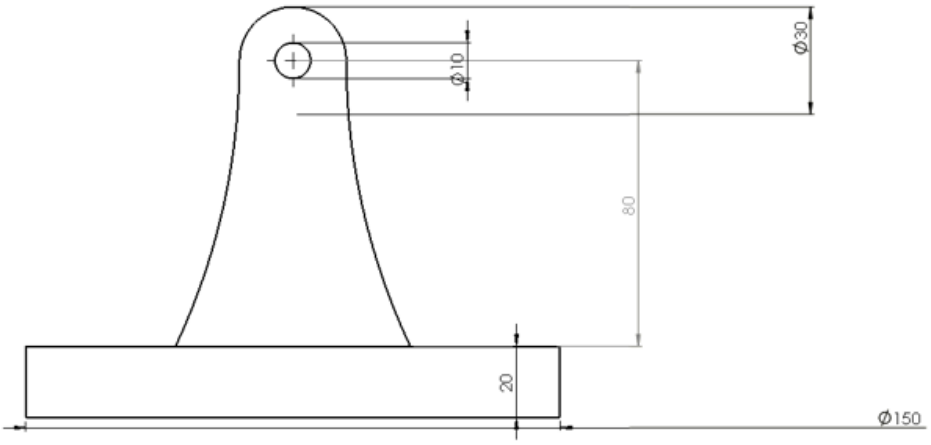
5.1. Giriş

Bu bölümde, üçüncü ve dördüncü bölümlerde kinetik ve kinematik analizi yapılmış iki serbestlik derecesine sahip robot kol modelinin 3D tasarımı anlatılmıştır. Tasarlanan modelin Matlab-Simulink ortamına taşınmasının adımlarından bahsedilmiştir. Elde edilen kinetik ve kinematik model çıktılarının fiziksel model çıktıları ile karşılaştırılması yapılmıştır. Yani tasarlanan robot kola ait matematiksel çıktılar ile fiziksel çıktıların kıyaslaması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda fiziksel model ile matematiksel modelin eşleştiği görülmüştür. Yani sistemin doğru bir sistem olduğu ve bu sistem için denetleyici tasarımına geçilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

5.2. Solidworks 3D Modelinin Oluşturulması

3D katı modelin çizimi için Solidworks katı çizim ve modelleme programı tercih edilmiştir. İki serbestlik derecesine sahip robot kola ait parçalar ayrı ayrı çizilip sonrasında birleştirilmiştir. Robot kol üç parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar yere sabit olan taban parçası, birinci uzuv ve ikinci uzuvdur.

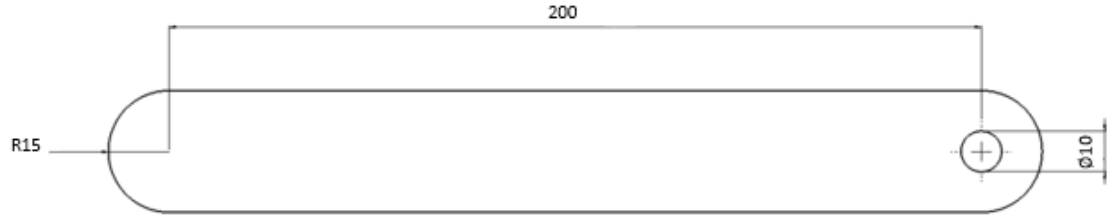
Robot kolun ilk olarak taban parçası çizilmiştir. Taban parçasının yere paralel yüzeyi daire şeklindedir ve 150 mm çapındadır. Toplam yüksekliği 115 mm, birinci uzvun taban parçasına eklendiği dönel eksenin yerden yüksekliği ise 100 mm'dir. Taban parçasına ait teknik çizim Şekil 5.1'de verilmiştir.



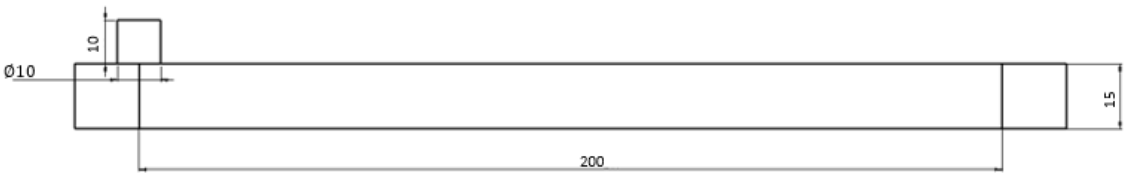
Şekil 5.1. Taban parçası teknik çizimi

Parçaların ağırlığı, atalet momentleri, yoğunluğu, yüzey alanı gibi birçok unsur Solidworks tarafından hesaplanmaktadır. Bu bilgilere ulaşabilmek için ekstra hesaplama yapılmasına gerek yoktur. Parçalar ile ilgili tüm özelliklere öge özellikleri sekmesinden ulaşabilmek mümkündür.

Robot kola ait bir diğer çizim birinci uzvun çizimidir. Birinci uzuv, taban parçasına eklenen 0.2 metre uzunluğundaki uzuvdur. Yapılan hesaplamalarda uzuvların boyu, ağırlığı ve atalet momentleri kullanılmaktadır. Uzuvların boyu parçaları çizerken belirlenebilir fakat ağırlığı ve atalet momenti yapılan çizime bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Birinci uzuv ile ilgili gerekli tüm değerler Solidworks öge özellikkleri bölümünden alınmıştır. Birinci uzvun ağırlığı 0.1006 kilogramdır, atalet momenti (I_1) ise $427.227 * 10^{-6}\ kg.m^2$'dir. Birinci uzva ait teknik çizim resimleri Şekil 5.2'de ve Şekil 5.3'te verildiği gibidir.

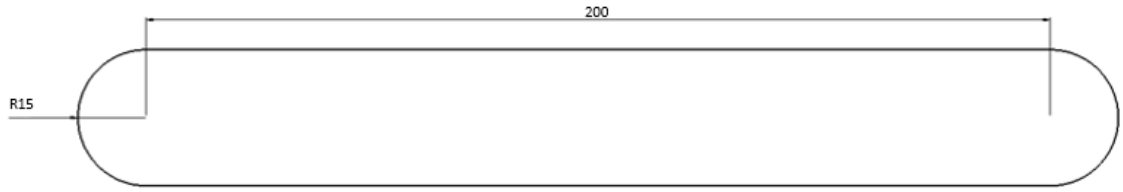


Şekil 5.2. Birinci uzuv üst görünüş

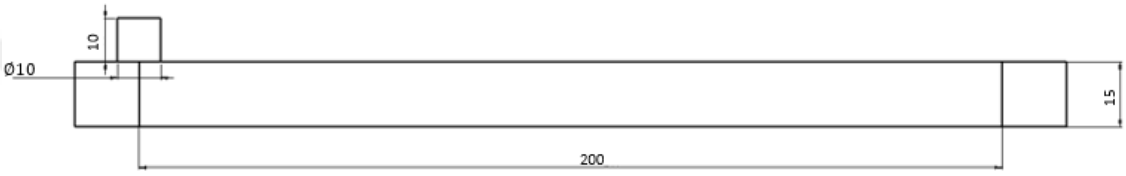


Şekil 5.3. Birinci uzuv yan görünüş

Robot kola ait çizilen son parça ise ikinci uzuv parçasıdır. Bu parça birinci uzva eklenmektedir. Uzunluğu 0.2 metredir. Ağırlığı 0.10139 kilogramdır. Atalet momenti (I_2) ise $435.276 * 10^{-6} kg.m^2$'dir. İkinci uzva ait teknik çizim Şekil 5.4'te ve Şekil 5.5'te verilmiştir.

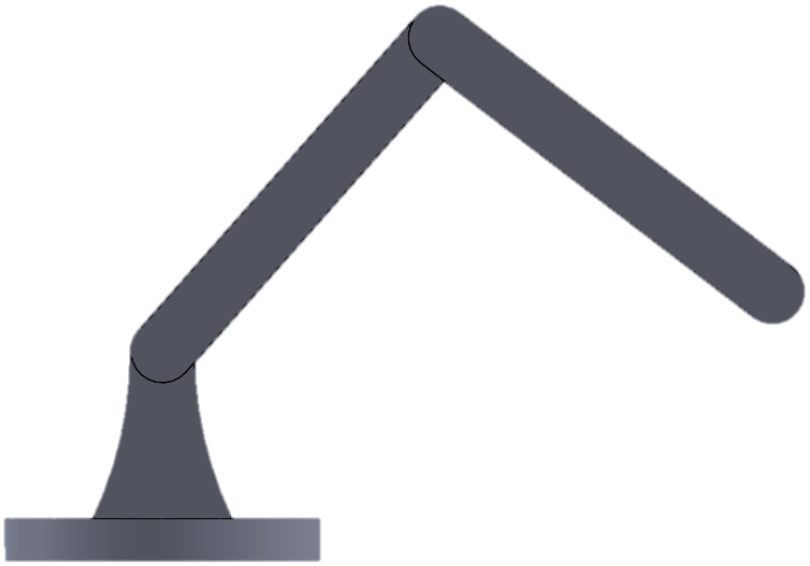


Şekil 5.4. İkinci uzuv üst görünüş



Şekil 5.5. İkinci uzuv yan görünüş

Tüm parçaların çizimi tamamlandıktan sonra montaj işlemine geçilmiştir. Montajı yapılmış robot kolun son görünüşü Şekil 5.6'da verildiği gibidir.

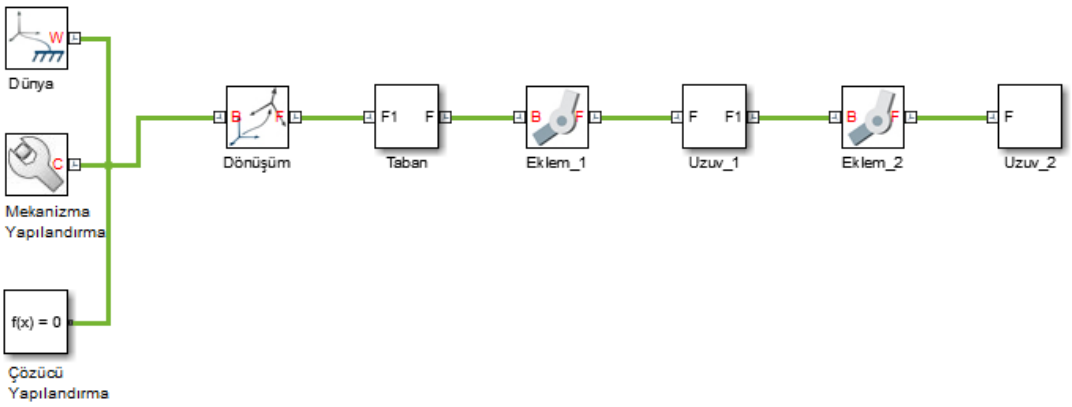


Şekil 5.6. Robot kolun montajlanmış görünüşü

5.3 Solidworks Ortamından Matlab-Simulink Ortamına Aktarım

Solidworks'te parçaların çizim ve montajlama işlemi tamamlandıktan sonra çizim dosyasının Matlab ortamına aktarılabilmesi için birkaç adım izlenmelidir. İlk adım çizim dosyasının dışa aktarım prosedürünü yapmaktır. Dışa aktarım prosedürü, yeni bir model oluşturabilmek için Simscape Multibody'ye içe aktarılabilecek bir ''xml'' dosyası ve bir dizi geometri dosyası oluşturulmasını sağlar. Bunun sonucunda ''.xml'' dosyası, 3D montajını tanımlayan montaj yapısını ve parça parametrelerini sağlar, geometri dosyası ise çeşitli 3D parçalarının 3 boyutlu yüzey şekillerini sağlar. Bunun için Solidworks programının içinde ''Tools'' menüsünden ''SimMechanics Link'' ardından ''Export'' ardından ''SimMechanics Second Generation'' seçilmelidir ve yeni oluşturulacak olan ''.xml'' dosyaları ile geometri dosyaları Solidworks çizimlerinin içinde bulunduğu dosyaya kaydedilmelidir. Bu kaydetme işleminden sonra Solidworks programındaki işlem tamamlanmış olur. Bir sonraki adım Matlab ortamında içe aktarım işleminin yapılmasıdır. İçe aktarım işlemi ''smimport'' konutu ile yapılmaktadır. Bu komuttan sonra içe aktarım işlemi tamamlanmış olmaktadır. Bundan sonra robot kol blok diyagramlar ile modellenmeye hazır hale gelmiştir.

Robot kola ait Matlab-Simulink tarafından oluşturulan temel bloklar ile ifade edilen model diyagramı Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Robot kol temel blok diyagramı

Robot kola ait model diyagramında bulunan tüm bloklar ayrı anlamlar taşımaktadır.

- Taban, Uzuv_1 ve Uzuv_2 robot kolun taban ve link parçalarını ifade etmektedirler.

- Eklem_1 ve Eklem_2 blokları, iki çerçeve arasında hareket eden döner eklemi temsil eder. Yani başka bir ifade ile Eklem_1 bloğu θ_1'i Eklem_2 bloğu ise θ_2'yi ifade etmektedirler.
- Görselde 'Dönüşüm' olarak ifade edilen transform bloğu ise iki çerçeve arasında sabit bir 3-B katı dönüşümü tanımlar. İki bileşen, dönüşümün öteleme ve dönme kısımlarını bağımsız olarak belirtilir. Farklı çeviriler ve döndürmeler serbestçe birleştirilebilir.
- Dünya Bloğu: Herhangi bir mekanik modelde önceden tanımlanmış tüm çerçeve ağlarının temelidir. Sağ el kuralını referans alır, ortogonal ve hareketsizdir. Dünya veya zemin çerçevesine erişim sağlar.
- Mekanizma yapılandırma bloğu: Bloğun bağlı olduğu hedef makineye uygulanan mekanik ve benzetim parametrelerinin ayarlanmasına yardımcı olur.
- Çözücü yapılandırma bloğu: Benzetim için kullanılacak çözüm ayarlarının yapılmasını sağlan bloktur.

5.4 Matlab Modelinin Kinematik ve Kinetik Testlerinin Yapılması

3D tasarım Matlab'e aktarıldıktan sonra kinetik ve kinematik testlerin yapılması için blok diyagramlar ile modelleme işlemine geçilmiştir. Matlab-Simulink robot kola ait parçaların blok diyagramlarının bulunduğu temel blok diyagram şemasını kendi sağlamaktadır. İstenilen testlerin yapılabilmesi için gerekli olan blok diyagramlar ve fonksiyon blokları temel blok diyagram şemasına bu bölümde eklenmiştir.

Kinetik ve kinematik testlerin yapılmasındaki amaç robot kol modelinin matematiksel ve fiziksel çıktılarının karşılaştırılabilmesidir. Robot kola ait matematiksel model çıktıları ile fiziksel model çıktıların karşılaştırılması aslında robot kola ait matematiksel hesaplamalar ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılmasını ifade etmektedir. Bu sayede sistemin doğru çalışan bir sistem olup olmadığı ortaya çıkmış olacaktır.

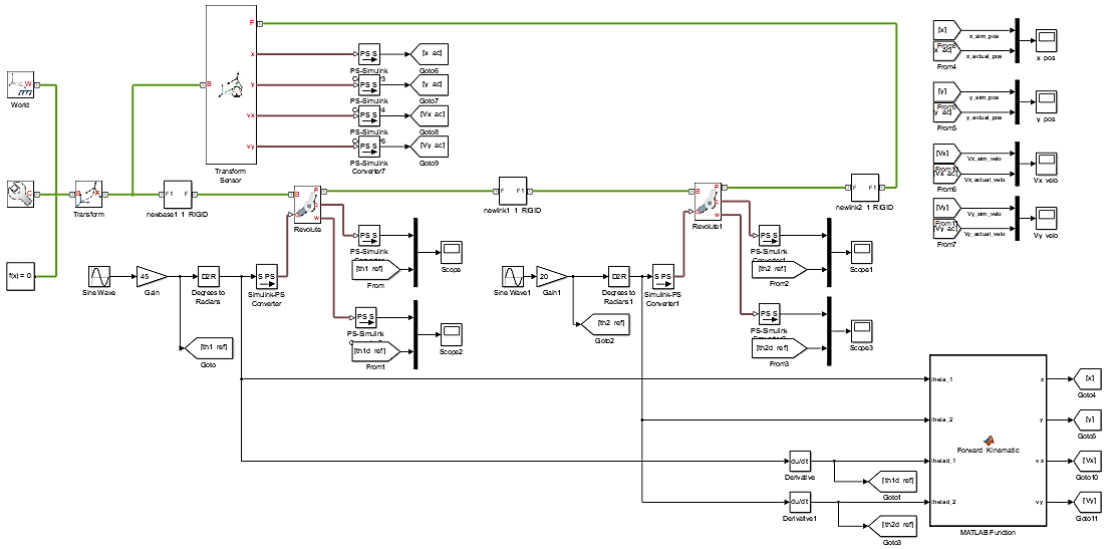
5.4.1 Matematiksel ve Fiziksel Modellerin Kinematik Çıktılarının Karşılaştırılması

Matematiksel ve fiziksel modellerin kinematik çıktılarının karşılaştırılması düz kinematik çıktıların karşılaştırılması ve ters kinematik çıktıların karşılaştırılması olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bölüm 3'te sistem kinematiği başlığı anlatında

anlatılan düz kinematik ve ters kinematik denklemlerden türetilen matematiksel modele ait fonksiyonlar ile benzetim modeli çıktıları karşılaştırılmıştır.

5.4.1.1 Düz Kinematik Çıktılarının Karşılaştırılması

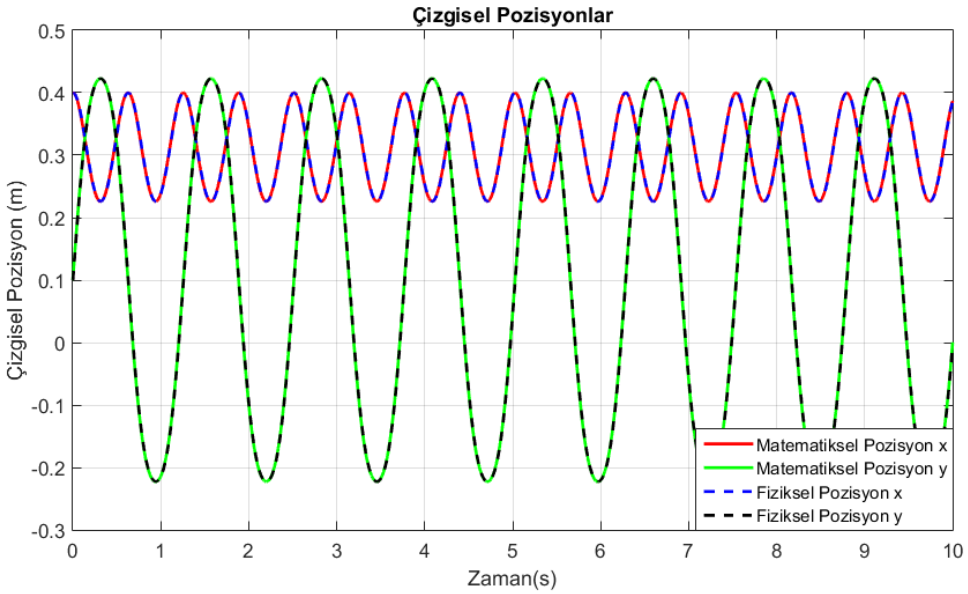
Sistemin düz kinematik çıktılarının karşılaştırılması, fiziksel modelin çıktıkları ile üçüncü bölümde kinematik sistem başlığı altında anlatılan düz kinematik konum ve hız denklemlerinin fonksiyon bloğunun içine kod olarak yazılması ile oluşturulan matematiksel modelin çıktılarının karşılaştırılmasını ifade etmektedir. Yani başka bir ifade ile fiziksel model ile matematiksel modele aynı giriş değerleri uygulanarak çıkış değerlerinin grafiklerinin aynı olup olmadığı kıyaslanmaktadır. Düz kinematik modele ait Matlab-Simulink blok diyagram şeması Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Düz kinematik model Simulink blok diyagram şeması

a.) Pozisyon

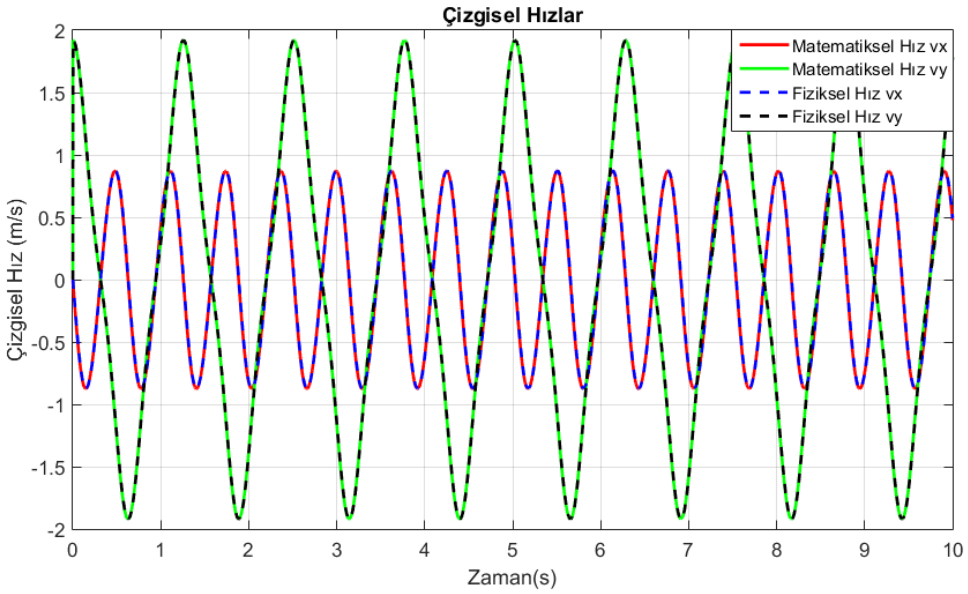
Robot kol sisteminin düz kinematik pozisyon çıktılarına ulaşabilmek için fiziksel model ve matematiksel model eklemlerine θ_1 ve θ_2 açıları uygulanmıştır. İki modelin birbiri ile aynı olup olmadığını anlaşılabilmesi için aynı eklemlere uygulanan açıların aynı olması gerekmektedir. Şekil 5.9'da robot kol uç noktasını veren çizgisel pozisyonlar grafiği robot kolun fiziksel ve matematiksel modellerinin birinci eklemlerine $45 * \sin(5 * t)$ sinüs dalgasının ikinci eklemlerine ise $20 * \sin(5 * t)$ sinüs dalgasının pozisyon girdisi olarak uygulanması ile elde edilmiştir.



Şekil 5.9. Robot kol uç noktası yörünge grafiği (çizgisel pozisyon grafiği)

b.) Hız

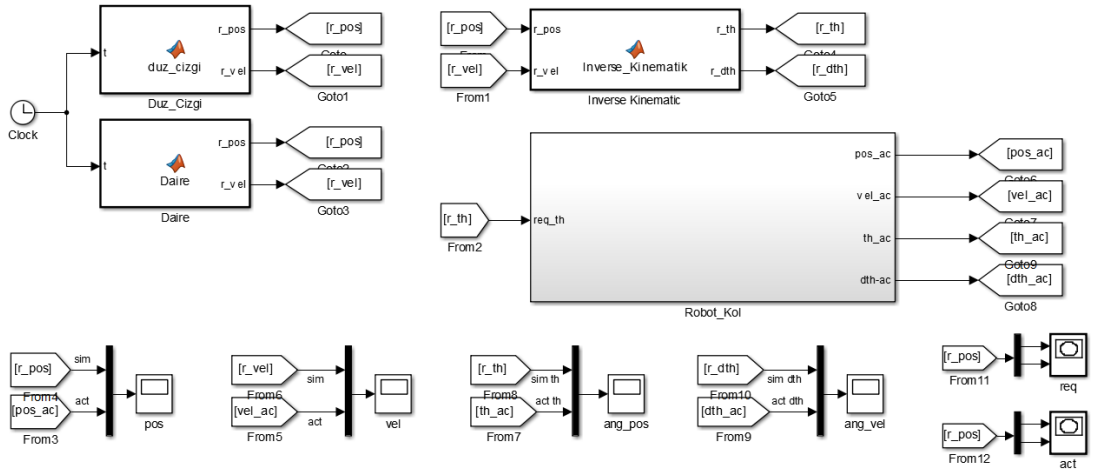
Robot kol sisteminin düz kinematik pozisyon çıktılarına ulaşabilmek için fiziksel model ve matematiksel model eklemlerine $\frac{5*\pi}{4} * \cos(t)$ radyan, $\dot{\theta}_1$ hızı olarak ve $\frac{5*\pi}{9} * \cos(t)$ radyan, $\dot{\theta}_2$ hızı olarak uygulanmıştır. Uygulanan bu giriş değerleri sonucunda ulaşılan çizgisel hız grafiği Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Robot kol çizgisel hız grafiği

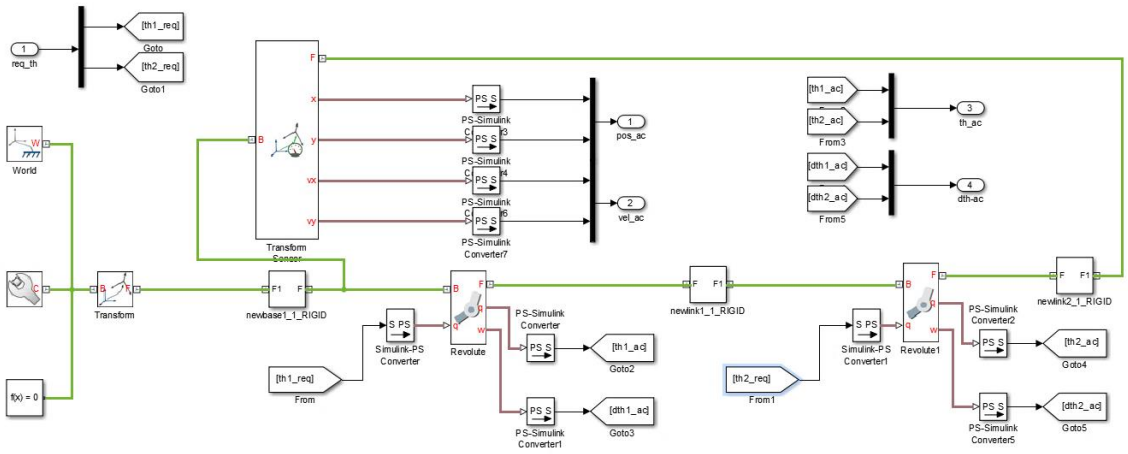
5.4.1.2 Ters Kinematik Çıktılarının Karşılaştırılması

Sistemin ters kinematik çıktılarının karşılaştırılması iki farklı veri girişi ile yapılmıştır. Matematiksel modele ve fiziksel modele düz çizgi yörüngesi ve daire yörüngesi çizgisel pozisyonları ve çizgisel hızları giriş olarak gönderilmiş, açısal pozisyon ve açısal hız çıktıları alınmıştır. Sistemin ters kinematik Matlab-Simulink modellemesi Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. Ters kinematik model Simulink blok diyagram şeması

Robot kol bloğunun iç modellemesi ise Şekil 5.12'de verilmiştir.



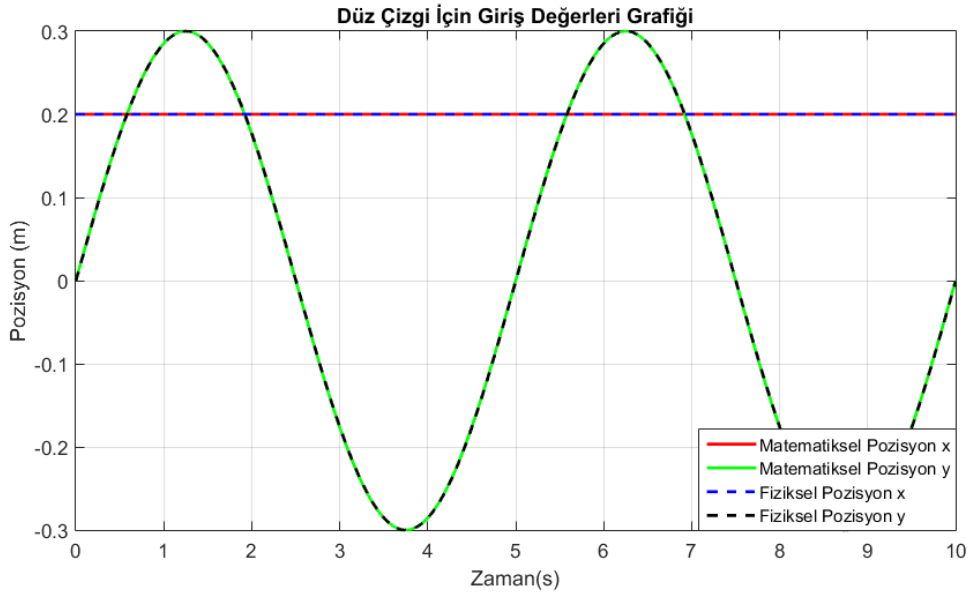
Şekil 5.12. Kinematik model için robot kol bloğu iç modellemesi

a.) Pozisyon

Sistemin ters kinematik pozisyon analizi yapılırken sisteme giriş verisi olarak üçüncü bölümde hareket tasarımı başlığı altında anlatılan düz çizgi ve daireye ait çizgisel

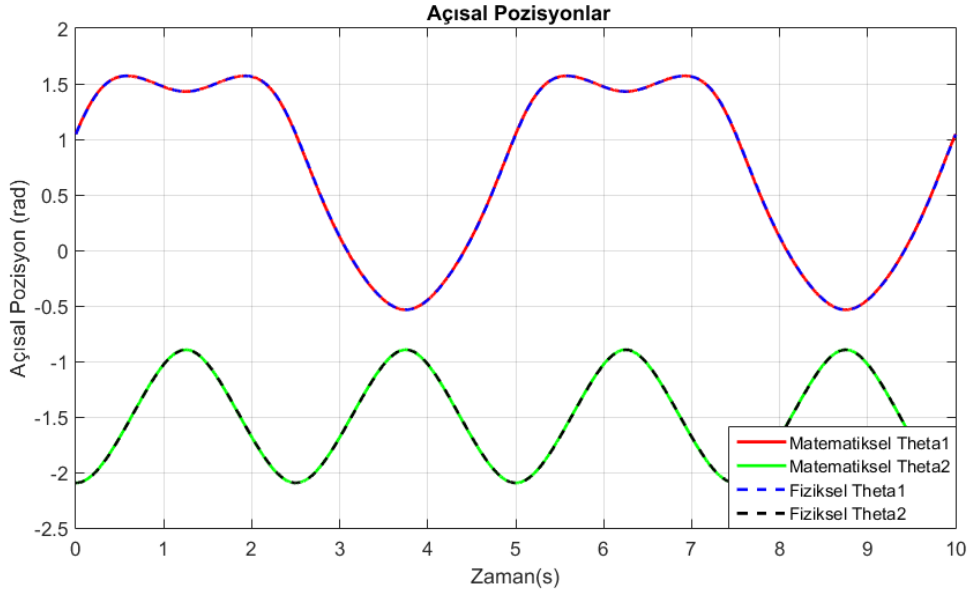
pozisyonlar uygulanarak bu girdilerin oluşturduğu açısal pozisyon ve açısal hız çıktıların karşılaştırılması yapılmıştır.

Düz çizgi girişine ait x ve y pozisyonlarının oluşturduğu grafik Şekil 5.13'te verilmiştir.



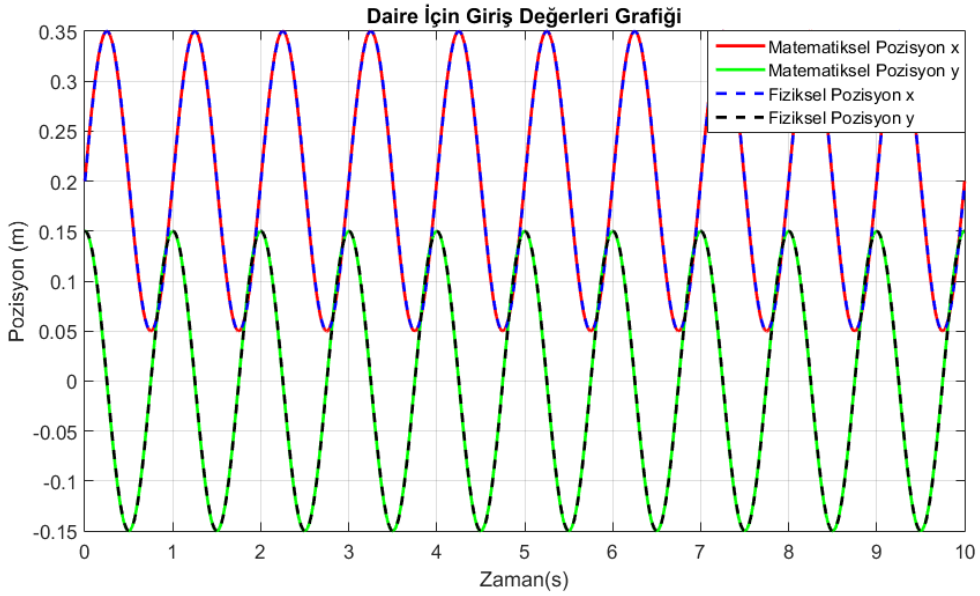
Şekil 5.13. Düz çizgi yörüngesi için giriş pozisyonları

Düz çizgi oluşturan x ve y pozisyon verilerinin matematiksel modele ve fiziksel modele giriş verisi olarak gönderilmesi ile ortaya çıkan çıkış verilerinin oluşturduğu grafik olan açısal pozisyon grafiği Şekil 5.14'te verilmiştir.



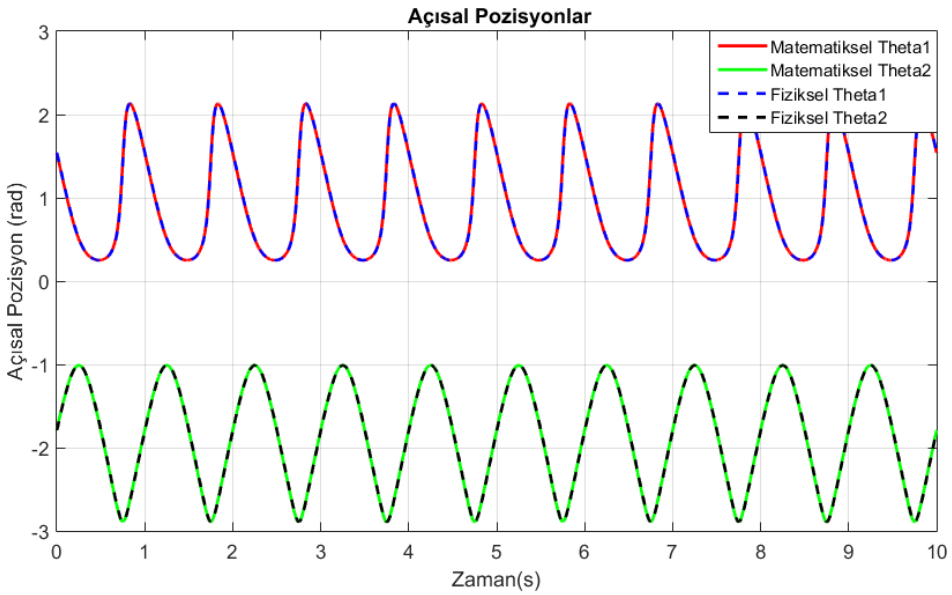
Şekil 5.14. Düz çizgi yörüngesi takip edilirken açısal pozisyon grafiği

Daire girişine ait x ve y pozisyonlarının oluşturduğu grafik Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15. Daire yörüngesi için giriş pozisyonları

Daire oluşturan x ve y pozisyon verilerinin matematiksel modele ve fiziksel modele giriş verisi olarak gönderilmesi ile ortaya çıkan çıkış verilerinin oluşturduğu grafik yani açısal pozisyon grafiği Şekil 5.16'da verilmiştir.

