

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALTI SERBESTLİK DERECELİ BİR SERİ ROBOTUN
TASARIMI, ÜRETİMİ VE UZAKTAN İNSAN ELİ
HAREKETLERİ İLE KONTROLÜ**

ZEHRANUR YILMAZ

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALTI SERBESTLİK DERECELİ BİR SERİ ROBOTUN
TASARIMI, ÜRETİMİ VE UZAKTAN İNSAN ELİ
HAREKETLERİ İLE KONTROLÜ

ZEHRANUR YILMAZ

Prof.Dr. Zafer BİNGÜL

Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof.Dr. Serdar KÜÇÜK

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. Metin TOZ

Jüri Üyesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bilim ve sanayide otonom sistemlere yönelim her geçen gün hızlanarak artmaktadır. İnsan gücünün devre dışı bırakılmasını amaçlayan ve insanı zor çalışma ortamlarından uzaklaştırmayı ve erişimi zor alanlarda insan yerine akıllı makineler ile yapılamaz denilen tüm işlemleri yapılabilir duruma getimeyi hedefleyen bu akışta, bana kendimi geliştirmek ve ufkumu açabilmek için fırsat tanıyan değerli hocam Prof. Dr. Zafer BİNGÜL'e, yardımlarını benden esirgemeyen Akif Kılınç ve diğer ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca her zaman, her durumda yanımda olan sevgili eşim ve aynı zamanda meslektaşım Orkun YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Beni yetiştiren bu günlere gelmemi sağlayan canım babama, anneme ve kardeşlerime sonsuz minnet duygularımı ve sevgilerimi sunarım.

Mayıs-2021

Zehranur YILMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xiv
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	5
1.1. Robotların Sınıflandırılması	5
1.1.1. Taşınabilirliklerine göre robotlar	5
1.1.1.1. Sabit robotlar.....	5
1.1.2. Kinematik yapılarına göre robotlar	6
1.2. Robotların Modellenmesinde Kullanılan Metotlar.....	6
1.2.1. İleri kinematik modeli	6
1.2.2. Ters kinematik modeli.....	7
1.2.3. Dinamik modeli.....	7
1.3. Robotların Kontrolünde Kullanılan Yöntemler.....	7
2. SİSTEMİN MEKATRONİK TASARIMI	8
2.1. Mekanik Tasarım.....	8
2.1.1. Birinci bağ tasarımı	8
2.1.1.1. Birinci bağ üç boyutlu tasarımı.....	9
2.1.2. İkinci bağ tasarımı	9
2.1.2.1. İkinci bağ tasarımında alt bileşenler	10
2.1.2.2. İkinci bağ üç boyutlu tasarımı.....	15
2.1.3. Üçüncü bağ tasarımı	15
2.1.3.1. Üçüncü bağ tasarımında alt bileşenler	16
2.1.3.2. Üçüncü bağ üç boyutlu tasarımı	20
2.1.4. Dördüncü bağ tasarımı	21
2.1.4.1. Dördüncü bağ alt bileşen tasarımları	22
2.1.4.2. Dördüncü bağın üç boyutlu tasarımı	24
2.1.5. Beşinci bağ tasarımı	25
2.1.5.1. Beşinci bağ alt bileşen tasarımları.....	25
2.1.5.2. Beşinci bağ üç boyutlu tasarımı.....	26
2.1.6. Altıncı bağ.....	26
2.1.6.1. Altıncı bağ alt bileşen tasarımları.....	27
2.1.6.2. Altıncı bağ üç boyutlu tasarımı.....	28
2.1.7. Uç işlevci tasarımı	28
2.1.7.1. Uç işlevci alt bileşen tasarımları.....	29
2.1.7.2. Uç işlevci üç boyutlu tasarımı.....	32
2.1.8. Solucan dişli set.....	32
2.1.9. Robotun 3D montaj modeli	34
2.1.10. Robotun fiziksel parametrelerinin değerleri.....	35

2.2. Sistemin Elektronik Tasarımı	38
2.2.1. Elektronik tasarımın alt yapısının oluşturulması.....	38
2.2.2. Elektronik tasarım malzeme listesinin oluşturulması.....	39
2.2.3. Kullanılan malzemelerin teknik özellikleri	39
2.2.3.1. Kontrol kartı (STM32F407).....	39
2.2.3.2. DC motor sürücü (SKU.DRI0041).....	45
2.2.3.3. 12V DC güç kaynağı (S-360-12).....	48
2.2.3.4. 5V güç kaynağı	49
2.2.3.5. 24V DC güç kaynağı (DVPPS02).....	49
2.2.3.6. Faulhaber 50mNm DC mikromotor	51
2.2.3.7. Servo motor-1 HS-311 HITEC	55
2.2.3.8. Servo motor-2 Robo Soul LD-2015	57
2.2.3.9. 37D#4753-..54 Pololu fırçalı DC motor	58
2.2.3.10. Leap motion	60
2.2.3.11. Dağıtım kartı	62
2.2.4. Elektronik tasarım şemasının hazırlanması.....	62
3. SİSTEMİN KİNEMATİK MODELİNİN ELDE EDİLMESİ	64
3.1. Giriş	64
3.2. İleri Kinematik Modeli	65
3.2.1. Denavit-Hartenberg(D-H) yöntemi	65
3.2.2. Robotun ileri kinematik modelinin elde edilmesi	66
3.3. Ters Kinematik Modeli.....	69
3.4. Robotun Jakobiyen Analizi	73
4. DİNAMİK MODEL	75
4.1. Giriş	75
4.2. Robot Dinamiğinde Lagrangian Fonksiyonu	76
4.3. Lagrangian Fonksiyonu Yardımıyla Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi	77
4.4. Robotun Yörünge Planlaması.....	77
4.5. Geliştirilen Robot Kontrolörü.....	78
4.5.1. PID kontrolör.....	78
4.5.2. MATLAB/Simulink kontrolör modeli	80
4.6. Ters Dinamik Model.....	81
4.7. Robotun MATLAB/Simulink Dinamik Modeli	84
5. İNSAN-ROBOT ARAYÜZÜ(HRI)	94
6. DENEYSEL SONUÇLAR	98
6.1. Doğrudan Verilen Açık Referansları ile Yapılan Çalışmalar.....	98
6.1.1. Birinci eklem için referans verisi ile çalışma	99
6.1.2. Birinci ve üçüncü eklem için referans veri ile çalışma.....	101
6.1.3. Tüm eklemler için referans veri ile çalışma	103
6.2. İleri Kinematik Model Kullanılarak Gerçek Zamanlı Yörünge Takibi Çalışmaları	105
6.2.1. Çalışma-1.....	105
6.2.2. Çalışma-2.....	106
6.2.3. Çalışma-3.....	108
6.3. Tut-Bırak Uygulaması.....	109
6.4. Ters Kinematik Model Kullanılarak Gerçek Zamanlı Yörünge Takibi Çalışmaları	110
6.4.1. Çalışma-1	110

6.4.2. Çalışma-2	113
6.5. İnsan-Robot Arayüzü Kullanılarak Robotun Gerçek Zamanlı Kontrolü	116
6.5.1. Çalışma-1	116
6.5.2. Çalışma-2	118
7. SONUÇLAR	121
KAYNAKLAR	124
EKLER.....	127
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	142
ÖZGEÇMİŞ	143



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Robotların sınıflandırılması.....	5
Şekil 1.2. Seri ve paralel manipülatör	6
Şekil 2.1. Birinci bağ teknik resim	9
Şekil 2.2. Birinci bağ üç boyutlu tasarım	9
Şekil 2.3. İkinci bağ teknik resim	10
Şekil 2.4. İkinci bağ birinci alt bileşen teknik resim	11
Şekil 2.5. İkinci bağ ikinci alt bileşen teknik resmi	11
Şekil 2.6. İkinci bağ üçüncü alt bileşen teknik resim	12
Şekil 2.7. İkinci bağ dördüncü alt bileşen teknik resim	12
Şekil 2.8. İkinci bağ beşinci alt bileşen teknik resim	13
Şekil 2.9. İkinci bağ altıncı alt bileşen teknik resim.....	13
Şekil 2.10. İkinci bağ yedinci alt bileşen teknik resim.....	14
Şekil 2.11. F608Z rulman	14
Şekil 2.12. İkinci bağ üç boyutlu tasarımı	15
Şekil 2.13. Üçüncü bağ tasarımı teknik resmi	15
Şekil 2.14. Birinci alt bileşen birinci parça teknik resmi	16
Şekil 2.15. Birinci alt bileşen birinci parça teknik resmi	16
Şekil 2.16. Üçüncü bağ ikinci alt bileşen teknik resmi	17
Şekil 2.17. Üçüncü bağ üçüncü alt bileşen teknik resmi	17
Şekil 2.18. Üçüncü bağ dördüncü alt bileşen teknik resmi	18
Şekil 2.19. Triger kasnak_1	19
Şekil 2.20. Triger kayış	20
Şekil 2.21. Triger kasnak_2.....	20
Şekil 2.22. Üçüncü bağ üç boyutlu tasarımı	21
Şekil 2.23. Dördüncü bağ teknik resmi	21
Şekil 2.24. Dördüncü bağ birinci alt bileşen teknik resmi	22
Şekil 2.25. Dördüncü bağ ikinci alt bileşen teknik resmi.....	23
Şekil 2.26. Dördüncü bağ üçüncü alt bileşen teknik resmi	23
Şekil 2.27. Dördüncü bağ dördüncü bileşen teknik resmi.....	24
Şekil 2.28. Triger kasnak_1	24
Şekil 2.29. Dördüncü bağ invertor tasarımı.....	24
Şekil 2.30. Beşinci bağ teknik resmi	25
Şekil 2.31. Beşinci bağ birinci alt bileşen teknik resmi	25
Şekil 2.32. Beşinci bağ üç boyutlu tasarımı	26
Şekil 2.33. Altıncı bağ teknik resmi	26
Şekil 2.34. Altıncı bağ birinci alt bileşen teknik resmi	27
Şekil 2.35. Altıncı bağ ikinci alt bileşen teknik resmi.....	27
Şekil 2.36. Altıncı bağ üç boyutlu tasarımı	28
Şekil 2.37. Uç işlevci teknik resmi	28
Şekil 2.38. Uç işlevci birinci alt bileşen teknik resmi	29

Şekil 2.39. Uç işlevci ikinci alt bileşeni teknik resmi	29
Şekil 2.40. Uç işlevci üçüncü alt bileşen teknik resmi	30
Şekil 2.41. Krank-biyel.....	30
Şekil 2.42. Krank teknik resmi	31
Şekil 2.43. Biyel teknik resmi	31
Şekil 2.44. Uç işlevci üç boyutlu tasarımı	32
Şekil 2.45. Solucan dişli mekanizması	33
Şekil 2.46. Solucan dişli mekanizması teknik resim	34
Şekil 2.47. Robotun üç boyutlu montaj modeli	35
Şekil 2.48. Robotun kinematik modellemede kullanılacak fiziksel boyutları.....	36
Şekil 2.49. ZORO Prototip fotoğrafı	37
Şekil 2.50. Elektronik tasarım	38
Şekil 2.51. STM32F407 Kontrol kartı fotoğraf.....	40
Şekil 2.52. STM32F407 teknik resim	40
Şekil 2.53. Kontrol kartı STM32F407 fiziksel gösterim.....	41
Şekil 2.54. PWM üreten timer-kanal seçimi	43
Şekil 2.55. STM32F407VG pin fonksiyonları	45
Şekil 2.56. SKU.DRI0041 fotoğraf	45
Şekil 2.57. SKU.DRI0041 teknik resim	46
Şekil 2.58. SKU.DRI0041 pin bağlantıları.....	47
Şekil 2.59. 12V DC S-360-12 güç kaynağı	48
Şekil 2.60. 24V DC güç kaynağı (DVPPS02).....	49
Şekil 2.61. DVPPS02 model numarası.....	49
Şekil 2.62. DVPPS02 pin bağlantıları	50
Şekil 2.63. Faulhaber 3557 DC motor fotoğraf.....	51
Şekil 2.64. Faulhaber 3557 DC motor teknik resim.....	51
Şekil 2.65. Faulhaber 3557 DC motor 3D resim	52
Şekil 2.66. Faulhaber 3557 DC motor 38/1 serisi redüktör teknik resim.....	53
Şekil 2.67. Faulhaber HEDS 5500 enkoder.....	54
Şekil 2.68. Faulhaber enkoder ve motor montaj resmi.....	54
Şekil 2.69. HITEC HS-311 fotoğrafı.....	55
Şekil 2.70. HITEC HS-311 birim ölçüler	55
Şekil 2.71. HITEC HS-311 motor 3D tasarım	56
Şekil 2.72. HITEC HS-311 motor pin bağlantısı	56
Şekil 2.73. Robo-Soul LD-2015 motor	57
Şekil 2.74. Robo-Soul LD-2015 motor 3D tasarım.....	57
Şekil 2.75. Robo-Soul LD-2015 motor pin bağlantıları.....	58
Şekil 2.76. 37D#4753 pololu DC motor.....	59
Şekil 2.77. 37D#4753 pololu DC motor 3D tasarım.....	59
Şekil 2.78. 37D#4753 pololu DC motor kablo pinleri	60
Şekil 2.79. Leap Motion-1.....	61
Şekil 2.80. Leap Motion-2.....	61
Şekil 2.81. Dağıtım PCB kartı proteus tasarımı	62
Şekil 2.82. Dağıtım PCB kartı ares tasarımı.....	62
Şekil 2.83. ZORO E-Plan şeması	63
Şekil 3.1. ZORO robotunun izometrik görünümü.....	64

Şekil 3.2.	DH parametreleri.....	66
Şekil 3.3.	Robotun eksenlerinin yerleştirilmesi.....	67
Şekil 4.1.	ZORO robot dinamik model parametreleri	75
Şekil 4.2.	PID kontrol şeması.....	79
Şekil 4.3.	PID kontrolör iç yapısı	80
Şekil 4.4.	MATLAB/Simulink kontrolör alt sistemi.....	81
Şekil 4.5.	Eklemlerin zamana göre konum değişimleri.....	82
Şekil 4.6.	Eklemlerin hız-zaman grafiği.....	82
Şekil 4.7.	Eklemlerin zamana göre ivme grafikleri.....	83
Şekil 4.8.	Eklemlerin torkları.....	83
Şekil 4.9.	Sistemin dinamik modeli.....	84
Şekil 4.10.	İleri dinamik simülasyon çalışması-1 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-1.....	85
Şekil 4.11.	İleri dinamik simülasyon çalışması-1 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-2.....	86
Şekil 4.12.	İleri dinamik simülasyon çalışması-1 / ZORO başlangıç pozisyonu görüntüsü	87
Şekil 4.13.	İleri dinamik simülasyon çalışması-1 / ZORO hedef pozisyon görüntüsü.....	87
Şekil 4.14.	İleri dinamik simülasyon çalışması-2 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri.....	88
Şekil 4.15.	İleri dinamik simülasyon çalışması-2 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-1.....	89
Şekil 4.16.	İleri dinamik simülasyon çalışması-2 / ZORO başlangıç pozisyonu görüntüsü	90
Şekil 4.17.	İleri dinamik simülasyon çalışması-2 / ZORO hedef pozisyon görüntüsü.....	90
Şekil 4.18.	İleri dinamik simülasyon çalışması-3 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-1.....	91
Şekil 4.19.	İleri dinamik simülasyon çalışması-3 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-2.....	92
Şekil 4.20.	İleri dinamik simülasyon çalışması-3 / ZORO başlangıç pozisyonu görüntüsü	93
Şekil 4.21.	İleri dinamik simülasyon çalışması-3 / ZORO hedef pozisyonu görüntüsü	93
Şekil 5.1.	Leap Motion referans koordinat sistemi.....	94
Şekil 5.2.	Çevrimiçi olarak el verisinin alınması	95
Şekil 5.3.	Geliştirilen HRI ile insan elinden alınan verinin üç boyutlu olarak çizimi.....	96
Şekil 6.1.	Doğrudan verilen veriler için akış şeması.....	99
Şekil 6.2.	İlk çalışma-referans veriler (a) t=0 anındaki görüntü (b) t=4 anındaki görüntü (c) t=6 anındaki görüntü (d) t=10 anındaki görüntü (e) t=12 anındaki görüntü (f) t=12 anındaki görüntü.....	100
Şekil 6.3.	İlk çalışma, referans veri-gerçek zamanlı veri	101

Şekil 6.4.	Birinci ve üçüncü eklem gerçek zamanda hareket (a) $t=0$ anındaki görüntü (b) $t=2$ anındaki görüntü (c) $t=4$ anındaki görüntü (d) $t=8$ anındaki görüntü	101
Şekil 6.5.	Birinci eklem için θ_1 ve referans θ_1 veri grafiği.....	102
Şekil 6.6.	Üçüncü eklem için θ_1 ve referans θ_1 veri grafiği	102
Şekil 6.7.	Altı eklem doğrudan veri ile eş zamanlı çalıştırılması.....	103
Şekil 6.8.	Birinci eklem motoru gerçek zamanlı çalışma / altı eklem eş zamanlı.....	103
Şekil 6.9.	İkinci eklem motoru gerçek zamanlı çalışma / altı eklem eş zamanlı.....	104
Şekil 6.10.	Üçüncü eklem motoru gerçek zamanlı çalışma / altı eklem eş zamanlı.....	104
Şekil 6.11.	İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-1 (a) $t=2$ anındaki görüntü (b) $t=5$ anındaki görüntü (c) $t=10$ anındaki görüntü.....	105
Şekil 6.12.	İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-1/ motor verileri.....	106
Şekil 6.13.	İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-2	107
Şekil 6.14.	İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-2/ motor verileri.....	107
Şekil 6.15.	İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-3 (a) $t=2$ anındaki görüntü (b) $t=6$ anındaki görüntü (c) $t=10$ anındaki görüntü.....	108
Şekil 6.16.	İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-3/ motor verileri.....	109
Şekil 6.17.	ZORO tut-bırak uygulaması.....	110
Şekil 6.18.	Ters kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-1.....	111
Şekil 6.19.	Ters kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-1 / motor verileri.....	112
Şekil 6.20.	Robotun uç işlevcisinin kartezyen uzayında izlediği yörünge / çalışma-1	112
Şekil 6.21.	Ters kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-2.....	113
Şekil 6.22.	Robotun uç işlevcisinin kartezyen uzayında izlediği yörünge / çalışma-2	114
Şekil 6.23.	Ters kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-2/ motor verileri.....	115
Şekil 6.24.	İnsan elinden alınan verinin HRI çıkış sinyali	116
Şekil 6.25.	Leap Motion ile robotun gerçek zamanlı kontrolü.....	117
Şekil 6.26.	Leap Motion ile gerçek zamanlı kontrol / motor-zaman verileri	118
Şekil 6.27.	Elden alınan veriler ile robotun üç boyutlu uzayda takip ettiği yörünge.....	119
Şekil 6.28.	Leap Motion ile robotun gerçek zamanlı kontrolü-2	119
Şekil 6.29.	Leap Motion ile gerçek zamanlı kontrol 2 / motor-zaman verileri	120