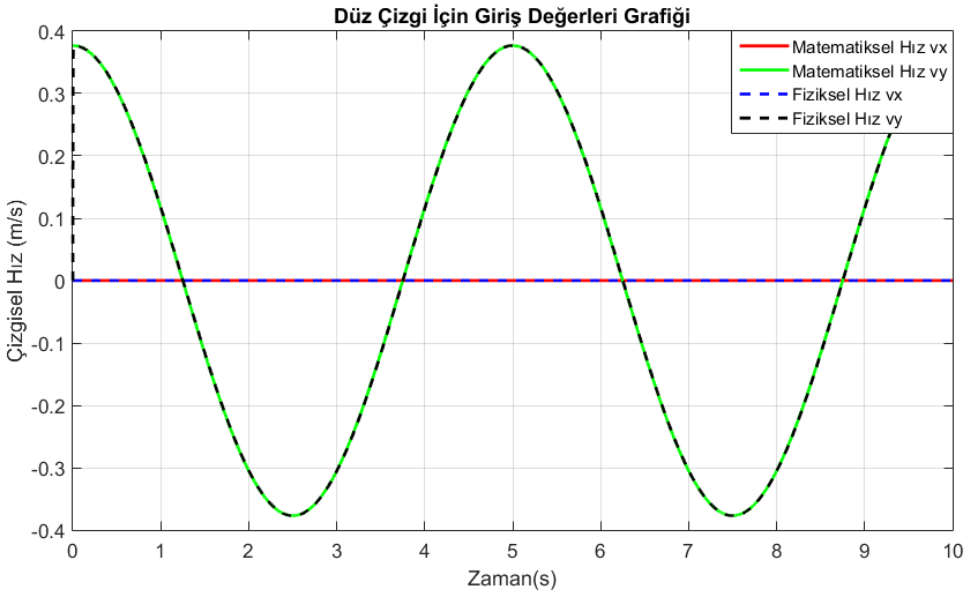


Şekil 5.16. Daire yörüngesi takip edilirken açısal pozisyon grafiği

b.) Hız

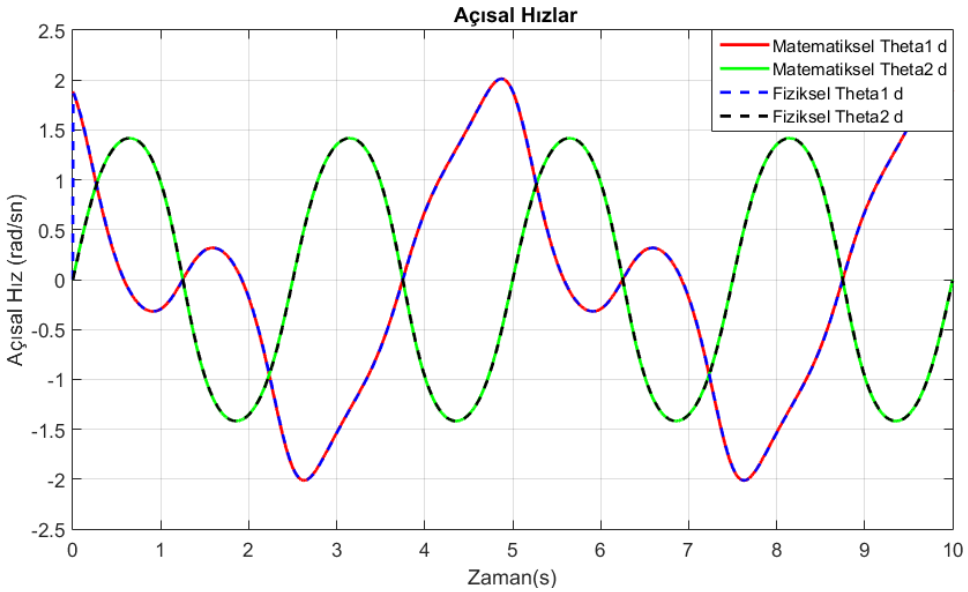
Ters kinematik testlerin ikinci adımı ise sistemin açısal hız çıktılarının karşılaştırılmasıdır. Bu adımda düz çizgi ve daire oluşturan x ve y hızları kullanılmıştır.

Düz çizgi girişine ait giriş verilerinin oluşturduğu grafik yani ters kinematik hız kıyaslaması yapılabilmesi için giriş olarak kullanılan değerlerin grafiği Şekil 5.17'de verilmiştir.



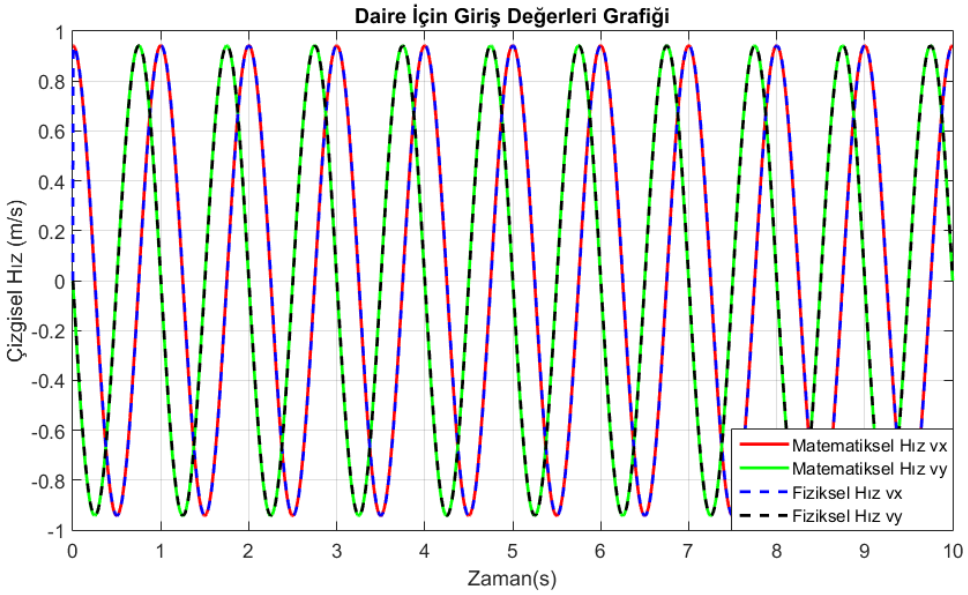
Şekil 5.17. Düz çizgi yörüngesi için giriş hızları

Düz çizgi oluşturan x ve y hızlarının verilerinin matematiksel modele ve fiziksel modele giriş verisi olarak gönderilmesi ile ortaya çıkan çıkış verilerinin oluşturduğu grafik yani açısal hız grafiği Şekil 5.18'de verilmiştir.



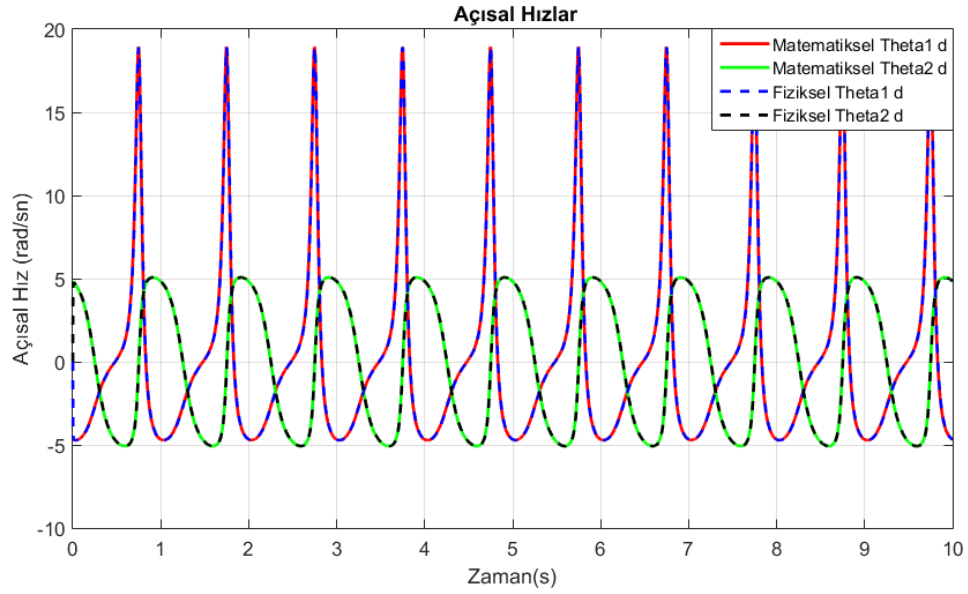
Şekil 5.18. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız grafiği

Daire giriş verisinin hızlarının oluşturduğu giriş değerleri grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.19. Daire yörüngesi için giriş hızları

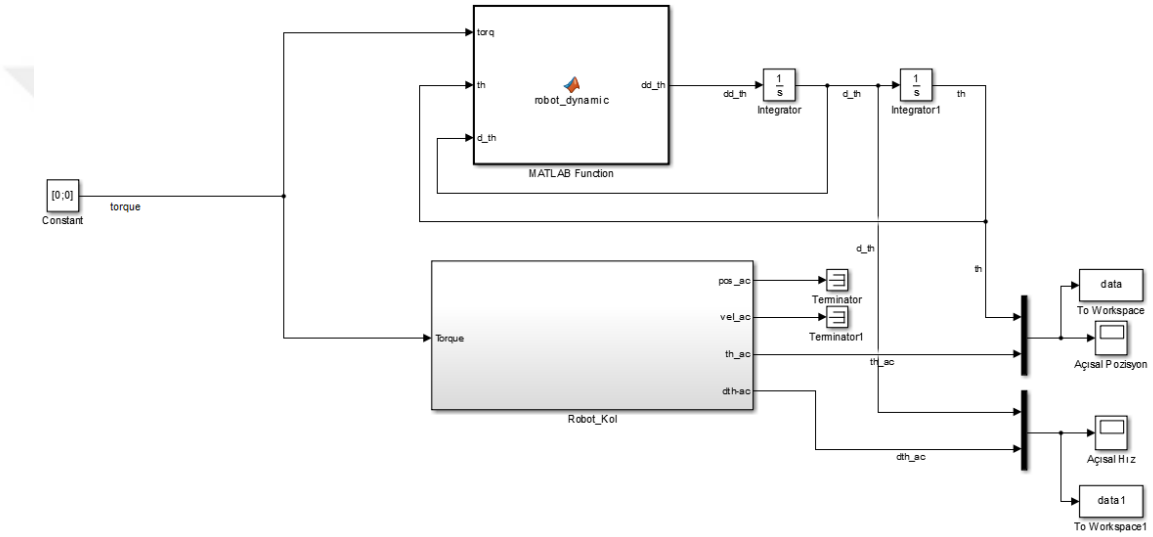
Daire oluşturan x ve y hız verilerinin matematiksel modele ve fiziksel modele giriş verisi olarak gönderilmesi ile ortaya çıkan çıkış verilerinin oluşturduğu grafik yani açısal hız grafiği Şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.20. Daire yörüngesi için açısal hız grafiği

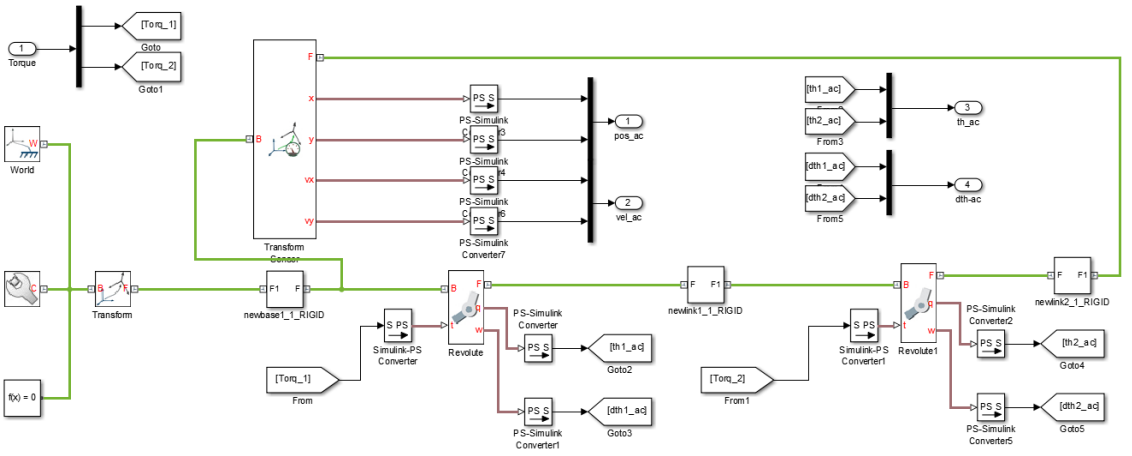
5.4.2 Matematiksel ve Fiziksel Modellerin Kinetik Çıktılarının Karşılaştırılması

Sistemin kinetik çıktılarının karşılaştırılması, fiziksel modelin çıktıkları ile dördüncü bölümde Robot kol modelinin dinamiği başlığı altında anlatılan Langrange – Euler eşitliği kullanılarak elde edilen hareket denklemlerinin fonksiyon bloğunun içine kod olarak yazılması ile oluşturulan matematiksel modelin çıktıların karşılaştırılmasını ifade etmektedir. Yani başka bir ifade ile fiziksel model ile matematiksel modele aynı giriş tork değerleri uygulanarak çıkış değerlerinin grafiklerinin aynı olup olmadığı kıyaslanmaktadır. Robot kol sisteminin kinetik modeline ait Matlab-Simulink blok diyagram şeması Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.21 Robot kol kinetik model Simulink diyagram şeması

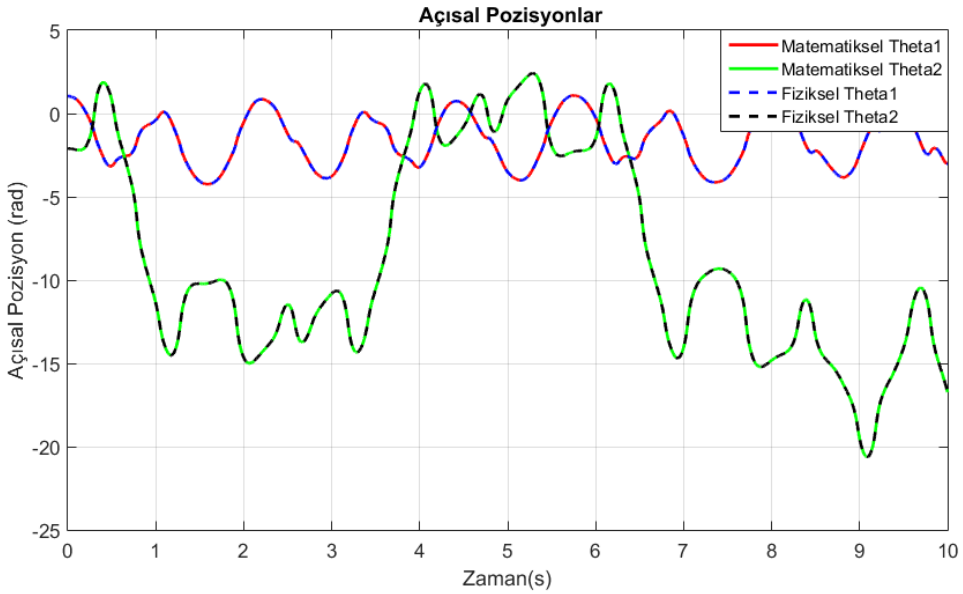
Robot kol sisteminin kinematik modeline ait Matlab-Simulink blok diyagramında bulunan ‘’Robot Kol ‘’ bloğunun içini gösteren görsel Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22. Kinetik model için robot kol bloğu iç modellemesi

a.) Pozisyon

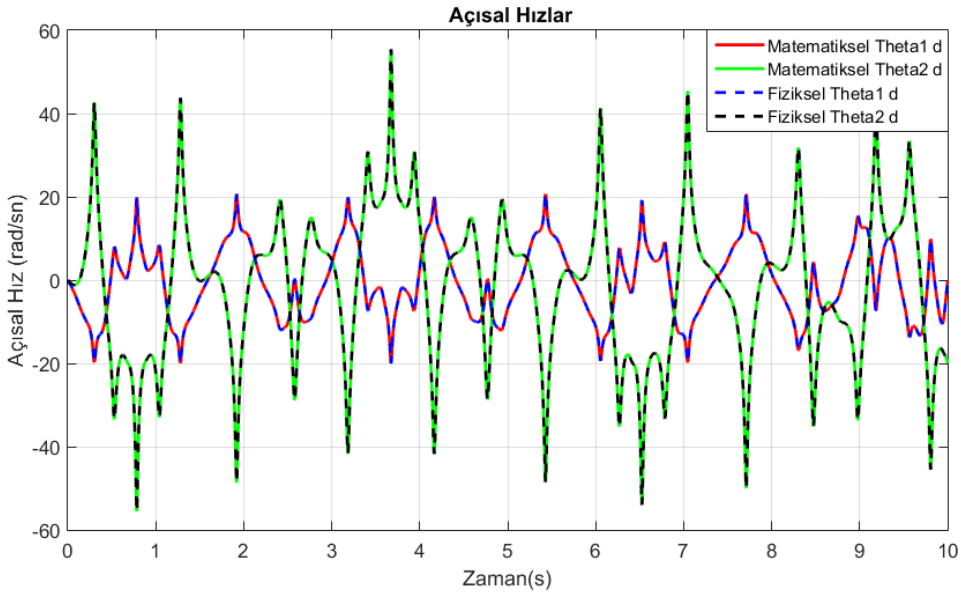
Kinetik sistemin pozisyon analizi yapılarken giriş verisi olarak fiziksel sisteme de matematiksel sisteme de aynı tork değeri gönderilmektedir. Gönderilen bu tork değerleri sonucunda çıktı olarak alınan θ_1 ve θ_2 değerlerinin fiziksel ve matematiksel çıktıları grafik yardımıyla birbiri ile karşılaştırılarak matematiksel ve fiziksel modellerin aynı sonucu verip vermediği kontrol edilmiştir. Kinetik sisteme ait ''Açısal Pozisyon'' grafiği Şekil 5.23'te verilmiştir.



Şekil 5.23. Kinetik sistem açısal pozisyon grafiği

b.) Hız

Kinetik sistemin pozisyon analizi yapılarken giriş verisi olarak fiziksel sisteme de matematiksel sisteme de aynı tork değeri gönderilmektedir. Gönderilen bu tork değerleri sonucunda çıktı olarak alınan $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ değerlerinin fiziksel ve matematiksel çıktıları grafik yardımı ile bir biri ile karşılaştırılarak matematiksel ve fiziksel modellerin birbiri ile aynı sonucu verip vermediği kontrol edilmiştir. Kinetik sisteme ait ''Açısal Hız'' grafiği Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24. Kinetik sistem açısal hız grafiği

BÜLÜM 6

DENETİM SİSTEMLERİ TASARIMI

6.1 Giriş

İki serbestlik derecesine sahip robot kolun kinematik ve dinamik testlerinin yapılmasının ardından sistemin fiziksel ve matematiksel modelinin eşleştiği ve sistemin denetleyici tasarımı yapmak için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun ardından iki serbestlik dereceli robot kol sistemi için PID (Proportional-Integral-Derivative) denetleyici tasarımı yapılmış ve bu denetleyicilere yapay zeka algoritması ile destek uygulanmıştır. Bu bölümde PID denetleyici tasarımının oluşturulması, PID denetleyicilerin fiziksel modele dahil edilmesi, PID denetleyicilere destek yapay sinir ağı uygulanması anlatılmıştır.

6.2 PID Denetim Sisteminin Tasarlanması

Denetleyiciler çıkıştan gelen sinyalin geri besleme yoluyla sisteme verilip referans sinyal ile karşılaştırılmasını sağlayan, referans sinyal ile çıkış sinyali arasındaki farkı yani hatayı en aza indirmeyi amaçlayan kontrol geribildirim mekanizmasıdır. PID denetleyici, bir robotun konumunun hassas kontrolü için yaygın olarak kullanılır (Mahto, Kaur, & Jain, 2022). Bu çalışmada denetleyici olarak PID denetleyici tercih edilmiştir.

6.2.1 PID Modeli

PID denetleyici, oransal-integral-türev modellerinin kombinasyonundan oluşan denetleyici türüdür. P sistemin anlık ne kadar hata yaptığını, I sistemin toplam hatasını, D sistemin hatasının değişim hızını ifade etmektedir. PID denetleyicisinin girişi hata, çıktısı ise torktur. PID kontrolcüye ait denklemlerde (6.1) numaralı eşitlik pozisyon

hatasını, (6.2) numaralı eşitlik hız hatasını, (6.3) numaralı eşitlik ise ivme hatasını ifade etmektedir.

$$e = \theta_r - \theta_a \tag{6.1}$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_a \tag{6.2}$$

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_r - \ddot{\theta}_a \tag{6.3}$$

PID denetleyiciye ait tork çıktısını veren denklemi elde etmek için yapılan hesaplamalar (6.4) ile (6.6) arası numaralı eşitliklerde verilmiştir.

$$\ddot{e} = -K_{p_e} - K_i \int e dt - K_d \frac{de}{dt} \tag{6.4}$$

$$\ddot{e} = -K_{p_e} - K_i \int e dt - K_d \frac{de}{dt} = \ddot{\theta}_r - \ddot{\theta}_a \tag{6.5}$$

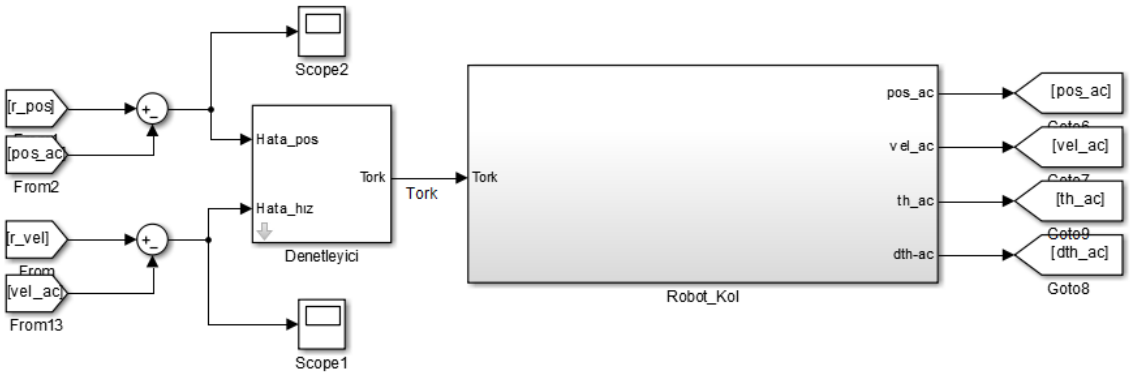
$$-K_{p_e} - K_i \int e dt - K_d \frac{de}{dt} = \ddot{\theta}_r - M^{-}(\tau - C\dot{\theta} - G) \tag{6.6}$$

PID denetleyiciye ait tork çıktısını veren denklem (6.7) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$\tau = M\left(\ddot{\theta}_r + K_p * (\theta_r - \theta_a) + K_i \int (\theta_r - \theta_a) dt + K_d \frac{d(\theta_r - \theta_a)}{dt}\right) + C\dot{\theta} + G \tag{6.7}$$

6.2.2 PID Denetleyicinin Fiziksel Modele Dahil Edilmesi

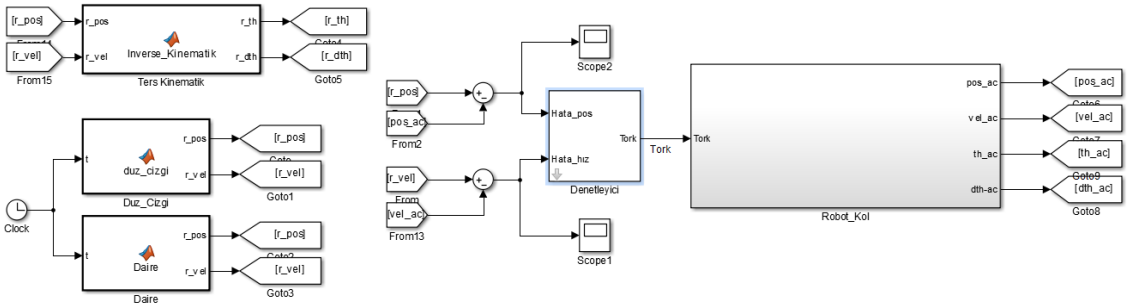
Beşinci bölümde Matlab modelinin kinematik ve kinetik testlerinin yapılması başlığı altında doğrulanan fiziksel robot kol modeli alt sistem olarak ‘’Robot_Kol’’ bloğu altına eklenmiştir. Bu robot kol alt sistemi bloğunun girdisi tork olarak verilmiştir. Torkun elde edilebilmesi için sisteme PID denetim sistemi eklenmiştir. Dahil edilen PID sistemi ile robot kol sisteminin birleştirilmiş blok diyagramı Şekil 6.1’de verilmiştir.



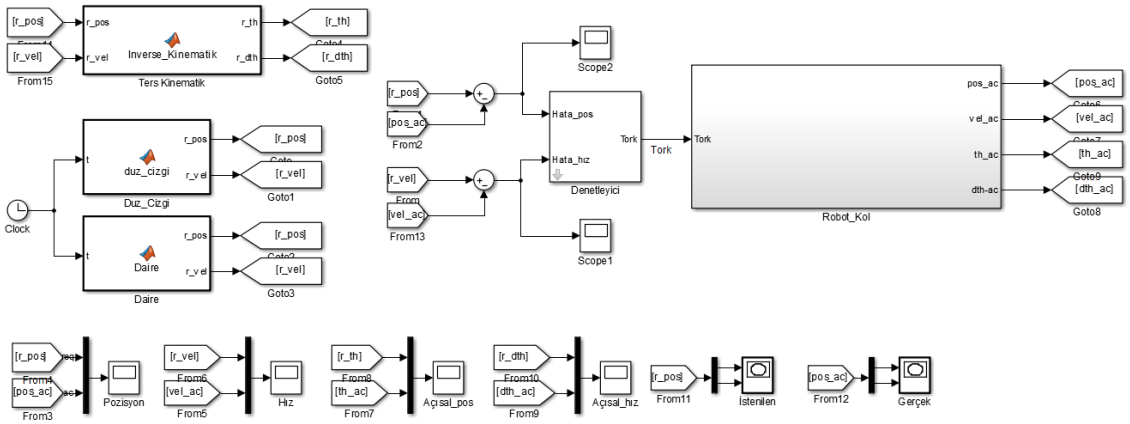
Şekil 6.1. Sisteme PID denetleyici eklenmiş blok diyagram şeması

Bölüm 3'te hareket tasarımı başlığı altında oluşturulan düz çizgi ve daire hareket durumları PID sistemine dahil edilmiştir. İki durum aynı anda kullanılmamaktadır. Düz çizgi durumu kullanılırken daire, daire durumu kullanılırken düz çizgi pasif haldedir. Düz çizgi ve daire durumlarının çıktıları ters kinematik modelin giriş değerleridir.

PID giriş değeri olarak kullanılan pozisyon hatasının hesaplanabilmesi için ters kinematik modelden elde edilen açısal konumdan fiziksel modelden elde edilen açısal konumun çıkarılması gerekmektedir. Aynı şekilde hız hatası ters kinematik modelden gelen açısal hızdan fiziksel modelden gelen açısal hızın çıkarılması ile bulunur. Hata değerlerini hesaplayabilmek için gerekli olan açısal pozisyon ve açısal hız değerleri beşinci bölümde doğrulanmış olan ters kinematik model sayesinde elde edilmektedir. Bu sebeple sisteme ters kinematik model ve hareket durumları eklenmiştir. Ters kinematik fonksiyon diyagramı ve hareket durumlarının eklendiği blok diyagram şeması Şekil 6.2'de verilmiştir. Grafik ekranları bulunduğu şema ise Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.2. Sisteme ters kinematik fonksiyonun ve hareket yörüngelerinin eklendiği blok diyagram şeması



Şekil 6.3. Sisteme grafik ekranlarının eklendiği blok diyagram şeması

6.2.2.1 PID Katsayılarının Belirlenmesi

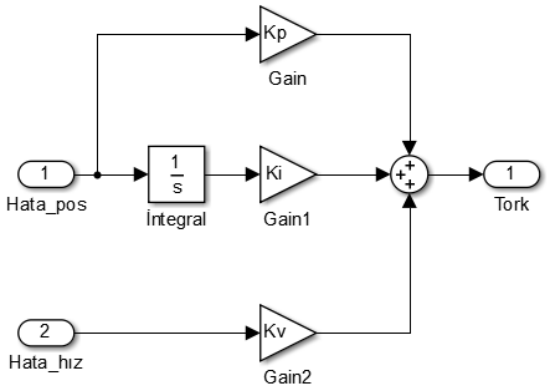
PID katsayılarını belirlemek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları deneme yanılma yöntemi, Cohen Conn yöntemi, Yuwana Seborg yöntemi, Ziegler Nichols yöntemidir. Bu tez çalışmasında PID katsayı değerleri deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir.

PID modeli başlığı altında (6.7) numaralı eşitliklerde yer alan; K_p, kontrol katsayısını, K_i, integral katsayısını, K_d, türev katsayısını, e, hata değerini ifade etmektedir. Bu katsayıların değişmesi PID kontrolcünün davranışında değişimlere neden olmaktadır. PID katsayı değişimlerinin etkileri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. PID Katsayılarının İstenilen Çıktıya Etkileri

Artarsa ↑	Düşükten Yükseğe Çıkış Süresi	Aşım	Sistemin Yerleşme Süresi	Kalıcı Durum Hatası
K_p	Azalır	Artar	Küçük Değişim	Azalır
K_i	Azalır	Artar	Artar	Azalır
K_d	Küçük Değişim	Azalır	Azalır	Değişmez

İki serbestlik dereceli robot kol için kullanılan PID denetleyici Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. PID denetleyici

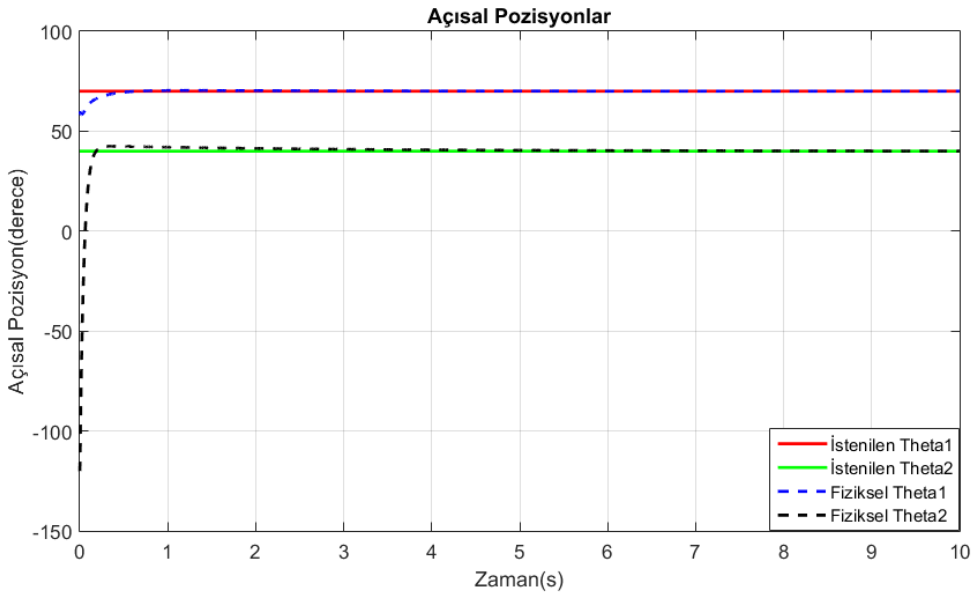
PID denetleyicinin blok diyagramının verildiği Şekil 6.4'te PID katsayıları, K_P her bir açı için, K_i her bir açının integrali için, K_v her bir açısal hız için hatanın karşılaştırılmasında kullanılan iki değerli vektörlerdir. K_P, K_i ve K_v için kullanılan değerler Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2: PID Katsayı Değerleri

PID Katsayıları	Katsayı Değerleri
K_P	[16,34]
K_i	[6,8]
K_v	[1,2]

6.2.3 PID Denetleyicinin Benzetim Çıktıları

Katsayı değerlerinin belirlenmesinin ardından robot kolun birinci eklemine 70 derece, ikinci eklemine 40 derece adım girişi uygulanarak PID denetleyicilerin davranışı test edilmiştir. PID denetleyicilere ait açısal pozisyon grafiği Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5. Referans girişler için açısal pozisyon grafiği (PID)

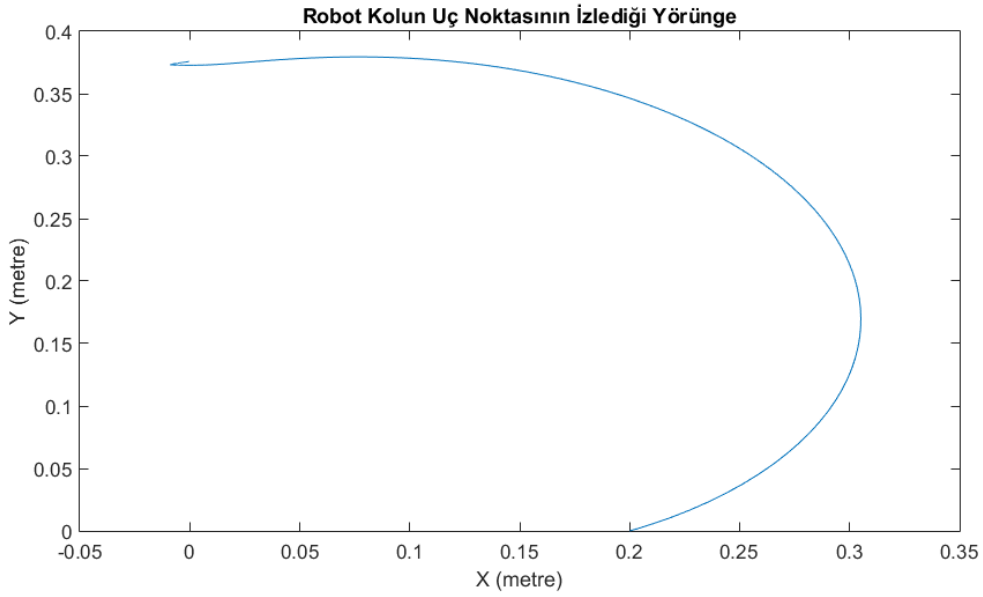
θ_1 için;

Düşükten yükseğe çıkma süresi (rise time) 0,45 saniyedir. Aşım (overshoot) değeri % 0.28 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi (settling time) 6 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır.

θ_2 için;

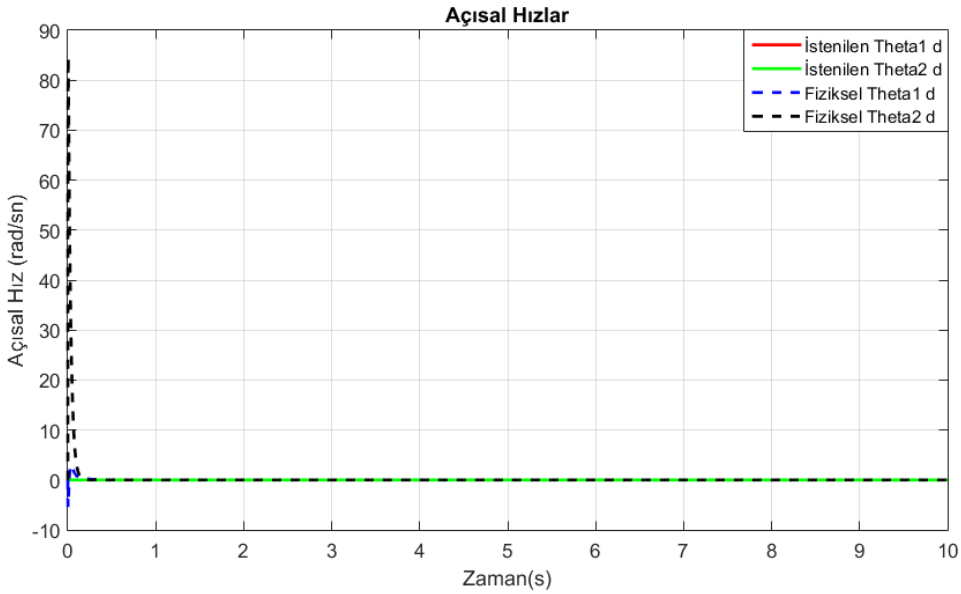
Düşükten yükseğe çıkma süresi (rise time) 0,14 saniyedir. Aşım (overshoot) değeri % 2.7 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi (settling time) 6 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise % 0.27 olarak ölçülmüştür.

Robot kolun eklemlerine 70 derece ve 40 derece adım girişi uygulandığında robot kolun uç noktasının izlediği yol Şekil 6.6'da verilmiştir. Robot kolun uç noktasının koordinatları x 0.2 metreden 0'a, y ise 0'dan 0.376 metreye gitmiştir.



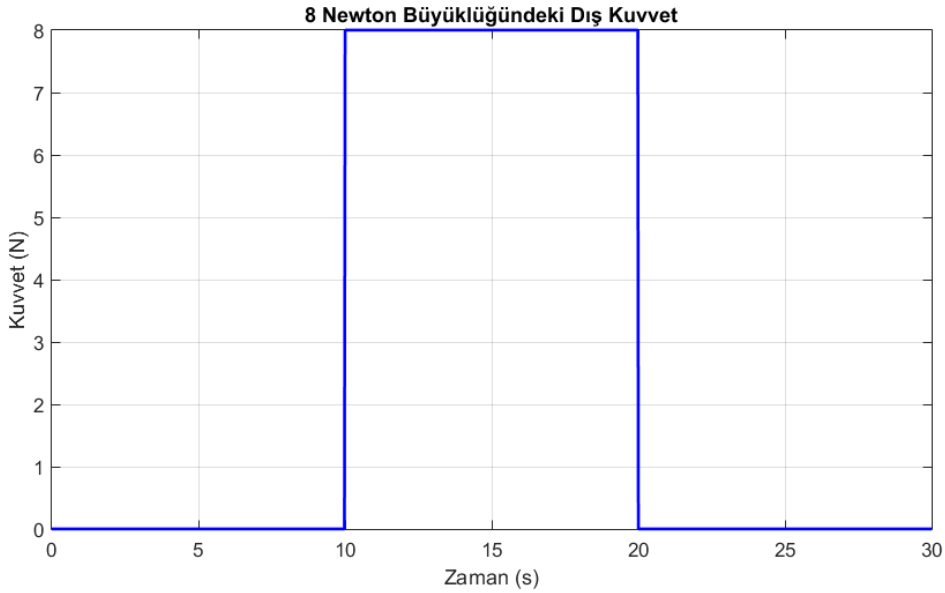
Şekil 6.6. Referans giriş değerleri ile oluşan robot uç noktası yörünge grafiği (PID)

Birinci ekleme 70 derece ikinci ekleme 40 derece adım girişi uygulandığında ortaya çıkan açısal hız grafiği ise Şekil 6.7'de verilmiştir. İvmenin 0 olduğu gözlemlenmiştir.



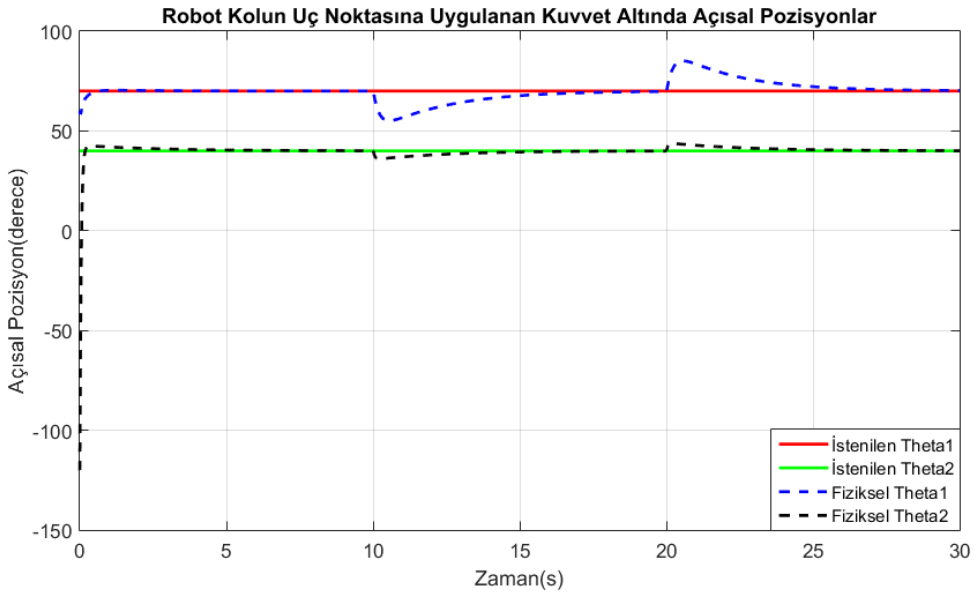
Şekil 6.7. Referans giriş değerleri ile açısal hız grafiği (PID)

PID testlerine robot kolun uç noktasına dışarıdan bir kuvvet uygulanarak devam edilmiştir. Birinci ekleme 70 derecelik ikinci ekleme 40 derecelik adım girişi uygulanırken 30 saniyelik bir benzetim oluşturulmuştur ve bu benzetimin 10. ve 20. saniyeleri arasında robot kolun uç noktasına 8 Newton büyüklüğünde bir dış kuvvet uygulanmıştır. Uygulanan dış kuvvetin grafiksel gösterimi Şekil 6.8'de verilmiştir.



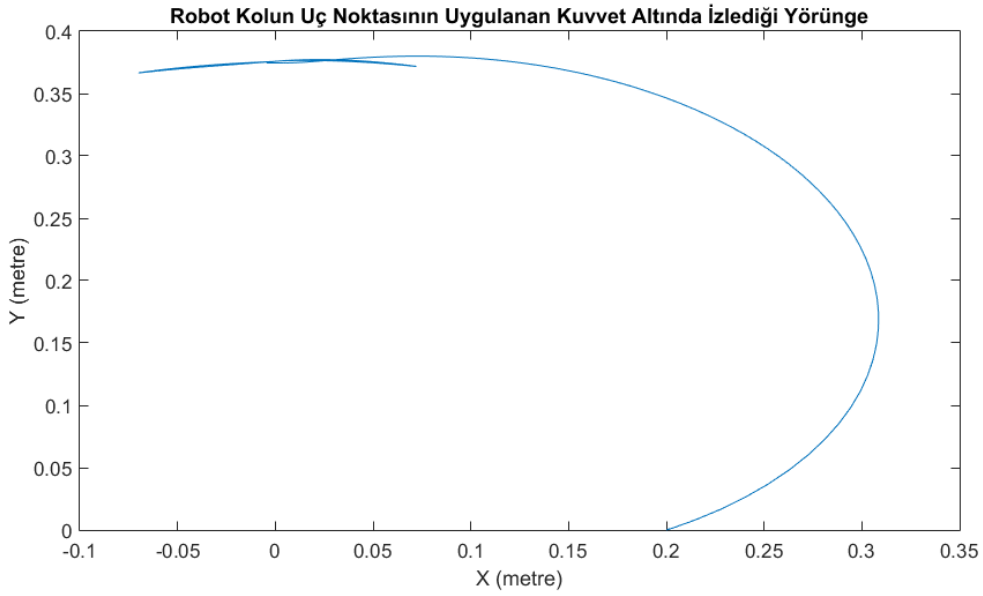
Şekil 6.8. 8 Newton büyüklüğünde bozucu etki yaratan dış kuvvet

Robot kolun uç noktasına 30 saniyelik benzetimin 10. saniyesinde başlayıp 20. saniyesinde biten 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanması ile oluşan açısal pozisyon grafiği Şekil 6.9'da verilmiştir.



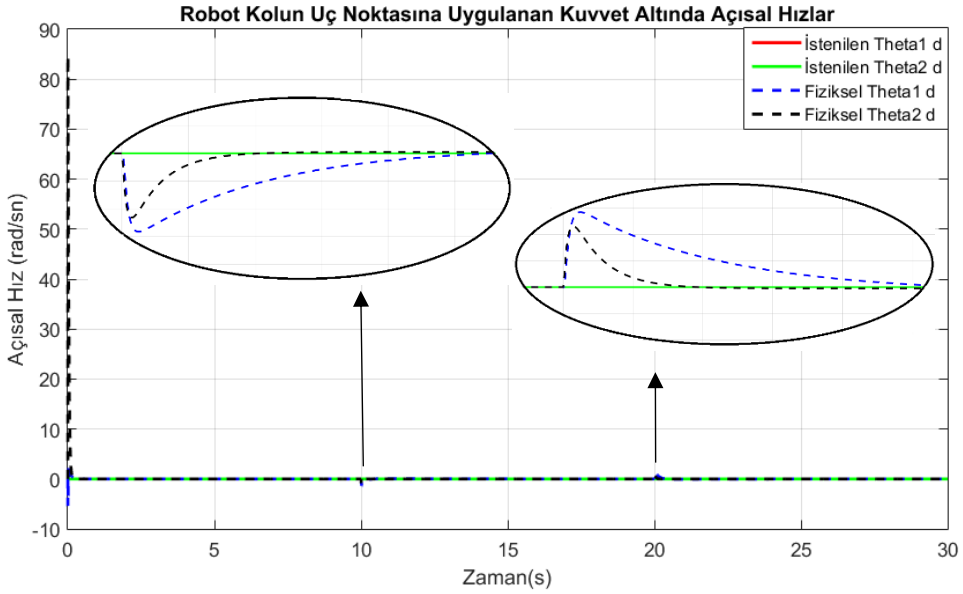
Şekil 6.9. Referans giriş değerleri için 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (PID)

Robot kolun eklemlerine 70 derece ve 40 derece adım girişi uygulanırken 30 saniyelik benzetimin 10. ve 20. Saniyeleri arasında robot kolun uç noktasına uygulanan 8 Newton büyüklüğünde kuvvetin bozucu etkisi altında robot kolun uç noktasının izlediği yol Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. 8 N büyüklüğünde kuvvet altında referans giriş değerleri ile robot uç noktası yörünge grafiği (PID)

8 Newton büyüklüğündeki etki altında açısal ivme grafiği ise Şekil 6.11'de verilmiştir. 10. saniyede 8 Newton büyüklüğünde kuvvetin uygulanmaya başlanması ve 20. saniyede kuvvetin uygulamaya son verilmesinden kaynaklı ivmede ufak bir değişim olmaktadır.



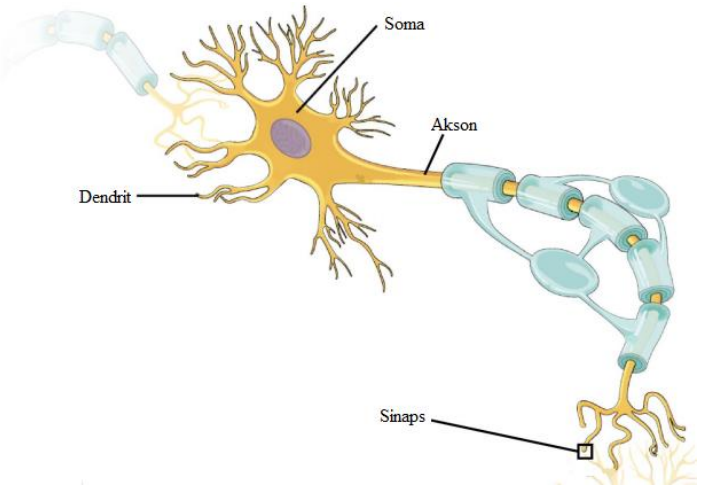
Şekil 6.11. 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında referans giriş değerleri ile oluşan açısal hız grafiği (PID)

6.3 Hibrit Denetim Sistemi (PID+ Yapay Sinir Ağları)

Bu başlık altında geleneksel PID denetim sistemine destek amacı ile eklenen yapay sinir ağları anlatılmıştır.

Yapay sinir ağları, insan beynindeki sinir ağları örnek alınarak oluşturulmuş yapay zeka algoritmasıdır. Bu nedenle yapay sinir ağları insan beynini taklit ederek geliştirilmiş, ağırlıklı bağlantılar yardımı ile birbirine bağlanan ve her biri kendi belleğine sahip işlem elemanlarından oluşan paralel ve dağıtılmış bilgi işleme yapılarıdır (Keleşoğlu & Fırat, 2006).

Yapay sinir ağlarının çalışma prensibi insan beyninde bulunan sinir hücrelerinin incelenmesi ile daha iyi anlaşılabilir. Biyolojik sinir ağlarına ait görsel Şekil 6.12'de verilmiştir.



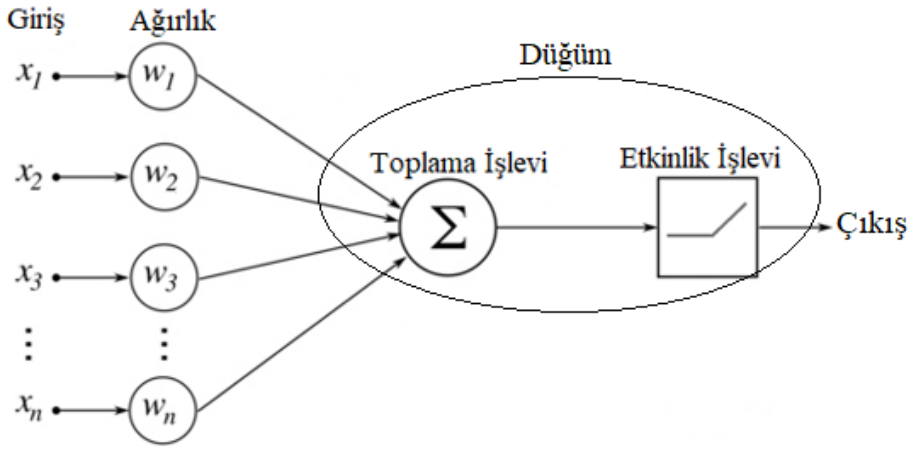
Şekil 6.12. Biyolojik sinir ağları

Biyolojik sinir hücrelerinin dört temel bileşeni vardır. Bu bileşenler şu şekilde açıklanabilir;

- Dendrit: Bağlantılı olduğu komşu hücrelerden sinyali alır.
- Soma: Hücrenin gövdesidir ve gelen sinyalleri işler ardından bir çıkış üretir.
- Akson: İşlenen sinyali çıkışa aktarır.
- Sinaps: Çıkıştaki sinyali bağlantılı olduğu komşulara iletir.

Yapay sinir hücreleri biyolojik sinir hücrelerinin bu bileşenlerinin davranışlarını taklit etmektedirler. Biyolojik sinir ağlarında bulunan dentritin yapay sinir ağlarındaki karşılığı giriş, somaya karşılık gelen terim düğüm, sinapsin karşılığı ağırlık ve aksonun karşılığı ise çıkıştır.

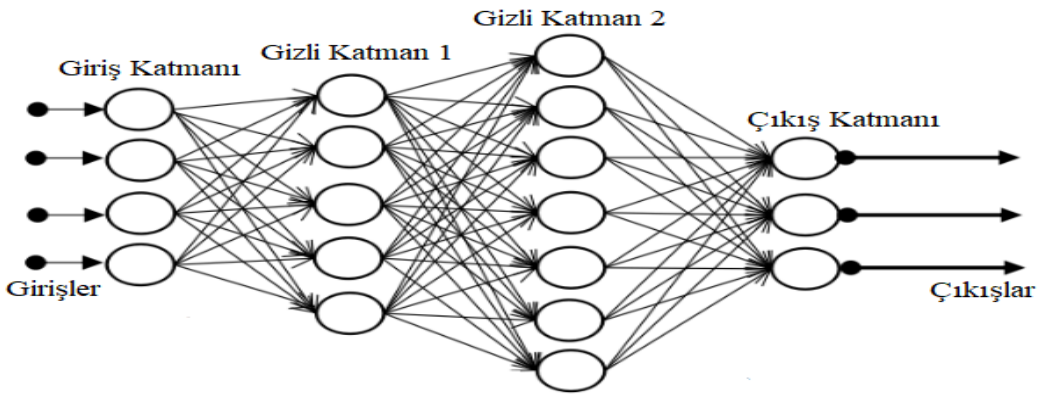
Yapay sinir ağı hücresine ait görsel Şekil 6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.13. Yapay sinir ağı hücresi

- Girişler: Komşu sinir hücrelerinden ya da dış dünyadan alınan sinyaller olabilir.
- Ağırlıklar: Her bir girişin sinir hücresi üzerindeki etkisini belirleyen katsayılardır. Her bir girişin kendine ait bir katsayı değeri vardır.
- Toplama İşlevi: Her bir girişin kendi ağırlık katsayısı ile çarpıldıktan sonra toplanmasının ardından, bu toplama eşik değerinin ilave edilmesiyle elde edilir.
- Aktivasyon Fonksiyonu: Toplama işlevinden elde edilen değer bir aktivasyon fonksiyonunda geçirilerek elde edilen değer yapay sinir hücresinin çıkışına iletilir.
- Çıkış İşlevi: İşlev sonucunun komşu diğer sinir hücrelerine ya da doğrudan çıkışa iletildiği noktadır.

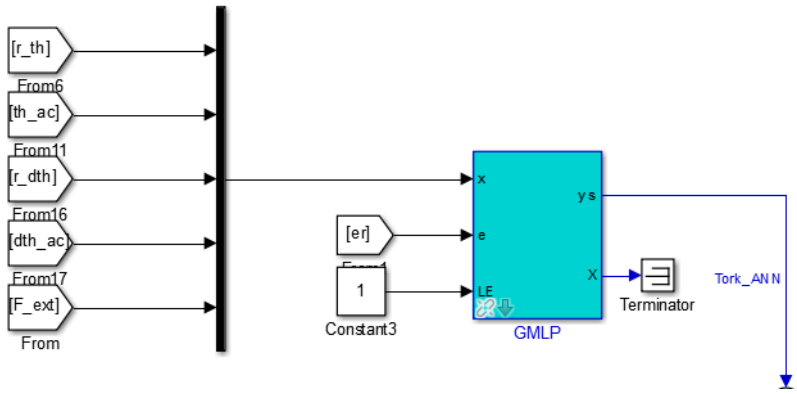
Yapay sinir ağları birden çok yapay sinir hücresinin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Örnek bir yapay sinir ağını gösteren görsel Şekil 6.14'te verilmiştir.



Şekil 6.14. Yapay sinir ağı katmanları

6.3.1 PID Denetleyici Sistemine Yapay Sinir Ağlarının Dahil Edilmesi

Bu çalışmada yapay sinir ağları PID denetleyici katsayılarını optimize etmek için değil kontrol sistemine dışarıdan destek sağlamak için kullanılmıştır. Bölüm 6.2'de oluşturulan PID denetleyici sistem modeline ayrık zamanlı genelleştirilmiş MLP sinir ağı, (GMLP) yapay sinir ağı bloğu eklenerek yapay sinir ağları sisteme dahil edilmiştir (Campa, Fravolini, & Napolitano, 2002). GMLP sinir ağı bloğunun görseli Şekil 6.15'te verilmiştir.

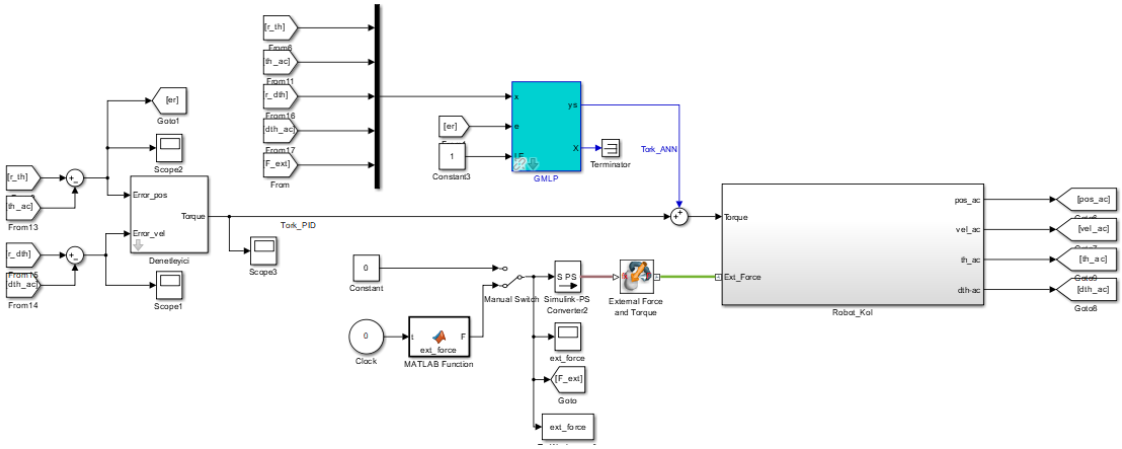


Şekil 6.15. Yapay sinir ağları bloğu

GMLP sinir ağı bloğunun girişlerinden ‘x’ ile ifade edilen girişten gönderilen veriler fiziksel modelden gelen θ_1, θ_2, $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$, matematiksel modelden gelen θ_1, θ_2, $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$ ve robot kol uç noktasına uygulanan 8 N büyüklüğündeki dış kuvvettir. GMLP bloğunun ‘e’ ile ifade edilen girişinden pozisyon hataları da yapay sinir ağı bloğuna giriş olarak gönderilmektedir. LE ile ifade edilen üçüncü giriş ise öğrenme etkinliğidir. LE=1 ile öğrenme etkinleştirilir, LE=0 ile öğrenme devre dışı bırakılır.

GMLP bloğunun ‘ys’ çıkışı yapay sinir ağının oluşturduğu torktur. Ve bu tork toplama bloğu ile PID denetleyiciden gelen torka ilave edilmektedir. Böylece robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvetin etkisini gidermede yapay sinir ağları PID denetleyiciye destek sağlamaktadır. İkinci çıktı ise sütun bazında yeniden şekillendirilmiş durum matrisidir. Bu matrise ihtiyaç olmadığı için veriler terminatör bloğuna gönderilmiştir.

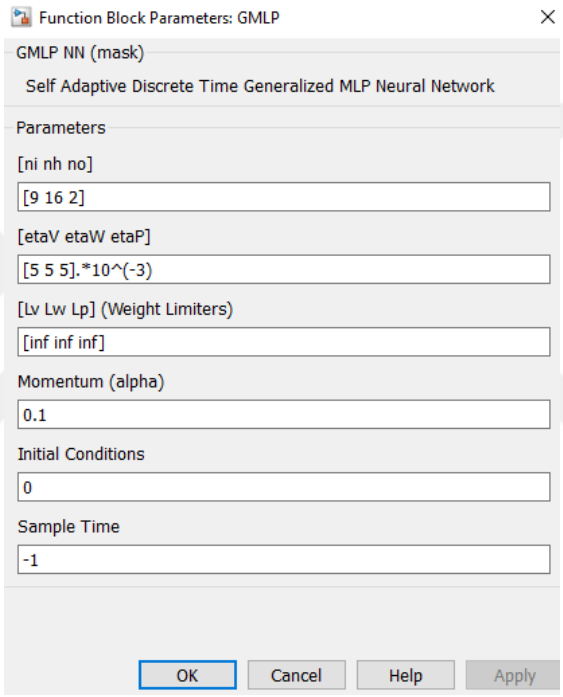
Blok diyagram şemasının genel görünümü Şekil 6.16’da verilmiştir.



Şekil 6.16. Sisteme yapay sinir ağı eklenmesi ile oluşan blok diyagram şeması

6.3.2 Yapay Sinir Ağlarının Katsayılarının Belirlenmesi

PID denetleyici parametrelerinde olduğu gibi yapay sinir ağı parametrelerini belirlenirken de deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. Parametrelerin belirlenmesinde etkin faktörler aşım, düşükten yükseğe çıkmak için geçen süre, sistemin yerleşme süresi ve kalıcı durum hatasıdır. Parametreler belirlenirken, aşımın en düşük olduğu sistemin yerleşme süresinin en kısa olduğu ve kalıcı durum hatasının en az olduğu koşullardaki değerler seçilmiştir. Seçilen parametrelerin gösteren GMLP bloğuna ait fonksiyon parametrelerinin belirlendiği bölüm Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17. Yapay sinir ağları bloğu parametreleri

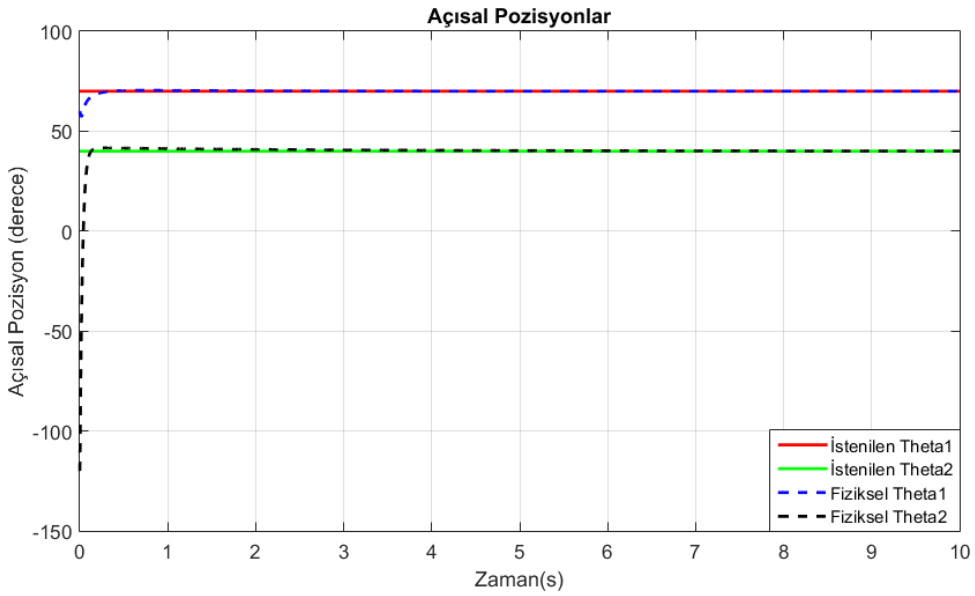
GMLP bloğuna ait fonksiyon parametrelerinin verildiği Şekil 6.17'de görülen:

- İlk parametre n_i girdi sayısını, n_h gizli katmandaki nöron sayısını ve n_o çıktı sayısını içeren bir vektördür.
- İkinci parametre vektörü aşağıdakiler için öğrenme oranlarını içerir:
  1) Giriş ve gizli katmanları birbirine bağlayan ağırlıklar (V)
  2) Gizli ve çıktı katmanlarını birbirine bağlayan ağırlıklar (W)
  3) Parametreler vektörü (P)
- Üçüncü parametre vektörü ikinci parametre vektöründe yer alan 3 öğenin her bir elemanı için sınırlayıcılar içerir. Başka bir ifade ile ağırlık sınırlayıcıdır.

- Dördüncü parametre momentum vektörüdür. Momentum faktörü sonraki her ağırlık değişikliğine eklenen ağırlık değişikliği oranını tanımlamaktadır.

6.3.3 Yapay Sinir Ağları Destekli Sistemin Benzetim Çıktıları

Katsayı değerlerinin belirlenmesinin ardından yine PID denetleyici benzetimlerinde olduğu gibi robot kolun birinci eklemine 70 derece, ikinci eklemine 40 derece adım girişi uygulanarak PID denetleyicili sisteme yapay sinir ağları desteği eklenerek davranışı test edilmiştir. Yapay sinir ağları destekli sisteme ait açısal pozisyon grafiği Şekil 6.18'de verilmiştir.



Şekil 6.18. Referans girişler için açısal pozisyon grafiği (YSA)

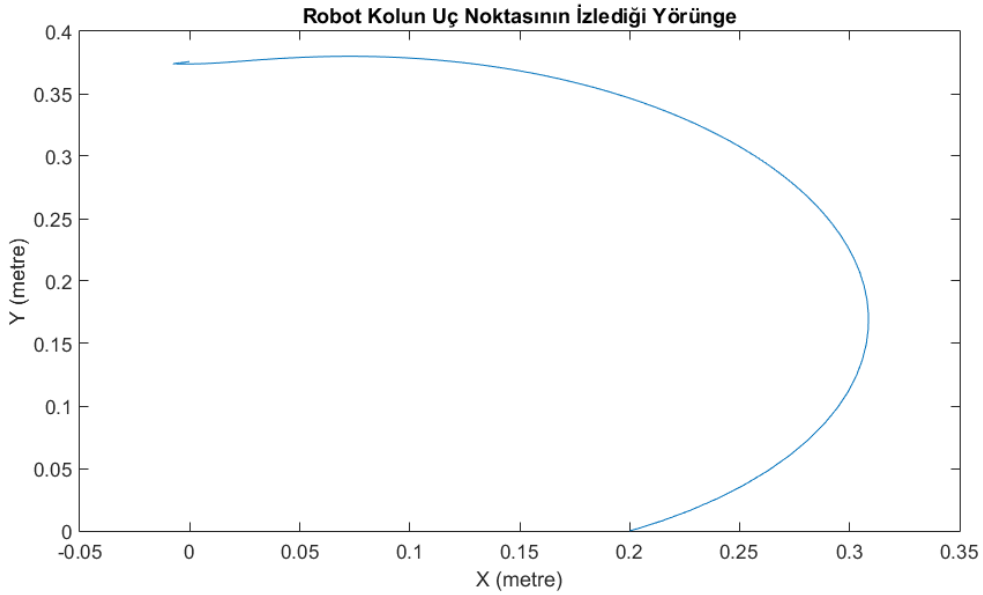
θ_1 için;

Düşükten yükseğe çıkma süresi 0,357 saniyedir. Aşım değeri % 0.64 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 6 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır.

θ_2 için;

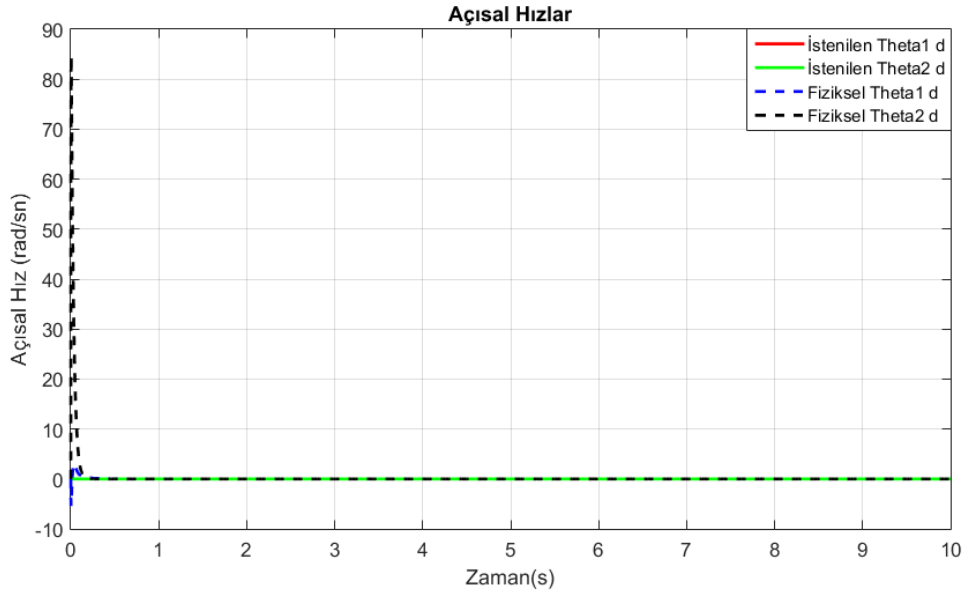
Düşükten yükseğe çıkma süresi 0,14 saniyedir. Aşım değeri % 1,4 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 6 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise % 0.12 olarak ölçülmüştür.

Robot kolun eklemlerine 70 derece ve 40 derece adım girişi uygulandığında robot kolun uç noktasının izlediği yol Şekil 6.19'da verilmiştir. Robot kolun uç noktasının koordinatlarından x 0.2 metreden 0'a, y ise 0'dan 0.376 metreye gitmiştir.



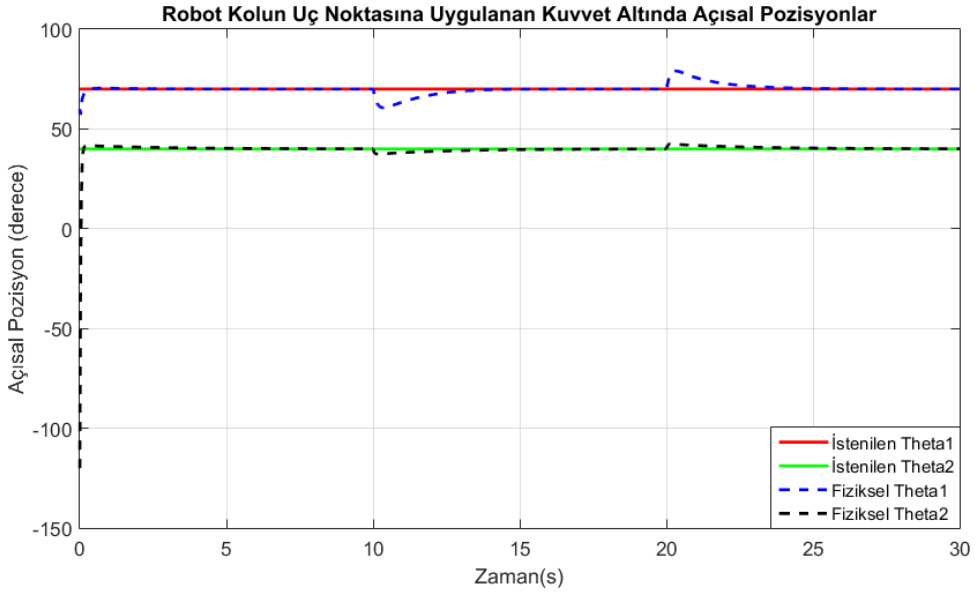
Şekil 6.19. Referans giriş değerleri ile oluşan robot uç noktası yörünge grafiği (YSA)

Birinci ekleme 70 derece ikinci ekleme 40 derece adım girişi uygulandığında ortaya çıkan açısal hız grafiği ise Şekil 6.20'de verilmiştir. İvmenin 0 olduğu gözlemlenmiştir.