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Triger / zaman kayış kasnak semboller	19
Tablo 2.2. Sonsuz dişli ölçüler	33
Tablo 2.3. Robotun fiziksel parametre değerleri	36
Tablo 2.4. Robot eklemlerinin mekanik sınırları.....	37
Tablo 2.5. Elektronik tasarım elemanları	39
Tablo 2.6. STM32F407 Kontrol kartı özellikleri	40
Tablo 2.7. SKU.DRI0041 pin tanımlamaları.....	47
Tablo 2.8. SKU.DRI0041 çalışma sistemi	48
Tablo 2.9. S-160-12 teknik özellikleri.....	48
Tablo 2.10. DVPPS02 pin tanımlamaları	50
Tablo 2.11. DVPPS02 teknik özellikleri	50
Tablo 2.12. Faulhaber 3557 teknik özellikler.....	52
Tablo 2.13. Faulhaber 3557 38/1 redüktör teknik özellikler	53
Tablo 2.14. Faulhaber 3557 HEDS 5500 enkoder teknik özellikler	54
Tablo 2.15. HITEC HS-311 teknik özellikler	56
Tablo 2.16. Robo-Soul LD-2015 motor teknik özellikler	58
Tablo 2.17. 37D#4753 pololu DC motor teknik özellikler	59
Tablo 2.18. 37D#4753 pololu DC motor kablo pinleri	60
Tablo 3.1. Robotun DH tablosu.....	68
Tablo 3.2. Ters kinematik çözüm kümeleri.....	72
Tablo 4.1. PID katsayıları.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α_{i-1}	:	i. bağıın açısı
a_{i-1}	:	i. bağıın uzunluğı
C	:	Coriolis-merkezkaç matrisi
d_i	:	i. bağıın eklem kaçıklığı
D	:	Küttele matrisi
$e(t)$:	Hata sinyali
I_i	:	i. bağıın kütlesele atalet momenti (kg.m ²)
G	:	Yerçekimi vektörü
J	:	Jakobiyen matrisi
K	:	Kinematik enerji
K_D	:	PID türev katsayısı
K_I	:	PID integral katsayısı
K_P	:	PID oransal katsayısı
L	:	Lagrangian
m_i	:	i. bağıın kütlesele (kg)
v	:	Doğrusal hız (m/s)
P	:	Potansiyel enerji
R	:	Rotasyon matrisi
T	:	Transformasyon matrisi
$u(t)$:	Kontrol sinyali
θ_i	:	i. bağıın eklem açısı
$\dot{\theta}_i$:	i. bağıın eklem hızı
$\ddot{\theta}_i$:	i. bağıın eklem ivmesi
τ_i	:	i. eklemle torku
q	:	Eklem uzay konum vektörü
\dot{q}	:	Eklem uzay hız vektörü
\ddot{q}	:	Eklem uzay ivme vektörü
x	:	Kartezyen uzay konum vektörü
\dot{x}	:	Kartezyen uzay hız vektörü
\ddot{x}	:	Kartezyen Uzay İvme Vektörü
ω	:	Açısal Hız (rad/s)

Kısaltmalar

CPR	:	Counts Per Revolution (devir başı darbe sayısı)
ÇK	:	Çözüm Kümesi
D-H	:	Denavit-Hartenberg Yöntemi
FPS	:	Frame Pers Second (saniye başına görüntü sayısı)
HRI	:	Human Robot Interface (İnsan Robot Arayüzü)
I/O	:	Input/Output (Giriş/Çıkış)
PID	:	Oransal-İntegral-Türev

PCB : Printed Circuit Board (Baskı Devre Kartı)
Üniv. : Üniversite



ALTI SERBESTLİK DERECELİ BİR SERİ ROBOTUN TASARIMI, ÜRETİMİ VE UZAKTAN İNSAN ELİ HAREKETLERİ İLE KONTROLÜ

ÖZET

Bu tezin amacı, öğrencilerin robot laboratuvarlarında gerçek zamanlı yörünge kontrolü ve insan-robot arayüzü uygulamaları yapabilecekleri, kolay erişilebilir bir robot platformu oluşturmaktır. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki bir diğer hedef ise, insan için tehlikeli olabilecek ortam ve koşullarda (radyoaktif ortamlar, kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği alanlar vs.) çalışabilecek ve insan eli hareketleriyle uzaktan kontrol edilebilecek insan-robot arayüzüne sahip bir robotun geliştirilmesidir. Bu doğrultuda ZORO olarak isimlendirilen altı serbestlik dereceli bir seri manipülatörün mekatronik tasarımı, üretimi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmalarında ilk olarak robotun mekanik ve elektrik-elektronik tasarımları yapılmış ve bu tasarım doğrultusunda prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Robotun kinematik ve dinamik modelleri geliştirilerek MATLAB programında simulasyonu yapılmıştır. Beşinci dereceden polinom kullanılarak yörünge fonksiyonu oluşturulmuş ve bu yörünge için PID tabanlı kontrolör geliştirilerek simulasyon ortamında sistemin çalışması incelenmiştir.

Robotun insan eliyle uzaktan kontrolünün sağlanması için Leap Motion kullanılarak bir insan-robot arayüzü(HRI) geliştirilmiştir. Bu arayüz oluşturulurken sensör için oluşturulmuş MATLAB kütüphanesi kullanılarak elden alınan verilerin bu platforma aktarılması sağlanmıştır. Daha sonra bu veriler robotun çalışma uzayıyla eşleştirilmiş ve çevrimiçi olarak çizdirilmesi sağlanmıştır.

Geliştirilen ileri kinematik ve ters kinematik algoritmaları gerçek zamanlı olarak prototip üzerinde çalıştırılmıştır. Bu çalışmalardan sonra geliştirilen HRI kullanılarak ZORO'nun insan elinin yaptığı hareketleri takip etmesi sağlanmıştır. Gerçek zamanlı çalışmalarda oluşturulan yörünge fonksiyonu kullanılarak robotun hareketleri yumuşatılmıştır. Bu çalışmalar sonucu elde edilen veriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gerçek Zamanlı Kontrol, İnsan-Robot Arayüzü, Kinematik Analiz, Robot Dinamik Analizi, Seri Robot Tasarımı.

DESIGN, MANUFACTURING AND REMOTE CONTROL OF A 6-DOF SERIAL ROBOT WITH HUMAN-HAND MOTIONS

ABSTRACT

The aim of this thesis is to create an easily accessible robot platform where students can perform real-time trajectory control and human-robot interface applications in robotics laboratories. Another goal of this study is to develop a robot that can work in environments and conditions that may be dangerous for humans, can be remotely controlled. Therefore, mechatronic design, production and control of a 6-DOF serial manipulator called ZORO has been carried out.

Firstly, mechatronic design of the robot was made. A prototype was produced. Kinematic and dynamic models of the robot were developed and simulated. A trajectory function was created and simulation of robot was examined by developing a PID-based controller while tracking given trajectory.

A human-robot interface has been developed to enable remote control of the robot by human-hand motions. While creating this interface, the MATLAB library created for the sensor was used to transfer the data received from hand motions to this platform. Then, these data were matched with the robot's workspace and plotted online.

The developed forward and inverse kinematics algorithms run on the prototype in real time. Then, real-time hand motion tracking applications were tested by using the developed HRI. The motion of ZORO was smoothed by using the trajectory function created in real-time studies. The data obtained from real-time studies were presented.

Keywords: Real-Time Control, Human-Robot Interface, Kinematic Analysis, Robot Dynamics, Serial Robot Design.

GİRİŞ

21. yüzyılda bir çok alanda tüketimin artması ile birlikte üretim kapasitesinin yükseltilmesine ihtiyaç duyulmuş olup bu doğrultuda yorulmadan devamlı olarak yüksek verimlilikle çalışabilecek otonom sistemlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu otonom sistemlerin içerisinde çeşitli görevleri yerine getirebilme özelliğine sahip olduğu için robotlar önemli bir yer tutmaktadır. Amerikan Robot Enstitüsünün (RIA) yaptığı tanıma göre robot, taşıma, boyama, kaynak gibi çeşitli görevleri yerine getirebilen tekrar programlanabilme özelliğine sahip elektromekanik sistem olarak ifade edilir.

Bu tez kapsamında, öğrencilerin robot laboratuvarlarında gerçek zamanlı yörünge kontrolü ve insan-robot arayüzü uygulamalarında kullanabilecekleri, düşük maliyetli, açık mimarı yapısına ve 500 gr faydalı yük kapasitesine sahip altı serbestlik dereceli seri bir manipulatorün tasarımı, prototip üretimi ve insan-robot arayüzüyle kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki bir diğer hedef ise insan yaşamını tehdit edebilecek koşullarda, insan el hareketleri kullanılarak uzaktan kontrol edilebilecek bir insan-robot arayüzüne sahip robotun geliştirilmesidir.

Bu amaç doğrultusunda ilk olarak, robotun mekanik tasarımı Inventor programında gerçekleştirilmiştir. Robotun tüm gövde tasarımı ve malzemelerinin seçimi robot kinematik ve dinamik hesaplamalarına göre optimum olarak yapılmıştır.

Mekanik tasarımı oluşturulan bu robotun, verilen yörüngeyi takip etmesini sağlayacak uygun tork-hız değerlerine sahip eyleyiciler ve bu eyleyicilere uygun motor sürücülerini seçilmiştir. Aynı şekilde sistemin gerçek zamanlı kontrolünü sağlamak amacıyla sistem gereksinimlerini karşılayabilecek özelliklere sahip STM32 kontrol kartının kullanılması uygun görülmüştür. Daha sonra seçilen elektronik donanımların besleme gerilimlerine ve sistemin çekeceği en yüksek akım değerine uygun güç kaynakları belirlenmiştir.

Robotun elektrik ve elektronik şeması E-Plan programı kullanılarak oluşturulmuş ve kullanılan elektronik bileşenler ile birlikte elektronik tasarım bölümünde sunulmuştur. Tez kapsamında kullanılan STM32 kartı I/O port çıkışı olan 3V seviyesini, motor sürücülerinin IN1-IN2 pinlerinin düzgün şekilde çalışmasını sağlamak için gerekli 5 V seviyesine çıkarmak ve 5V seviyesiyle çalışan elektronik sistemlerin beslemelerini tek bir yerden sağlayabilmek amacıyla Proteus programında bir PCB tasarımı gerçekleştirilmiş ve ilgili tasarım şemaları da yine aynı bölümde sunulmuştur.

Tasarımı gerçekleştirilen parçaların üretilebilmesi için teknik resimleri AutoCAD programı kullanılarak imalata uygun şekilde hazırlanmıştır. Daha sonra tüm mekanik parçalar ürettirilmiş, gerekli yan elemanlar ile elektrik-elektronik bileşenler tedarik edilmiştir. Bu bileşenler kullanılarak robotun prototipi üretilmiştir.

Robotun, eklem uzay ile kartezyen uzay parametreleri arasında geçişi gerçekleştirmek amacıyla kinematik analizi yapılmıştır. Bu doğrultuda ileri kinematik modeli için Denavit-Hartenberg yöntemi, ters kinematik modeli için analitik yöntem kullanılmıştır. Aynı zamanda eklem uzay hızları ile kartezyen uzay hızları arasında geçişi sağlamak amacıyla robotun hız kinematik modeli Jakobiyen matrisi bulunarak elde edilmiştir.

Geliştirilen robotun, dinamik analizi yapılmıştır. Bu noktada analitik ve nümerik olmak üzere iki farklı dinamik model elde edilmiştir. Analitik dinamik model Lagrange-Euler yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Nümerik dinamik model ise, Inventor ortamında oluşturulan üç boyutlu montaj modelinin MATLAB-Simulink ortamına aktarılmasıyla elde edilmiştir. Elde edilen dinamik model kullanılarak ileri ve ters dinamik analizleri yapılmıştır. İleri dinamik analiz, robotun simülasyonunun sağlanması ve kontrolör tasarımının gerçekleştirilmesi için yapılmıştır. Ters dinamik analiz ise, robotun en zor yörüngeyi takip edebilmesi için gerekli olan en yüksek tork değerlerinin belirlenmesi ve buna uygun eyleyicilerin seçilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Robotun hareketini, insan eli hareketleriyle uzaktan kontrol etmek amacı ile bir insan-robot arayüzü tasarlanmıştır. Bu arayüz kullanılarak, seri manipülatörün insan elinin yaptığı hareketleri takip etmesi sağlanmıştır. Arayüzde Leap Motion sensörü kullanılmış, bu cihazın 250 ms aralıklarla insan eli verilerini alması sağlanmıştır. Gerçek zamanlı uygulama esnasında insan elinden alınan ilk verinin robotun başlangıç

konumuyla eşleştirilmesi için eşleştirme rotasyon matrisi ve konum vektörü hesaplanmaktadır ve sonraki döngülerde alınan veriler ilk döngüde hesaplanan bu rotasyon matrisi ve öteleme vektörü yardımıyla robot çalışma uzayına aktarılmıştır. Bu veriler robot için kartezyen uzay referans verilerini ifade etmektedir ve robotun insan eli hareketlerini takip edebilmesi için eklem uzayı referanslarının elde edilmesi gerekmektedir. Eklem uzay referanslarını elde etmek için ters kinematik fonksiyonu kullanılmıştır. Robotun bulunduğu konumdan, robot insan arayüzünün hesapladığı yeni konuma geçmesini yumuşak bir şekilde sağlamak amacıyla bir yörünge fonksiyonu kullanılmıştır. Bu yörünge fonksiyonu, beşinci dereceden bir polinom kullanılarak oluşturulmaktadır ve bu yörünge fonksiyonuna göre hesaplanan eklem uzayı referans verilerinin 50 ms aralıklarla kontrol kartına gönderilmesi sağlanmıştır. Hesaplanan eklem uzayı değişkenlerinin referans değerleri seri haberleşme kullanılarak STM32 kontrol kartına gönderilmektedir. Kontrol kartı içerisinde motor enkoderlerinden gelen geri besleme verileri ile gelen referans verileri oluşturulan PID fonksiyonuna gönderilir. Her motor için uygun PID parametreleri belirlenmiş, bu sayede motorların referans verilerine en kısa sürede ve en düşük aşım oluşacak şekilde gitmesi sağlanmıştır.

Motor enkoder verileri STM32 kartından periyodik olarak MATLAB ortamına seri haberleşme kullanılarak aktarılmaktadır. Bu şekilde robotun yörünge izleme kabiliyeti, bilgisayar platformundaki MATLAB ortamında gelen bu veriler kullanılarak oluşturulan grafiklerin analiz edilmesiyle gözlenebilmektedir.

Deneyisel çalışmalarda ilk olarak MATLAB ortamından doğrudan eklem uzayı referans verileri verilerek robot hareketleri gözlenmiştir. Daha yumuşak bir hareket sağlanması için simulasyon ortamında çalışması yapılan yörünge fonksiyonu gerçek zamanlı uygulamaya uyarlanmış ve bu yörünge kullanılarak da çeşitli deneyler yapılarak sonuçlar paylaşılmıştır. Daha sonra, kartezyen uzay referansları sisteme verilererek yapılan çalışmalara ters kinematik model de eklenmiş ve yörünge fonksiyonu kullanılmış, robot verilen bu yörüngeyi düzgün bir şekilde takip etmiştir. Deneyisel çalışmaların son aşamasında ise kartezyen uzay referansları robot insan arayüzünden gelen el verileri kullanılarak hesaplanmış ve ters kinematik model ile yörünge planlayıcısı kullanılarak robotun insan elinin yaptığı hareketleri takip etmesi sağlanmıştır.

Bölüm 1’de robotların kullanım amaçları, robotların tarihsel gelişimi ve robot sınıflandırmalarına dair bilgiler verilmiş olup, literatürde kinematik ve dinamik analizlerinin hangi yöntemlerle yapıldığından, robot kontrol metotlarından ve bu tez kapsamında hangi yöntemlerin kullanıldığından bahsedilmiştir.

Bölüm 2’de bu tez kapsamında üzerinde çalışılan seri robotun mekanik, elektrik-elektronik tasarımlarına değinilmiş ve sistemin üzerinde yer alan tüm bileşenlerin tanıtımı yapılmıştır.

Bölüm 3’te sistemin ileri ve ters kinematik modeli ile hız kinematiği ayrıntılı olarak denklemlerle sistematik bir şekilde açıklanmış ve kullanılan yöntemlerle ilgili bilgiler paylaşılmıştır.

Bölüm 4’te sistemin dinamik modelinin nasıl bulunduğu ele alınmış ve robotun hareket denklemlerine değinilmiştir. Bu çözümler esnasında kullanılan metotlardan bahsedilmiştir.

Bölüm 5’te robotun insan eli hareketleri ile uzaktan kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmış olan insan-robot arayüzü hakkında bilgiler verilmiş, kullanım alanlarından bahsedilmiş ve tez kapsamına yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

Bölüm 6’te tasarımı ve kinematik-dinamik analizi tamamlanan robotun sırasıyla, ileri kinematik, ters kinematik uygulamaları, tüm eklemlerin eş zamanlı olarak hareketinin sağlanması, ileri kinematik ve ters kinematik kullanılarak yörünge takibi deneyleri, tut-bırak uygulaması ve son olarak Leap Motion sensörü kullanılarak tasarlanan insan-robot arayüzü ile insan elinden alınan konum ve yönelim bilgilerini takip eden gerçek zamanlı uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 7’de yapılan çalışmalarla ilgili genel bilgiler verilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

1. GENEL BİLGİLER

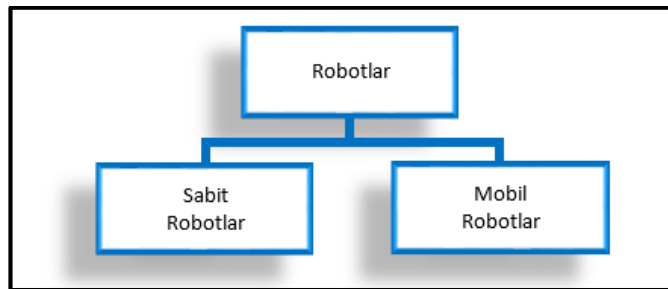
Günümüzde, insaneli değmeden üretimin gerçekleştirilebildiği, hatta lojistik, tasarım vb. alanlarında da giderek insanların rolünün azaldığı bir dünyaya geçiş yapılmakta ve endüstri 4.0 giderek yaygınlaşmaktadır [1]. İnsan faktörünün düşük verimliliği ve maliyetinin fazla olması ve bu işlerde robotların, akıllı yazılımların bir çok işi basit hale getirmesi, robotik alanında yapılacak çalışmaların ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu gelişen teknolojiye ayak uyduramayan ve üretim aşamalarında robotlardan faydalanmayan veya bunu yaygınlaştırmayan şirketlerin bir çoğunun varlıklarını sürdürmeyeceği çok açıktır.