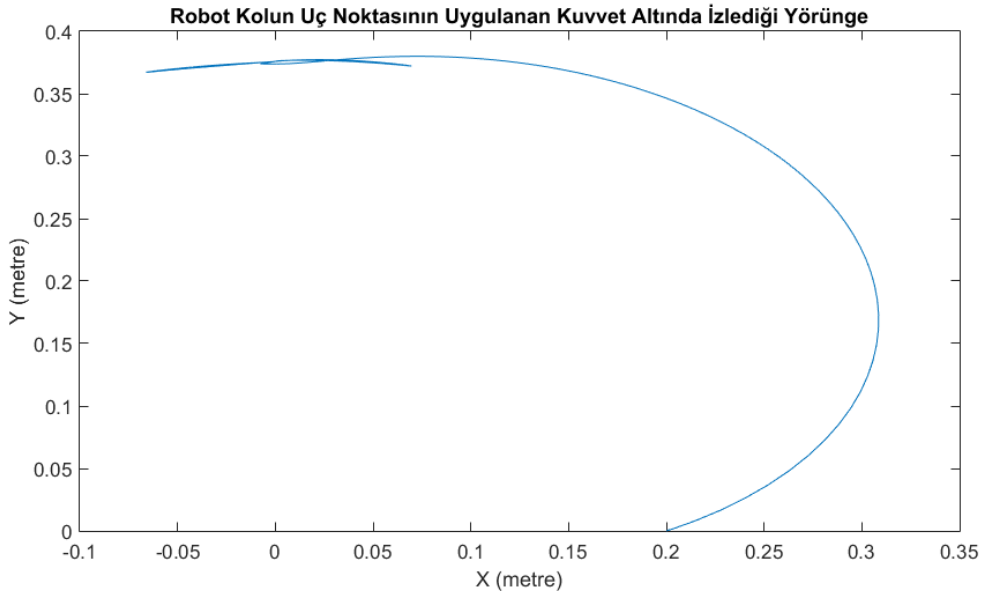
Şekil 6.20. Referans giriş değerleri ile açısal hız grafiği (YSA)

Yine geleneksel PID denetleme sisteminde olduğu gibi yapay sinir ağı destekli denetim sisteminde de robot kolun uç noktasına 30 saniyelik benzetimin 10. saniyesinde başlayıp 20. saniyesinde biten 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanmıştır. Oluşan açısal pozisyon grafiği Şekil 6.21'de verilmiştir.



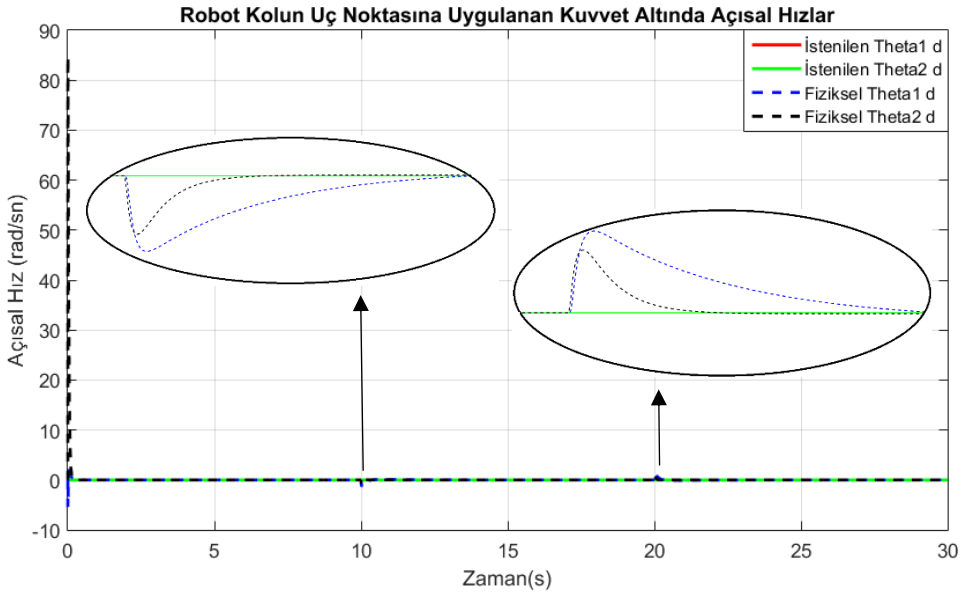
Şekil 6.21. Referans giriş değerleri için 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (YSA)

Robot kolun eklemlerine 70 derece ve 40 derece adım girişi uygulanırken 30 saniyelik benzetimin 10. ve 20. saniyeleri arasında robot kolun uç noktasına uygulanan 8 Newton büyüklüğündeki kuvvetin bozucu etkisi altında robot kolun uç noktasının izlediği yol Şekil 6.22'de verilmiştir.



Şekil 6.22. 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında referans giriş değerleri ile robot uç noktası yörünge grafiği (YSA)

8 N büyüklüğündeki kuvvet altında açısal ivme grafiği Şekil 6.23'te verilmiştir. 10. saniyede 8 N büyüklüğünde kuvvetin uygulanmaya başlanması ve 20. saniyede kuvvet uygulamaya son verilmesinden kaynaklı ivmede ufak bir değişim olmaktadır.

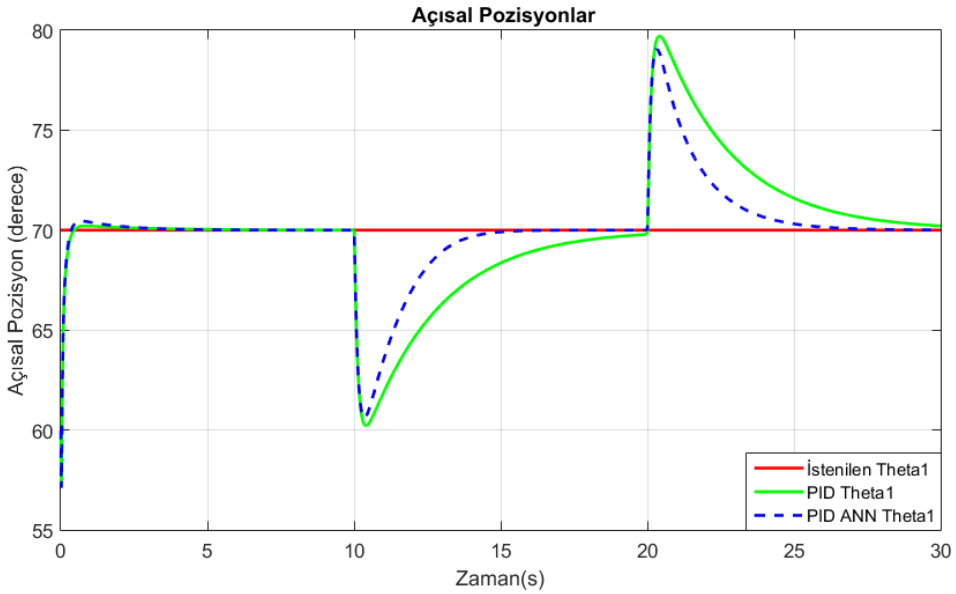


Şekil 6.23. 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında referans giriş değerleri ile oluşan açısal hız grafiği (YSA)

6.4 Tasarlanan Denetleme Sistemlerinin Karşılaştırılması

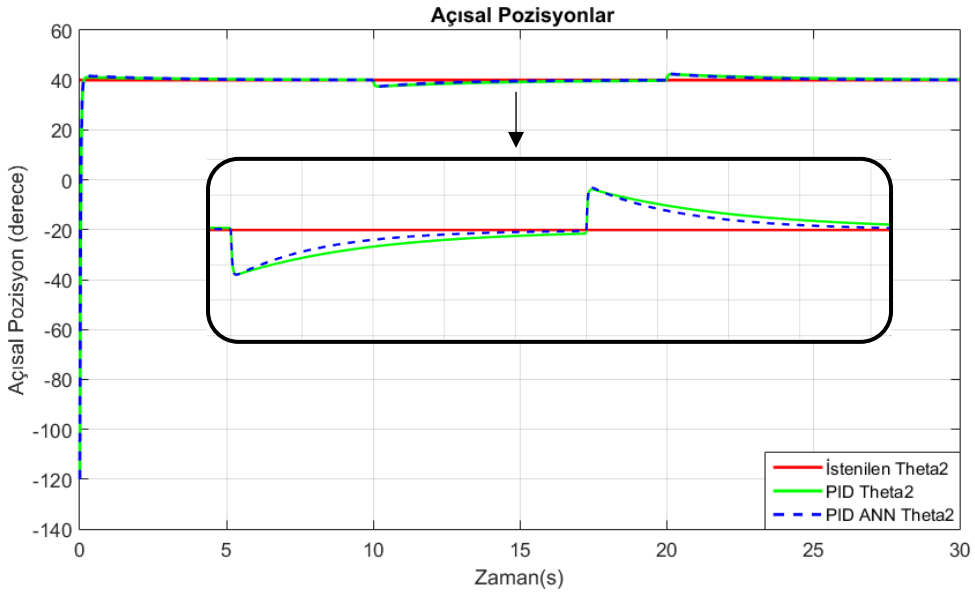
Bu başlık altında geleneksel PID denetleme sistemi ve YSA destekli PID denetleme sisteminin dışarıdan uygulanan kuvvetlere verdiği cevapların daha net görülebilmesi için istenilen referans açıların, PID denetleme sistemi ve YSA destekli PID denetleme sistemi cevapları aynı grafik içinde verilmiştir.

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında uygulanan 8 Newton büyüklüğündeki dış kuvvetin robot kolun birinci eklemine uygulanan 70 derecelik açı üzerindeki bozucu etkisinin her iki denetleme sistemi ile kontrolü Şekil 6.24'te verilmiştir.



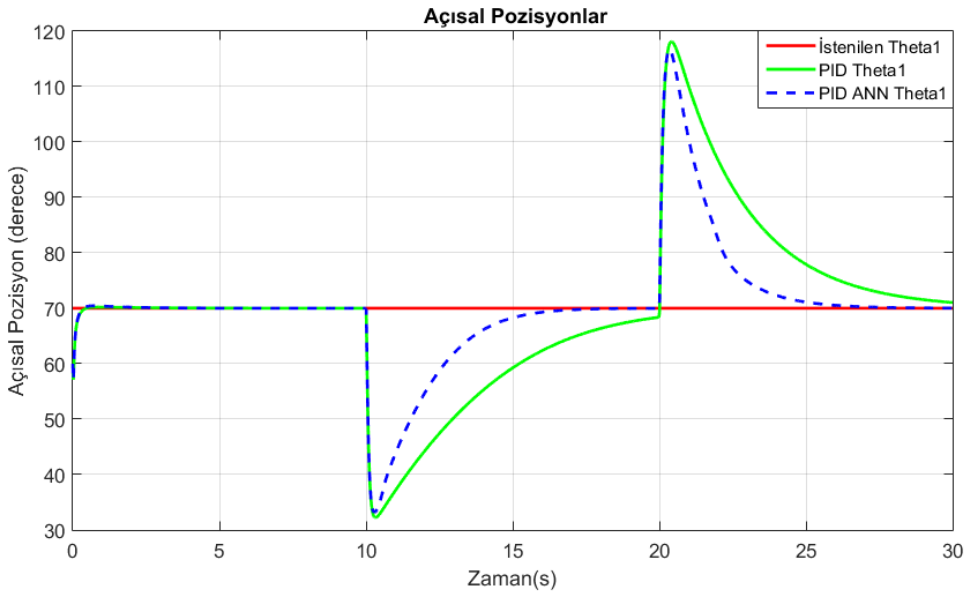
Şekil 6.24. İlk ekleme uygulanan 8 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında uygulanan 8 Newton büyüklüğündeki dış kuvvetin robot kolun ikinci eklemine uygulanan 40 derecelik açı üzerindeki bozucu etkisinin her iki denetleme sistemi ile kontrolü Şekil 6.25'te verilmiştir.



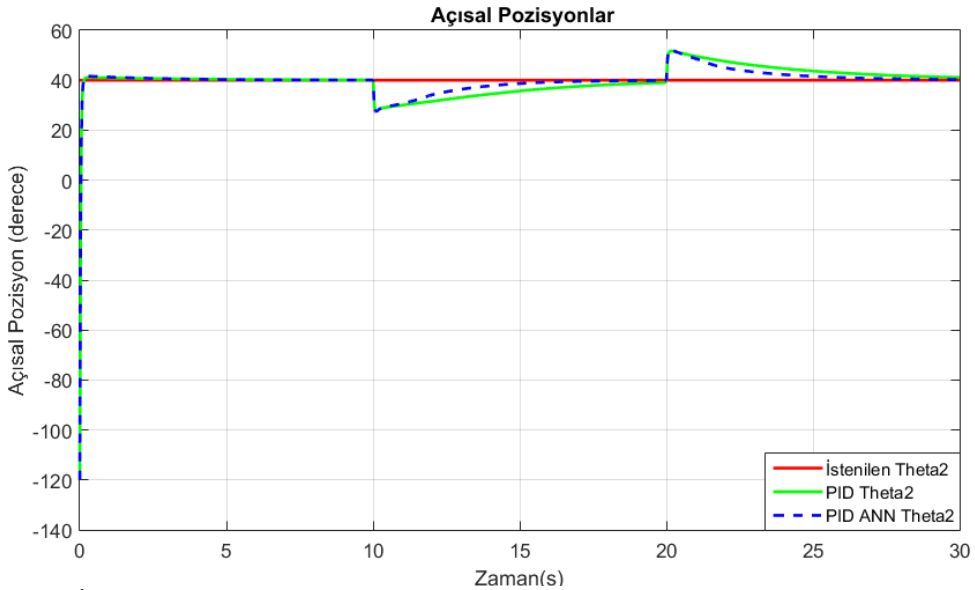
Şekil 6.25. İkinci ekleme uygulanan 8 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında uygulanan 40 Newton büyüklüğündeki dış kuvvetin robot kolun birinci eklemine uygulanan 70 derecelik açı üzerindeki bozucu etkisinin her iki denetleme sistemi ile kontrolü Şekil 6.26'da verilmiştir.



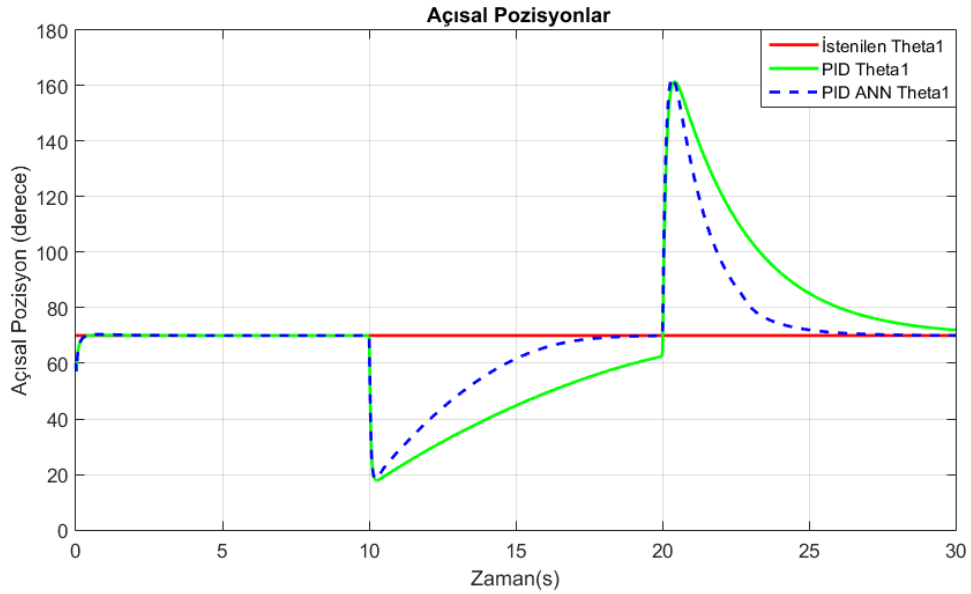
Şekil 6.26. İlk ekleme uygulanan 40 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında uygulanan 8 Newton büyüklüğündeki dış kuvvetin robot kolun ikinci eklemine uygulanan 40 derecelik açı üzerindeki bozucu etkisinin her iki denetleme sistemi ile kontrolü Şekil 6.27'de verilmiştir.



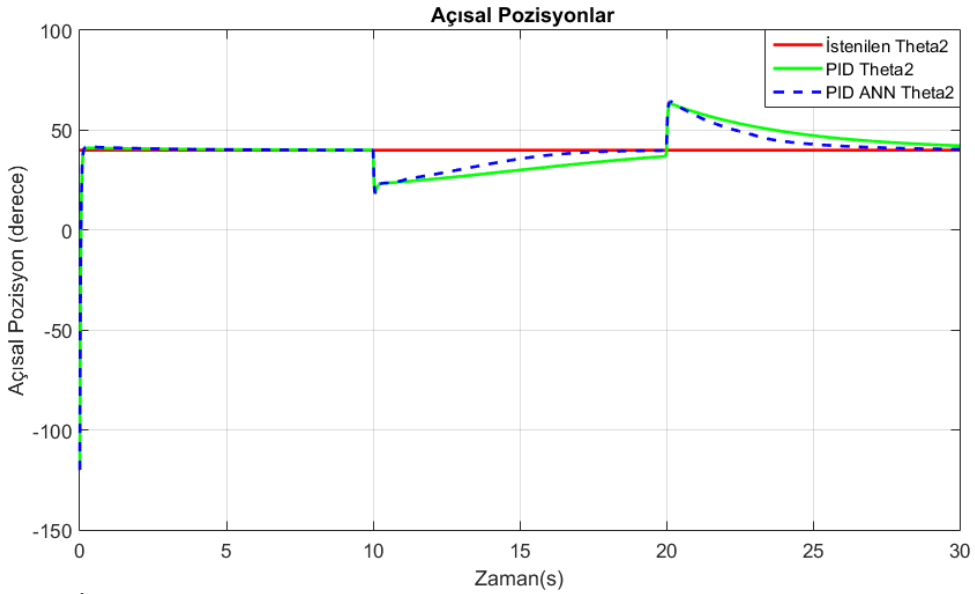
Şekil 6.27. İkinci ekleme uygulanan 40 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında uygulanan 80 Newton büyüklüğündeki dış kuvvetin robot kolun birinci eklemine uygulanan 70 derecelik açı üzerindeki bozucu etkisinin her iki denetleme sistemi ile kontrolü Şekil 6.28'de verilmiştir.



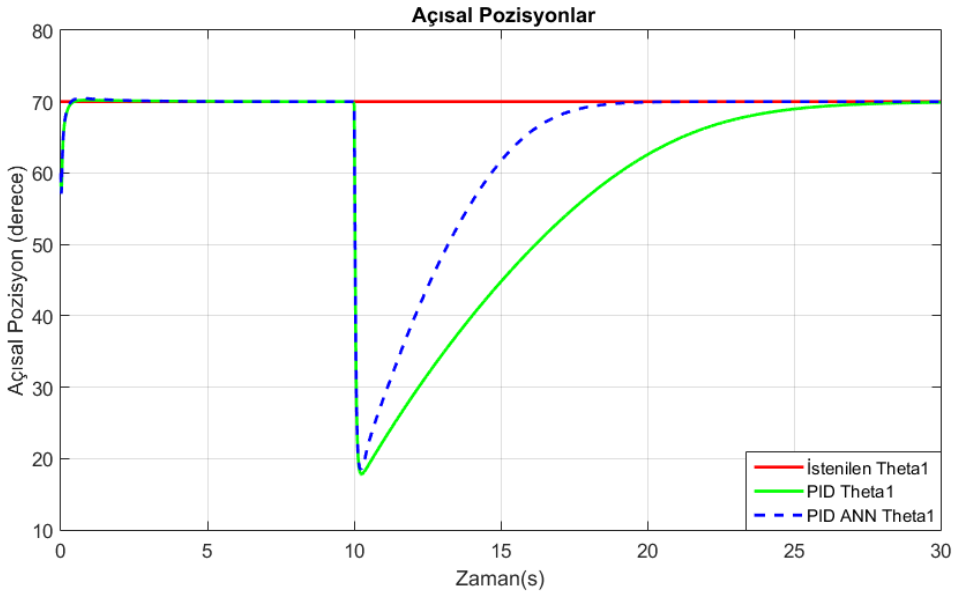
Şekil 6.28. İlk ekleme uygulanan 80 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında uygulanan 80 Newton büyüklüğündeki dış kuvvetin robot kolun ikinci eklemine uygulanan 40 derecelik açı üzerindeki bozucu etkisinin her iki denetleme sistemi ile kontrolü Şekil 6.29'da verilmiştir.



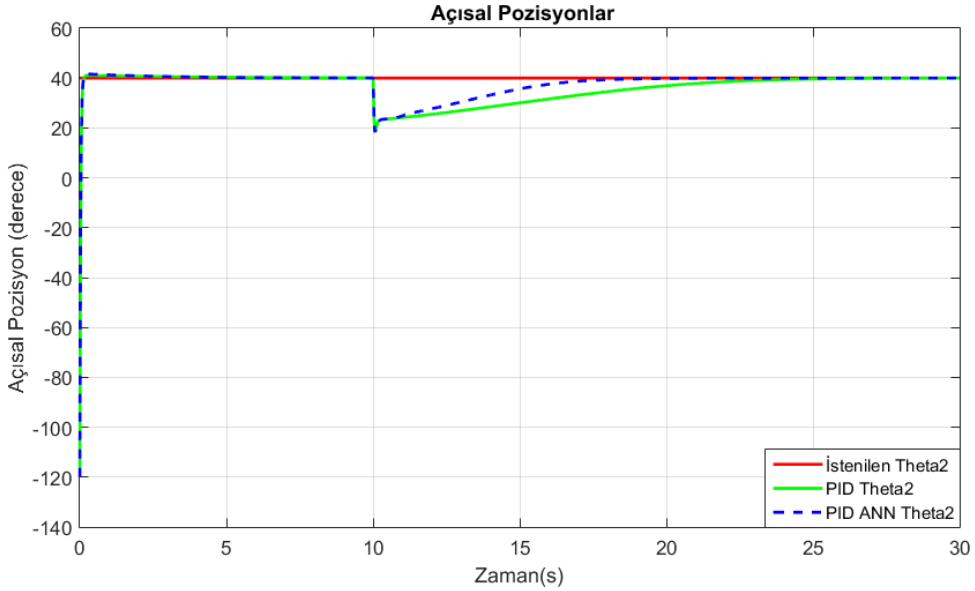
Şekil 6.29. İkinci ekleme uygulanan 80 N büyüklüğündeki kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi

Robot kolun uç noktasına 10. saniyede başlayan ve sürekli devam eden 80 Newton büyüklüğündeki dış kuvvetin robot kolun birinci eklemine uygulanan 70 derecelik açı üzerindeki bozucu etkisinin her iki denetleme sistemi ile kontrolü Şekil 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6.30. İlk ekleme uygulanan 80 N büyüklüğündeki devamlı kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi

Robot kolun uç noktasına 10. saniyede başlayan ve sürekli devam eden 80 N büyüklüğündeki dış kuvvetin robot kolun ikinci eklemine uygulanan 40 derecelik açı üzerindeki bozucu etkisinin her iki denetleme sistemi ile kontrolü Şekil 6.31'de verilmiştir.



Şekil 6.31. İkinci ekleme uygulanan 80 N büyüklüğündeki devamlı kuvvete denetim sistemlerinin tepkisi

BÖLÜM 7

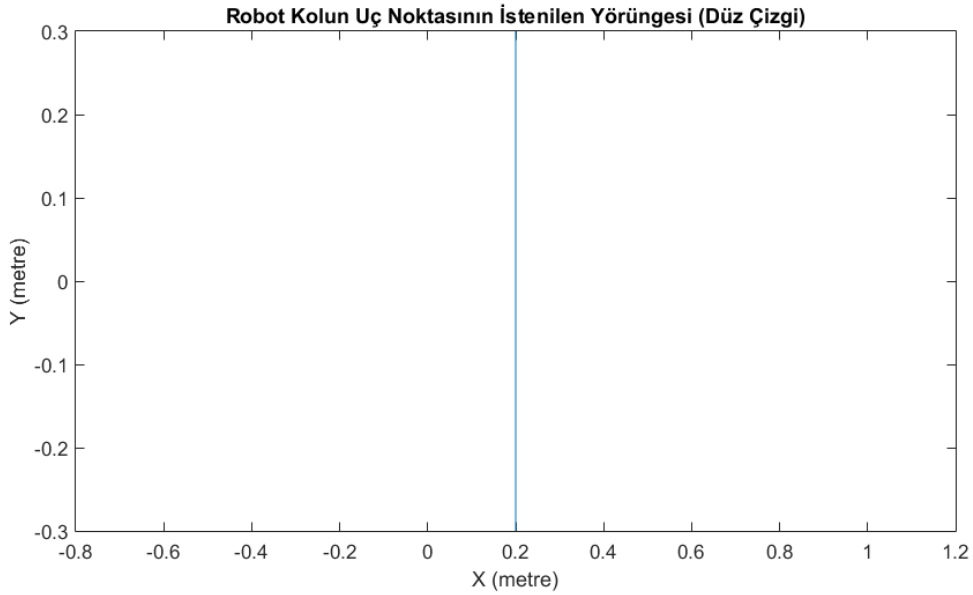
BENZETİM SONUÇLARI

7.1 Giriş

Bu bölümde daha önce bölüm 3'te düz çizgi ve daire şeklinde oluşturulan hareket tasarımları için, bölüm 6'da tasarlanan PID denetleyici sistemi test edilmiştir. PID ve yapay sinir ağları destekli PID sonuçları analiz edilmiş ve grafiksel sonuçları verilmiştir.

7.2 Durum 1: Düz Çizgi Girişi

Düz çizgi hareketi daha önce bölüm 3'te tasarlanmış ve anlatılmıştır. Tasarlanan hareket fonksiyonunun PID denetim sistemi ile birleştirilmiş hali daha önce 6. bölümde verilmiştir. Referans düz çizgi yörüngesine ait XY grafiği Şekil 7.1'de verilmiştir.

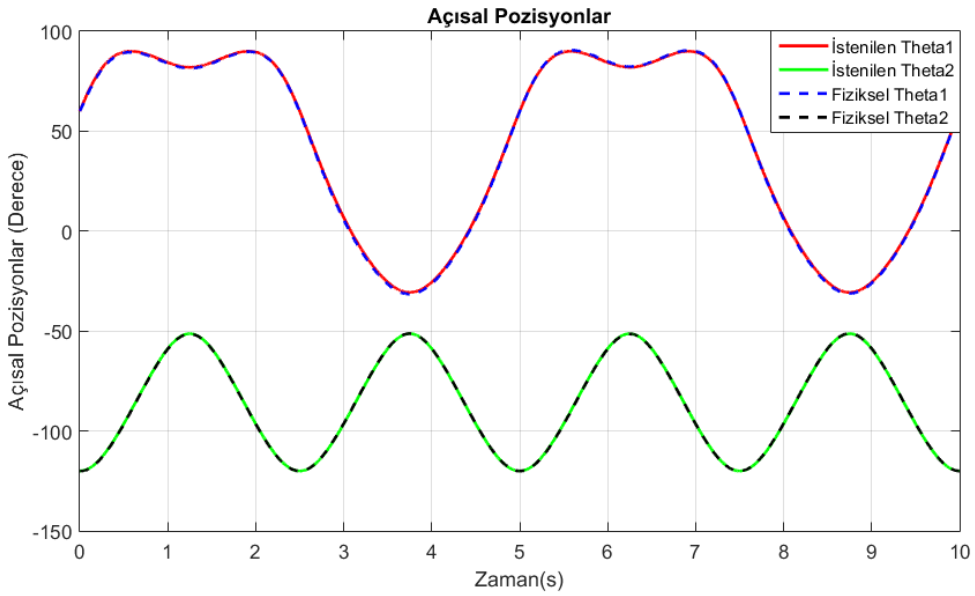


Şekil 7.1. Referans düz çizgi yörüngesi

Düz çizgi için zamana bağlı olarak oluşturulan hareket tasarımı bölüm 3'te oluşturulan ters kinematik modelden geçirilerek düz çizgi oluşturmak için istenilen açılar ve hızlar elde edilmektedir. İstenilen açılar ve hızlar eklemlere giriş olarak verilmekte ve bölüm 6'da tasarlanan PID denetleme sisteminin ürettiği torkla beraber robot kolun uç noktasının pozisyonu bulunmaktadır.

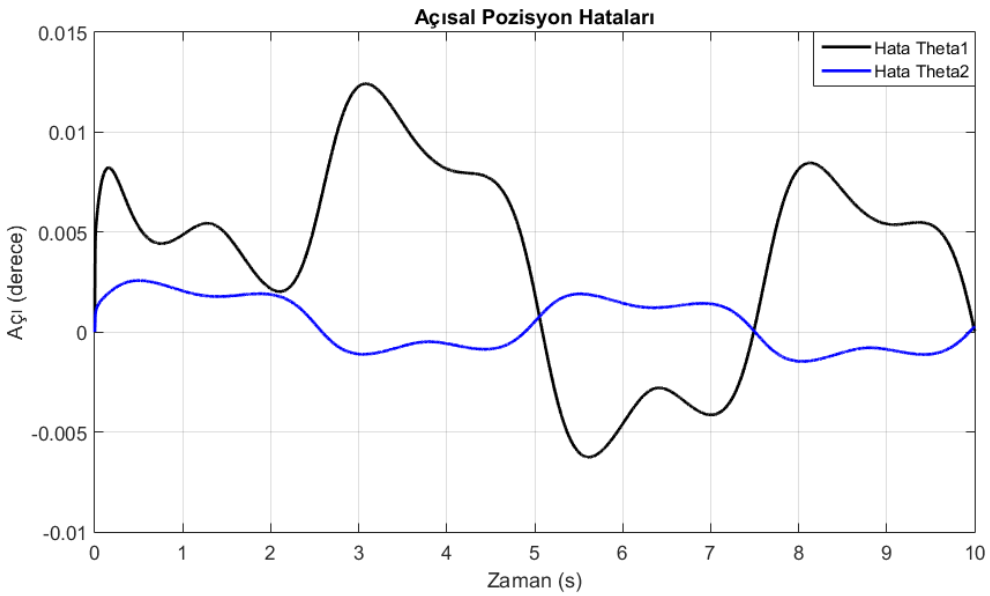
7.2.1 PID Denetleme Çıktıları

Referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açıları ile karşılaştırıldığı açısal pozisyon grafiği Şekil 7.2'de verilmiştir.



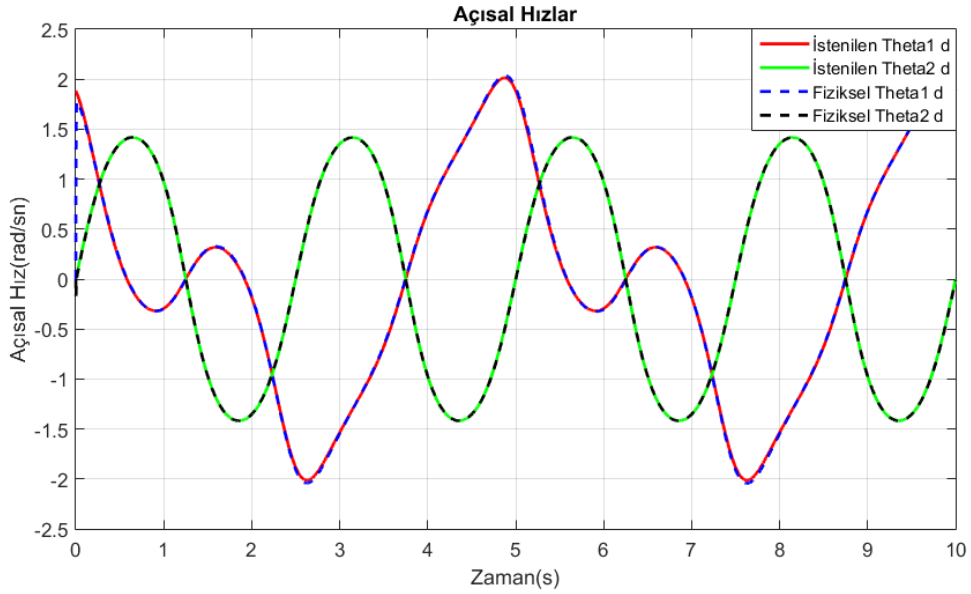
Şekil 7.2. Düz çizgi yörüngesi için açısal pozisyon grafiği (PID)

PID girişi olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarının farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.3'te verilmiştir.



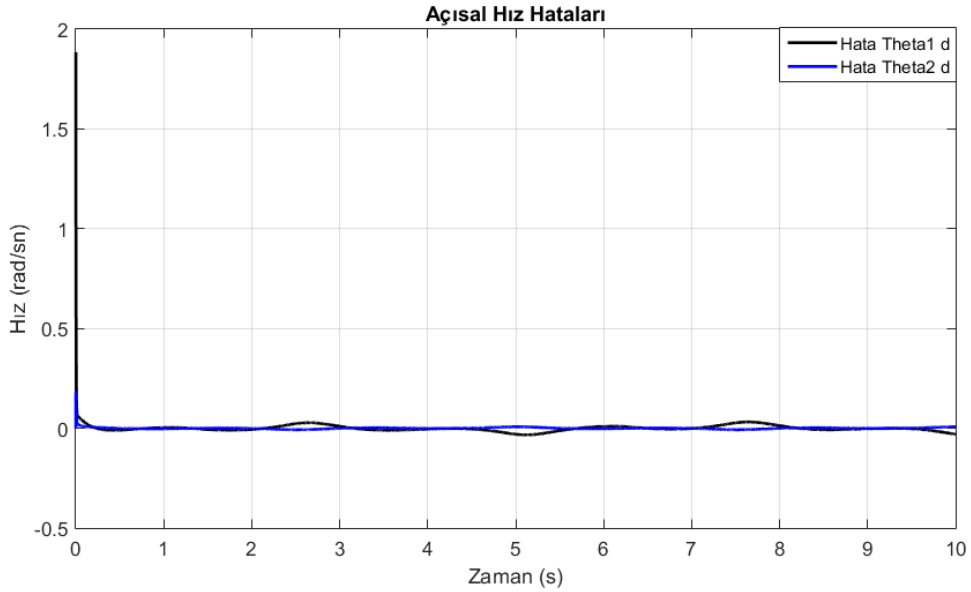
Şekil 7.3. Düz çizgi yörüngesi için açısal pozisyon hataları (PID)

Referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızları ile karşılaştırıldığı açısal hız grafiği Şekil 7.4'te verilmiştir.



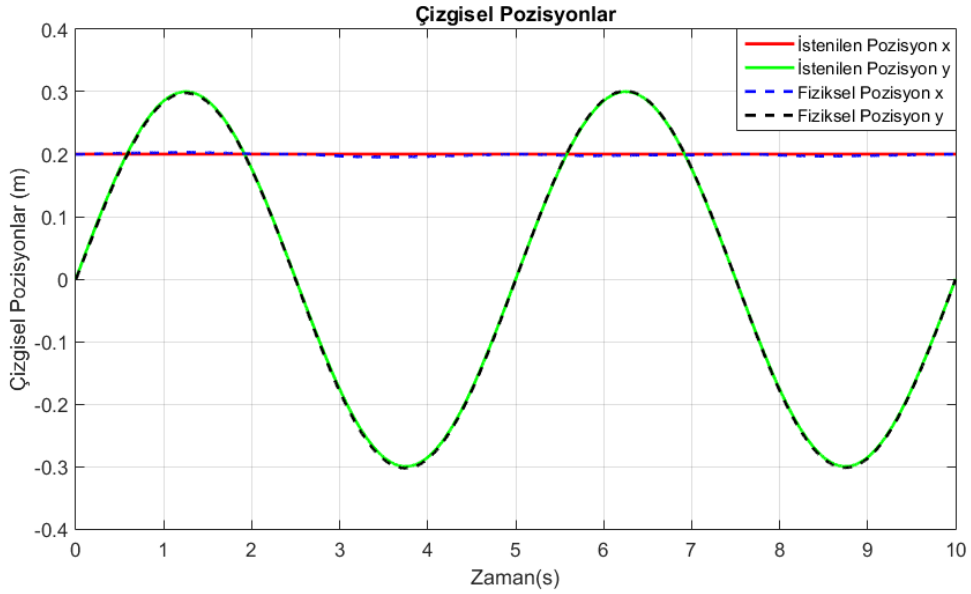
Şekil 7.4. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız grafiği (PID)

PID girişi olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.5'te verilmiştir.



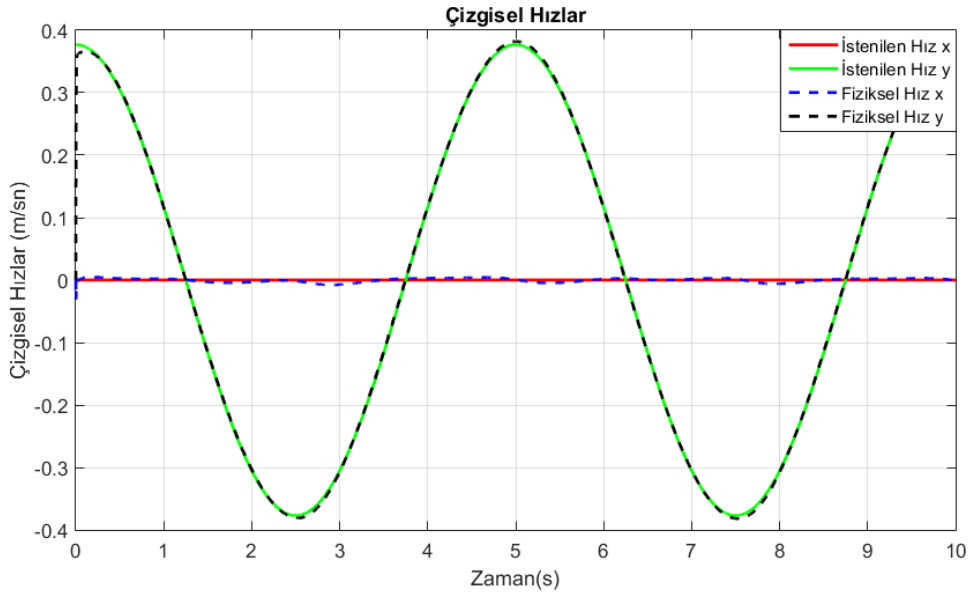
Şekil 7.5. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız hataları (PID)

Robot kolun takip etmesi istenilen düz çizgi yörüngesine ait x ve y pozisyonlarının, robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y pozisyonları ile karşılaştırılması Şekil 7.6'de verilmiştir.



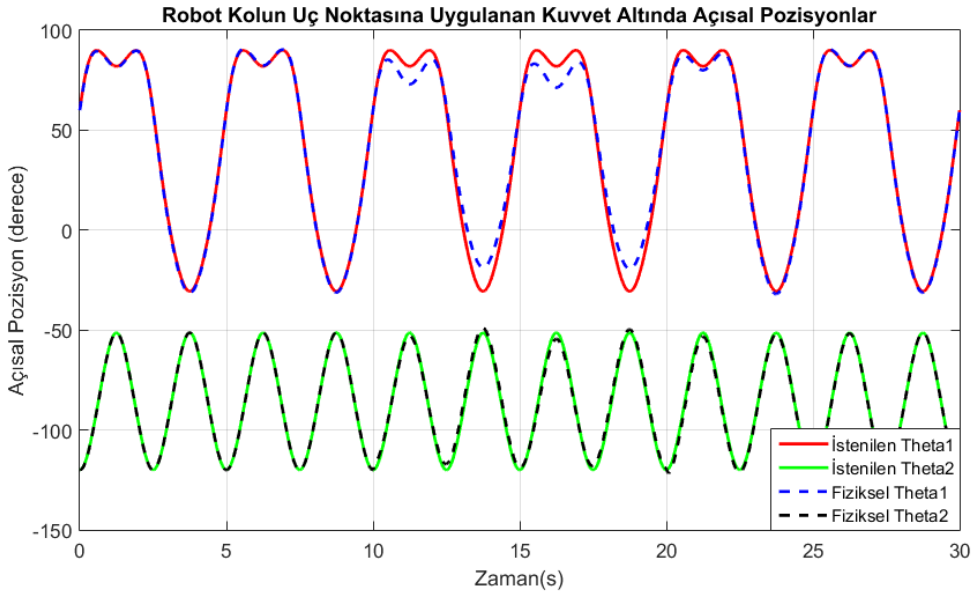
Şekil 7.6. Düz çizgi yörüngesi çizgisel pozisyon grafiği (PID)

Robot kolun takip etmesi istenilen düz çizgi yörüngesine ait x ve y hızlarının, robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y hızları ile karşılaştırılması Şekil 7.7'de verilmiştir.



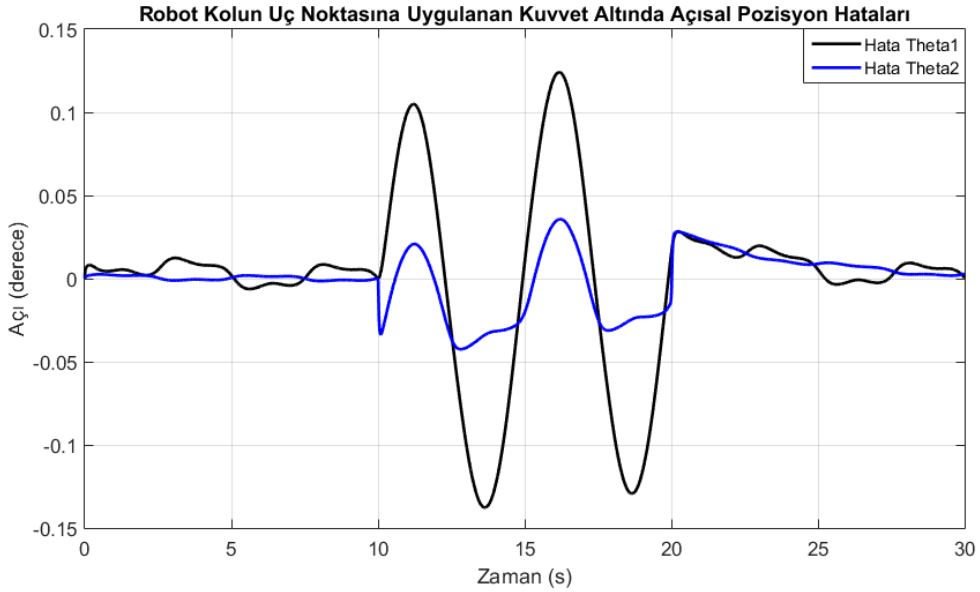
Şekil 7.7. Düz çizgi yörüngesi çizgisel hız grafiği (PID)

Referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açıları ile robot kolun uç noktasına 10. saniyede başlayıp 20. saniyede biten 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanarak karşılaştırıldığı açısal pozisyon grafiği Şekil 7.8'de verilmiştir.



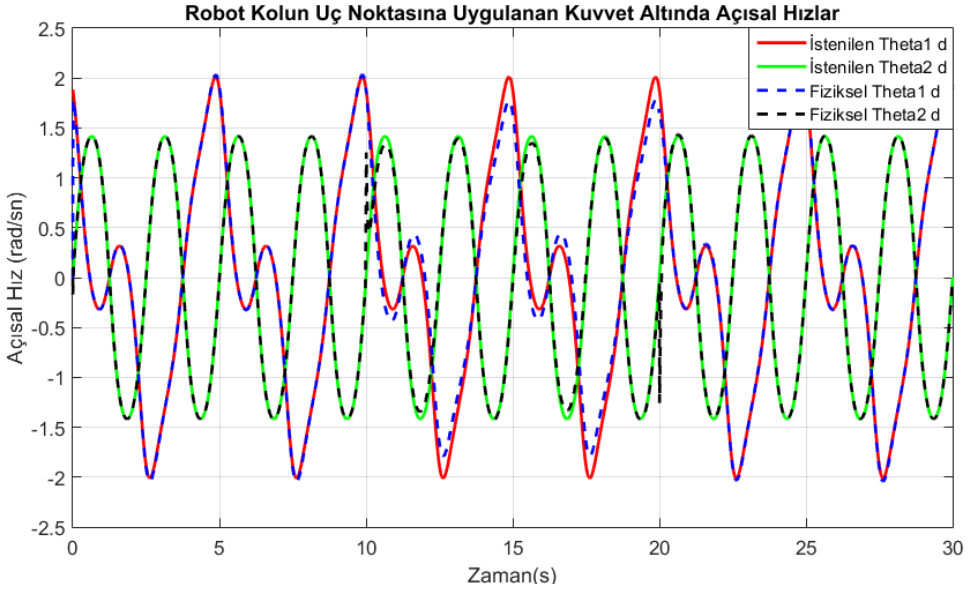
Şekil 7.8. Düz çizgi yörüngesi kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (PID)

Robot kolun uç noktasına 10. saniyede başlayıp 20. saniyede bitecek şekilde 10 saniye boyunca 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığında PID girişi olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.9'da verilmiştir.



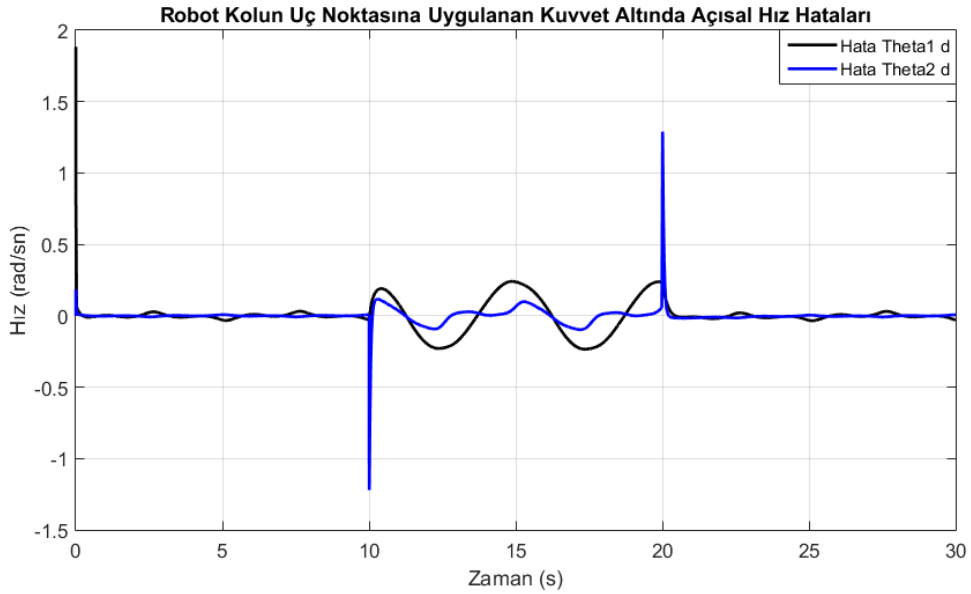
Şekil 7.9. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon hataları (PID)

Referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızları ile robot kolun uç noktasına 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanan koşullar altında karşılaştırıldığı açısal hız grafiği Şekil 7.10'da verilmiştir.



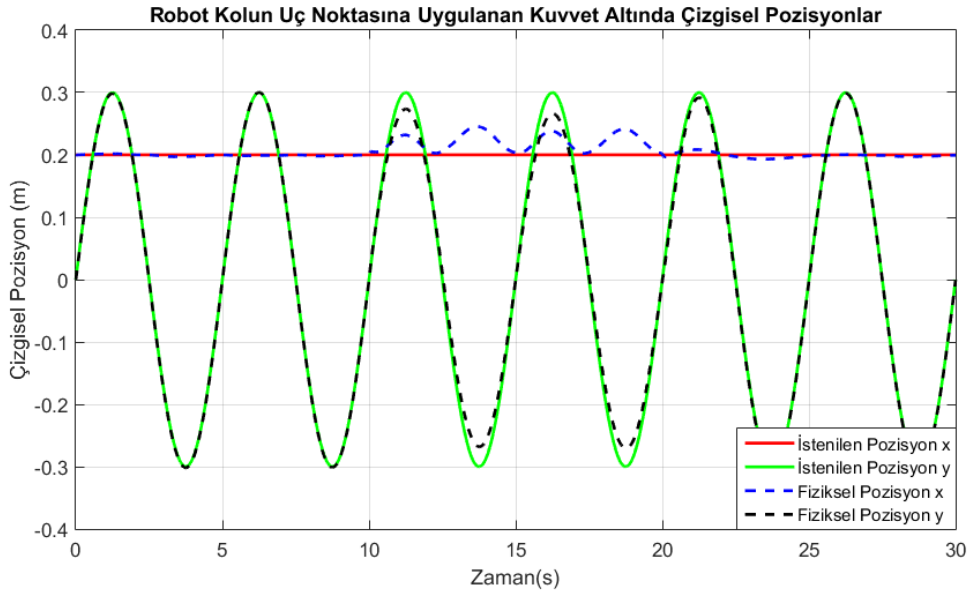
Şekil 7.10. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal hız grafiği (PID)

Robot kolun uç noktasına 10. saniyede başlayıp 20. saniyede bitecek şekilde 10 saniye boyunca 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında PID girişi olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.11'de verilmiştir.



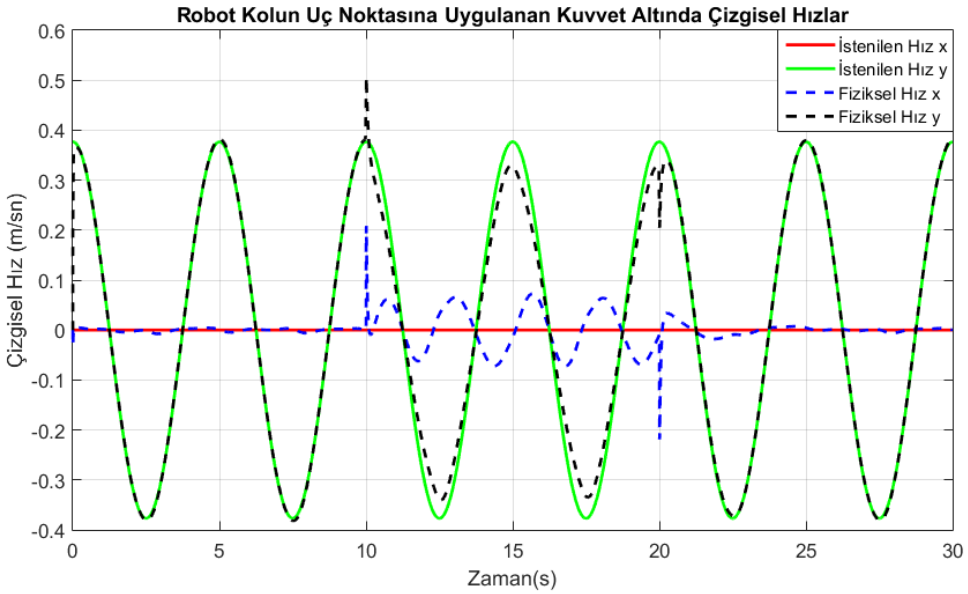
Şekil 7.11. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal hız hataları (PID)

Robot kolun takip etmesi istenilen düz çizgi yörüngesine ait x ve y pozisyonlarının, robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvet etkisi ile robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y pozisyonları ile karşılaştırılması Şekil 7.12'de verilmiştir.



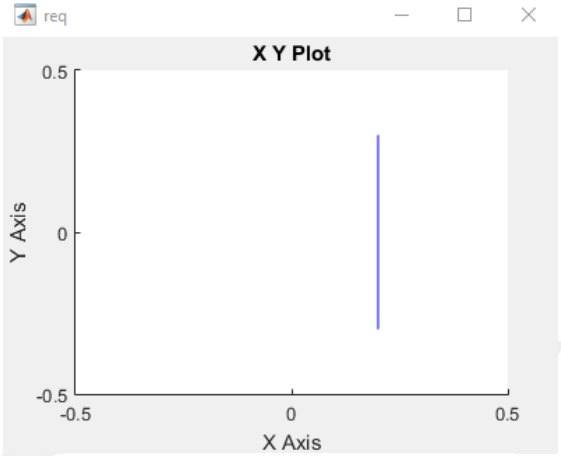
Şekil 7.12. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında çizgisel pozisyon grafiği (PID)

Robot kolun takip etmesi istenilen düz çizgi yörüngesine ait x ve y hızlarının, robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvet etkisi ile robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y hızları ile karşılaştırılması Şekil 7.13'te verilmiştir.

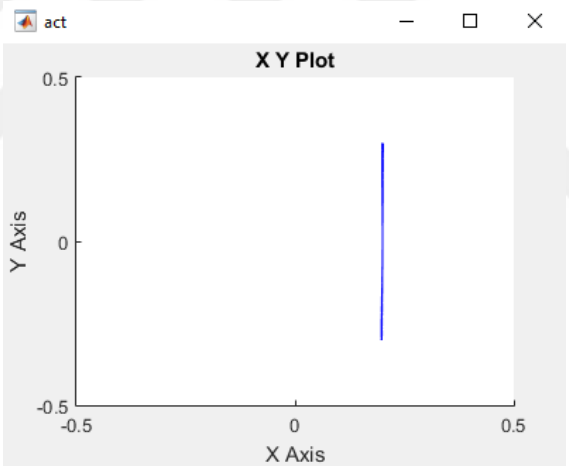


Şekil 7.13. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında çizgisel hız grafiği (PID)

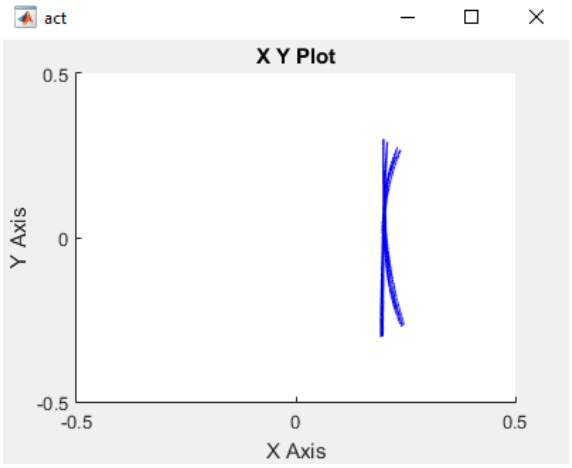
PID denetiminde robot kol uç noktasının konum grafikleri sırası ile verilmiştir. Robotun uç noktasının izlemesi istenilen yörünge Şekil 7.14'te, robotun uç noktasının normal şartlar altında izlediği yörünge Şekil 7.15'te, robotun uç noktasına 8 N büyüklüğünde kuvvet uygulandığında izlediği yörünge ise Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.14. Referans düz çizgi

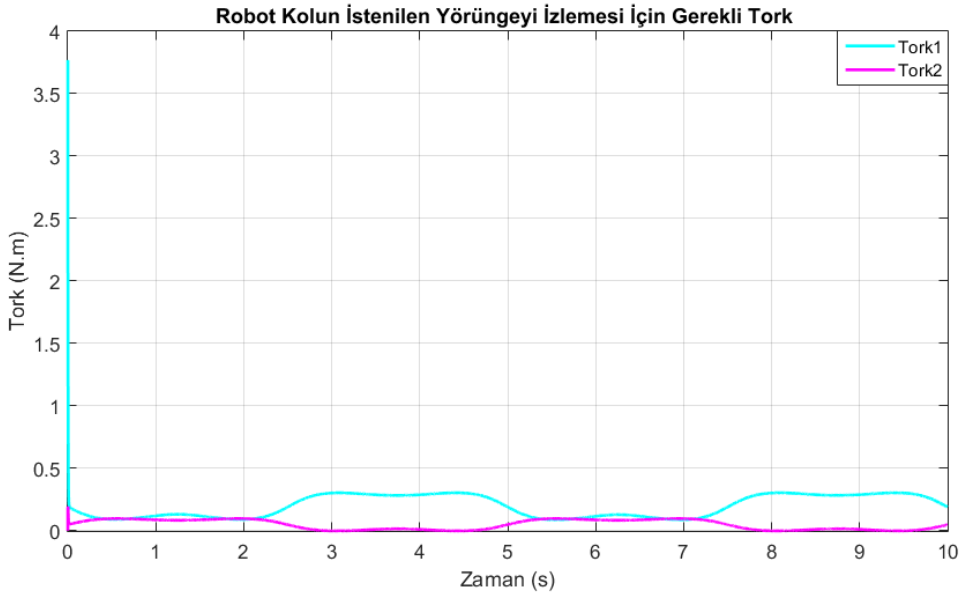


Şekil 7.15. PID denetiminde robot kol uç noktası düz çizgi yörüngesi



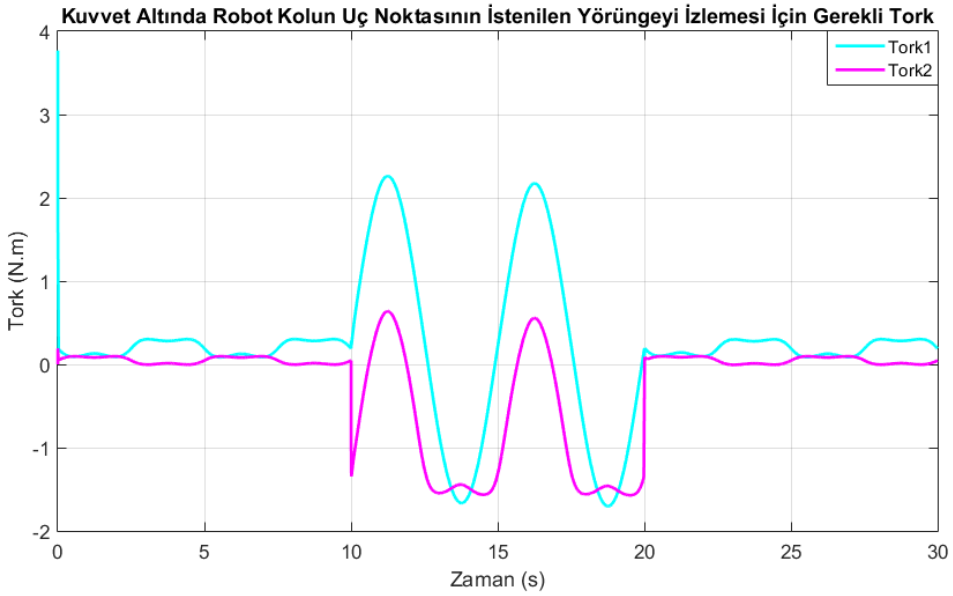
Şekil 7.16. PID denetiminde kuvvet altında robot kol düz çizgi yörüngesi

PID denetim sistemi ile kontrol edilen robot kol sisteminde, robot kolun uç noktasının istenilen düz çizgi yörüngesini takip etmesi için gerekli torka ait grafik Şekil 7.17'de verilmiştir.



Şekil 7.17. Robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (PID)

PID denetim sistemi ile kontrol edilen robot kol sisteminde, uygulanan 8 Newton büyüklüğündeki kuvvet altında robot kolun uç noktasının istenilen düz çizgi yörüngesini takip etmesi için gerekli torka ait grafik Şekil 7.18'de verilmiştir.

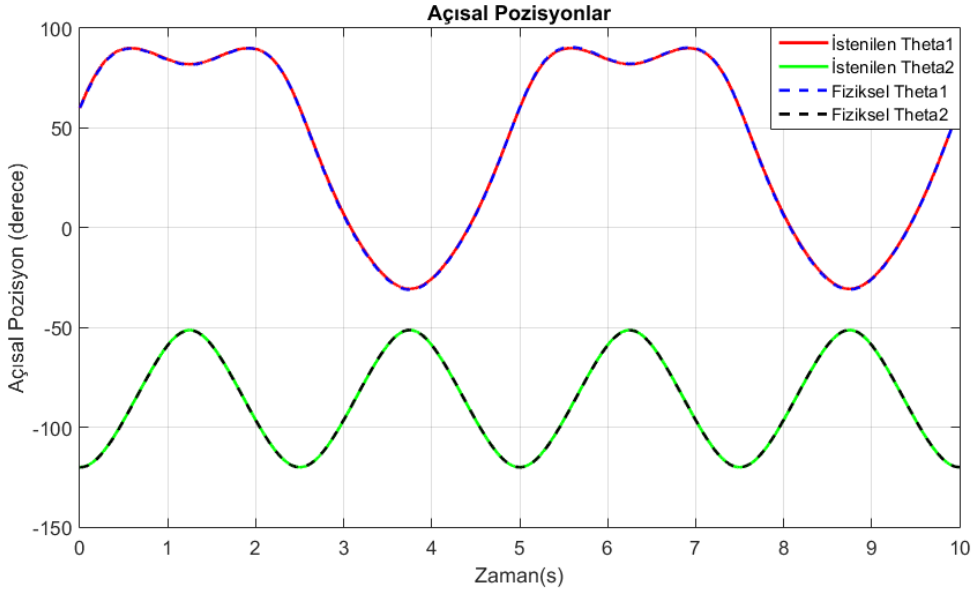


Şekil 7.18. Kuvvet altında robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (PID)

7.2.2 Hibrit Denetim Sistemi (PID+ Yapay Sinir Ağları) Çıktıları

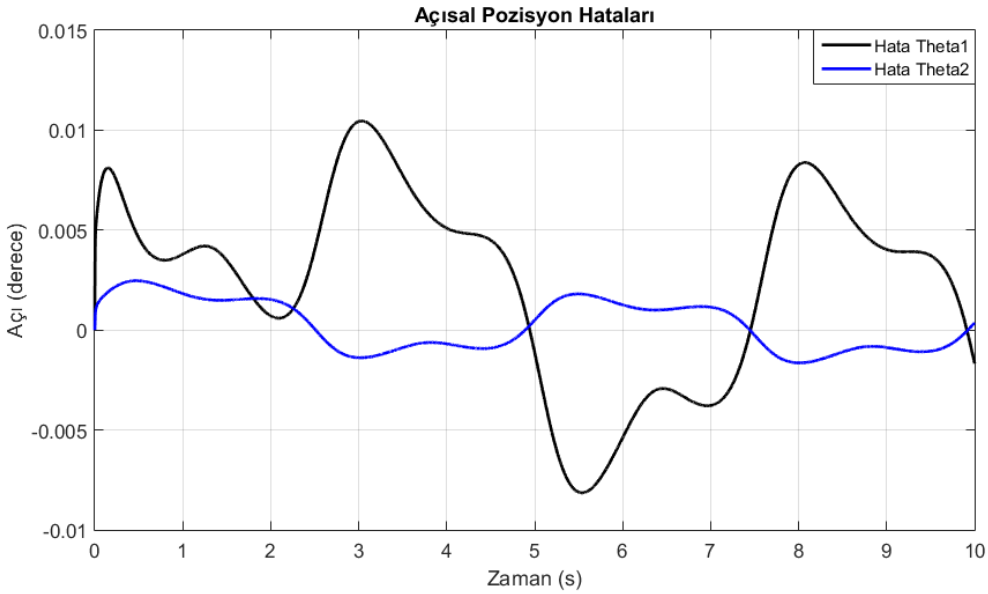
Bu bölümde geleneksel PID denetleme sistemine yardımcı olarak yapay sinir ağları eklenmiş sistemin sonuçları verilmiştir. Alınan benzetim çıktıları yapay sinir ağları destekli PID denetleme sistemi çıktılarıdır.

Referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açıları ile karşılaştırıldığı açısal pozisyon grafiği Şekil 7.19'da verilmiştir.



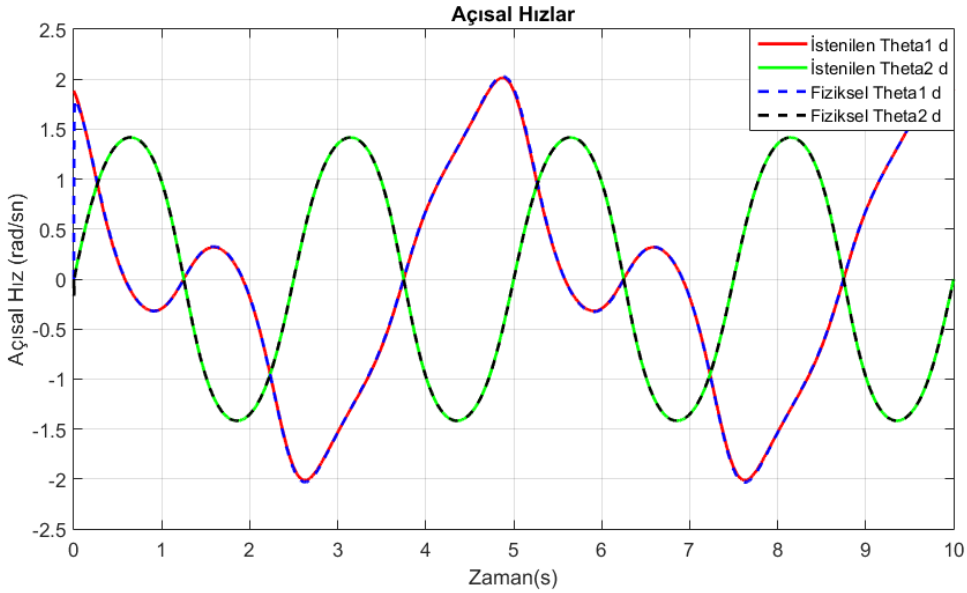
Şekil 7.19. Düz çizgi yörüngesi için açısal pozisyon grafiği (YSA)

Giriş olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.20'de verilmiştir.



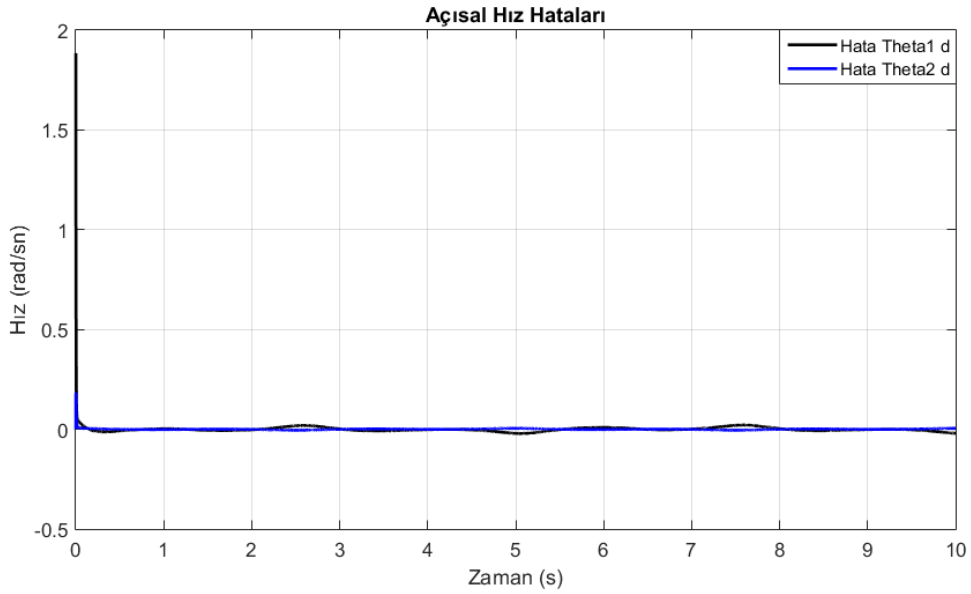
Şekil 7.20. Düz çizgi yörüngesi için açısal pozisyon hataları (YSA)

Referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızları ile karşılaştırıldığı açısal hız grafiği Şekil 7.21'de verilmiştir.



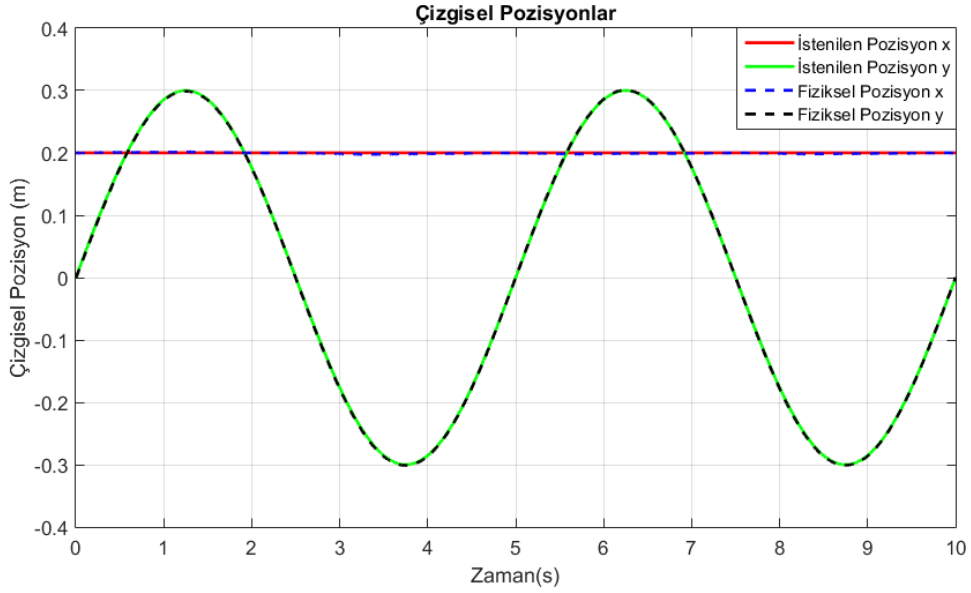
Şekil 7.21. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız grafiği (YSA)

Giriş olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.22'de verilmiştir.