Robot kelimesi ilk olarak Çekoslavakya’da Karel Capek adında bir yazar tarafından 1921 yılında kullanılmıştır [2]. Kelime anlamı ise “köle”dir. Literatür incelendiğinde karşılaşılan ilk robot 1954 yılında George Devol’un geliştirdiği “Unimate” adlı robottur. Bu robotun endüstride kullanıma uygun hale getirilmesi 1961 yılında olmuş ve ilk olarak General Electrics’te kurulmuştur [3]

1.1. Robotların Sınıflandırılması

Robotlar uygulama alanlarına, kinematik yapılarına ve taşınabilirliklerine göre, gibi bir çok sınıflandırma çeşidine tabi tutulabilirler.

1.1.1. Taşınabilirliklerine göre robotlar



Şekil 1.1. Robotların sınıflandırılması

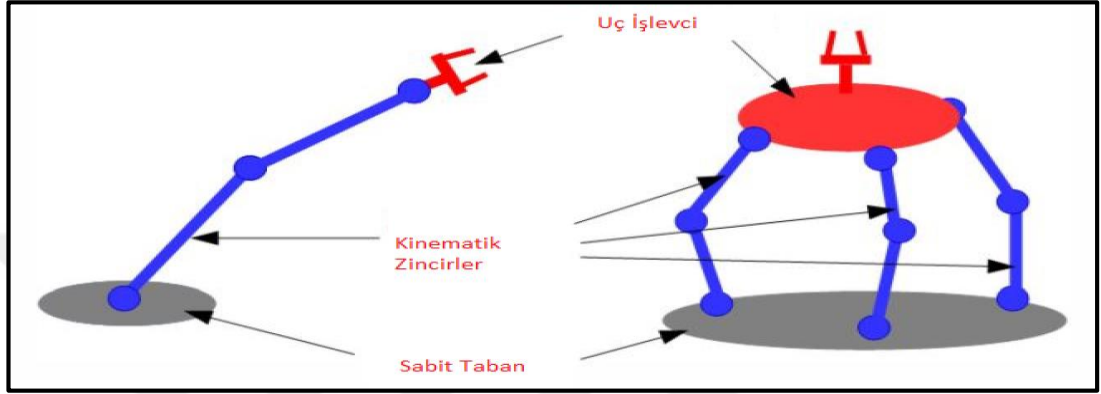
1.1.1.1. Sabit robotlar

Sabit robot tanımı mekaniksel yapının sınıflandırılması olarak düşünülebilir. Robotun bir ucu zemine sıkıca sabitlenirken uç işlevci olarak adlandırdığımız diğer ucu ise

programlanarak kontrol edilebilmektedir ve istenilen şekilde hareket etmekte serbesttir.

1.1.2. Kinematik yapılarına göre robotlar

Kinematik yapıya göre seri (açık çevrim), paralel (kapalı çevrim) ya da hibrit olarak sınıflandırılmaktadırlar [4].



Şekil 1.2. Seri ve paralel manipülatör [4]

Seri robotlar bir tabandan uç işlevciye uzanan motorla kontrol edilen eklemlerin birbirine seri olarak bağlı olduğu robotlardır, çoğunlukla “omuz”, “dirsek” ve “bilek” olarak tanımlanan insan koluna benzetilmek amacıyla tasarlanmış yapılara sahiptir. Endüstride en yaygın olarak kullanılan robotlardır. Seri robotlar genellikle manipüle edilmiş bir nesneyi robotun çalışma alanında istenen herhangi bir konuma getirebilmek amacıyla altı serbestlik dereceli olarak tasarlanırlar. Paralel robotlar ise taban ile uç işlevci arasında birden fazla paralel kola sahiptir. Hibrit robot yapılarında ise seri ve paralel robot yapıları beraber bulunmaktadır. Bu tez kapsamında seri robot yapısına sahip bir robot üzerinde durulmuştur. Geçmişte seri robotlarla ilgili pek çok çalışma mevcuttur [5, 6].

1.2. Robotların Modellenmesinde Kullanılan Metotlar

1.2.1. İleri kinematik modeli

İleri kinematik modelinin elde edilmesi yaygınca kullanılan Denavit-Hartenberg ve Uzaysal Operatör Cebiri (SOA) metotları kullanılmaktadır. Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılırken eklem konumları temel alınarak uç işlevcinin konum ve yönelim bilgilerini eklem değişkenleri cinsinden parametrik olarak ifade edebilmektir [7, 8]. SOA yönteminde ise eklem hızlarından yola çıkılarak ve yinelemeli şekilde nümerik

bir hesaplama algoritması yürütülür [9]. İşlem kapasitesi bakımından DH yöntemine üstünlük sağlasa da gelişen teknoloji ve artan işlemci kapasitesiyle birlikte DH yöntemi de genişçe kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında da DH yöntemi kullanılmıştır.

1.2.2. Ters kinematik modeli

Ters kinematik problemini çözmek için birbirinden farklı yöntemler bulunmaktadır. Her robotun ters kinematiğini çözme noktasında analitik yöntemler her zaman sonuç vermemektedir. Bu noktada çeşitli nümerik tabanlı yöntemler kullanılmaktadır [10]. Ancak tez kapsamında geliştirilen robotun analitik çözümü olması tasarım aşamasında önemli kriter olmuştur. Son üç eksen aynı noktada yer aldığı ve robotun her eklemi dönel eklem olduğu için analitik yöntem kullanılarak ters kinematik analizinin yapılması sağlanmıştır [11].

1.2.3. Dinamik modeli

Robotların dinamik modellemesi yapılırken farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlar enerji tabanlı yöntemler ve kuvvet tabanlı yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Lagrange-Euler ve Hamiltonion yöntemleri enerji tabanlı yöntemlere örnek olarak verilebilir. [12]'de Lagrange-Euler yöntemi ve Hamiltonion yöntemi kullanılarak robot dinamiği elde edilmiştir. [13]'de kullanılan Newton-Euler ise kuvvet tabanlı bir dinamik modelleme yöntemidir.

1.3. Robotların Kontrolünde Kullanılan Yöntemler

Seri robotların kontrolleri noktasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. [14]'de PID tabanlı kontrol metotları kullanılarak kontrol edilen sistemler bulunabilir. Aynı zamanda doğrusal olmayan bir çok kontrol yöntemi de robotların kontrolünde kullanılmaktadır. [15, 16] Aynı şekilde [17]'de ve [18]'de ise evrimsel algoritmalar kullanılarak (PSO) robotun kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Robotların uzaktan kontrolleri noktasında da bir çok farklı insan-makine arayüzü uygulaması yapılmış olup, bunlardan en yaygınları görüntü işleme tabanlı ve giyilebilir sistemlerdir. Tez kapsamında ise görüntü işleme tabanlı bir insan makine arayüzü tasarlanmıştır ve robot için gerekli referans verilerini oluşturacak el hareketlerinin konum ve yönelim bilgileri Leap Motion sensörü yardımı ile algılanacaktır.

2. SİSTEMİN MEKATRONİK TASARIMI

Bu bölümde, geliştirilmiş olan ZORO robotunun mekanik ve elektronik tasarım aşamaları gösterilmektedir.

Robotlar için serbestlik derecesi, birbirinden bağımsız hareket edebilen eklem sayısını ifade etmektedir. Bu tez kapsamında, üzerinde çalışılmış olan robot birbirinden bağımsız altı ekleme sahip olduğu için altı serbestlik dereceli olarak tanımlanmaktadır. Bu robotun her bir alt mekanik bileşeni ve bu bileşenlerin montajı, sistemi anlatan teknik resimler Bölüm 2.1’de sunulmuştur.

Aynı şekilde geliştirilmiş olan robotun hareketini sağlayan motor ve sürücüleri, bu motorların istenilen hareketi yapması için gerekli olan kontrol sinyallerini oluşturan kontrolörleri ve diğer elektronik bileşenleri anlatan elektronik tasarıma ise Bölüm 2.2’de değinilmiştir.

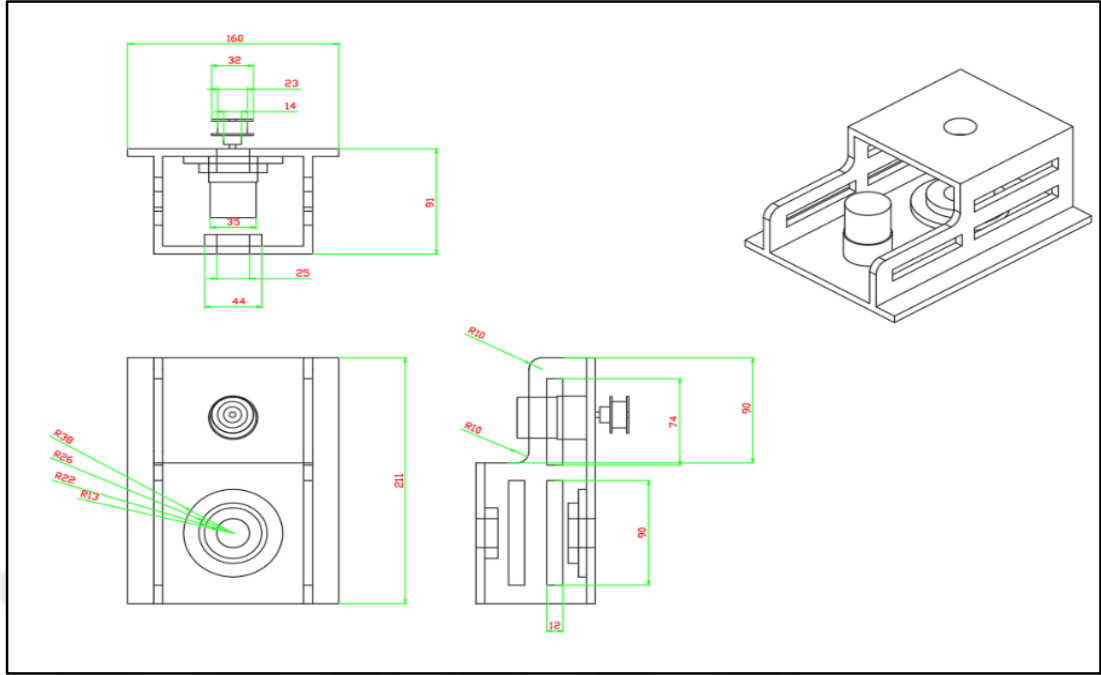
2.1. Mekanik Tasarım

Robotun her bir alt bileşeninin modelleri, üç boyutlu mekanik tasarım ortamı olan Inventor programında oluşturulup, sonrasında tüm eklemlerine dönel eklem ilişkisi tanımlanarak montaj işlemi gerçekleştirildi. Bu tasarım esnasında malzeme dayanımı ve hareket kabiliyeti göz önüne alınarak, robot gövdesini oluşturan tüm malzemelerin ve ayrıca hareket için gerekli torku sağlayan eyleyicilerin seçimi mühendislik hesaplamalarına uygun olarak yapıldı.

Oluşturulan bu alt bileşenlerin ve montajın teknik resimleri ve izometrik görüşleri paylaşılmıştır.

2.1.1. Birinci bağ tasarımı

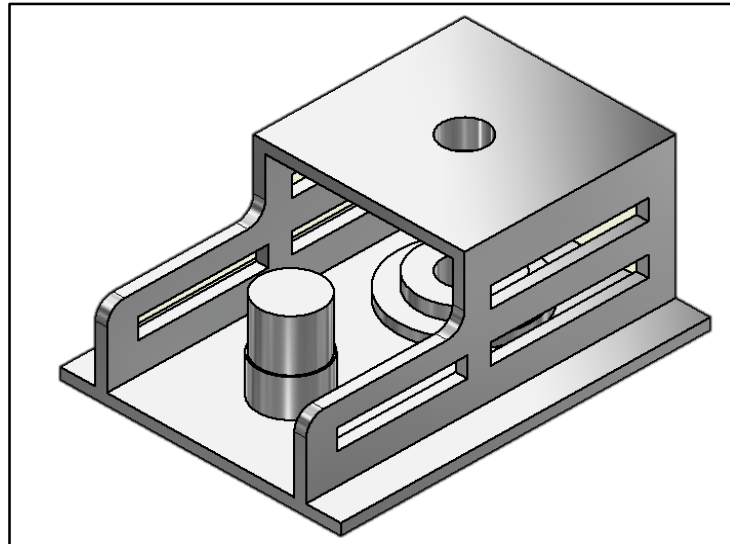
Robotun referans eksenini üzerinde barındıran hareketsiz alt parçasıdır. Üzerinde ilk eklemi tahrikeden motor bulunmaktadır. Robot alt tablasının tasarımında malzeme olarak alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Dünyadaki en hafif metallerden biri olan alüminyumun, aynı zamanda güçlü ve esnek olması robot gövdesinde kullanıma uygunluğunu destekler. Bu parçaya ait teknik resim Şekil 2.1’de ve üç boyutlu ortamdaki görüntüsü Şekil 2.2’de paylaşılmıştır.



Şekil 2.1. Birinci bağ teknik resim

2.1.1.1. Birinci bağ üç boyutlu tasarımı

Inventor ortamında üç boyutlu olarak tasarlanan ilk eklem ve bağa ait izometrik görüntü Şekil 2.2 de paylaşılmıştır.

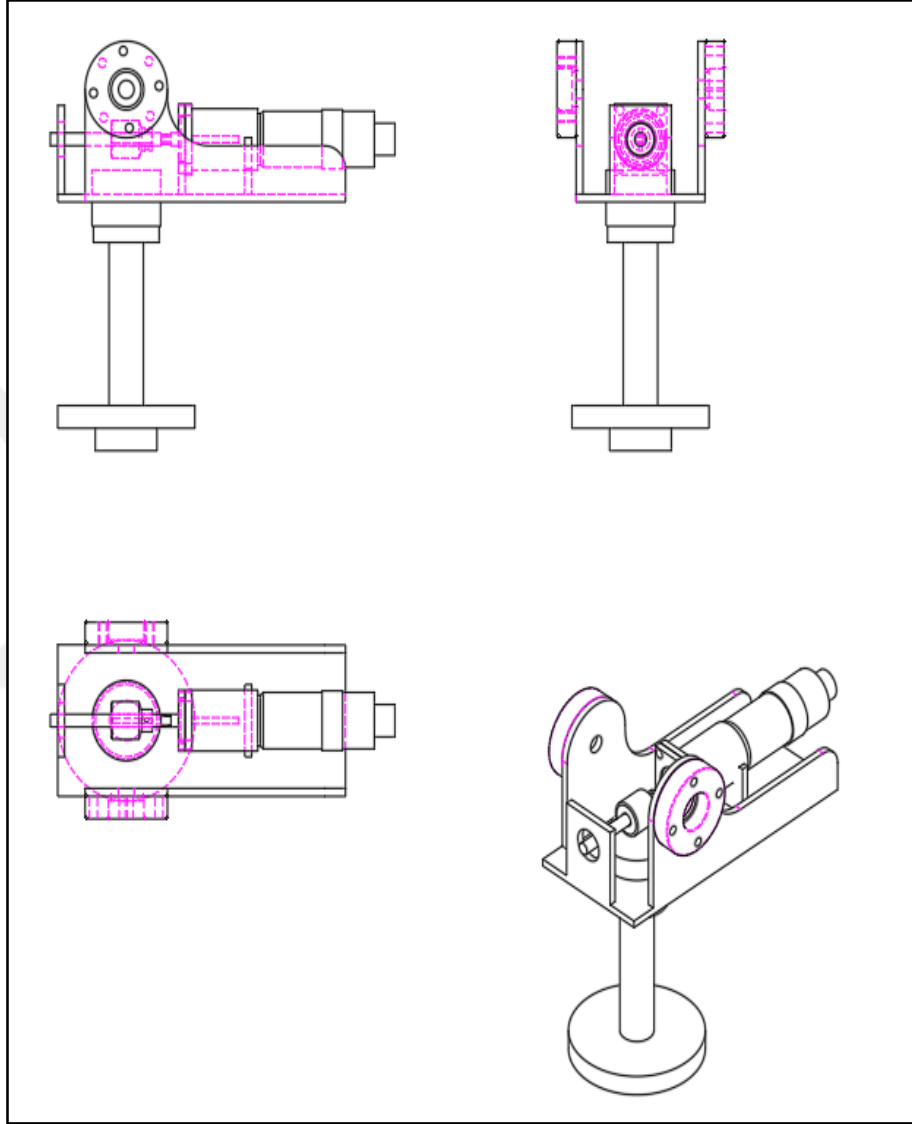


Şekil 2.2. Birinci bağ üç boyutlu tasarım

2.1.2. İkinci bağ tasarımı

Birinci bağ olarak adlandırılan hareketsiz parçaya, koordinat düzleminde yer alan dikey eksen etrafında tam tur yapabilecek şekilde dönel eklemle bağlanan parçadır. Bu

parça hareket ederken ona bağlı olan gövdedeki diğer tüm parçalarıda hareket ettirdiği için en güçlü motoru üzerinde barındırmaktadır. Bu parça alüminyum alaşımından yapılmıştır. Parçaya ait teknik resim Şekil 2.3'te ve üç boyutlu ortamdan alınan görüntüsü Şekil 2.12'de paylaşılmıştır.