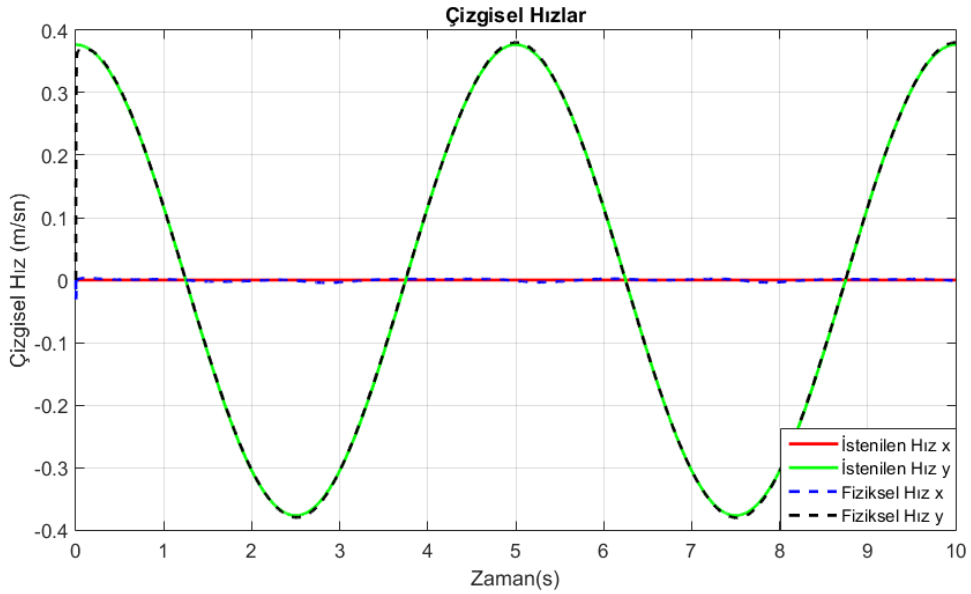
Şekil 7.22. Düz çizgi yörüngesi için açısal hız hataları (YSA)

Robot kolun takip etmesi istenilen düz çizgi yörüngesine ait x ve y pozisyonlarının, robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y pozisyonları ile karşılaştırılması Şekil 7.23'te verilmiştir.



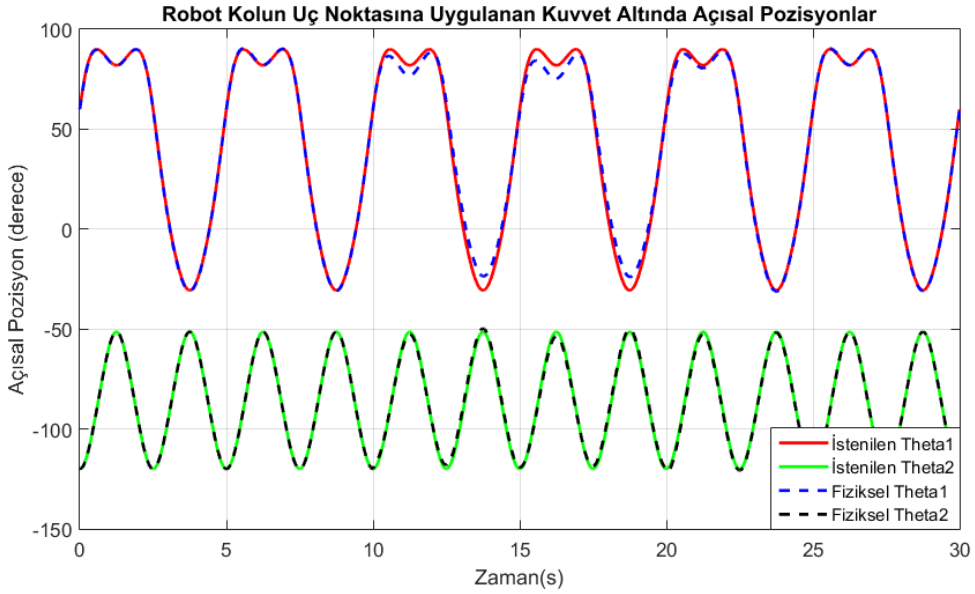
Şekil 7.23. Düz çizgi yörüngesi çizgisel pozisyon grafiği (YSA)

Robot kolun takip etmesi istenilen düz çizgi yörüngesine ait x ve y hızlarının, robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y hızları ile karşılaştırılması Şekil 7.24'te verilmiştir.



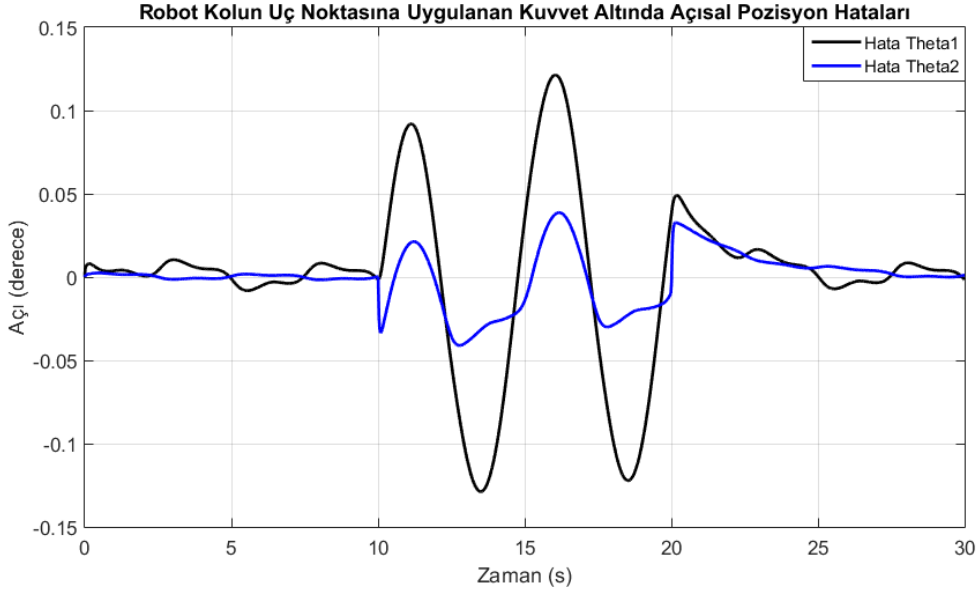
Şekil 7.24. Düz çizgi yörüngesi çizgisel hız grafiği (YSA)

Referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açıları ile robot kolun uç noktasına 10. saniyede başlayıp 20. saniyede biten 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanan koşullar altında karşılaştırıldığı grafik Şekil 7.25'te verilmiştir.



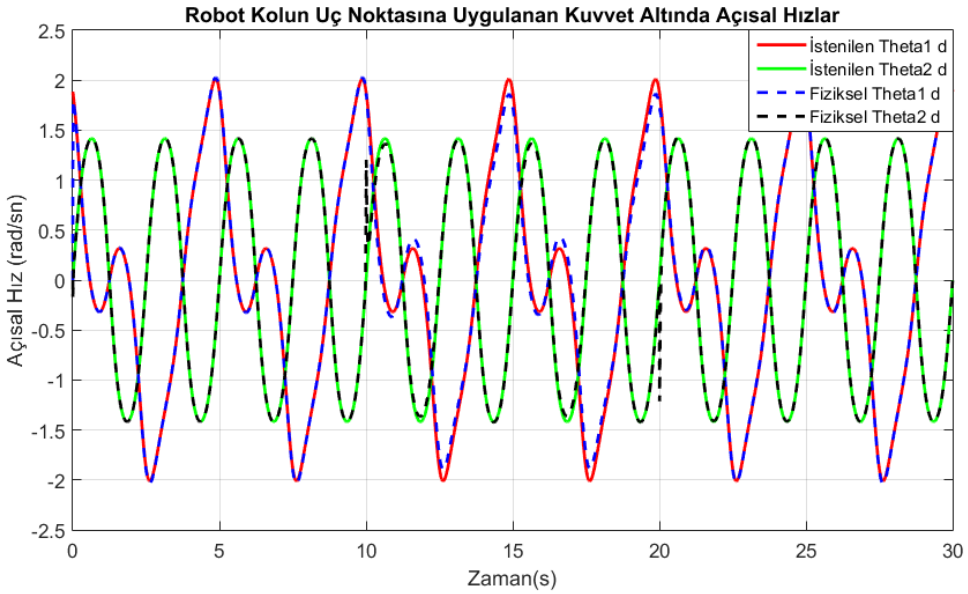
Şekil 7.25. Düz çizgi yörüngesi kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (YSA)

Robot kolun uç noktasına 10. saniyede başlayıp 20. saniyede bitecek şekilde 10 saniye boyunca 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullarda giriş olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.26'da verilmiştir.



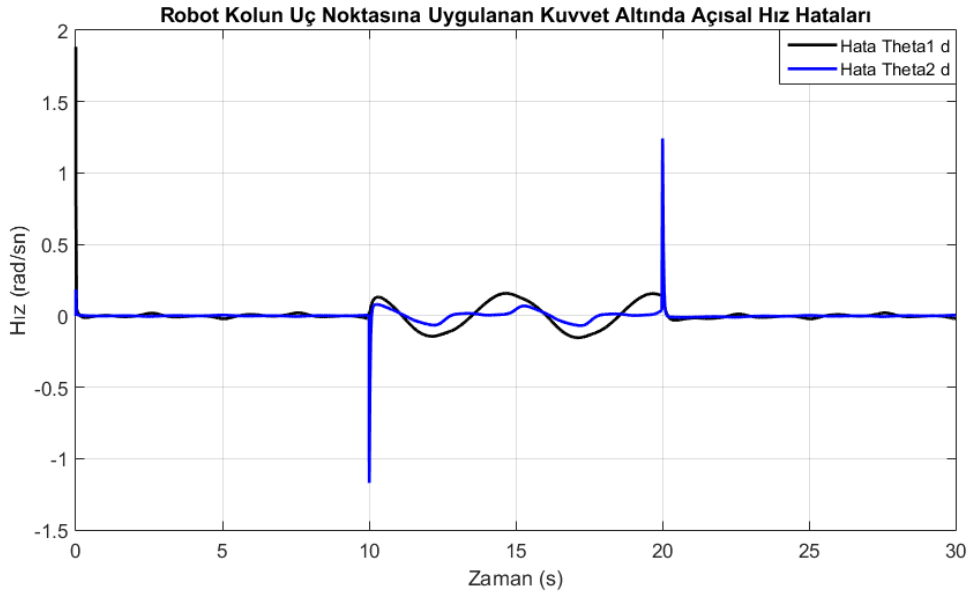
Şekil 7.26. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon hataları (YSA)

Referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızları ile robot kolun uç noktasına 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanan koşullar altında karşılaştırıldığı açısal hız grafiği Şekil 7.27'de verilmiştir.



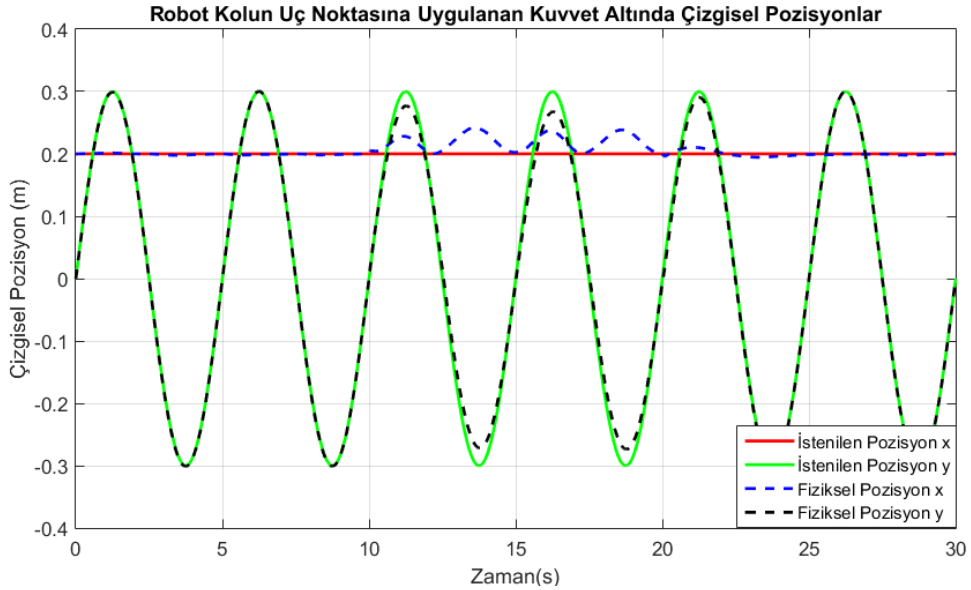
Şekil 7.27. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal hız grafiği (YSA)

Robot kolun uç noktasına 10. saniyede başlayıp 20. saniyede bitecek şekilde 10 saniye boyunca 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında giriş olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarının farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.28'de verilmiştir.



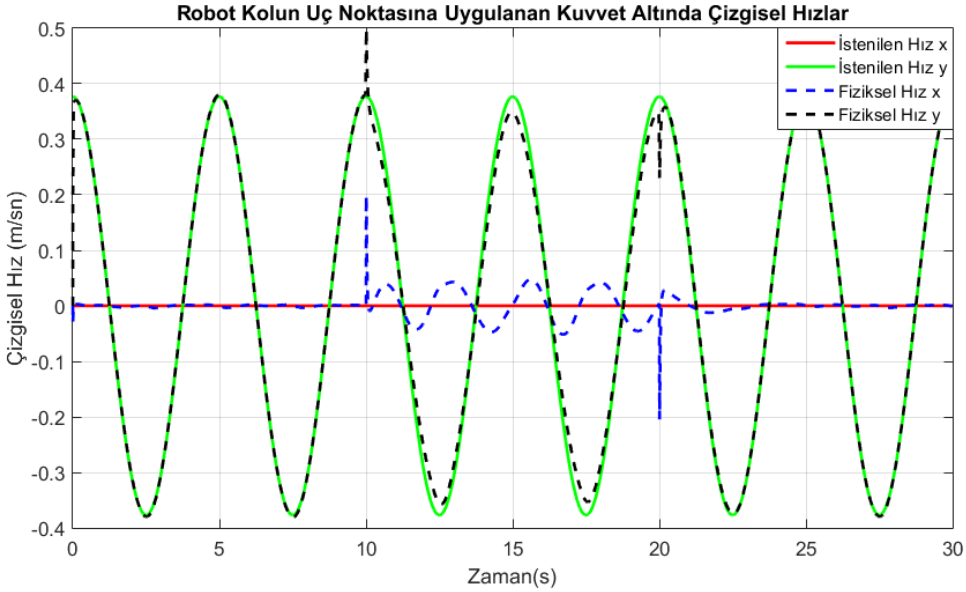
Şekil 7.28. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında açısal hız hataları (YSA)

Robot kolun takip etmesi istenilen düz çizgi yörüngesine ait x ve y pozisyonlarının, robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvet etkisi ile robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y pozisyonları ile karşılaştırılması Şekil 7.29'da verilmiştir.



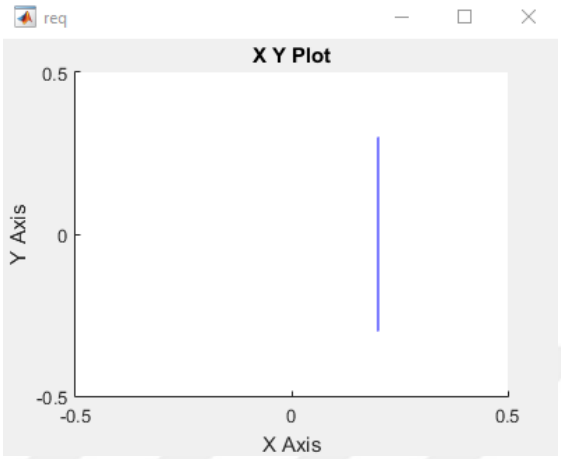
Şekil 7.29. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında çizgisel pozisyon grafiği (YSA)

Robot kolun takip etmesi istenilen düz çizgi yörüngesine ait x ve y hızları ile robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvet etkisi ile robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y hızlarının karşılaştırılması Şekil 7.30'da verilmiştir.

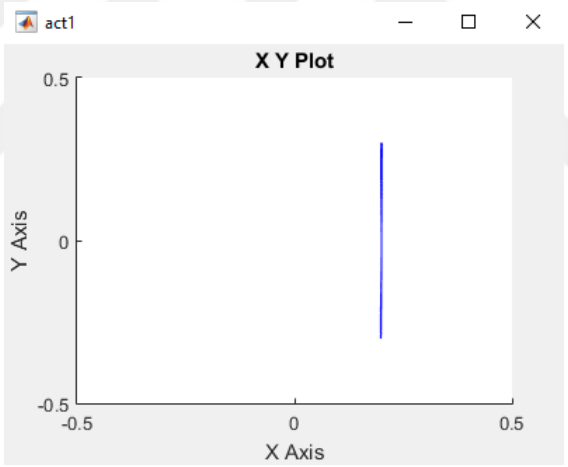


Şekil 7.30. Düz çizgi yörüngesi için kuvvet altında çizgisel hız grafiği (YSA)

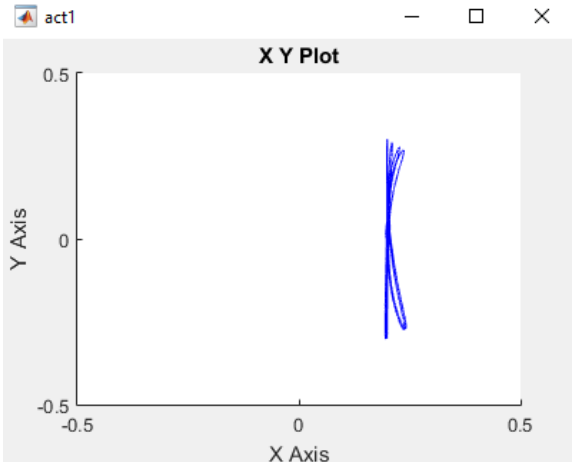
YSA destekli PID denetiminde robot kol uç noktasının konum grafikleri sırası ile verilmiştir. Robotun uç noktasının izlemesi istenilen yörünge Şekil 7.31'de, robotun uç noktasının normal şartlar altında izlediği yörünge Şekil 7.32'de, robotun uç noktasına 8 N büyüklüğünde kuvvet uygulandığında izlediği yörünge ise Şekil 7.33'te verilmiştir.



Şekil 7.31. Referans düz çizgi yörüngesi

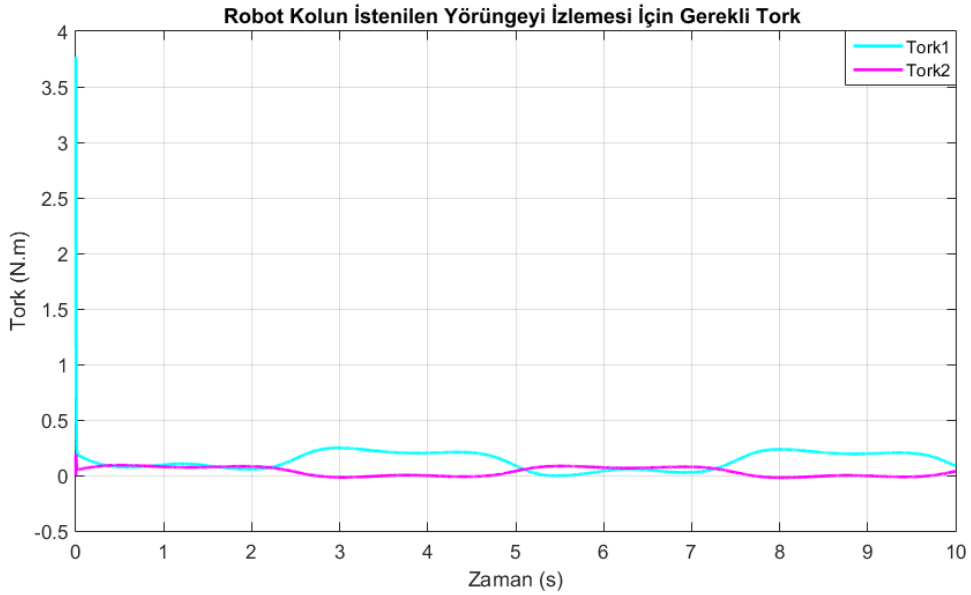


Şekil 7.32. YSA destekli PID denetiminde robot kol uç noktası düz çizgi



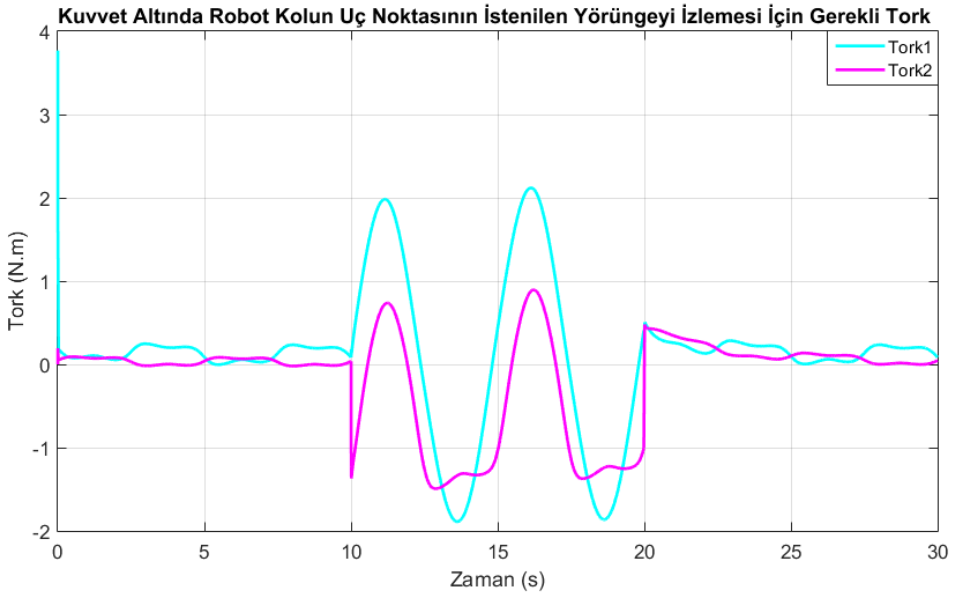
Şekil 7.33. YSA destekli PID denetiminde kuvvet altında robot kol düz çizgi

YSA destekli PID denetim sistemi ile kontrol edilen robot kol sisteminde, robot kolun uç noktasının istenilen düz çizgi yörüngesini takip etmesi için gerekli torka ait grafik Şekil 7.34'te verilmiştir.



Şekil 7.34. Robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (YSA)

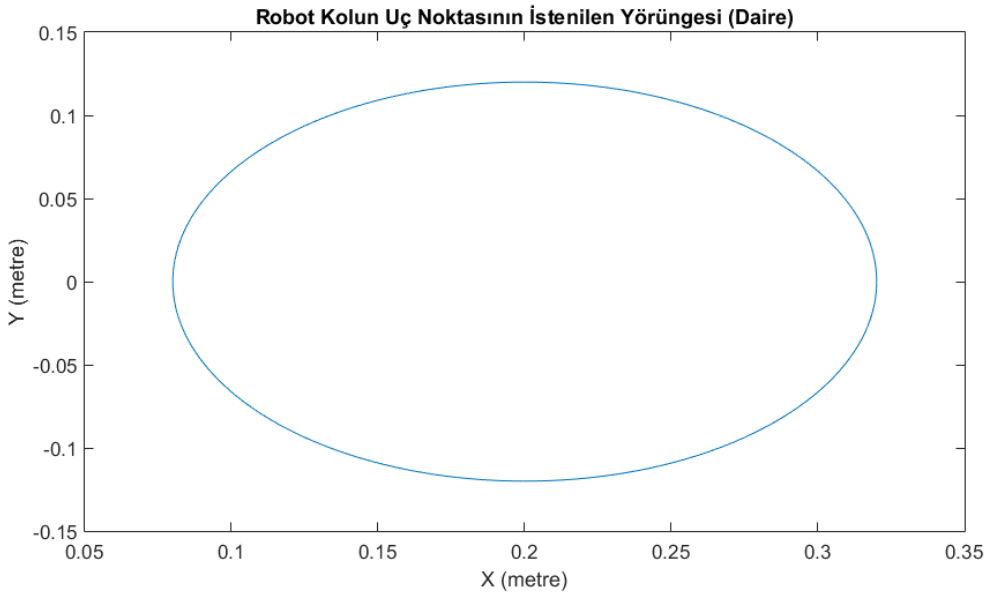
YSA destekli PID denetim sistemi ile kontrol edilen robot kol sisteminde, uygulanan 8 Newton büyüklüğündeki kuvvet altında robot kolun uç noktasının istenilen düz çizgi yörüngesini takip etmesi için gerekli torka ait grafik Şekil 7.35'te verilmiştir.



Şekil 7.35. Kuvvet altında robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (YSA)

7.3 Durum 2: Daire Girişi

Daire hareketi daha önce bölüm 3'te tasarlanmış ve anlatılmıştır. Tasarlanan hareket fonksiyonunun PID sistemi ile birleştirilmiş hali bölüm 6'da verilmiştir. Daireye ait XY grafiği Şekil 7.36'da verilmiştir.

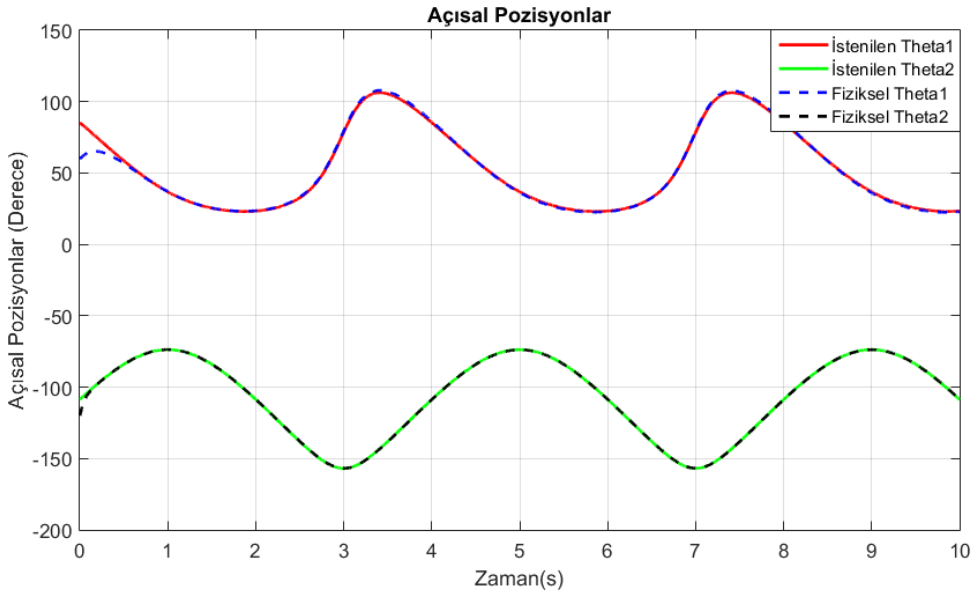


Şekil 7.36. Referans daire yörüngesi

Daire için zamana bağlı olarak oluşturulan hareket tasarımı bölüm 3'te oluşturulan ters kinematik modelden geçirilerek daire oluşturmak için istenilen açılar ve hızlar elde edilmektedir. İstenilen açılar ve hızlar eklemlere giriş olarak verilmekte bölüm 6'da tasarlanan PID'nin ürettiği torkla beraber robot kolun uç noktasının pozisyonu bulunmaktadır.

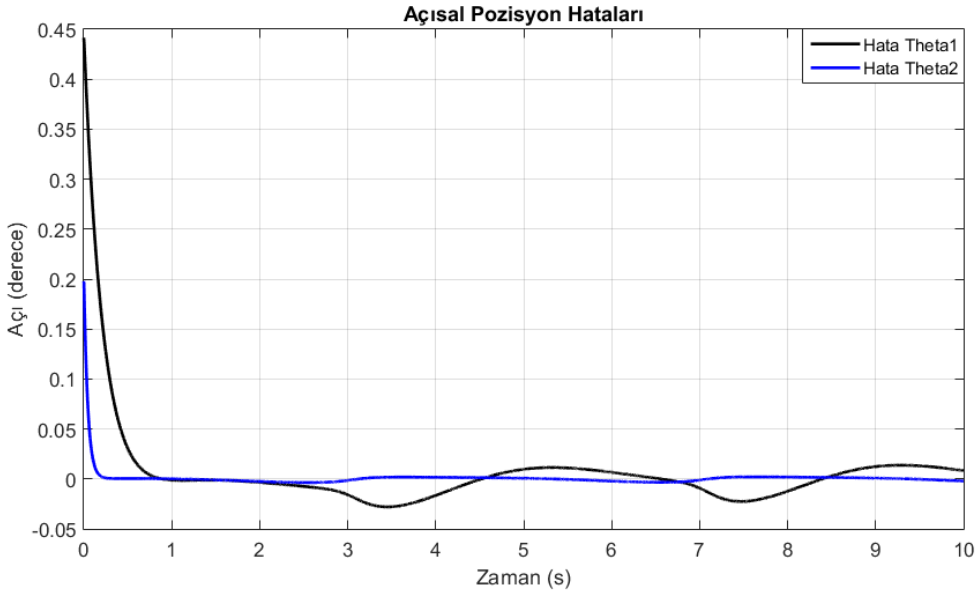
7.3.1 PID Denetleme Çıktıları

Referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açıları ile karşılaştırıldığı açısal pozisyon grafiği Şekil 7.37'de verilmiştir.



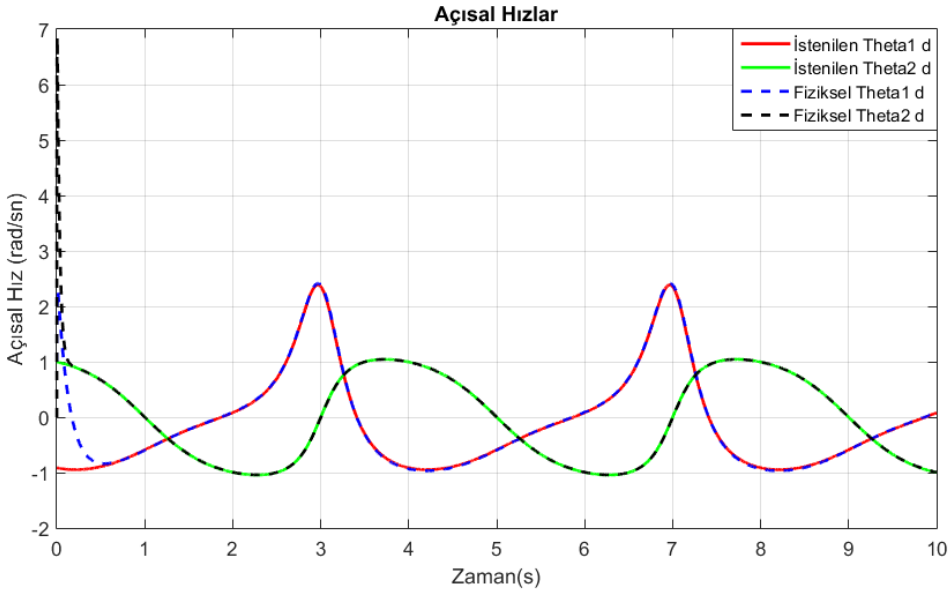
Şekil 7.37. Daire yörüngesi için açısal pozisyon grafiği (PID)

PID girişi olarak kullanılan referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla olan farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.38'de verilmiştir.



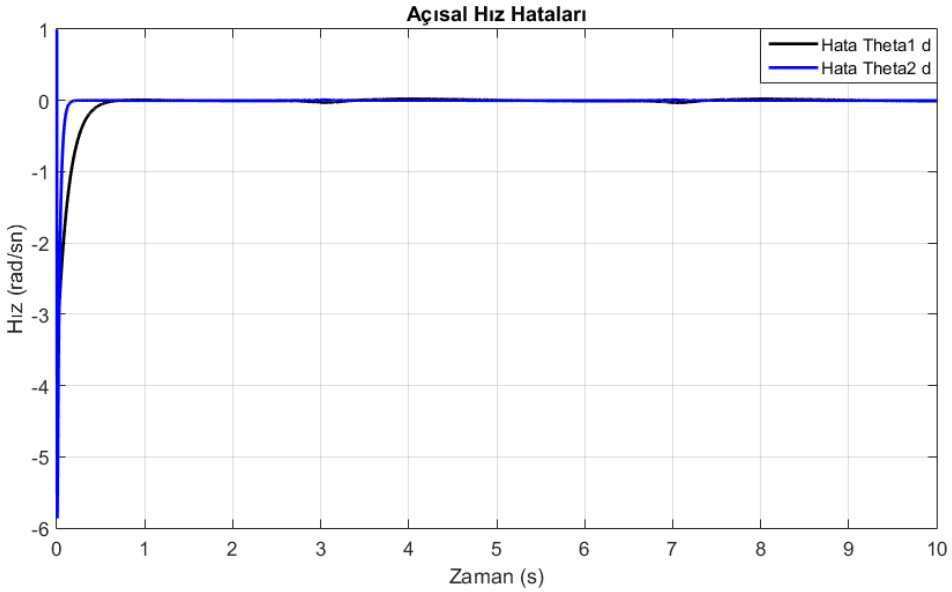
Şekil 7.38. Daire yörüngesi için açısal pozisyon hataları (PID)

Referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızları ile karşılaştırıldığı açısal hız grafiği Şekil 7.39'da verilmiştir.



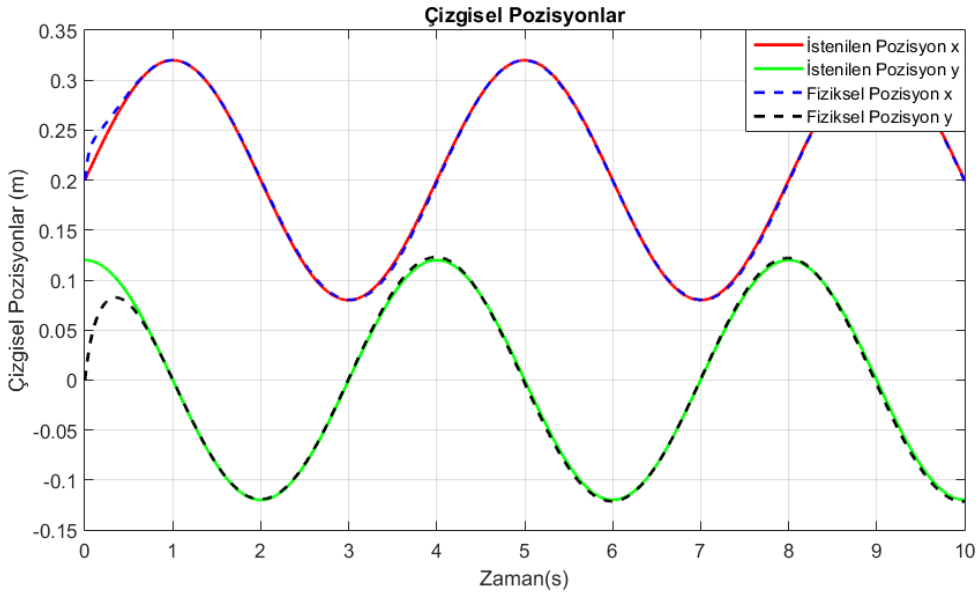
Şekil 7.39. Daire yörüngesi için açısal hız grafiği (PID)

PID girişi olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarıyla olan farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.40'ta verilmiştir.