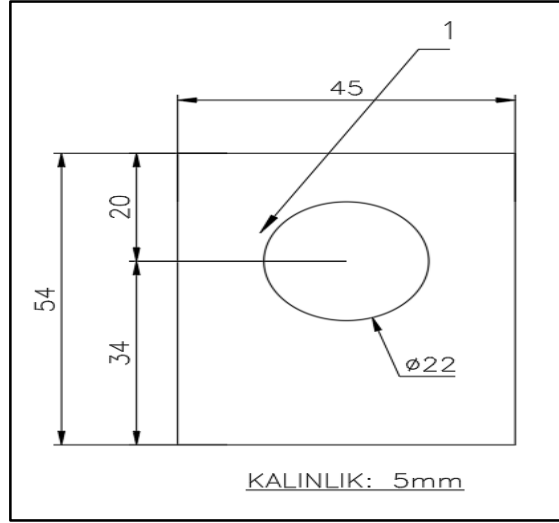


Şekil 2.3. İkinci bağ teknik resim

2.1.2.1. İkinci bağ tasarımında alt bileşenler

a) İkinci bağ birinci alt bileşeni

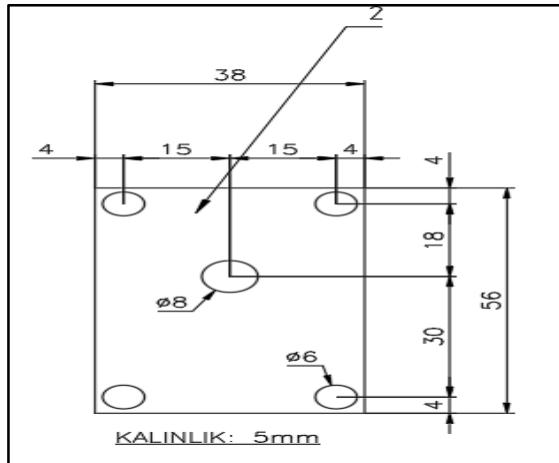
Sonsuz dişli setinin kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla solucan milinin F608Z rulman ile yataklanabilmesi için Şekil 2.4'de ki resme göre tasarlanan parça beşinci alt bileşen parçasına M2x10 ölçüsünde iki adet alyan başlı civata ile bağlanmıştır.



Şekil 2.4. İkinci bağ birinci alt bileşen teknik resim

b) İkinci bağ ikinci alt bileşeni

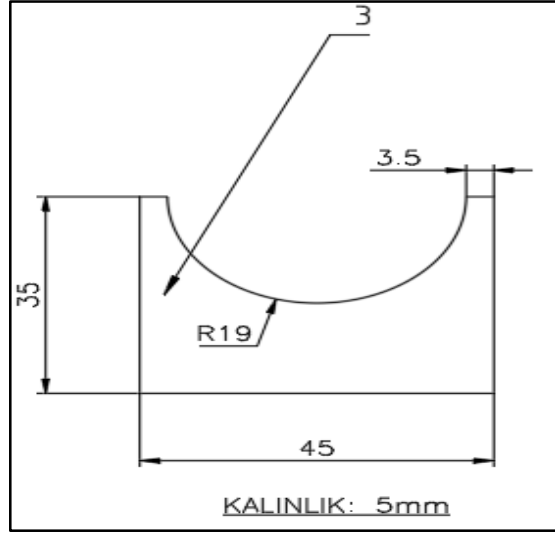
Faulhaber 3557020CS motorunun gövdesinde yer alan bağlantı parçasından ikinci bağa 4 adet M5x15 anahtar başlı civata ve somunlar ile sabitlenebilmesi için tasarlanmış olan ve beşinci alt bileşene kaynaklanarak bağlanan ikinci alt bileşen için teknik çizim Şekil 2.5’te paylaşılmıştır.



Şekil 2.5. İkinci bağ ikinci alt bileşen teknik resmi

c) İkinci bağ üçüncü alt bileşeni

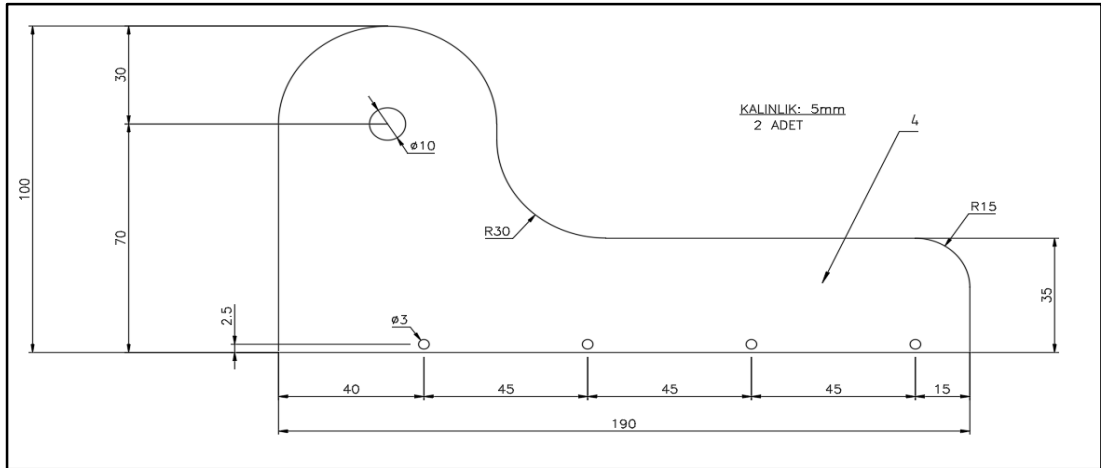
Faulhaber 3557020CS motorunun çalışma esnasında oluşabilecek tepkilere karşı yataklanması için beşinci alt bileşen parçasına kaynaklanarak sabitlenen üçüncü alt bileşen parçasının üretilebilmesi için hazırlanan resim Şekil 2.6’da yer almaktadır.



Şekil 2.6. İkinci bağ üçüncü alt bileşen teknik resim

d) İkinci bağ dördüncü alt bileşen

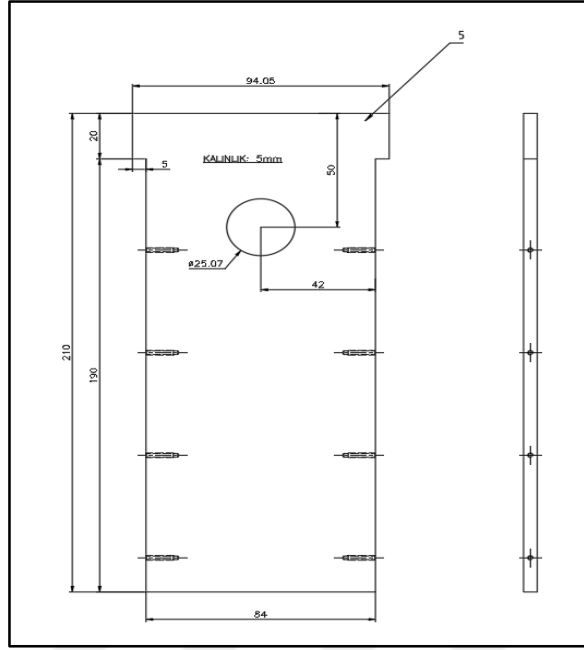
Beşinci alt bileşene sağ ve sol yandan montajlanmak üzere dördüncü alt bileşen isimli parçadan iki adet üretilmek amacıyla AutoCAD ortamında hazırlanan teknik resim Şekil 2.7’de yer almaktadır. Beşinci alt bileşen’e tek taraf için 4, toplamda 8 adet M4x20 alyan başlı civata ile iki yandan bağlanmaktadır.



Şekil 2.7. İkinci bağ dördüncü alt bileşen teknik resim

e) İkinci bağ beşinci alt bileşen

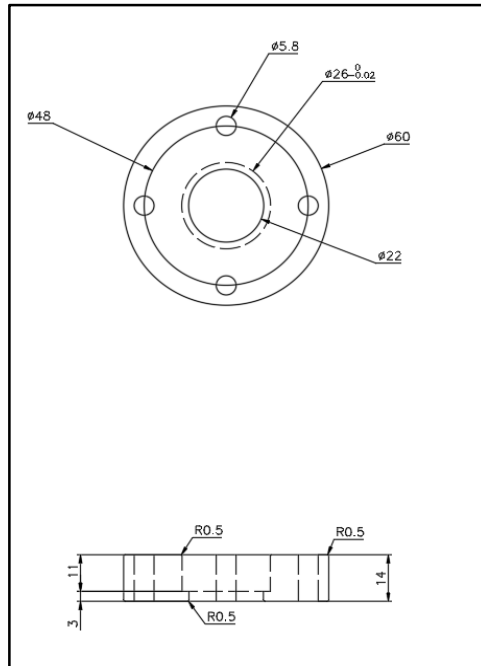
Alt tablaya kendisine sıkı geçme montajlanan mil ile bağlanan beşinci alt bileşen, ikinci alt bileşenin taban kısmını oluşturmakta olup 5mm alüminyum levhadan lazer kesim ile üretilmiştir. Üretim için gerekli olan teknik resim Şekil 2.8’de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.8. İkinci bağ beşinci alt bileşen teknik resim

f) İkinci bağ altıncı alt bileşeni

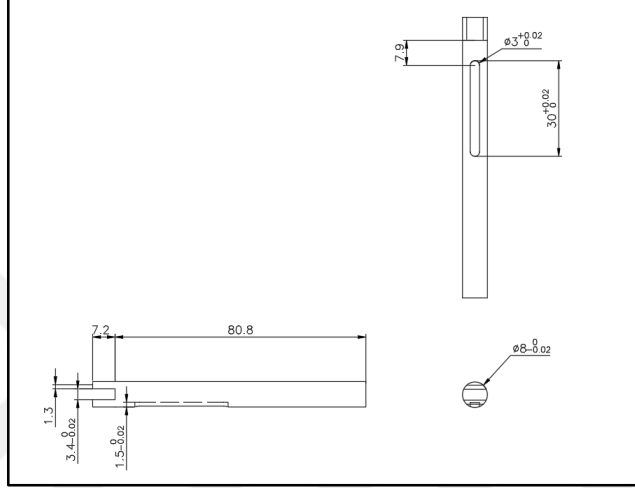
Dördüncü alt bileşene eş merkezli olarak bağlanan ve sonsuz dişli sisteminde dişliye ait milin yataklanmasında kullanılan 6000-C-2Z-C3 rulmanı sabitlemek amacıyla Şekil 2.9’da teknik resmi bulunan parça alüminyum malzemeden üretilmiştir.



Şekil 2.9. İkinci bağ altıncı alt bileşen teknik resim

g) İkinci bağ yedinci alt bileşeni

Solucan dişli setinin solucan bölümünün merkezinden geçen mil teknik resmi Şekil 2.10'da paylaşılmıştır. Üzerinde yeralan kama kanalı sayesinde solucanın mil etrafında dönmesi engellenmiş ve aynı zamanda setskur kullanılarak xy düzlemindeki pozisyonu belirlenmiştir. Bu bil motor miline yine setskur ve yataklama parçası ile sabitlenmiştir.



Şekil 2.10. İkinci bağ yedinci alt bileşen teknik resim

h) Güç aktarım elemanları

F608Z Rulman: Şekil 2.11'de fotoğrafı paylaşılan rulman, sonsuz dişli setinin solucan kısmını yataklamak amacıyla ikinci bağ birinci alt bileşene sıkı geçme olarak montajlanmaktadır.

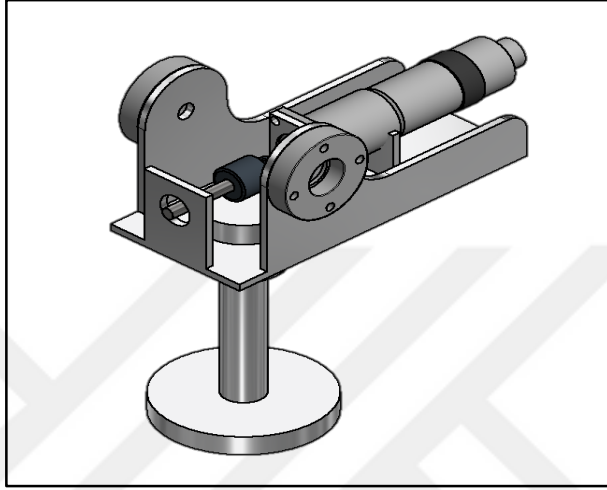


Şekil 2.11. F608Z rulman

6000-C-2Z-C3 Rulman: Solucan dişli setinin dişli kısmına bağlanan milin ikinci bağ üzerinde yataklanması amacıyla yataklama elemanlarına sıkı geçme olarak montajlanan rulmandır.

2.1.2.2. İkinci bağ üç boyutlu tasarımı

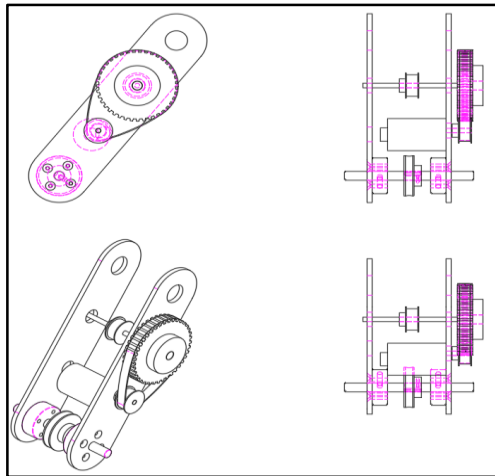
Inventor ortamında tasarlanan parçanın üzerinde yer alan Faulhaber 3557020CS ürün koduna sahip motorun üç boyutlu olarak parça üzerine montajı gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda sonsuz dişli setinin solucan kısmı ve ona ait mil de tasarımda montajlanarak gösterilmektedir.



Şekil 2.12. İkinci bağ üç boyutlu tasarımı

2.1.3. Üçüncü bağ tasarımı

İkinci bağ ile üçüncü bağ arasında kalan kısımdır. Her iki hareketli parçaya da dönül eklem ilişkisi ile bağlanmıştır. Üçüncü bağ gerekli dayanımı ve hafifliği sağlamak amacıyla alüminyum olarak tasarlanmıştır. Parçaya ait teknik resim Şekil 2.13'de paylaşılmıştır.



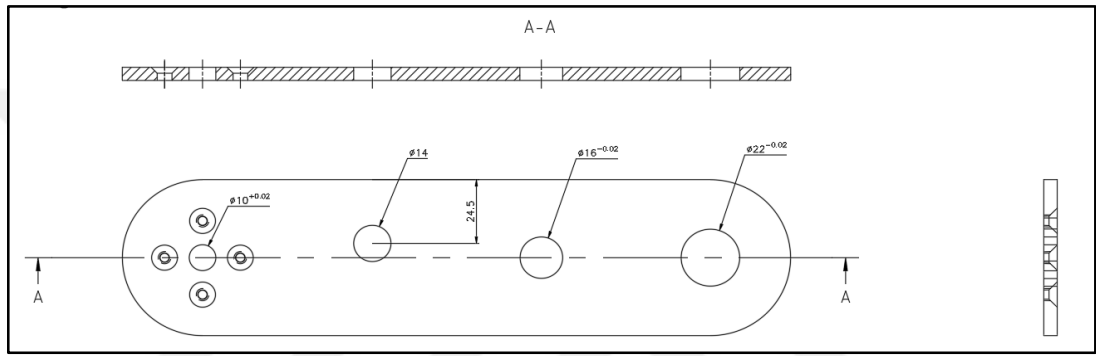
Şekil 2.13. Üçüncü bağ tasarımı teknik resmi

2.1.3.1. Üçüncü bağ tasarımında alt bileşenler

a) Üçüncü bağ birinci alt bileşeni

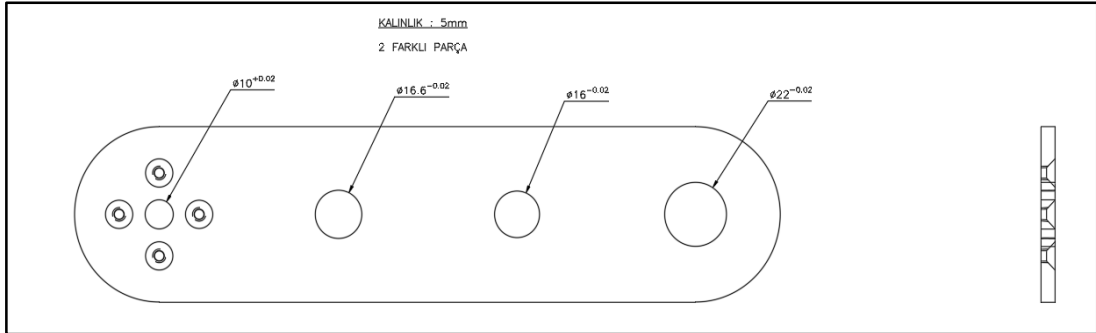
Sonsuz dişli setinin yataklandığı, üçüncü bağın dönme hareketini tetikleyen Pololu 50:1 DC motorun ve motor milinin bağlandığı, güç aktarım (kayış-kasnak) sistemlerinin yataklandığı iki ayrı parçadan oluşan ve alüminyum malzemeden lazer kesim üretim yöntemi ile üretilen bölümdür ve Şekil 2.14 ve Şekil 2.15 de üretim için gerekli olan teknik resimler paylaşılmıştır.

Birinci alt bileşen birinci parça



Şekil 2.14. Birinci alt bileşen birinci parça teknik resmi

Birinci alt bileşen ikinci parça

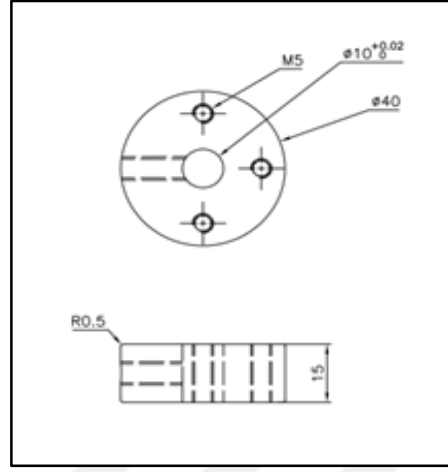


Şekil 2.15. Birinci alt bileşen birinci parça teknik resmi

b) Üçüncü bağ ikinci alt bileşeni

İkinci bağ üzerinde yeralan motordan oluşan torkun, sonsuz dişli güç aktarım sistemiyle aktarılması esnasında dişli milindeki dönme hareketinin birinci alt bileşene aktarılması için üretilen bu parçalar mildeki setskur boşluğuna setskur ile sabitlenmekte ve aynı zamanda birinci alt bileşenin her iki parçasına üçer adet M3x10 havşa başlı civata ile bağlanmaktadır.

Aluminyum malzemeden üretilen üçüncü bağ ikinci alt bileşen için teknik çizim Şekil 2.16'da paylaşılmıştır.

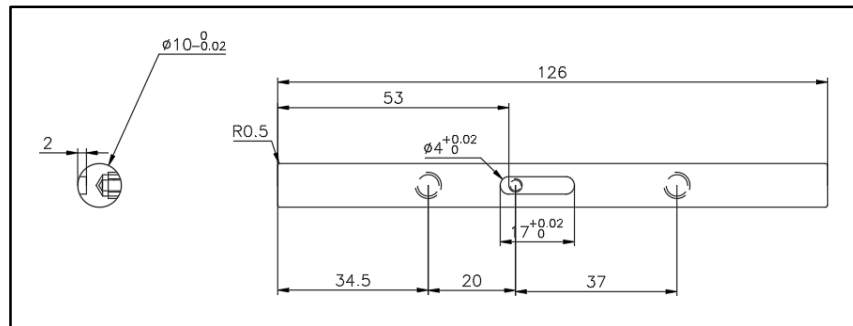


Şekil 2.16. Üçüncü bağ ikinci alt bileşen teknik resmi

c) Üçüncü bağ üçüncü alt bileşeni

Motorun doğrudan tahriklediği mil_1 üzerinden hareket sonsuz dişli mekanizmasına aktarılır. Kullanılan bu mekanizma sayesinde hareket, aralarında 90° lik açı bulunan iki düzlem arasında redüksiyon yapılarak aktarılır. Bu sayede daha küçük hacimde, daha yüksek tork elde edilebilmektedir. Bu nedenle üzerinde sabitleme parçalarını bağlamak için setskur boşaltmaları ve dişliye sıkı geçme bağlanabilmesi için kama kanalı ve aynı zamanda yine setskur boşaltması bulunmaktadır. Diğer yandan ikinci bağ üzerinde yataklanabilmesi için de ikinci bağın güç aktarım elemanları kısmında bahsedilen 6000-C-2Z-C3 Rulman kullanılmaktadır.

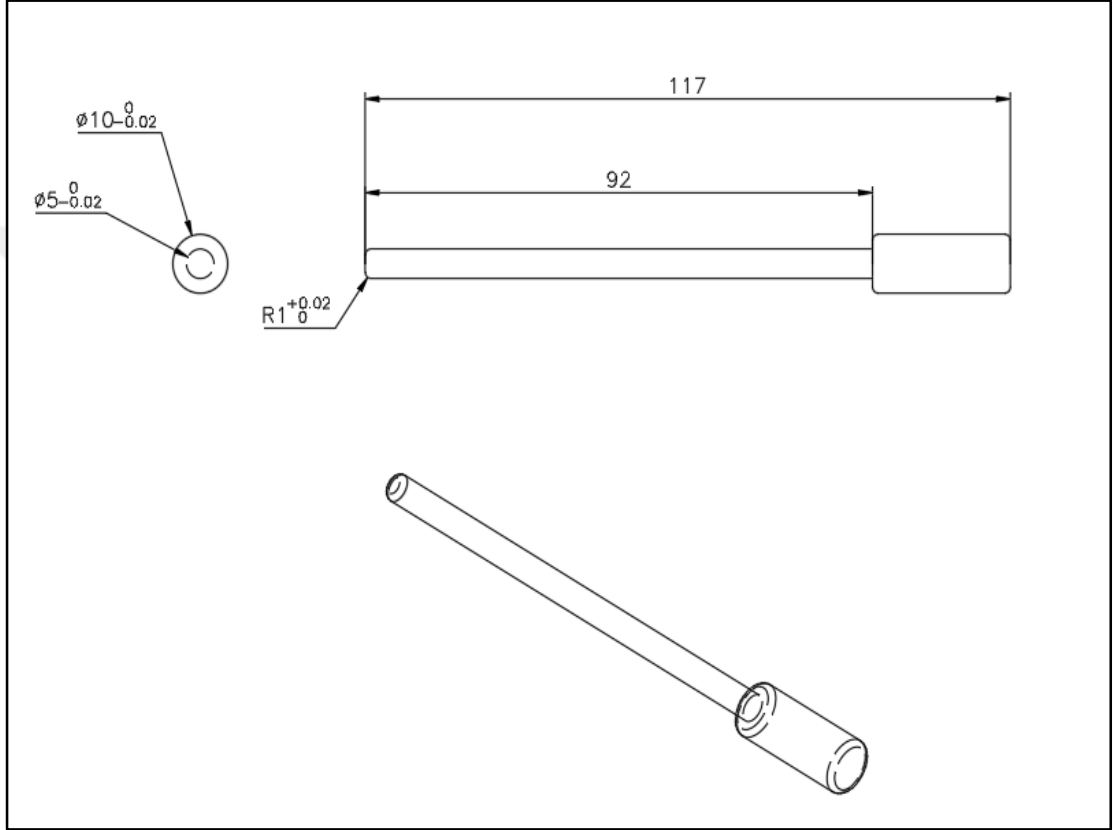
Çelik malzemeden üretilen mil için üretim aşamasında kullanılan teknik resim Şekil 2.17'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.17. Üçüncü bağ üçüncü alt bileşen teknik resmi

d) Üçüncü bağ dördüncü alt bileşeni

Üçüncü bağın üzerinde yer alan Pololu DC motorun doğrudan tahriklediği ve gerekli torku sağlayabilmek adına mühendislik hesaplamaları yapılarak seçilmiş olan Triger-kasnak sistemine ait dişlinin, merkezinden geçen ve gücü bir diğer Triger-kasnak mekanizmasına aktaran mil, Çelik malzemeden üretilmiş olup, üretimi için gerekli olan teknik resim Şekil 2.18' de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.18. Üçüncü bağ dördüncü alt bileşen teknik resmi

e) Güç aktarım elemanları

Triger / Zaman Kayış Kasnağı : Kayış kasnak sistemlerinin, maliyet avantajı, montaj kolaylığı, kayışların sistem üzerinde oluşan titreşimleri sönmüleyebilmesi, yüksek devirlerde çalışabilmesi, uzak miller arasında hareketin aktarımının sağlanabilmesi ve güç kayıplarının azaltılmış olması nedeniyle robotun tasarım aşamasında kullanılması öngörülmüştür. Sistemde, yüksek hızda çalışma gerekliliği nedeniyle Kayış-kasnak sistemlerinin bir çok çeşidinden biri olan Triger/zaman kasnakları kullanılmıştır. Bu sistemlerin kullanımı için gerekli olan matematiksel hesaplamalar aşağıda belirtilen formüller üzerinden yapılmıştır.

Tablo 2.1. Triger / zaman kayış kasnak semboller

Değişken Sembolü	Değişken Adı
p	Adım (Hatve)
M	Modül
z	Diş Sayısı
D_p	Taksimat Dairesi Çapı
D_e	Diş Üstü Çapı

Değişkenler tablo 2.1’de verilmiştir ve kullanılan formüller şu şekildedir:

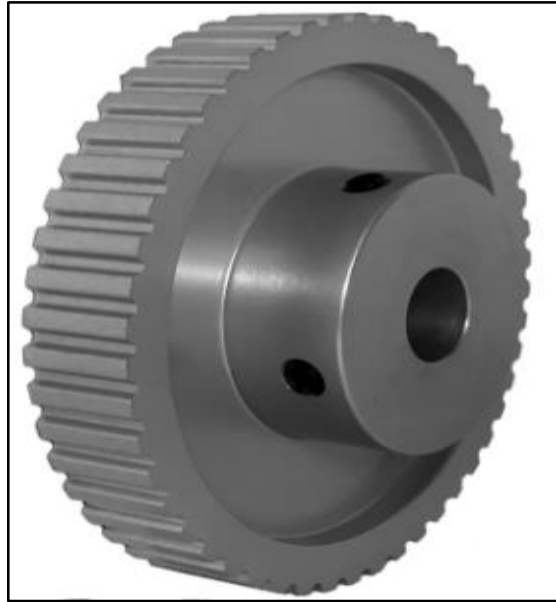
$$P = M \times \pi \quad (2.1)$$

$$D_p = M \times z \quad (2.2)$$

$$D_e = D_p + (2 \times M) \quad (2.3)$$

$$\text{Diş Kalınlığı} = p \div 2 \quad (2.4)$$

50 XL 037 Kasnak : Şekil 2.19’da verilen ve üzerinde 50 adet diş bulunduran, Withworth hatveli (XL), 15mm genişliğe sahip kasnak kullanılmaktadır.



Şekil 2.19. Triger kasnak_1

120XL Triger Kayış : 9.40mm genişliğe sahip üzerinde 60 adet diş bulunduran, hatvesi 5.08 olan çevresi 304,8mm ve kauçuk malzemeden yapılmış kayış kullanılmaktadır. Şekil 2.20’de triger kayışı fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.20. Triger kayış

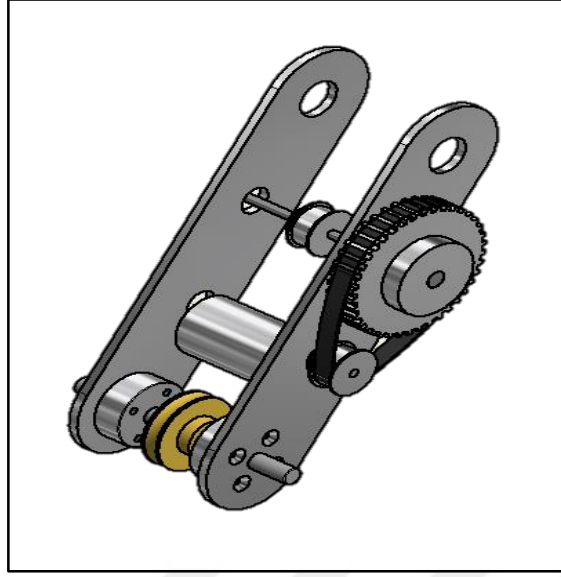
T15-XL-037F Kasnak : Üzerinde 15 adet diş bulunduran, Triger kasnak tipine sahip (XL), kayış genişliği 9,40 mm ve flanşlı modele sahip, dış çapı 24,26mm , hatvesi 5,08mm olan kasnaktan üçüncü bağın üzerinde iki adet kullanılmakta olup Şekil 2.21’de verilmiştir, biri üçüncü bağın dördüncü alt bileşenin üzerine ve diğeri fırçalı dc motor miline setskur ile bağlanmaktadır.



Şekil 2.21. Triger kasnak_2

2.1.3.2. Üçüncü bağ üç boyutlu tasarımı

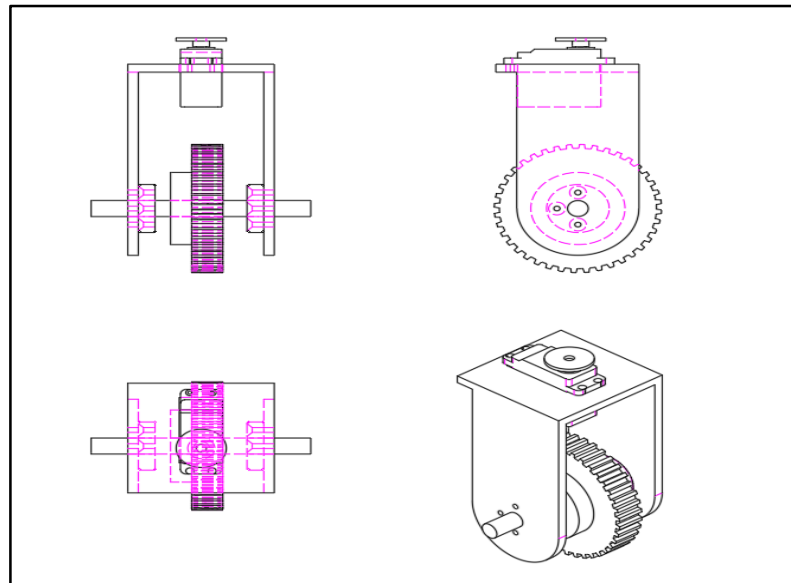
İkinci ve dördüncü bağın arasında yeralan ve üçüncü eklem hareketini sağlayan pololu marka fırçalı dc motoru ve onunla doğrudan tahriklenen güç aktarım sistemlerini üzerinde barındıran üçüncü bağın Inventor ortamında tasarımı gerçekleştirilmiş ve montajı Şekil 2.22’de paylaşılmıştır.



Şekil 2.22. Üçüncü bağ üç boyutlu tasarımı

2.1.4. Dördüncü bağ tasarımı

Üçüncü ile beşinci bağın arasında kalan parça dördüncü bağ olarak isimlendirilmiştir. Malzeme olarak hafif ve sağlam olması gerektiği için alüminyum malzemedен tasarlanmıştır. Bu kütle üzerinde bir adet Hitec HS-311 servo motor bulunmaktadır. Bu servo motor dördüncü ekleme dönme hareketini sağlamakta olup ve dolayısıyla euler bileği olarak adlandırılan üç serbestlik dereceli sistemin ilk serbestlik derecesini barındıran ekleme sahip robot bölümünü oluşturmaktadır. Parçaya ait teknik resim Şekil 2.23'te paylaşılmıştır.

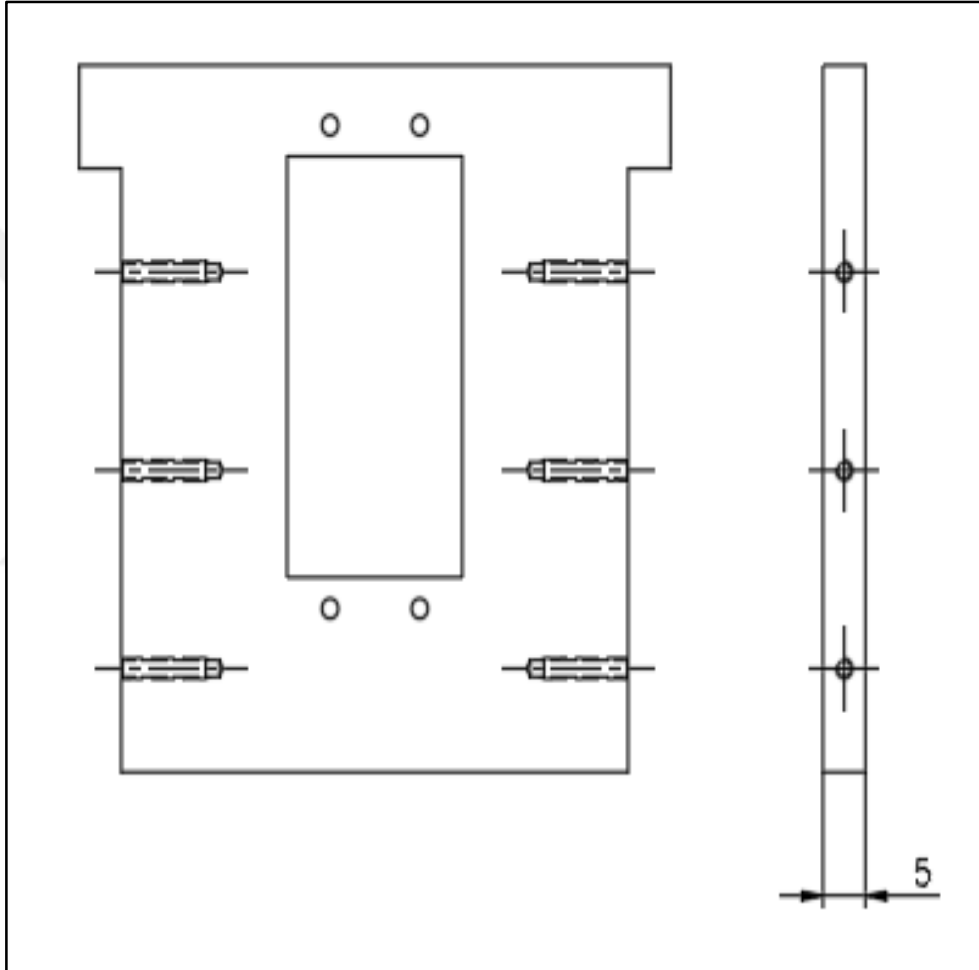


Şekil 2.23. Dördüncü bağ teknik resmi

2.1.4.1. Dördüncü bağ alt bileşen tasarımları

a) Dördüncü bağ birinci alt bileşeni

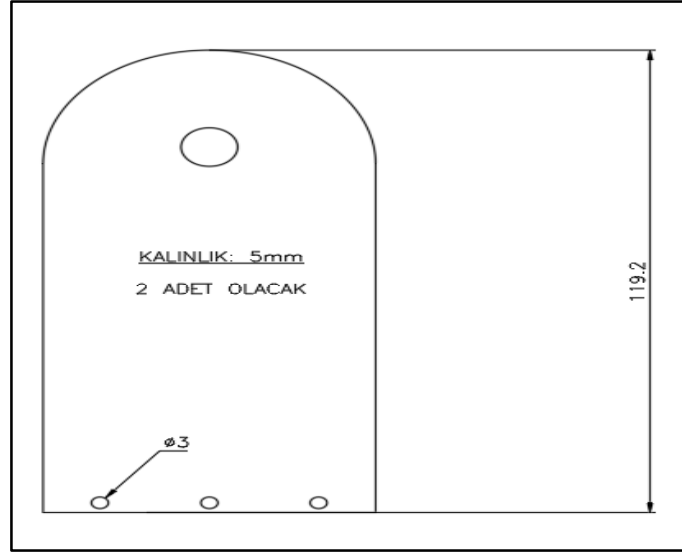
HS-311 servo motorun dört adet M2x10 civata ile bağlandığı, ikinci alt bileşen parçasının kendisine hem sağ hem de sol tarafından üçer adet M2X12 alyan başlı civata ile bağlandığı 5mm alüminyum sacdan lazer kesimde kesilerek üretilen bu parçanın teknik resmi Şekil 2.24'te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.24. Dördüncü bağ birinci alt bileşen teknik resmi

b) Dördüncü bağın ikinci alt bileşeni

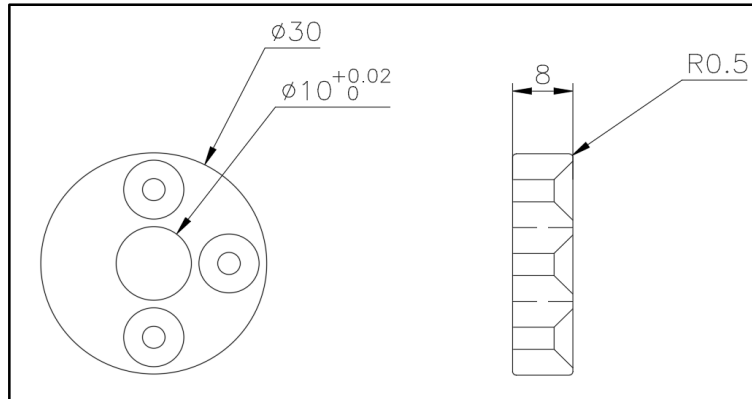
Bir önceki parçaya sağ ve sol yandan üçer adet M2x12 alyan başlı civata ile bağlanmak üzere iki adet üretilmiştir. 5 mm alüminyum sacdan lazer kesim ile üretilmiştir. Üçüncü bağın üzerinde yer alan fırçalı dc motor ile doğrudan tahriklenen kayış-kasnak mekanizmasının bağlı olduğu dördüncü alt bileşen mili ile üçüncü bağa döner eklem bağlantısı sağlanmaktadır. Bu bileşenin üretilmesi için hazırlanan teknik resim Şekil 2.25'te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.25. Dördüncü bağ ikinci alt bileşen teknik resmi