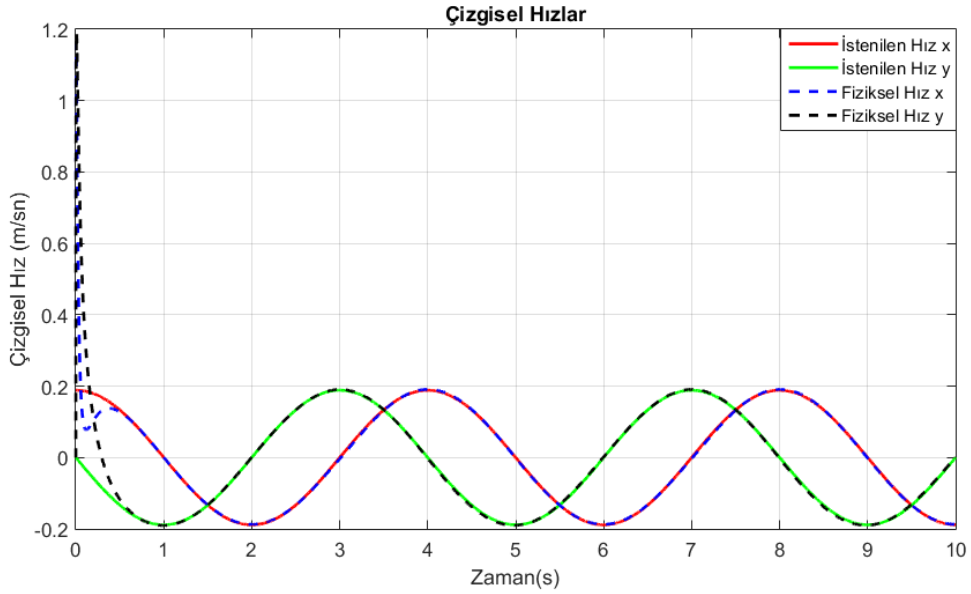
Şekil 7.40. Daire yörüngesi için açısal hız hataları (PID)

Robot kolun takip etmesi istenilen daire yörüngesine ait x ve y pozisyonlarının, robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y pozisyonları ile karşılaştırılması Şekil 7.41'de verilmiştir.



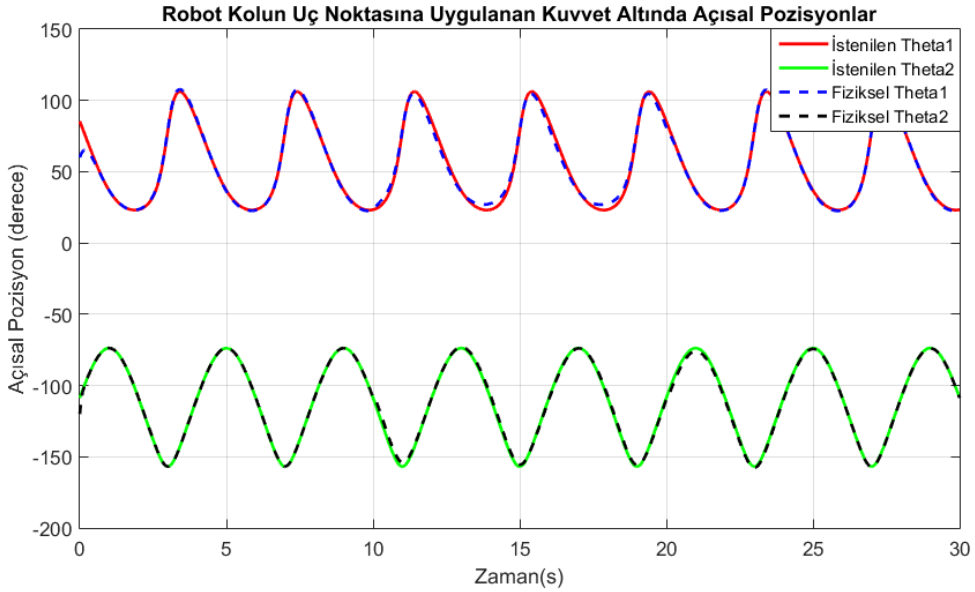
Şekil 7.41. Daire yörüngesi çizgisel pozisyon grafiği (PID)

Robot kolun takip etmesi istenilen daire yörüngesine ait x ve y hızlarının, robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y hızları ile karşılaştırılması Şekil 7.42'de verilmiştir.



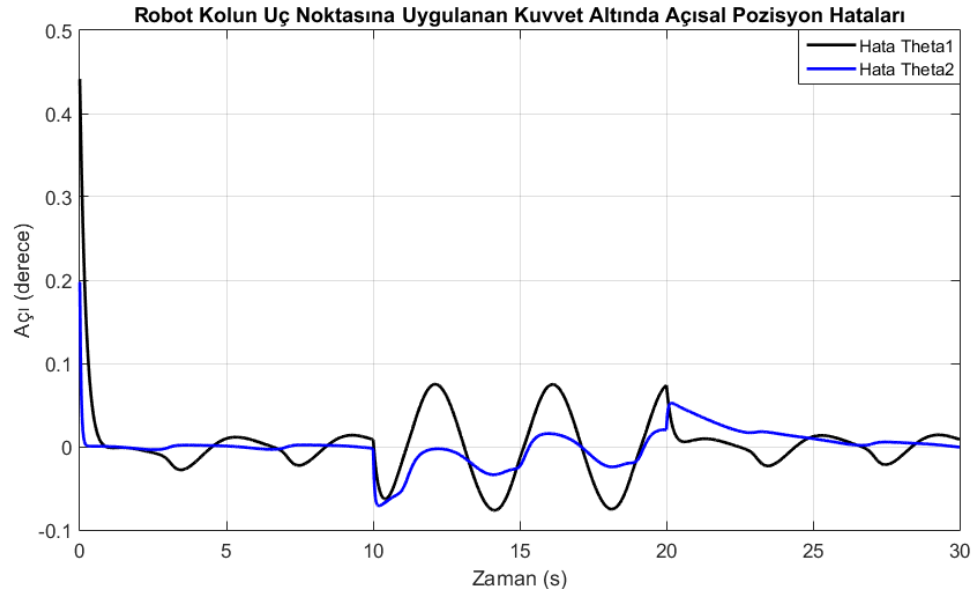
Şekil 7.42. Daire yörüngesi çizgisel hız grafiği (PID)

Referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açıları ile robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanan koşullar altında karşılaştırıldığı açısal pozisyon grafiği Şekil 7.43'te verilmiştir.



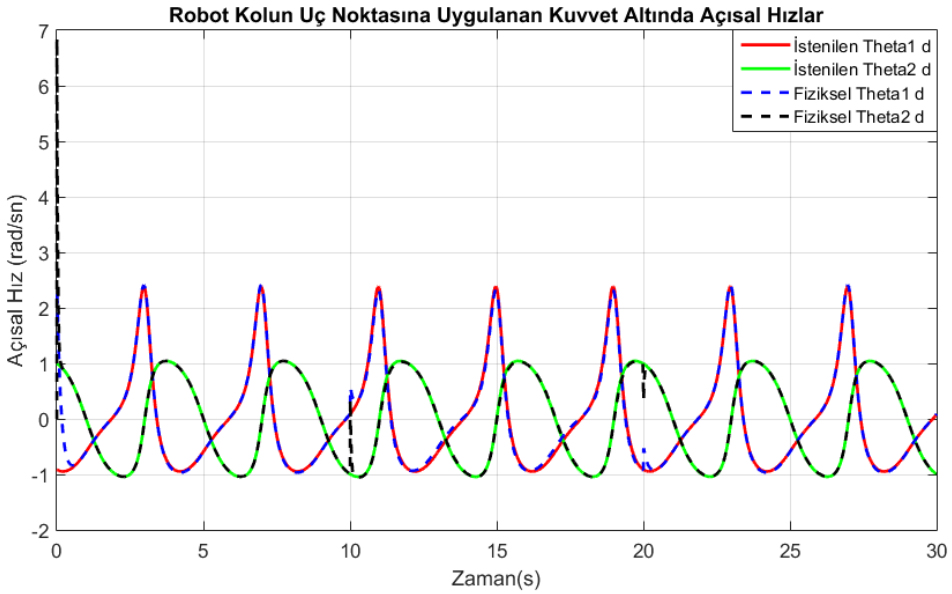
Şekil 7.43. Daire yörüngesi kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (PID)

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığında PID girişi olarak kullanılan referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarının farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.44'te verilmiştir.



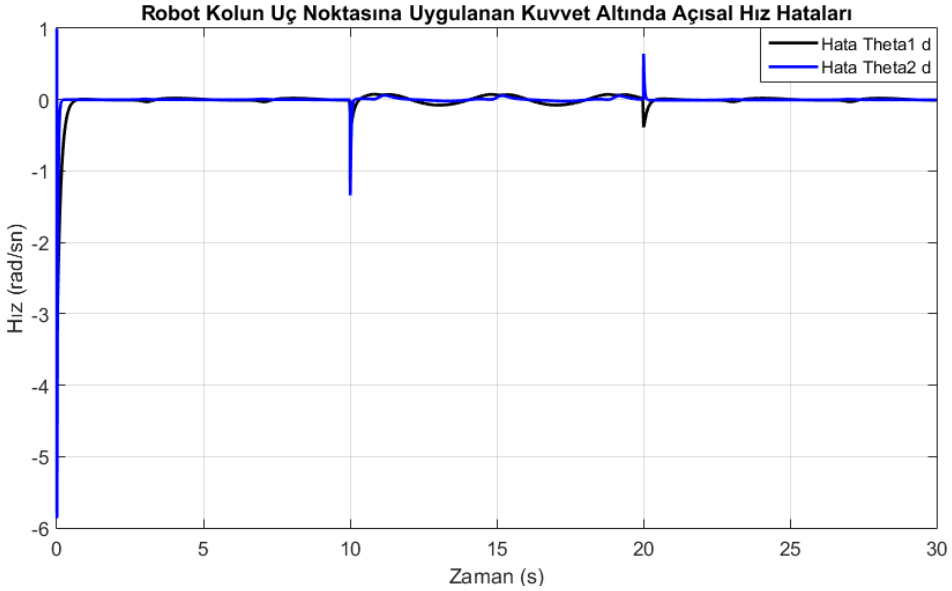
Şekil 7.44. Daire yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon hataları (PID)

Referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızları ile robot kolun uç noktasına 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanan koşullar altında karşılaştırıldığı açısal hız grafiği Şekil 7.45'te verilmiştir.



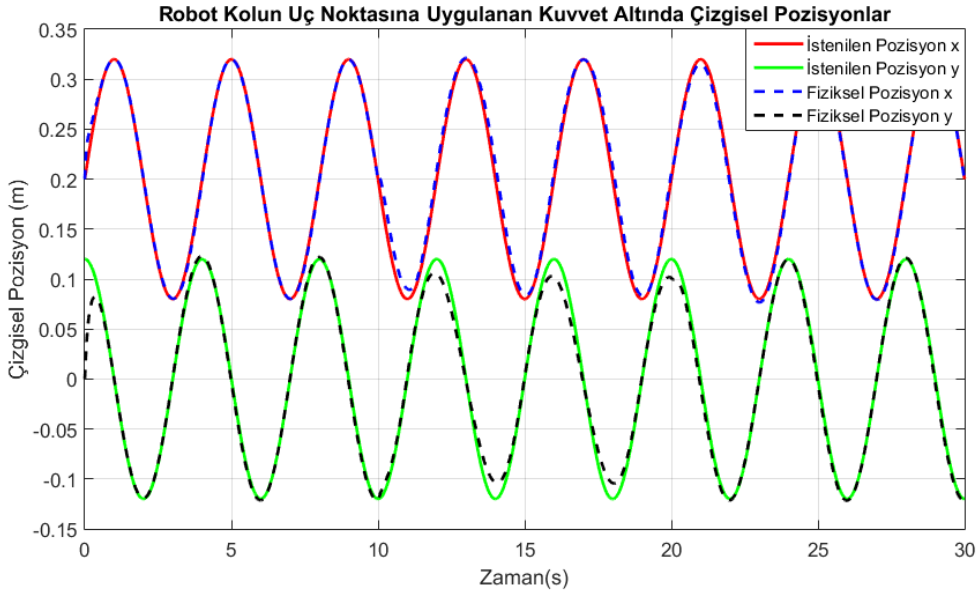
Şekil 7.45. Daire yörüngesi kuvvet altında açısal hız grafiği (PID)

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniye arasında 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında PID girişi olarak kullanılan referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.46'da verilmiştir.



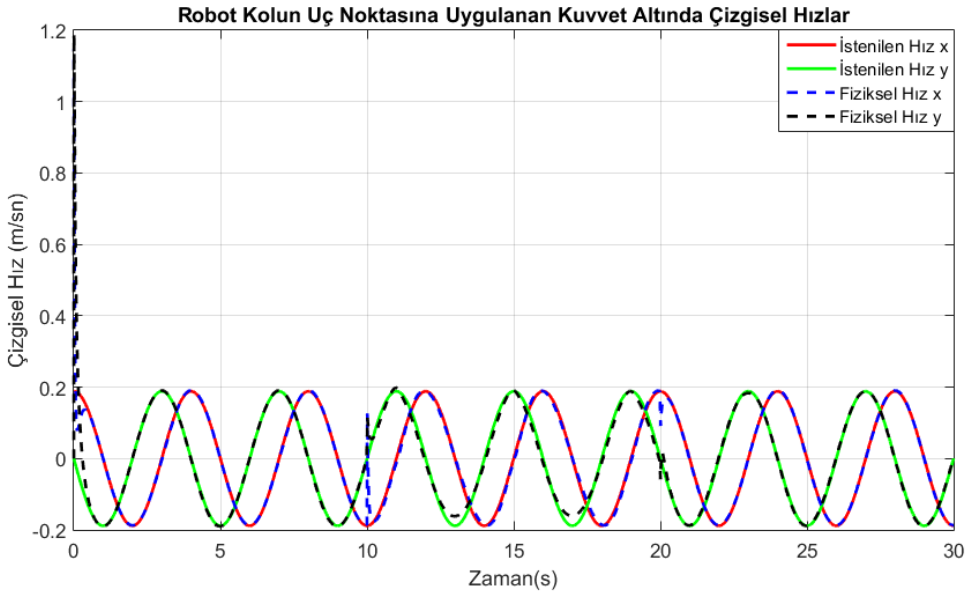
Şekil 7.46. Daire yörüngesi için kuvvet altında açısal hız hataları (PID)

Robot kolun takip etmesi istenilen daire yörüngesine ait x ve y pozisyonlarının, robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvet etkisi ile robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y pozisyonları ile karşılaştırılması Şekil 7.47'de verilmiştir.



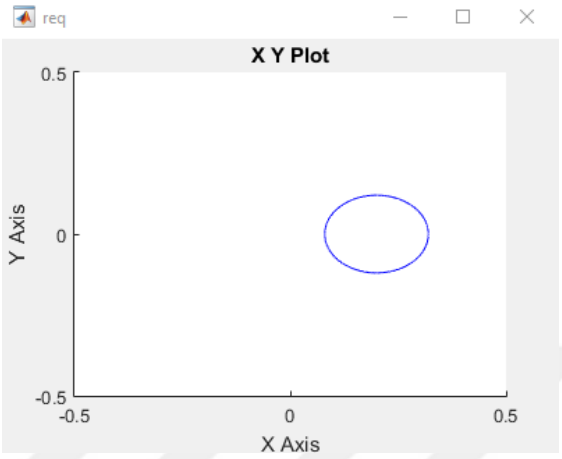
Şekil 7.47. Daire yörüngesi için kuvvet altında çizgisel pozisyon grafiği (PID)

Robot kolun takip etmesi istenilen daire yörüngesine ait x ve y hızlarının, robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvet etkisi ile robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y hızları ile karşılaştırılması Şekil 4.48'de verilmiştir.

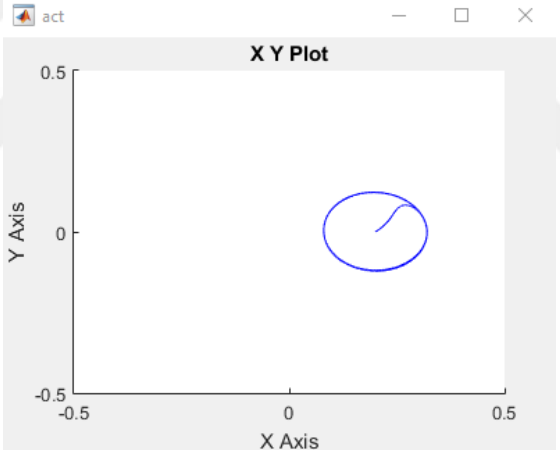


Şekil 7.48. Daire yörüngesi için kuvvet altında çizgisel hız grafiği (PID)

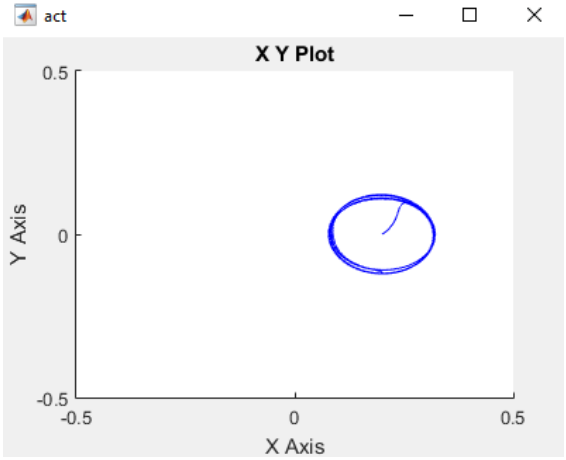
PID denetiminde robot kol uç noktasının konum grafikleri sırası ile verilmiştir. Robotun uç noktasının izlemesi istenilen yörünge Şekil 7.49'da, robotun uç noktasının normal şartlar altında izlediği yörünge Şekil 7.50'de, robotun uç noktasına 8 N büyüklüğündeki kuvvet altında izlediği yörünge ise Şekil 7.51'de verilmiştir.



Şekil 7.49. Referans daire yörüngesi

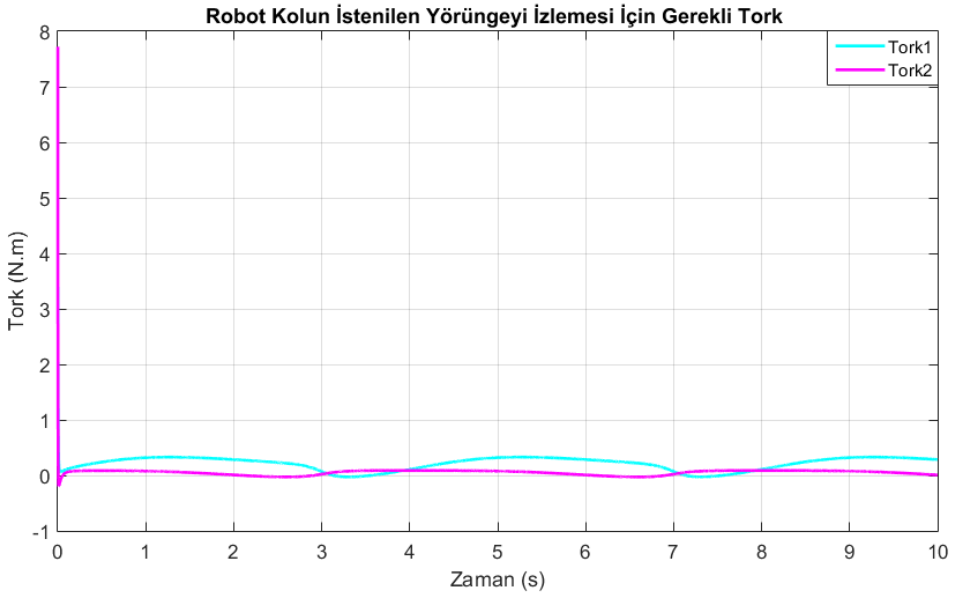


Şekil 7.50. PID denetiminde robot kol uç noktası daire yörüngesi



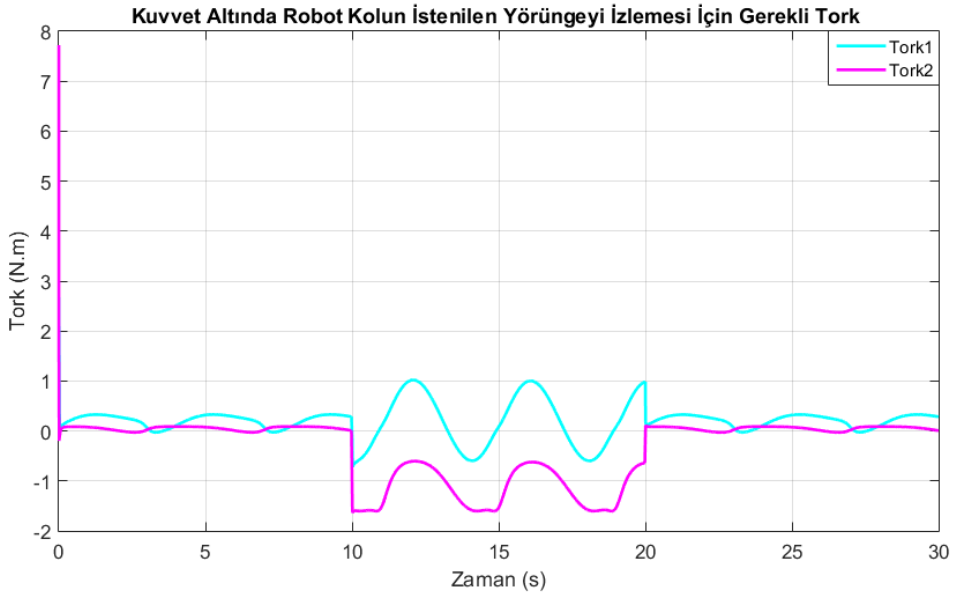
Şekil 7.51. PID denetiminde kuvvet altında robot kol daire yörüngesi

PID denetim sistemi ile kontrol edilen robot kol sisteminde, robot kolun uç noktasının istenilen daire yörüngesini takip etmesi için gerekli torka ait grafik Şekil 7.52'de verilmiştir.



Şekil 7.52. Robot kolun istenilen daire yörüngesini izlemesi için gerekli tork (PID)

PID denetim sistemi ile kontrol edilen robot kol sisteminde, uygulanan 8 Newton büyüklüğündeki kuvvet altında robot kolun uç noktasının istenilen daire yörüngesini takip etmesi için gerekli torka ait grafik Şekil 7.53'de verilmiştir.

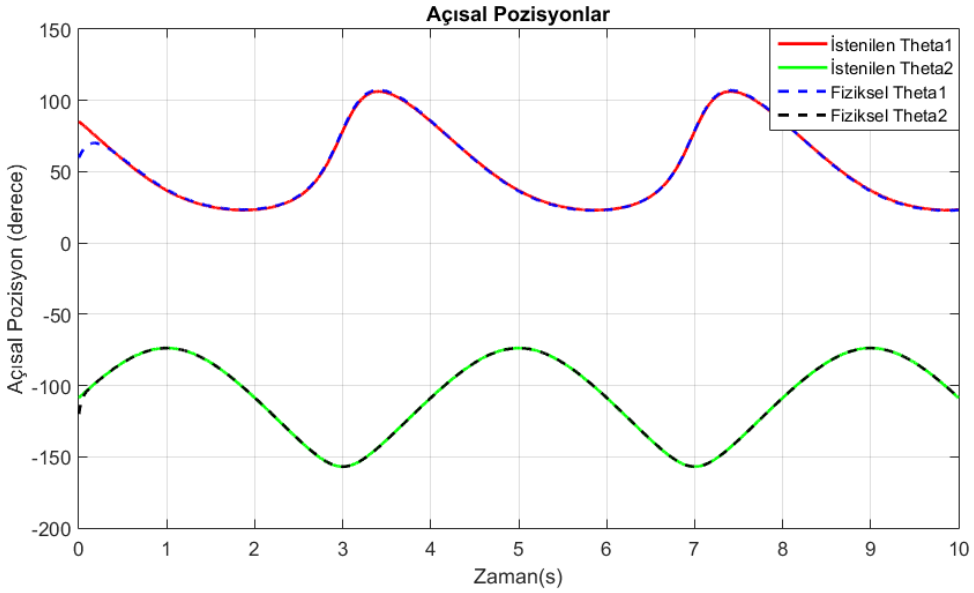


Şekil 7.53. Kuvvet altında robot kolun istenilen daire yörüngesini izlemesi için gerekli tork (PID)

7.3.2 Hibrit Denetim Sistemi (PID + Yapay Sinir Ağları) Çıktıları

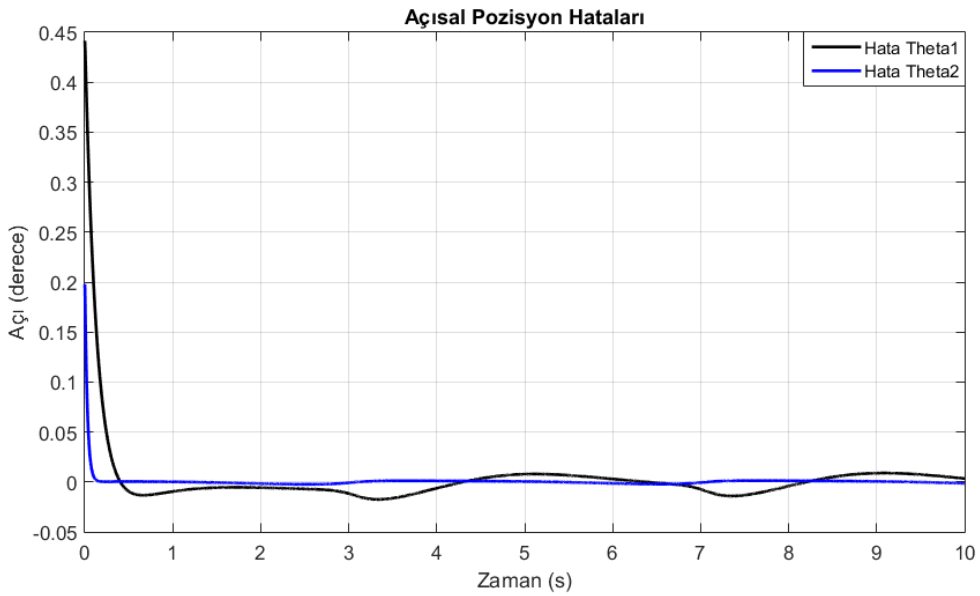
Bu bölümde geleneksel PID denetleme sistemine yardımcı olarak yapay sinir ağları eklenmiştir. Alınan benzetim çıktıları yapay sinir ağları destekli PID denetleme sistemi çıktılarıdır.

Referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açıları ile karşılaştırıldığı açısal pozisyon grafiği Şekil 7.54'te verilmiştir.



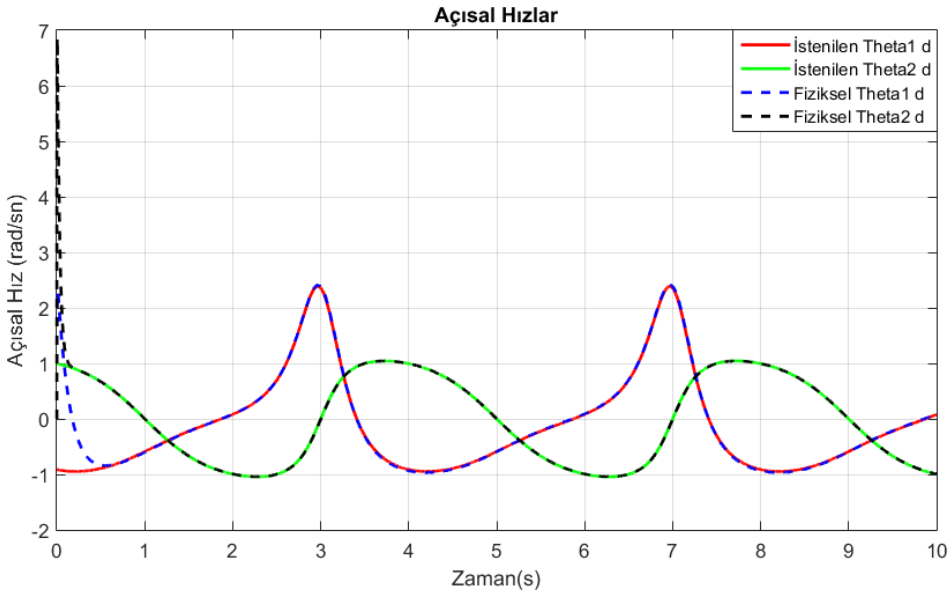
Şekil 7.54. Daire yörüngesi için açısal pozisyon grafiği (YSA)

Giriş olarak kullanılan referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.55'te verilmiştir.



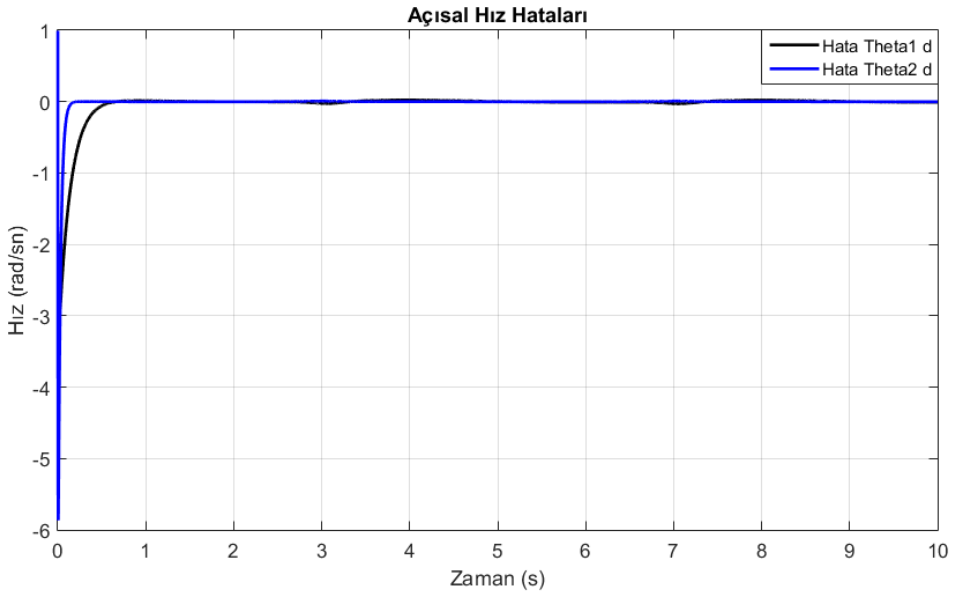
Şekil 7.55. Daire yörüngesi için açısal pozisyon hataları (YSA)

Referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızları ile karşılaştırıldığı açısal hız grafiği Şekil 7.56'da verilmiştir.



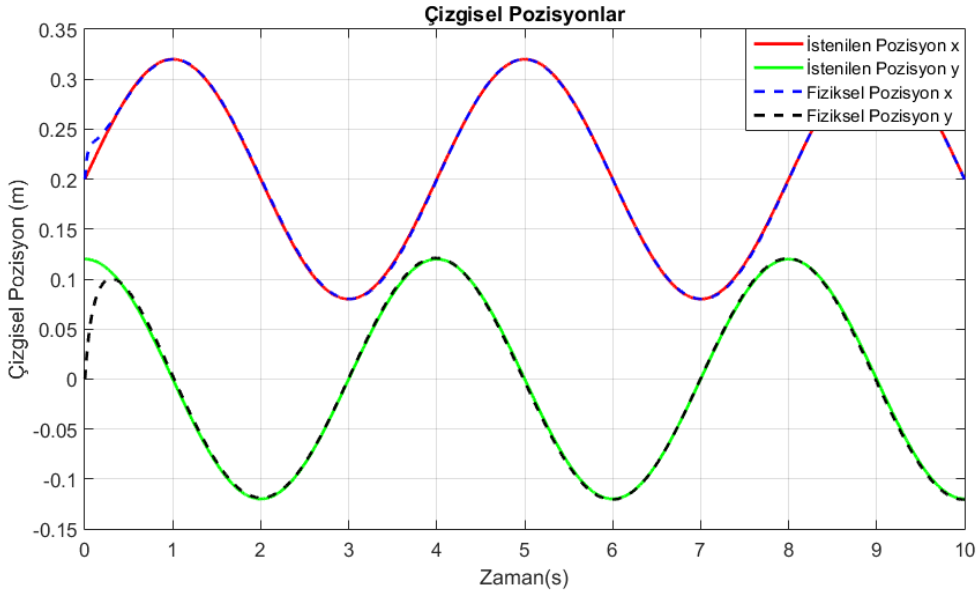
Şekil 7.56. Daire yörüngesi için açısal hız grafiği (YSA)

Giriş olarak kullanılan referans düz çizgi tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarıyla farkları alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.57'de verilmiştir.



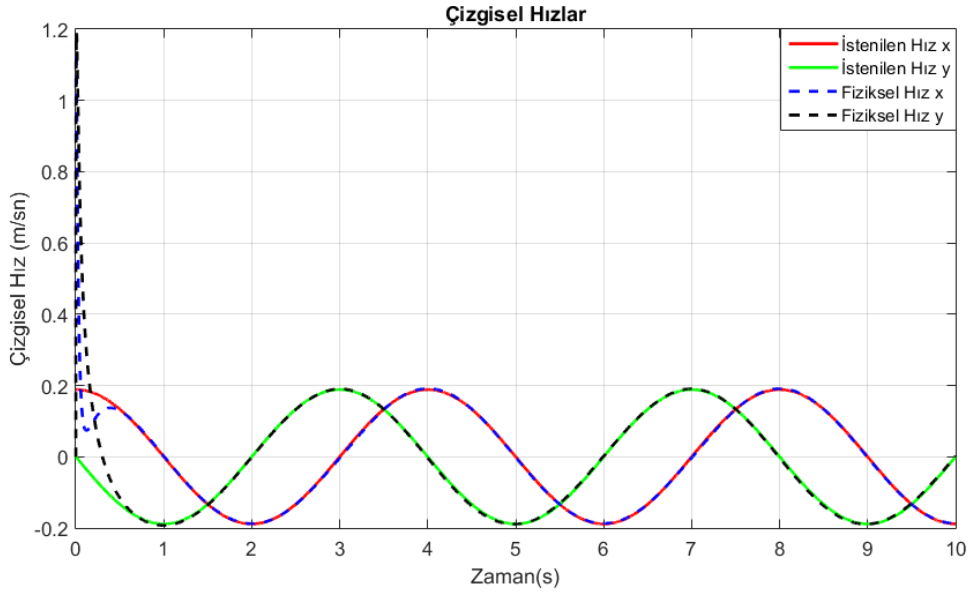
Şekil 7.57. Daire yörüngesi için açısal hız hataları (YSA)

Robot kolun takip etmesi istenilen daire yörüngesine ait x ve y pozisyonlarının, robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y pozisyonları ile karşılaştırılması Şekil 7.58'de verilmiştir.