c) Dördüncü bağ üçüncü alt bileşeni

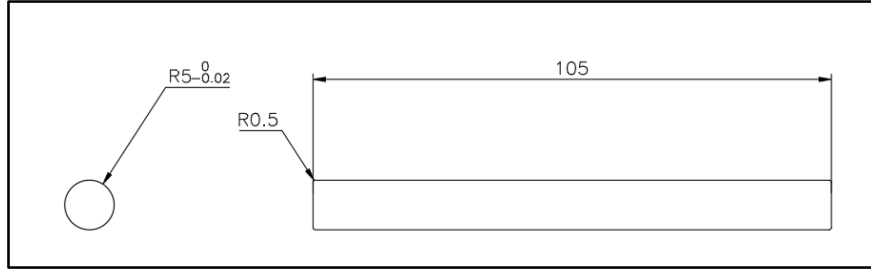
Dördüncü alt bileşenin miline setskur ile sabitlenmekte ve ikinci alt bileşene üçer adet M3x8 civata ile bağlanmakta olan bu parçanın için teknik resmi ise Şekil 2.26'da paylaşılmaktadır. Parça alüminyum malzemeden üretilmiştir. Üçüncü bağda da yeralan fırçalı DC motorun doğrudan tahriklemekte olduğu kayış-kasnak sistemine bağlı olan milin dördüncü bağa bu sabitleme parçaları ile sabitlenmesi doğrultusunda üçüncü eklemden dönme hareketinin gerçekleşmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2.26. Dördüncü bağ üçüncü alt bileşen teknik resmi

d) Dördüncü bağ dördüncü alt bileşenler

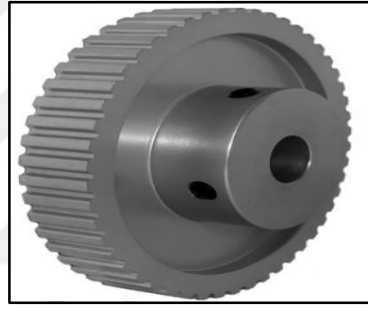
Üçüncü bağın üzerinde yeralan fırçalı DC motorun doğrudan tahriklediği kayış-kasnak sisteminin bağlı olduğu bu mil çelik malzemeden üretilmiş olup üretimi için hazırlanan teknik resim Şekil 2.27'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.27. Dördüncü bağ dördüncü bileşen teknik resmi

e) Güç aktarım elemanları

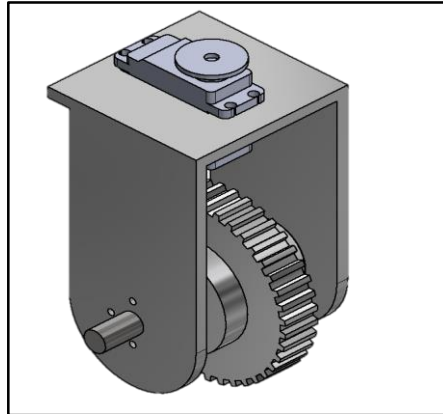
50 XL 037 Kasnak : Sistemde üzerinde 50 adet diş bulunduran, Withworth hatveli (XL), 15mm genişliğe sahip kasnak kullanılmaktadır. Kasnak dördüncü alt bileşen olan mile setskur ile bağlanmaktadır. Kullanılan kasnak fotoğrafı Şekil 2.28’de verilmektedir.



Şekil 2.28. Triger kasnak_1

2.1.4.2. Dördüncü bağın üç boyutlu tasarımı

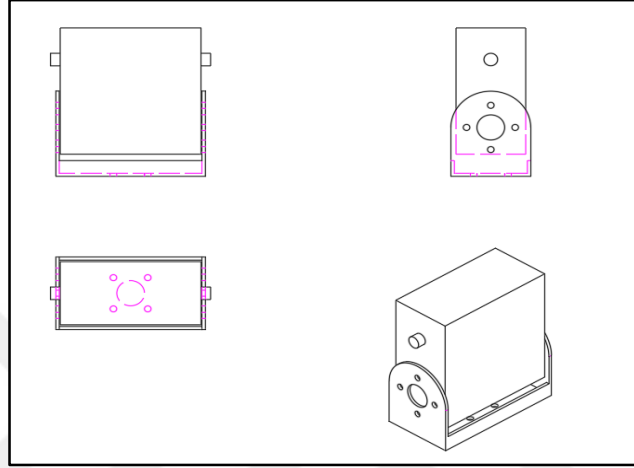
Inventor ortamında üç boyutlu tasarımı yapılarak montaj işleminin gerçekleştirildiği dördüncü bağa ait üç boyutlu tasarım resmi Şekil 2.29’da paylaşılmaktadır.



Şekil 2.29. Dördüncü bağ inverter tasarımı

2.1.5. Beşinci bağ tasarımı

Üzerinde Robosoul-LD2015 dijital servo motorunu bulunduran ve bu motor ile beşinci ekleme dönme hareketini sağlayan ve dolayısıyla euler bileği olarak adlandırılan üç serbestlik dereceli sistemin ikinci serbestlik derecesini barındıran ekleme sahip robot bölümüdür. Beşinci bağa ait Teknik resim Şekil 2.30’da paylaşılmaktadır.

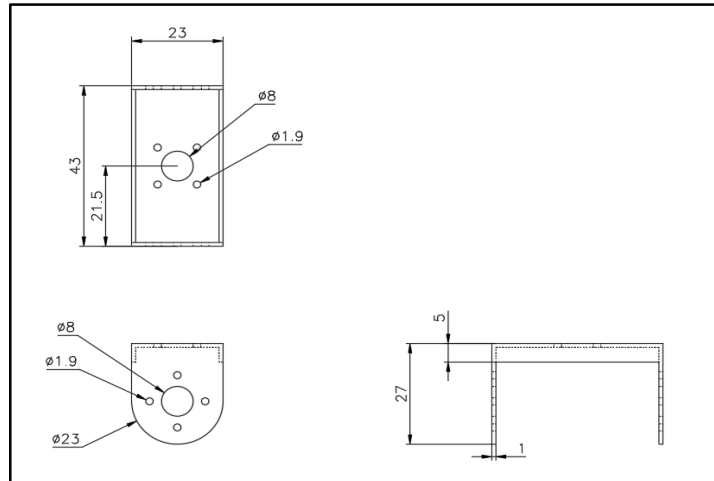


Şekil 2.30. Beşinci bağ teknik resmi

2.1.5.1. Beşinci bağ alt bileşen tasarımları

a) Beşinci bağ birinci alt bileşeni

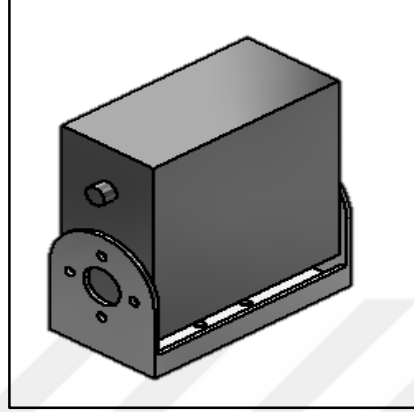
1mm alüminyum malzemeden bükülerek üretilen bu parçaya ait üretim resmi Şekil 2.31’de paylaşılmaktadır. Dördüncü bağ üzerinde yer alan HS-311 servo motora dört adet civata ile bağlanan bileşen, Robosoul-LD2015 servo motora da her iki yandan dörder adet civata ile bağlanmaktadır.



Şekil 2.31. Beşinci bağ birinci alt bileşen teknik resmi

2.1.5.2. Beşinci bağ üç boyutlu tasarımı

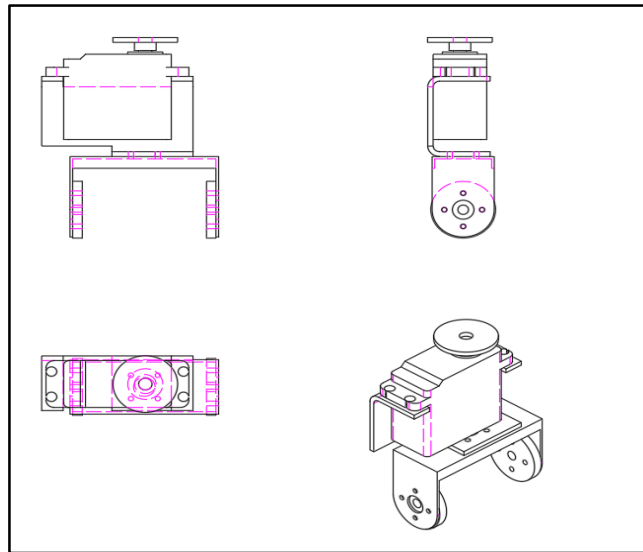
Inventor ortamında üç boyutlu tasarımı, beşinci bağın birinci alt bileşeni ve beşinci ekleme dönme hareketi sağlayan servo motor montajı gerçekleştirilmiştir. Inventor ortamında montaj arayüzünden alınan görüntü Şekil 2.32’de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.32. Beşinci bağ üç boyutlu tasarımı

2.1.6. Altıncı bağ

Bu kütle üzerinde bir adet birinci alt parça, ikinci alt parça ve bir adet de Hitec HS-311 servo motor bulunmaktadır. Bu parça, euler bileğini oluşturan sistemin üçüncü eklemine içermektedir. Çeşitli uç işlevci (gripper) sistemleri bu sisteme monte edilerek sistemin çeşitli görevleri yerine getirmesi sağlanabilmektedir. Şekil 2.33’te altıncı bağın teknik resmi paylaşılmaktadır.

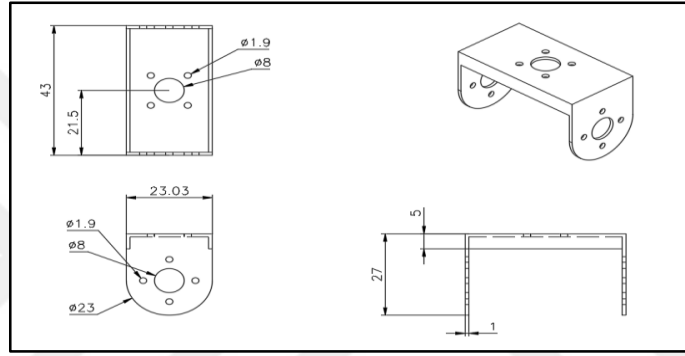


Şekil 2.33. Altıncı bağ teknik resmi

2.1.6.1. Altıncı bağ alt bileşen tasarımları

a) Altıncı bağ birinci alt bileşeni

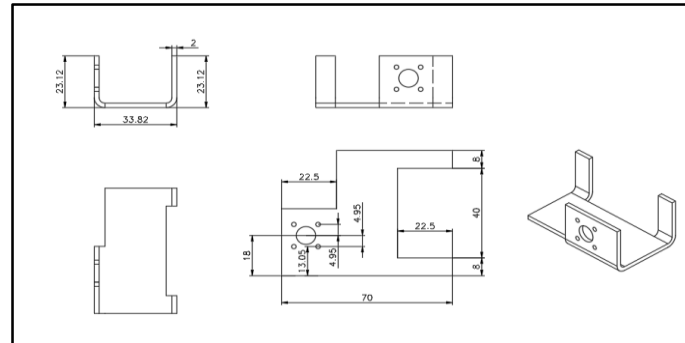
Beşinci bağ üzerinde yeralan Robosoul-LD2015 servo motorun motor milindeki dönme hareketini aktarabilmek amacı ile hazır olarak motorla birlikte üretilen parçalar kullanılmaktadır. Motora sağ ve sol yandan civata ile bağlanan bu hazır parçalar Altıncı bağ birinci alt bileşeni de dörder adet civata ile sağ ve sol yanaktan bağlanmaktadır. Bu sayede beşinci eklem motoru yani euler bileğini oluşturan ikinci ekleme ait motorda oluşan dönme hareketi doğrudan altıncı bağa aktarılmaktadır. Bu parçanın teknik resmi Şekil 2.34’te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.34. Altıncı bağ birinci alt bileşen teknik resmi

b) Altıncı bağ ikinci alt bileşeni

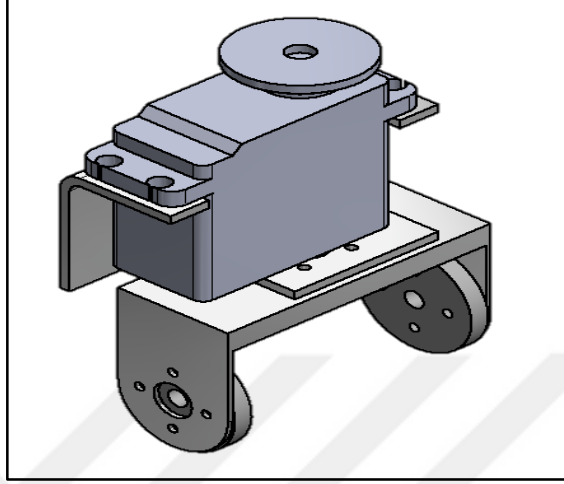
Üzerinde Hitec HS-311 servo motorunu bulunduran altıncı eklem yani euler bileğinin son eklemi olan üçüncü eklem yer aldığı ve uç işlevci üzerinde yer alan mili tahrikleyerek dönme hareketi gerçekleştiren küttedir. Şekil 2.35’te parçaya ait teknik resim yer almakta olup, malzeme olarak alüminyum 2mm levha kullanılmıştır ve lazer kesim sonrası büküm yöntemi ile talaşlı imalatı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.35. Altıncı bağ ikinci alt bileşen teknik resmi

2.1.6.2. Altıncı bağ üç boyutlu tasarımı

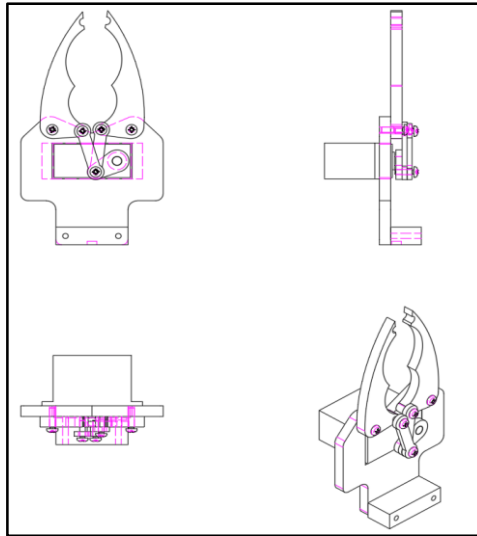
Üç boyutlu tasarımı inventor ortamında gerçekleştirilen altıncı bağa Inventor ortamından alınmış montaj görüntüsü Şekil 2.36’da paylaşılmaktadır.



Şekil 2.36. Altıncı bağ üç boyutlu tasarımı

2.1.7. Uç işlevci tasarımı

Uç işlevci olarak adlandırılan, herhangi bir pozisyon ve yönelimde robottan istenilen görevi yerine getirmesini sağlamak için kullanılan robot bölümüdür. Üzerinde, kışkaçlarını kontrol etmek amacıyla Hitec HS-311 servo motoru kullanılmaktadır. Altıncı bağ üzerinde yer alan Hitec HS-311 servo motoruna civatalar yardımıyla bağlanmaktadır. Uç işlevciye ait teknik resim Şekil 2.37’de yer almaktadır.

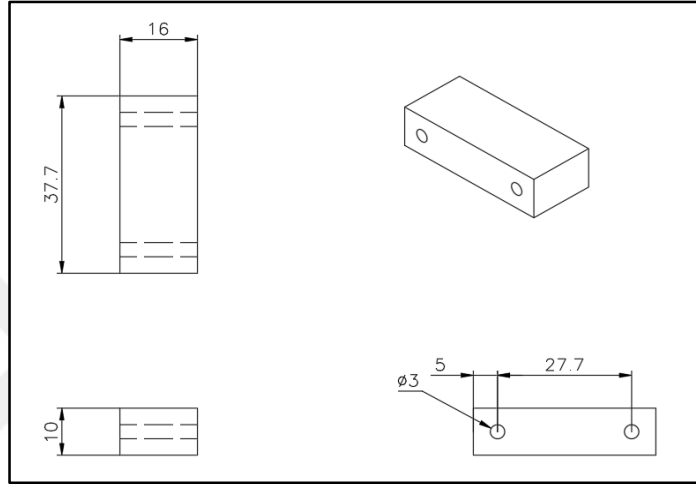


Şekil 2.37. Uç işlevci teknik resmi

2.1.7.1. Uç işlevci alt bileşen tasarımları

a) Uç işlevci birinci alt bileşeni

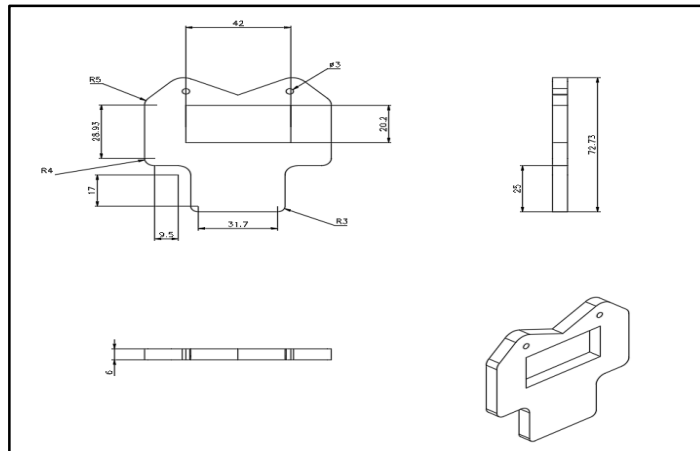
Altıncı bağıın ikinci alt bileşeni üzerinde yer alan HS-311 motor mili ili uç işlevci arasında montaj ilişkisini sağlayan ara parçadır. Sistem tasarımı için en önemli kriterinin hafif olması gerekliliği nedeniyle üç boyutlu yazıcıda PLA materyali kullanılarak üretilmiştir ve teknik resmi Şekil 2.38’de verilmiştir.



Şekil 2.38. Uç işlevci birinci alt bileşen teknik resmi

b) Uç İşlevci İkinci Alt Bileşeni

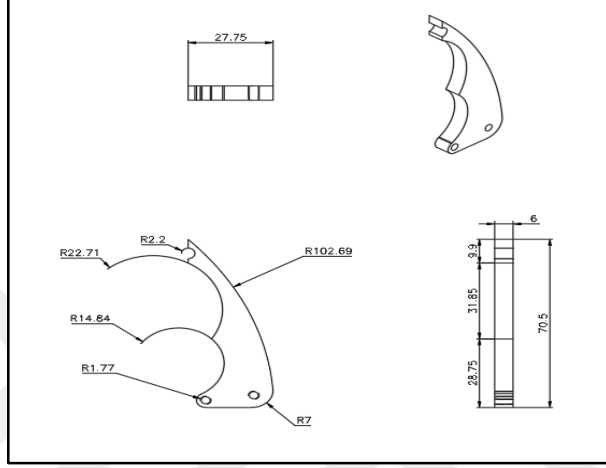
Uç işlevcinin gövde kısmı olarak nitelendirilen ve motoru üzerinde barındıran parçası olması nedeniyle kırılganlığı düşük fakat hafif malzeme seçimi gerektirmiş olan uç işlevci kestamit malzemedен işlenerek üretilmiştir. Şekil 2.39’da parçanın üretimi için kullanılan teknik resim paylaşılmaktadır.



Şekil 2.39. Uç işlevci ikinci alt bileşeni teknik resmi

c) Uç işlevci üçüncü alt bileşeni

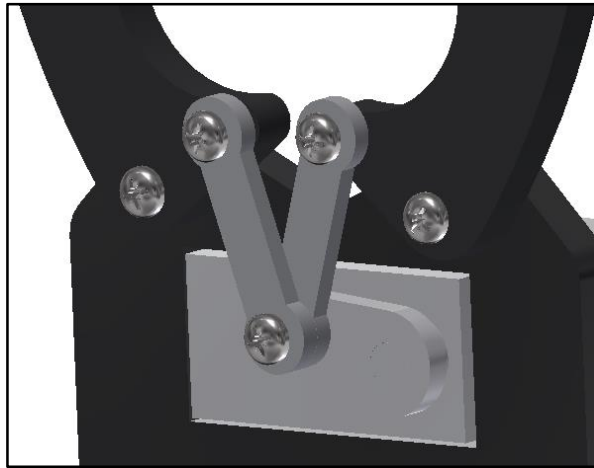
Uç işlevcinin ikinci alt bileşen parçası üzerinde yeralan HS-311 model motorun doğrudan tahriklemekte olduğu krank-biyel mekanizması üzerinden aktarılan güç ile hareketi sağlanan bu parça yani uç işlevci tırnakları olarak adlandırılan parçanın teknik resmi Şekil 2.40'ta paylaşılmaktadır. Bu parça, kestamit malzemedен işlenerek iki adet üretilmiştir.



Şekil 2.40. Uç işlevci üçüncü alt bileşen teknik resmi

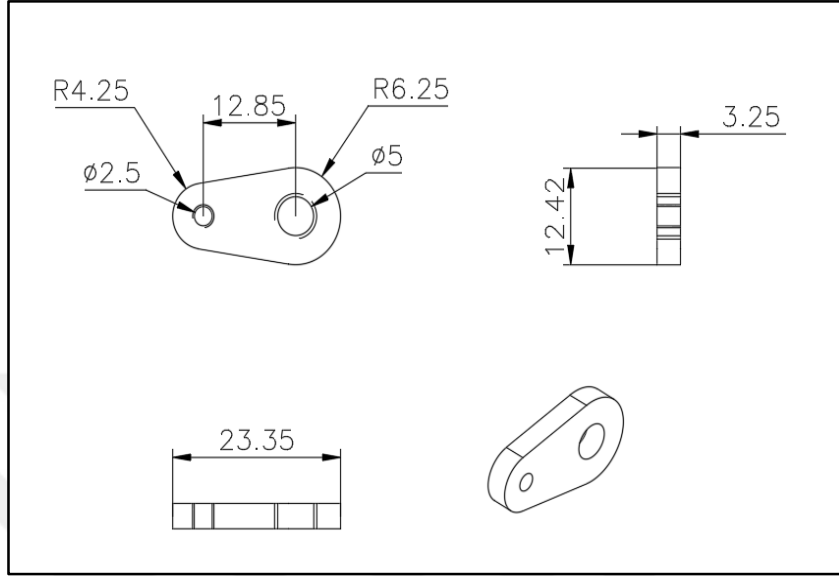
d) Uç işlevci dördüncü alt bileşeni

İkinci alt bileşen üzerinde yeralan HS-311 motorunun oluşturduğu dönme hareketini uç işlevci tırnaklarına öteleme hareketi yaptırabilmek için krank-biyel mekanizması tasarlanmıştır. Mekanizmanın üç boyutlu ortamdan alınan kesit görüntüsü Şekil 2.41'de gösterilmektedir.



Şekil 2.41. Krank-biyel

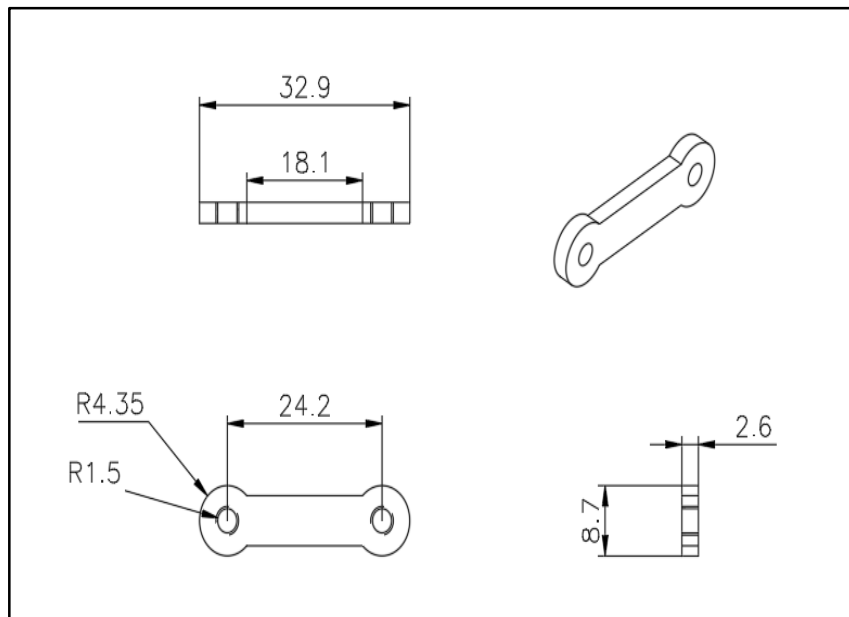
Krank : HS-311 motor miline bağlanan ve oradan aldığı dönme hareketini sağ ve sol uç işlevci tırnaklara ayrı ayrı ait olan biyel parçalarına aktarır. Kestamit malzemeden işlenerek üretilen bu parçaya ait teknik resim Şekil 2.42’de resim paylaşılmaktadır.



Şekil 2.42. Krank teknik resmi

Biyel : Krank milinden aldığı hareketi, itme hareketi olarak uc işlevci tırnaklarına yani uç işlevci ikinci alt parçasına aktarılmasını gerçekleştirmektedir.

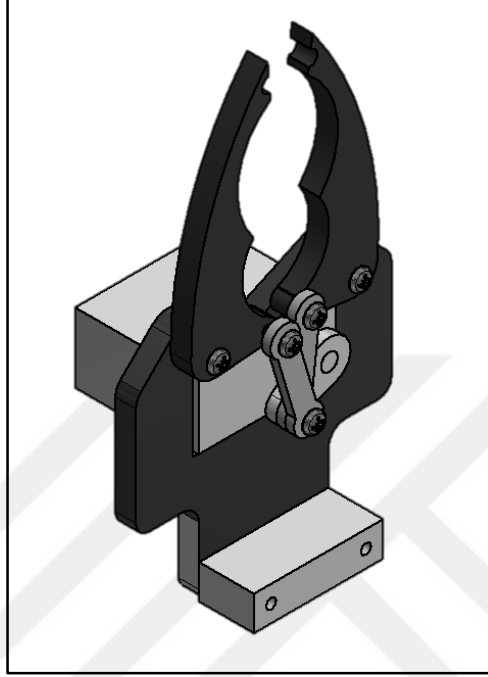
Bu parça kestamit malzemeden iki adet üretilmekte olup, üretimi için gerekli olan teknik resim Şekil 2.43’te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.43. Biyel teknik resmi

2.1.7.2. Uç işlevci üç boyutlu tasarımı

Inventor ortamında alt bileşen tasarımları gerçekleştirilmiş olan uç işlevciye ait üç boyutlu ortamdaki izometrik görüntü Şekil 2.44’te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.44. Uç işlevci üç boyutlu tasarımı

2.1.8. Solucan dişli set

Robot tasarımı esnasında kullanılan FAULHABER 3557020CS model motorun sisteme sağladığı tork değerinin hesaplamalar sonucunda 6:1 oranında artırılması gerektiği öngörülmüştür. Daha yüksek tork çıkışı sağlayabilecek bir motor hem maliyet hem de yer açısından tasarımda zorluklara neden olacağı için, çözüm olarak tork gereksinimini karşılamak dışında sisteme farklı katkıları da bulunan sonsuz dişli seti kullanılmaya karar verilmiştir. Bu doğrultuda tasarlanan setin 6:1 oranda tork kazanımı sağlaması planlanmıştır ve modül dişli sayısı ve diğer tasarım kriterleri belirlenmiştir. Çıkış torku olarak 12 Nm mertebelerinde dayanım sağlaması amacıyla iki bölümden oluşan setin solucan olarak adlandırdığımız motor miline bağlanan bölümü çelik alaşımından ve solucan bölümünden almış olduğu tork ile ikinci bağda da hareketi sağlayan dişli bölümü de bronz malzemeden üretilmiştir. Dişli sete ait görsel Şekil 2.45’de verilmektedir.



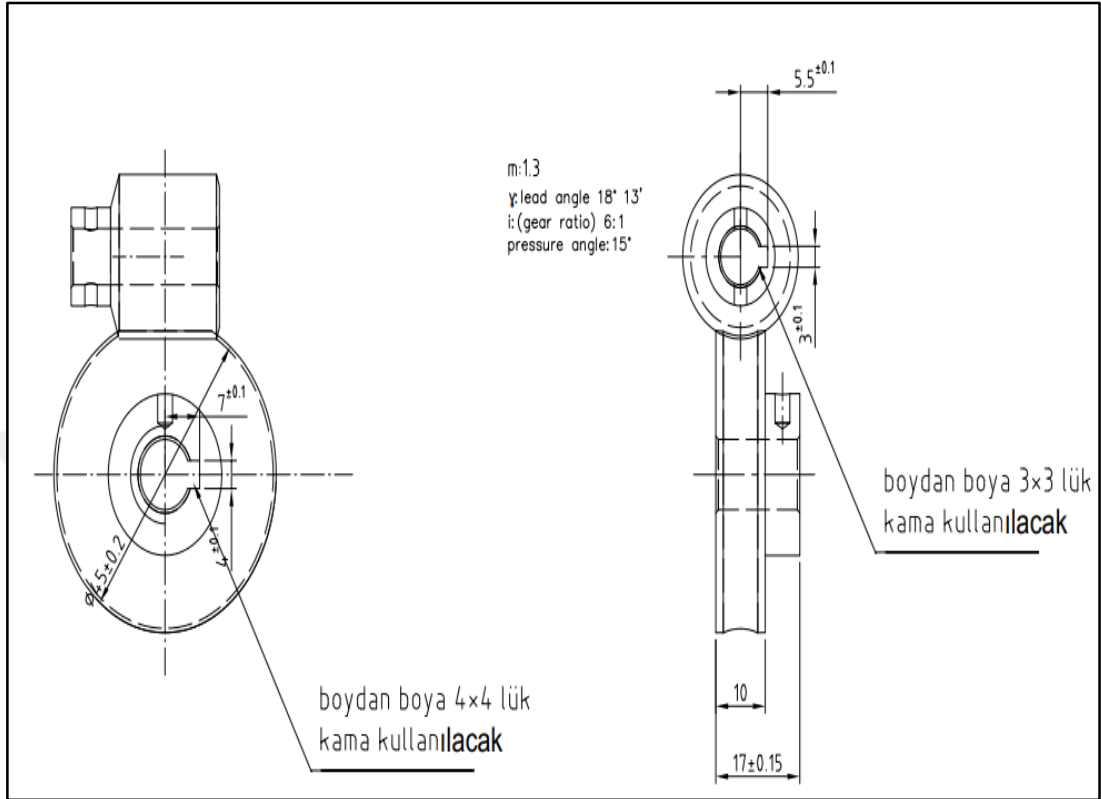
Şekil 2.45. Solucan dişli mekanizması

Sonsuz dişli mekanizmasının tasarım aşamasında gerekli olan birim ve ölçüler aşağıda Tablo 2.2’de paylaşılmaktadır.

Tablo 2.2. Sonsuz dişli ölçüler

Kısaltma	Açıklama	Değer
i	Dişli Oranı	6:1
γ_m	Helis Açısı	20°13'
m	Modül	1.2
z₁	Dişli Sayısı (solucan)	5
d_{m1}	Bölüm Dairesi Çapı (solucan)	20.8mm
d_{a1}	Uç Çapı (solucan)	23.4mm
z₂	Diş Sayısı (Dişli)	30
d_{m2}	Bölüm Dairesi Çapı (Dişli)	41.2mm
d_A	Uç Çapı (Dişli)	45mm
T₂	Çıkış Torku	12 Nm

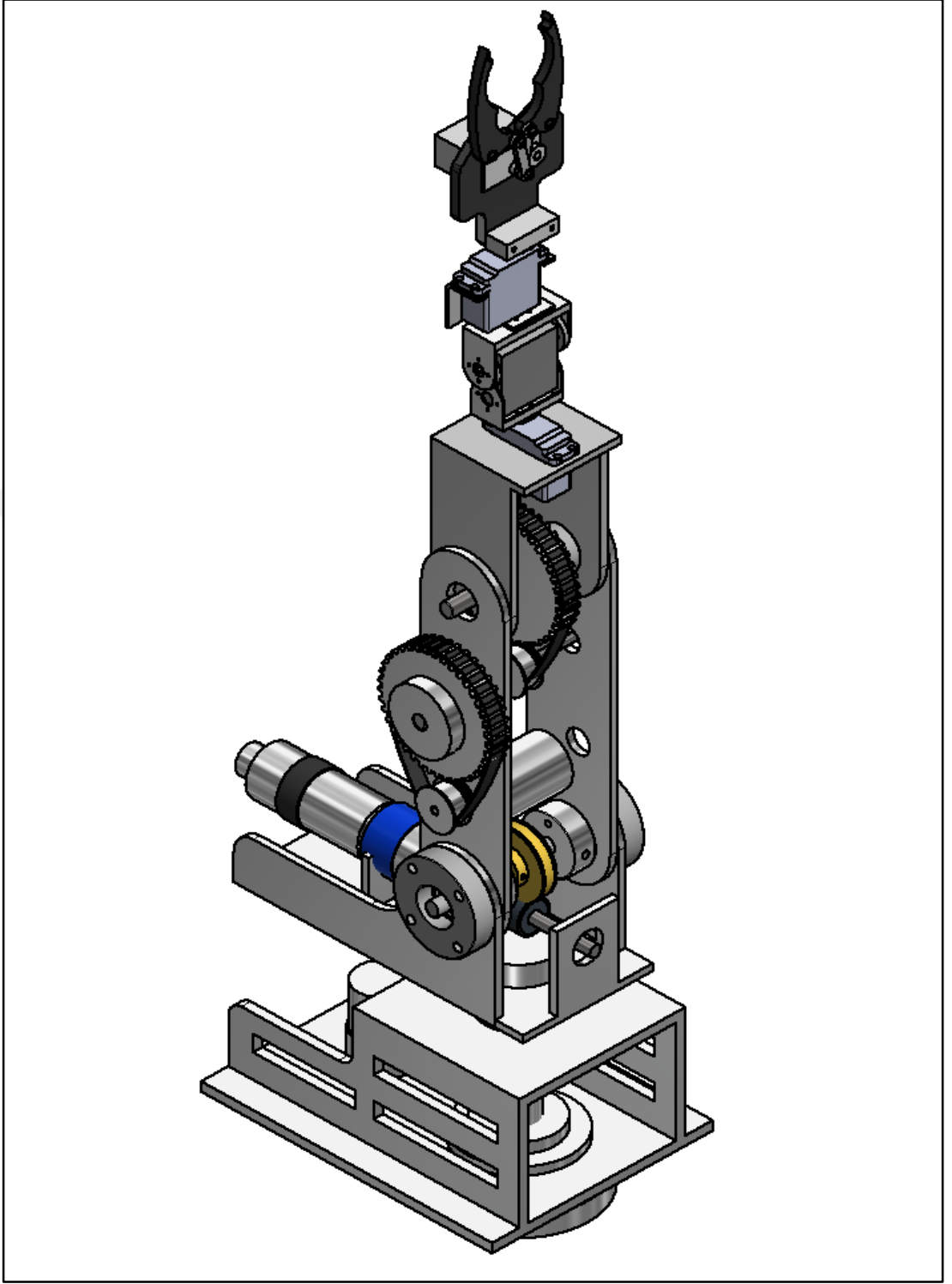
Sonsuz Dişli setinin üretimi için gerekli olan teknik resim Şekil 2.46’da paylaşılmaktadır.