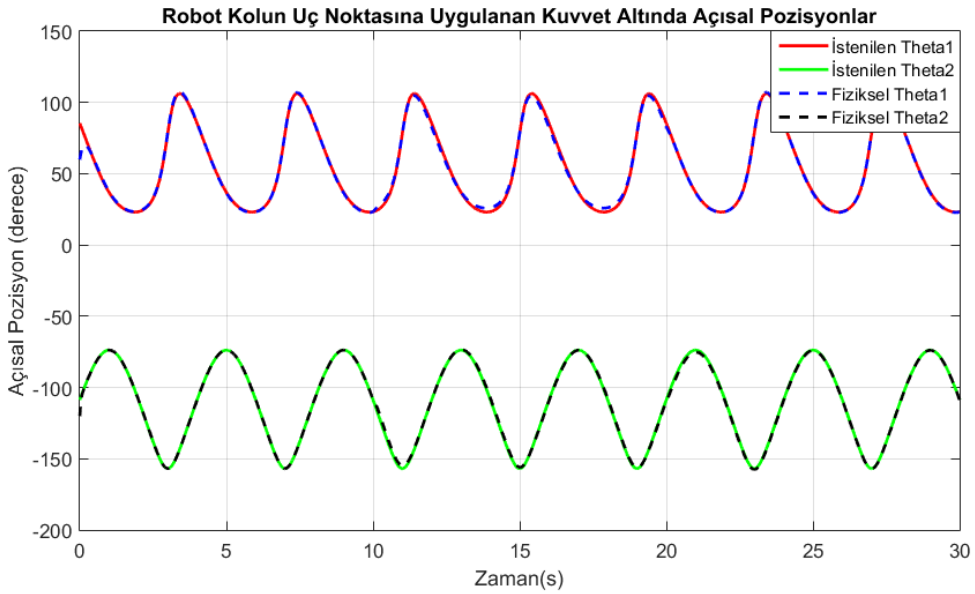
Şekil 7.58. Daire yörüngesi çizgisel pozisyon grafiği (YSA)

Robot kolun takip etmesi istenilen daire yörüngesine ait x ve y hızlarının, robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y hızları ile karşılaştırılması Şekil 7.59'da verilmiştir.



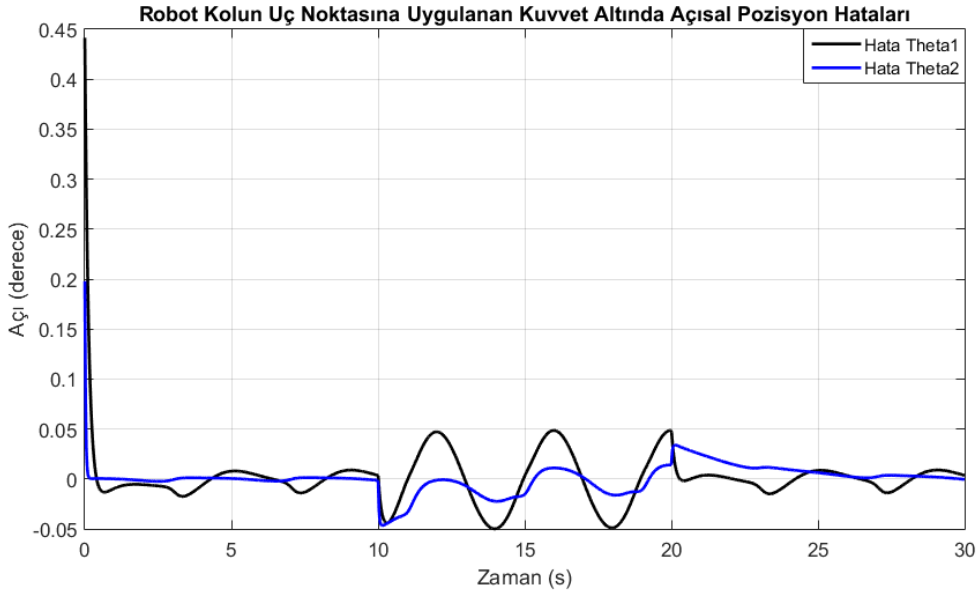
Şekil 7.59. Daire yörüngesi çizgisel hız grafiği (YSA)

Referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açıları ile robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanan koşullar altında karşılaştırıldığı açısal pozisyon grafiği Şekil 7.60'ta verilmiştir.



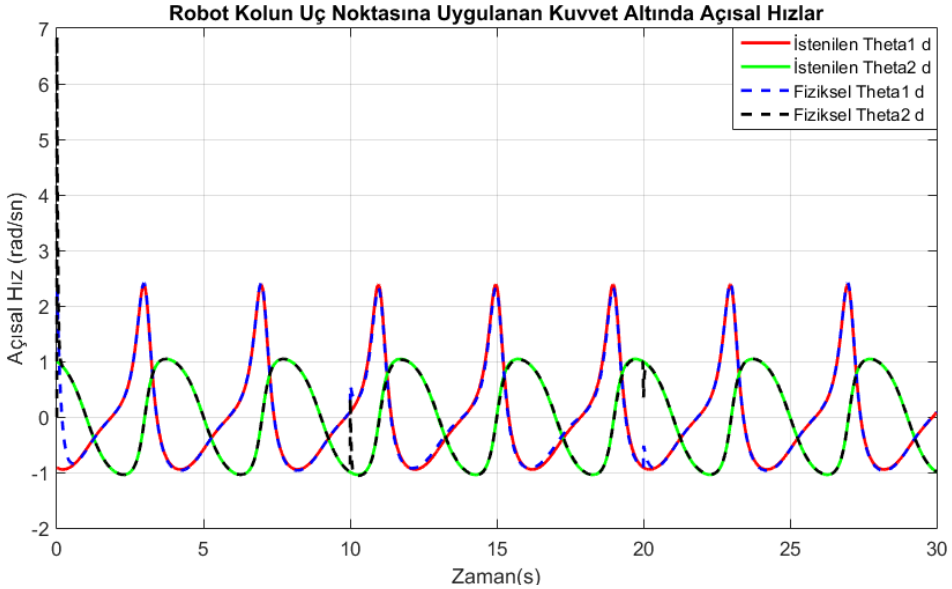
Şekil 7.60. Daire yörüngesi kuvvet altında açısal pozisyon grafiği (YSA)

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığında giriş olarak kullanılan referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.61'de verilmiştir.



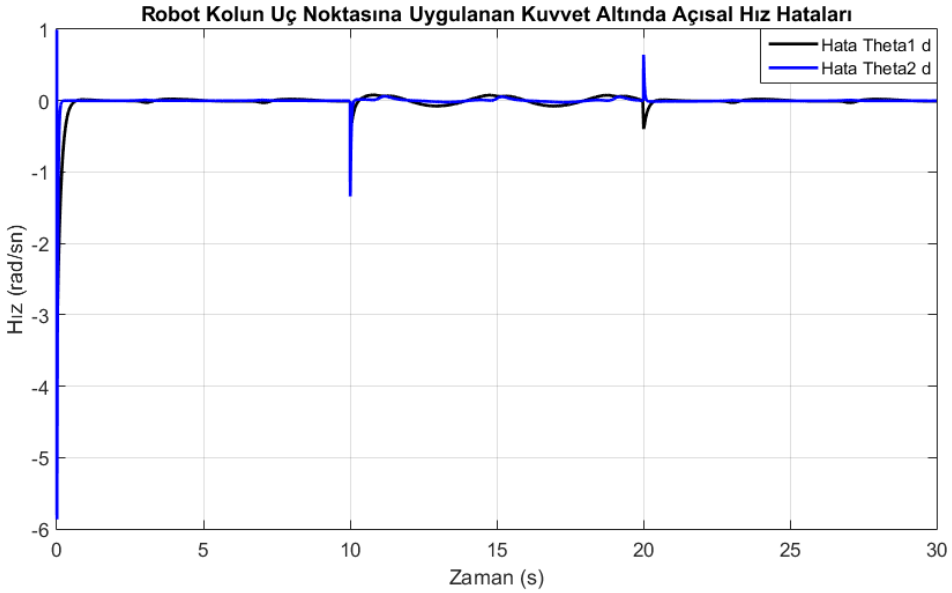
Şekil 7.61. Daire yörüngesi için kuvvet altında açısal pozisyon hataları (YSA)

Referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızlarının fiziksel modelden gelen $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ hızları ile robot kolun uç noktasına 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulanan koşullar altında karşılaştırıldığı açısal hız grafiği Şekil 7.62'de verilmiştir.



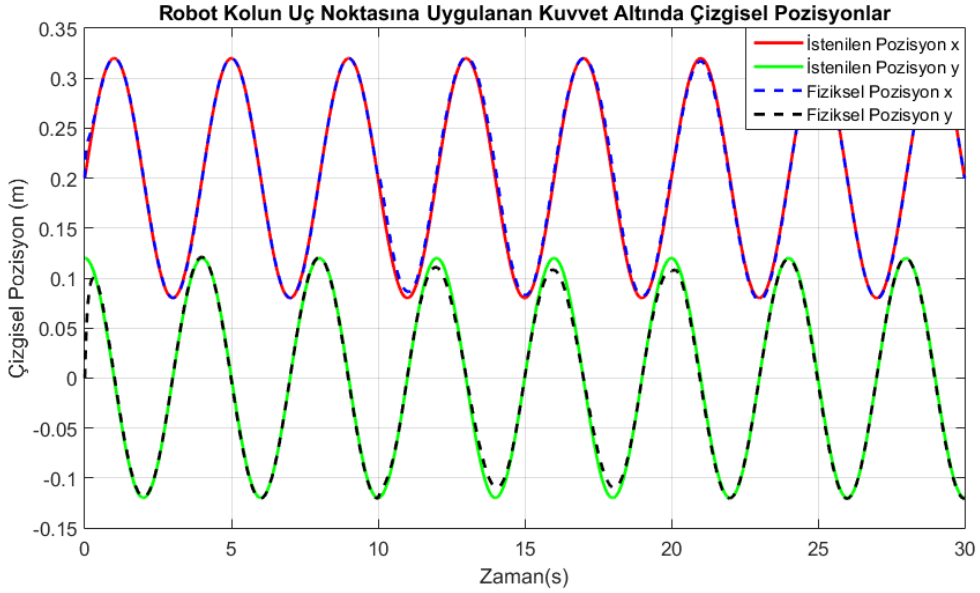
Şekil 7.62. Daire yörüngesi kuvvet altında açısal hız grafiği (YSA)

Robot kolun uç noktasına 10. ve 20. saniyeler arasında 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında giriş olarak kullanılan referans daire tasarımının ters kinematik modelden geçirilmesi ile elde edilen θ_1 ve θ_2 açılarının fiziksel modelden gelen θ_1 ve θ_2 açılarıyla farkı alınarak elde edilen hata değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 7.63'te verilmiştir.



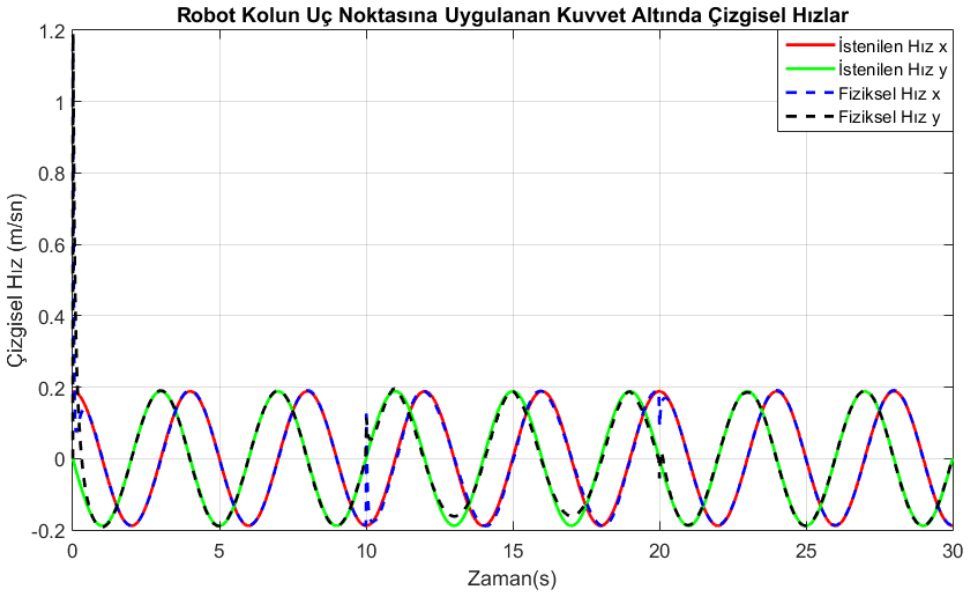
Şekil 7.63. Daire yörüngesi için kuvvet altında açısal hız hataları (YSA)

Robot kolun takip etmesi istenilen daire yörüngesine ait x ve y pozisyonlarının, robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvet etkisi ile robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y pozisyonları ile karşılaştırılması Şekil 7.64'te verilmiştir.



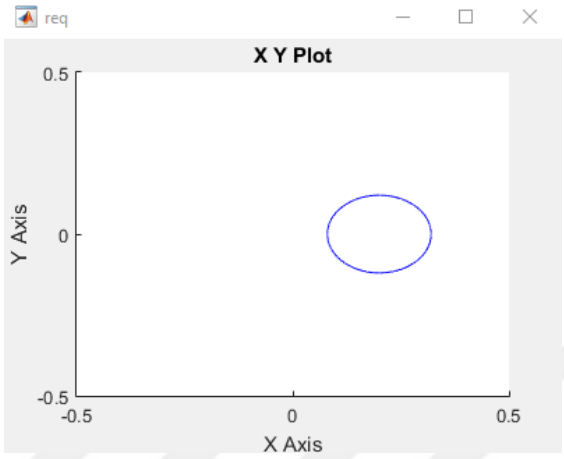
Şekil 7.64. Daire yörüngesi için kuvvet altında çizgisel pozisyon grafiği (YSA)

Robot kolun takip etmesi istenilen daire yörüngesine ait x ve y hızlarının, robot kolun uç noktasına uygulanan kuvvet etkisi ile robot kolun takip ettiği yörüngenin x ve y hızları ile karşılaştırılması Şekil 7.65'te verilmiştir.

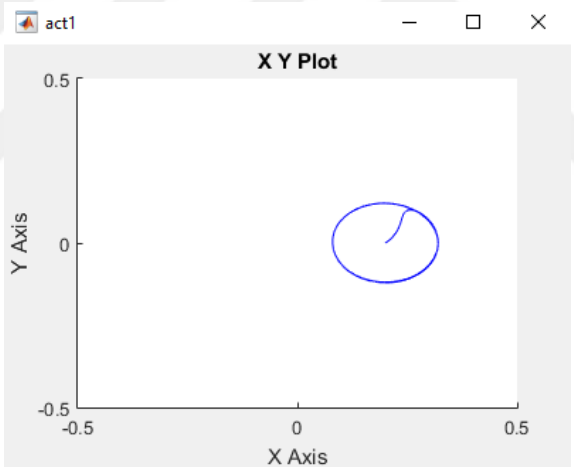


Şekil 7.65. Daire yörüngesi için kuvvet altında çizgisel hız grafiği (YSA)

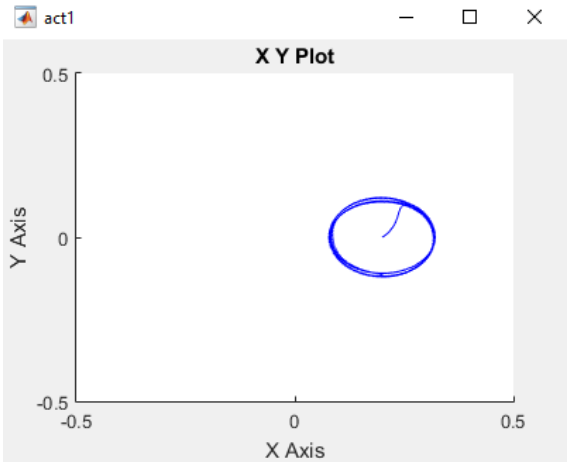
YSA destekli PID denetiminde robot kol uç noktasının konum grafikleri sırası ile verilmiştir. Robotun uç noktasının izlemesi istenilen yörünge Şekil 7.66'da, robotun uç noktasının normal şartlar altında izlediği yörünge Şekil 7.67'de, robotun uç noktasına 8 N büyüklüğünde kuvvet uygulandığında izlediği yörünge ise Şekil 7.68'de verilmiştir.



Şekil 7.66. Referans daire yörüngesi

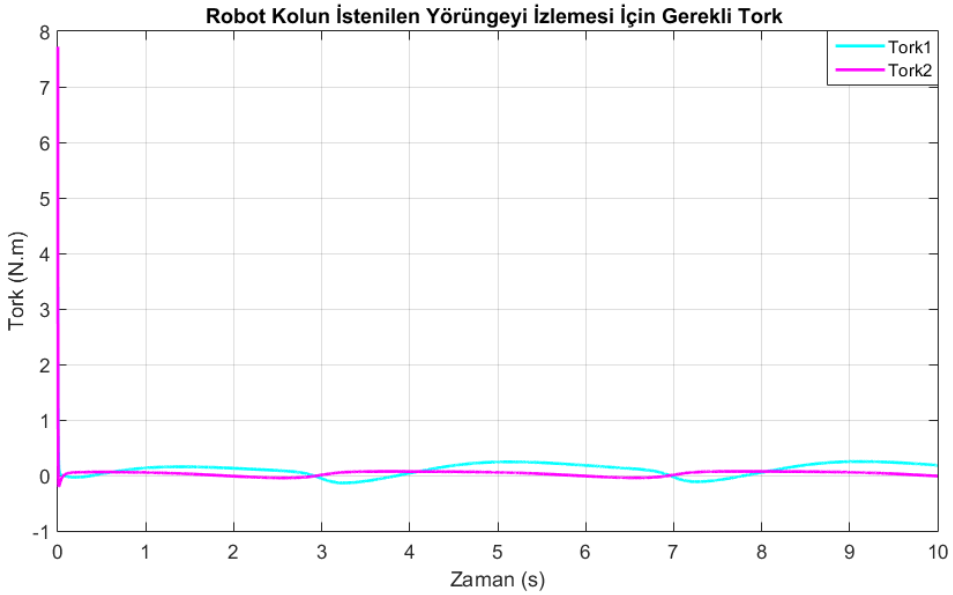


Şekil 7.67. YSA destekli PID denetiminde robot kol uç noktası



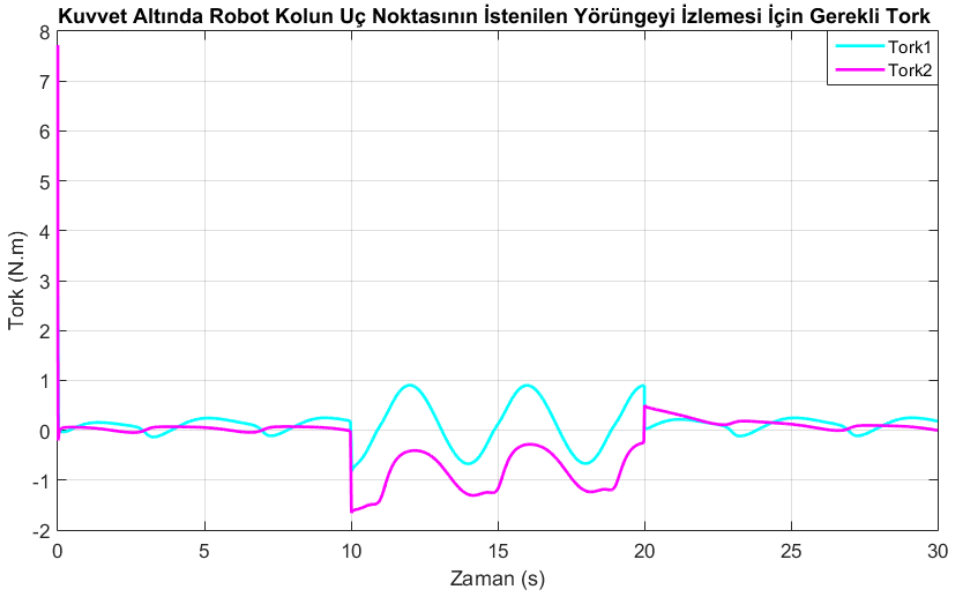
Şekil 7.68. YSA destekli PID denetiminde kuvvet altında robot kol

YSA destekli PID denetim sistemi ile kontrol edilen robot kol sisteminde, robot kolun uç noktasının istenilen daire yörüngesini takip etmesi için gerekli torka ait grafik Şekil 7.69'da verilmiştir.



Şekil 7.69. Robot kolun istenilen düz çizgi yörüngesini izlemesi için gerekli tork (YSA)

YSA destekli PID denetim sistemi ile kontrol edilen robot kol sisteminde, uygulanan 8 Newton büyüklüğündeki kuvvet altında robot kolun uç noktasının istenilen daire yörüngesini takip etmesi için gerekli torka ait grafik Şekil 7.70'te verilmiştir.



Şekil 7.70. Kuvvet altında robot kolun istenilen daire yörüngesini izlemesi için gerekli tork (YSA)

BÖLÜM 8

SONUÇ

Yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında Solidworks katı çizim programında iki serbestlik dereceli bir robot kol tasarlanmıştır. Tasarlanan bu robot kol Matlab/Simulink ortamına aktarılmıştır. Simulink ortamında robot kolun öncelikle kinematik modellemesi yapılmıştır. Kinematik modelleme ileri kinematik ve ters kinematik olarak iki adımda gerçekleştirilmiştir. Kinematik modelleme yapılırken geometrik yaklaşımdan faydalanılmıştır. Ardından robot kol sisteminin dinamik modellemesi yapılmıştır. Robot kolun dinamik modellemesi yapılırken L-E eşitliğinden yararlanılmıştır. Robot kol sistemin doğru ve güvenilir çalışan bir sistem olduğundan emin olunması için kinematik ve dinamik modellemelerin içinde fiziksel modeller ve fonksiyon blokları ile matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu sayede fiziksel modellerin sensörlerinden gelen çıktıları ile fonksiyon bloklarının içinde bulunan matematiksel kodlardan gelen çıktılar birbiri ile karşılaştırılmış ve sistemlerin çıktılarının eşleştiği görülmüştür. Sistemin fiziksel ve matematiksel modelinin eşleşmesinin ardından robot kol sisteminin denetim sistemi tasarımı yapmak için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada denetim sistemi olarak PID denetim sistemi tercih edilmiştir. İki serbestlik dereceli robot sistemi için PID denetleme sistemi tasarlanmıştır. Ardından PID denetleme sistemi robot kol sistemine entegre edilmiştir. PID denetim sistemi katsayıları belirlenirken referans değerler seçilmiş ve bu seçilen değerler ile test işlemi gerçekleştirilerek deneme yanılma yolu ile PID katsayı seçimi yapılmıştır. Ardından modern yapay zeka algoritmalarından biri olan yapay sinir ağları ile yapay sinir ağı destekli PID denetim sistemi oluşturulmuştur. Yapay sinir ağı katsayıları yine PID denetim sisteminde olduğu gibi aynı referans değerler ile test edilerek deneme yanılma yolu ile belirlenmiştir. Katsayı

değerlerinin belirlenmesinin ardından oluşturulan sistemler normal şartlarda ve robot kol uç noktasına sırasıyla 8 N, 40 N, 80 N büyüklüğünde kuvvet uygulanarak test edilmiştir.

Robot kolun ilk eklemine 70 ikinci eklemine 40 derece step girişi uygulanarak PID denetleme sistemi için normal şartlarda yapılan test sonucunda; θ_1 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,45 saniyedir. Aşım değeri % 0.28 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 6 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır. θ_2 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,14 saniyedir. Aşım değeri % 2.7 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 6 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise % 0.27 olarak ölçülmüştür.

Aynı koşullarda yani robot kolun ilk eklemine 70 ikinci eklemine 40 derece step girişi uygulanarak normal şartlar altında yapay sinir ağı destekli PID denetleme sistemi için yapılan test sonucunda; θ_1 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,357 saniyedir. Aşım değeri % 0.64 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 6 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır. θ_2 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,14 saniyedir. Aşım değeri % 1,4 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 6 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise % 0.12 olarak ölçülmüştür.

Robot kolun ilk eklemine 70 ikinci eklemine 40 derece step girişi uygulanarak PID denetleme sistemi için robot kolun uç noktasına 30 saniyelik benzetimin 10. saniyesinde başlayıp 20. saniyesinde biten 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında yapılan testin sonucunda; θ_1 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,44 saniyedir. Aşım değeri % 13.95 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 10 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise % 0.3 olarak ölçülmüştür. θ_2 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0.16 saniyedir. Aşım değeri % 6.42 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 10 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise % 0.55 olarak ölçülmüştür.

Robot kolun ilk eklemine 70 ikinci eklemine 40 derece step girişi uygulanarak robot kolun uç noktasına 10. saniyesinde başlayıp 20. saniyesinde biten 8 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı durumda yapay sinir ağı destekli PID denetleme sistemi için yapılan test sonucunda; θ_1 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,10 saniyedir. Aşım değeri % 13.41 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 5 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yoktur. θ_2 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,15 saniyedir. Aşım değeri % 6.4 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 7 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise % 0.16 olarak ölçülmüştür.

Robot kolun ilk eklemine 70 ikinci eklemine 40 derece step girişi uygulanarak PID denetleme sistemi için robot kolun uç noktasına 10. saniyesinde başlayıp sürekli devam eden 40 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında yapılan testin sonucunda; θ_1 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,3 saniyedir. Aşım değeri % 53.57 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 15 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır. θ_2 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0.1 saniyedir. Aşım değeri %32.5 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 17 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır.

Robot kolun ilk eklemine 70 ikinci eklemine 40 derece step girişi uygulanarak YSA destekli PID denetleme sistemi için robot kolun uç noktasına 10. saniyesinde başlayıp sürekli devam eden 40 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında yapılan testin sonucunda; θ_1 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,28 saniyedir. Aşım değeri % 52.85 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 8 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır. θ_2 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0.1 saniyedir. Aşım değeri %32.5 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 11 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır.

Robot kolun ilk eklemine 70 ikinci eklemine 40 derece step girişi uygulanarak PID denetleme sistemi için robot kolun uç noktasına 10. saniyesinde başlayıp sürekli devam eden 80 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında yapılan testin sonucunda; θ_1 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,28 saniyedir. Aşım değeri % 74.28 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 32 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır. θ_2 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0.1 saniyedir. Aşım değeri %55 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 35 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır.

Robot kolun ilk eklemine 70 ikinci eklemine 40 derece step girişi uygulanarak YSA destekli PID denetleme sistemi için robot kolun uç noktasına 10. saniyesinde başlayıp sürekli devam eden 80 Newton büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığı koşullar altında yapılan testin sonucunda; θ_1 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0,23 saniyedir. Aşım değeri % 72.85 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 20 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır. θ_2 için düşükten yükseğe çıkma süresi 0.06

saniyedir. Aşım değeri %52.5 olarak ölçülmüştür. Sistemin yerleşme süresi 18 saniyedir. Kalıcı durum hatası ise yok denecek kadar azdır.

Robot uç noktasına dışarıdan herhangi bir müdahale olmadığında iki denetim sistemi arasında çok büyük bir fark gözlemlenmese de robot uç noktasına dışarıdan kuvvet uygulandığında YSA destekli PID denetim sisteminin çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Robot uç noktasına uygulanan kuvvetin büyüklüğü arttıkça YSA destekli PID sisteminin geleneksel PID sistemine göre çok daha iyi cevaplar verdiği gözlemlenmiştir. YSA destekli PID denetleme sisteminin geleneksel PID denetim sistemine göre yükseğe çıkma süresini azalttığı, aşım yüzdesini düşürdüğü, sistemin yerleşme süresini oldukça düşürdüğü görülmüştür. Yapılan testler sonucunda YSA destekli PID deneteme sisteminin kuvvet altında gösterdiği performansın geleneksel PID denetleme sistemine göre çok daha iyi olduğu ortaya konulmuştur.

Referans değer testlerinin ardından robot kol davranışları iki denetleme sistemi için de iki farklı durum açısından incelenmiştir. Bu durumlar robot kolun uç noktasının izlediği düz çizgi yörüngesi ve daire yörüngesidir. Bu testlerin sonucunda YSA destekli PID denetleme sisteminin geleneksel PID denetleme sistemine göre robot kolun takip etmesi istenilen yörüngeye daha sadık kaldığı, robot uç noktasına uygulanan kuvvetin robot kolun izlemesi istenilen yörüngeyi daha az bozduğu ve bu bozulmayı daha kısa sürede yok ettiği görülmüştür.

Öneriler

Robot kollar birçok alanda kullanılmaktadır ve bu alanların çoğu insanlarla ortak çalışmayı gerektiren ortamlardır. Bu sebeple bir robot kolun insan ile etkileşimde bulunduğu yani dışarıdan gelen etkilere karşı cevap üretebildiği, dışarıdan uygulanan anlık kuvvetlerin oluşturduğu bozucu etkiyi ortadan kaldırmayı sağlayan denetleme sistemleri üzerine bir çalışma gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışmasında robot uç noktasına sabit bir dış kuvvet uygulanmaktadır fakat ileri ki çalışmalarda sabit olmayan anlık değişen kuvvetlere karşı çözüm üreten denetleme sistemleri oluşturulabilir.

Bu tez çalışmasında açık uçlu bir robot ile araştırma yapılmıştır fakat aynı çalışma kapalı sistem bir robot içinde gerçekleştirilebilir.

Farklı çalışma alanlarının farklı isterlerine en iyi şekilde çözüm sağlayabilmek için farklı denetleyicilere farklı yapay zeka algoritmaları uygulanabilir.

KAYNAKLAR

Adar, N. G., Ören, H., & Kozan, R. (2013). 5 Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Modellenmesi Ve Kontrolü. *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 17*(1), 155-160.

Al-Qahtani, H. M., Mohammed, A. A., & Sunar, M. (2017). Dynamics and Control of a Robotic Arm Having Four Links. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1841–1852. doi:10.1007/s13369-016-2324-y

Angel, L., & Viola, J. (2018). Fractional Order PID for Tracking Control of A Parallel Robotic Manipulator Type Delta. *ISA Transactions, 79*, 172-188. doi:https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.04.010

Berki, K. (2013). *Yapay Sinir Ağları İle Robot Kol Kontrolü.* İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Campa, G., Fravolini, M. L., & Napolitano, M. (2002). A, Library of Adaptive Neural Networks for Control Purposes. *IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design Proceedings* (s. 115-120). Glasgow, Scotland, UK: IEEE.

Caner, U., & Eroğlu, M. (2004). Robot Kol Denetim Tasarımı İçin Durum Değişkenleri Geri Beslemeli Ve Tümlevli Denetimci Yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19*(3), 335-342.

Craig, J. J. (2014). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* (Third Edition b.). Harlow: Pearson. ISBN: 1-292-04004-1

Ebioğlu, H. (2021). *Robot Kol Tasarımı Ve Bulanık Mantık Denetleyici İle Denetiminin Araştırılması.* Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ghaleb, N. M., & Aly, A. A. (2018). Modeling and Control of 2-DOF Robot Arm. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 24-31. ISSN: 2349-4395

Gürgüze, G., & Türkoğlu, İ. (2019). Kullanım Alanlarına Göre Robot Sistemlerinin Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 53-66.

Hüseyinoğlu, M., & Abut, T. (2018). Dynamic Model and Control of 2-DOF Robotic Arm. *European Journal of Technic (EJT)*, 141-150. ISSN: 2536-5134

İlgen, S., Durdu, A., Gülbahçe, E., & Çakan , A. (2020). İki Linkli Robot Manipülatörün Modellenmesi ve Bozucu Etki Altında Yörünge Kontrolü. IEEE Xplore. 978-1-7281-9090-7/20/$31.00 ©2020 IEEE

Kadu, C. B., Bhusal, S. B., & Lukare, S. B. (2015). Autotuning of PID Controller for Robot Arm and Magnet Levitation Plant. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), 4*(1), 186-193. ISSN: 2319-1163

Karakoyun, E., Çakan, A., & Kalyoncu, M. (2022). İki Serbestlik Dereceli Bir Robot Kolun Konum Kontrolü İçin PID Kontrol Parametrelerinin Arı Algoritması (AA)

Kullanılarak Belirlenmesi. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 111-124. doi: 10.25092/baunfbed.885152

Katipoğlu, G. (2013). *Üç Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Pozisyon Kontrolü.* İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Keleşoğlu, Ö., & Fırat, A. (2006). İç Basınç Altında İnce Cidarlı Kabukların Yapay Sinir Ağları İle Çözümü. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10*(3), 447-451.

Mahto, R. K., Kaur, J., & Jain, P. (2022). Performance Analysis of Robotic Arm Using Simulink. *2022 IEEE World Conference on Applied Intelligence and Computing* 508-512. IEEE. doi:10.1109/AIC55036.2022.9848866

MathWorks. (1984-2005). *The Language of Technical Computing, Getting Started with MATLAB Version 7.* The MathWorks, Inc.

MathWorks. (2003-2020). *Simscape Multibody Link Referans.* The MathWorks, Inc.

MathWorks, (2003-2020). *Simscape Multibody Link User's Guide.* The MathWorks, Inc. www.mathworks.com/trademarks adresinden alındı

Naing, W. W., Aung, K. Z., & Thike, A. (2018). Position Control of 3-DOF Articulated Robot Arm using PID Controller. *International Journal of Science and Engineering Applications, 7*(9), 254-260. ISSN:-2319–7560

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (Fifth Edition b.). Prentice Hall: Pearson Education, Inc.

Pajaziti, A., & Cana, H. (2014). Robotic Arm Control with Neural Networks Using Genetic Algorithm Optimization Approach. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 1431-1435.

Sciavicco, L., & Siciliano, B. (1996). *Modeling and Control of Robot Manipulators.* New York: The McGraw-Hill Companies.

Taşören, A. E., Gökçen, A., Soydemir, M. U., & Şahin, S. (2020). Artificial Neural Network-Based Adaptive PID Controller Design for Vertical Takeoff and Landing Model. *European Journal of Science and Technology (EJOSAT)*(Special Issue), 87-93. doi: 10.31590/ejosat.779085

Yağız, N., Hacıoğlu , Y., & Arslan, Y. Z. (2010). Load Transportation by Dual Arm Robot Using Sliding Mode Control. *Journal of Mechanical Science and Technology, 24*(5), 1177-1184. doi:10.1007/s12206-010-0312-9

Yıldırım, G. (2021). *3 Eksenli Bir Robot Kolun Kontrol Metotlarının İncelenmesi Ve Verimlilik Analizi.* Isparta: Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi/ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Youns, M. D., Attya, S. M., & Abdulla, A. I. (2013). Position Control Of Robot Arm Using Genetic Algorithm Based PID Controller. *Al-Rafidain Engineering*, 19-30.

Yüksel, G. (2018). *Dört Serbestlik Dereceli Robot Kolun 2-DOF PID ile Kontrolü.* Elazığ: Fırat Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Hazırlık sınıfını ABD'de New York Vaughn College of Aeronautics and Technology' de okudu. Lisans öğrenimine Türk Hava Kurumu Üniversitesinde devam etti ve 2020 yılında mekatronik mühendisliği programından mezun oldu. Ardından Marmara Üniversitesinde mühendislik yönetimi yüksek lisans programına başladı ve 2022 yılında mezun oldu. Şuan Trakya Üniversitesinde mekatronik mühendisliği yüksek lisans programına devam etmektedir.