Şekil 2.46. Solucan dişli mekanizması teknik resim

2.1.9. Robotun 3D montaj modeli

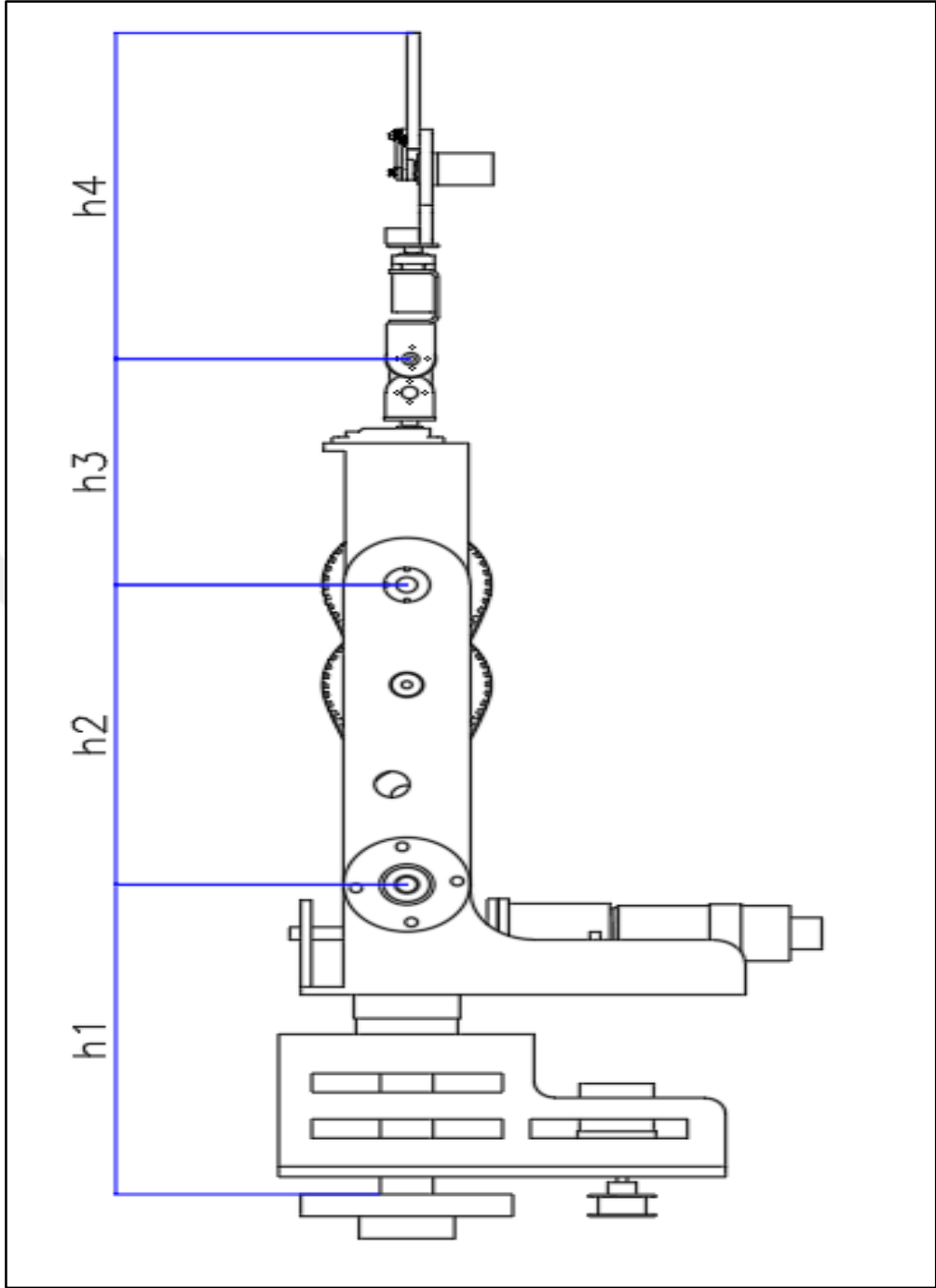
Bağlar ve bağların alt bileşenlerinden oluşan robotun Inventor ortamında üç boyutlu olarak montajı yapılmış, dönme hareketinin gerçekleştiği altı eklem için de dönme ilişkisi yine Inventor ortamında tanımlanmıştır. Altı ekleminde dönme hareketi gerçekleşen robotun simülasyon ortamında nümerik dinamik modelinin oluşturulabilmesi için eklemlerine ilişki tanımlanırken bu durum dikkate alınmıştır. Aynı zamanda tüm dinamik parametrelerin MATLAB ortamında hazır olarak elde edilebilmesi için üç boyutlu montaj modelinde tüm parçaların malzeme atamalarının yapıp yapılmadığına özellikle dikkat edilmiştir. Üç boyutlu model üzerinden dönme eksenlerinin kütlelerin ağırlık merkezlerine olan uzaklıkları rahatlıkla bulunabilmektedir. Bu nedenle üç boyutlu modelin elde edilmesi, tasarımın ve üretimin yanısıra bir çok avantajı da beraberinde getirmiştir. Inventor'deki montaj görüntüsü Şekil 2.47’de verilmiştir.



Şekil 2.47. Robotun üç boyutlu montaj modeli

2.1.10. Robotun fiziksel parametrelerinin değerleri

Robotun kinematik modelinde kullanılacak fiziksel boyutları Şekil 2.48’de ifade edilmiş ve Tablo 2.3’te her bir uzunluğun değerleri verilmiştir.



Şekil 2.48. Robotun kinematik modellemede kullanılacak fiziksel boyutları

Tablo 2.3. Robotun fiziksel parametre değerleri

Fiziksel Parametre	Değeri(mm)
h_1	393
h_2	380
h_3	287
h_4	414

Mekanik tasarım bölümünde tasarımları açıklanan her bir parçanın imalatı gerçekleştirilmiş, gerekli hazır parçaların tedariği sağlanmış ve robotun prototipi üretilmiştir. Bu prototipin fiziksel görüntüsü Şekil 2.49'da paylaşılmaktadır.



Şekil 2.49. ZORO Prototip fotoğrafı

Üretimi gerçekleştirilen ZORO prototipinde her bir eklemin sahip olduğu mekanik alt ve üst limitlere ait bilgiler tablo 2.4'te sunulmuştur.

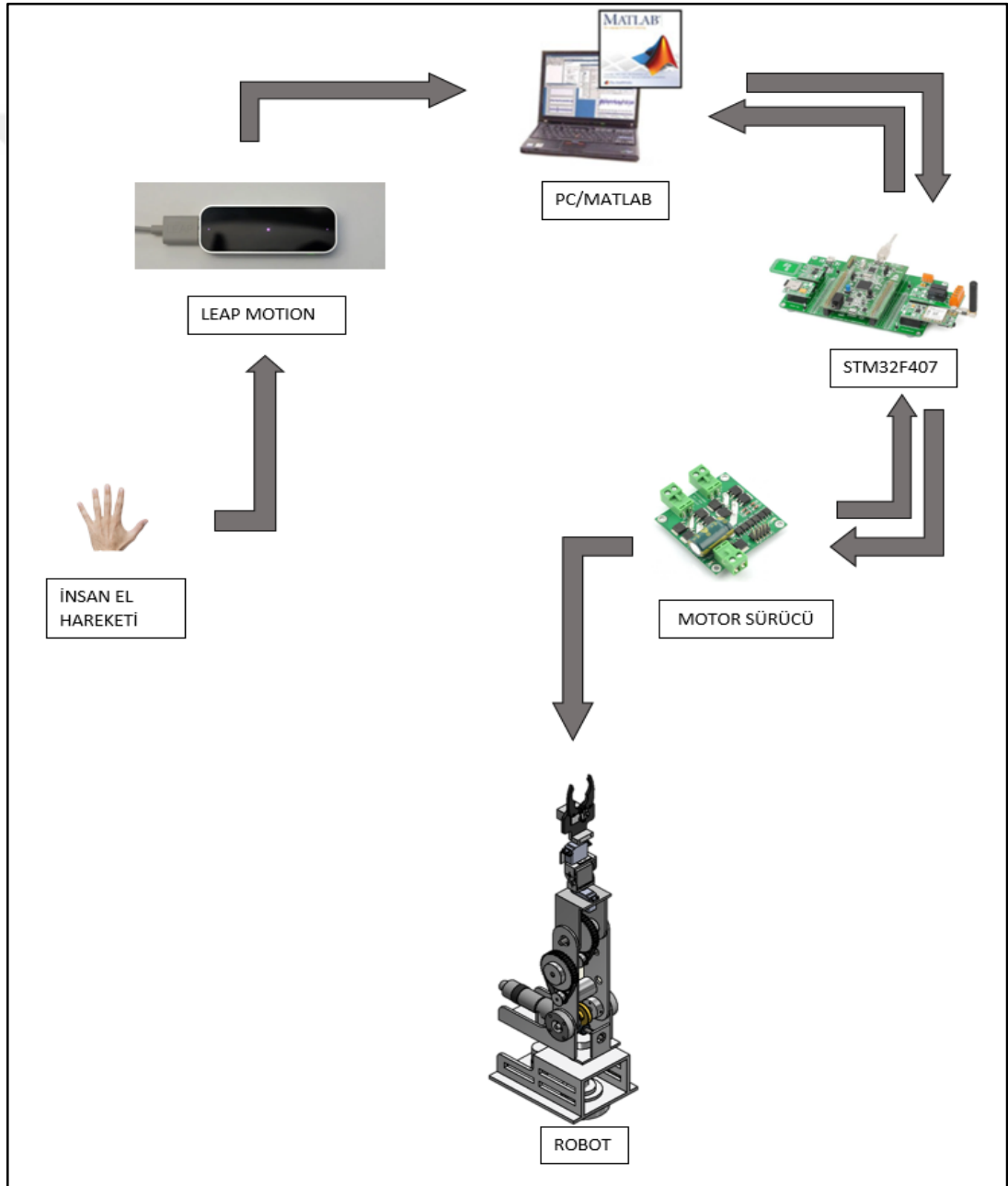
Tablo 2.4. Robot eklemlerinin mekanik sınırları

Eklemler Numarası	Alt Limit	Üst Limit
1. Eklemler	-100°	+100°
2. Eklemler	-85°	+85°
3. Eklemler	-120°	+120°
4. Eklemler	-90°	90°
5. Eklemler	-90°	90°
6. Eklemler	-90°	90°

2.2. Sistemin Elektronik Tasarımı

2.2.1. Elektronik tasarımın alt yapısının oluşturulması

Bu tez kapsamında insanın kol hareketlerini altı eksenli seri bir robota insan-makine arayüzü kullanarak aktarmak amaçlanmaktadır. Bunu yaparken Şekil 2.50’de yer alan akış şemasında görüldüğü gibi, Leap Motion aygıtı ile el hareketlerinin algılanması, sonrasında MATLAB içerisinde bulunan Leap Motion kütüphanesi kullanılarak insan eline ait konum ve yönelim verilerinin dijital ortama aktarılması sağlanmıştır.



Şekil 2.50. Elektronik tasarım

2.2.2. Elektronik tasarım malzeme listesinin oluşturulması

Bu tez kapsamında üretilen robotun elektrik donanımına ait malzeme listesi 2.5 numaralı tabloda, ürün kodu, markası, tanımı ve kaç adet kullanıldığı belirtilerek verilmektedir.

Tablo 2.5. Elektronik tasarım elemanları

No	Ürün Tanımı	Ürün Kodu	Ürün Markası	Kullanım Adedi
1	Kontrol Kartı	STM32F407	STMicroelectronics	1
2	DC Motor Sürücü	DRI0041	SKU	2
3	12V DC Güç Kaynağı	S-360-12	T-POWER	1
4	5V DC Güç Kaynağı	-	-	1
5	24V DC Güç Kaynağı	DVPPS02	DELTA	1
6	50mNm DC Mikromotor	3557..CS	FAULHABER	1
7	Servo Motor-1	HS-311	HITEC	3
8	Servo Motor-2	LD-2015	Robo-Soul	1
9	Fırçalı DC motor	37D#4753-..54	POLOLU	2
10	Hareket Algılama Sensörü	-	LEAP MOTION	1
11	8x0.25 Shieldli Kablo	2095780	SICK	2
12	2x1.5 Kablo	H05VV-F	-	2
13	7x0.75 Kablo	YSLY-JZ	2M	3
14	Dağıtım Kartı	-	Özel PCB Tasarımı	1
15	220V priz	-	-	1
16	M.USB (High Speed) Kablo	AWM 2725	-	2
17	ON/OFF Siviç	-	-	1

2.2.3. Kullanılan malzemelerin teknik özellikleri

2.2.3.1. Kontrol kartı (STM32F407)

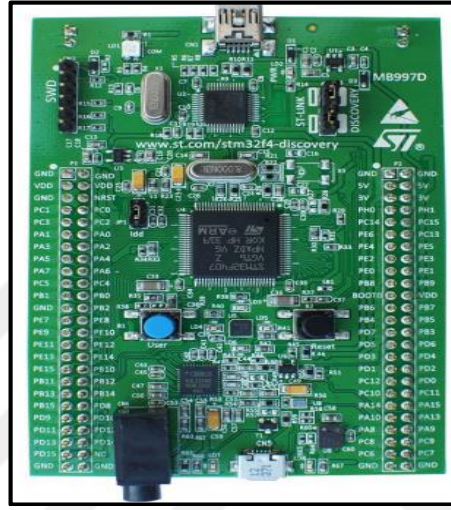
a) Kontrol kartının genel özellikleri

Sistemde kullanılan kontrol kartı STMicroelectronics firması tarafından üretilen ARM Cortex-M4 tabanlı yüksek performanslı, düşük maliyetli, kolay kullanımlı bir geliştirme kartıdır. Kart üzerinde STM32F407VGT6 mikrodenetleyicisi bulunur. Ayrıca bir debugera ihtiyaç duymaz. Çünkü üzerinde ST-LINK V2 ile gelmektedir. 192 kb RAM belleğe sahip olan kartın görseli Şekil 2.51’de verilmiştir. Kontrol kartına ait teknik resim Şekil 2.52’de paylaşılmaktadır.

Kontrol kartına ait ürün kodunun ne anlama geldiğini belirten kodlama bilgisi Tablo 2.6’da belirtilmektedir.

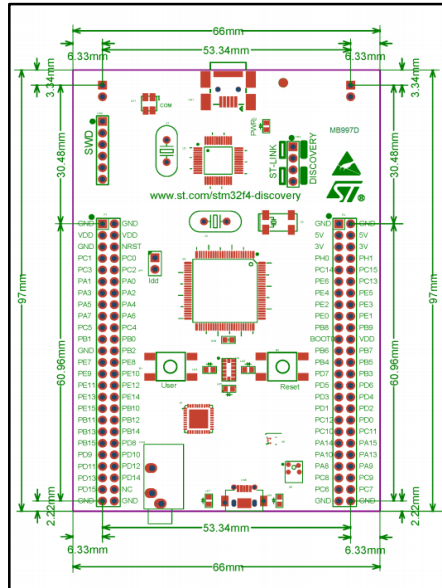
Tablo 2.6. STM32F407 Kontrol kartı özellikleri

STM32F4XXY-DISC1	Açıklama	Ör:STM32F407G-DISC1
STM32F4	STM32 / 32 bit ARM Cortex'de MCU serisi MCU'lar	STM32F4 Serisi
XX	MCU Serisindeki ürün tipi	STM32F407
Y	STM32 flash bellek boyutu	1 Megabayt
DISC1	Geliştirme Kiti	Geliştirme Kiti



Şekil 2.51. STM32F407 Kontrol kartı fotoğraf

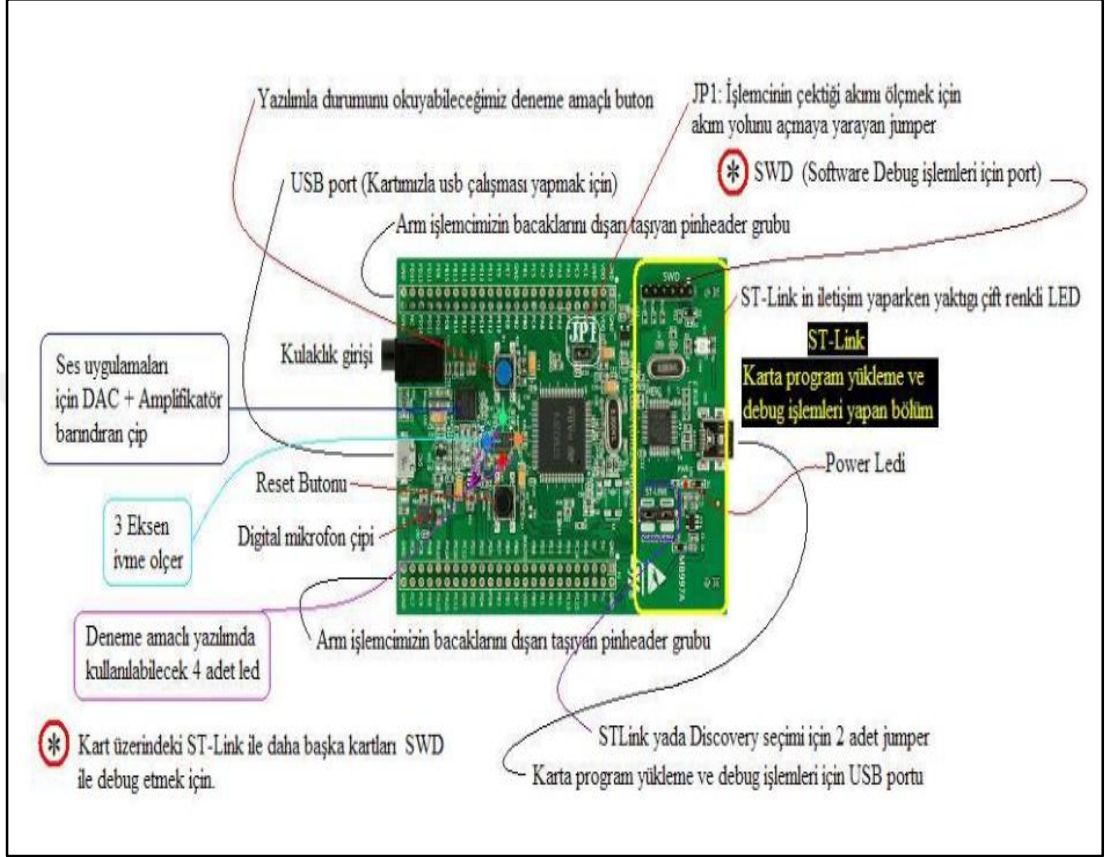
Kontrol kartı boyutları:



Şekil 2.52. STM32F407 teknik resim

b) Kontrol kartı fiziksel tanıtımı

Kart üzerinde yer alan cihaz ve bağlantı portlarının gösterimi Şekil 2.53'te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.53. Kontrol kartı STM32F407 fiziksel gösterim

Mikrodenetleyicinin sunduğu özellikler:

- STM32F407VGT6 mikrodenetleyici, 32-bit Arm® (a) FPU çekirdekli Cortex®-M4, 1 Mbyte Flash bellek, LQFP100 paketinde 192 Kbyte RAM
- USB OTG FS
- ST MEMS 3 eksenli ivmeölçer
- ST-MEMS ses sensörü çok yönlü dijital mikrofon
- Entegre D sınıfı hoparlör sürücüsüne sahip Audio DAC
- Kullanıcı ve reset butonları
- 100 adet giriş / çıkış pini tamamının kullanılabilmesini sağlayan 2x50 header konnektör çıkışları bulunmaktadır.

- Sekiz LED:
- LD1, USB iletişimi için (kırmızı/yeşil)
- LD2, 3.3V Besleme Gerilimi Aktif (kırmızı)
- LD3, kullanıcı ledi (turuncu)
- LD4, kullanıcı ledi (yeşil)
- LD5, kullanıcı ledi (kırmızı)
- LD6, kullanıcı ledi (mavi)
- LD7, VBUS (USB OTG) ledi (yeşil)
- LD8, Over-current (USB OTG) ledi (kırmızı)
- Board Konnektörleri:
- Micro-AB ile USB
- Stereo kulaklık çıkış jakı
- Programlama ve prototipleme panosuna hızlı bağlantı için tüm LQFP100 I/O'lar için 2,54mm genişletme başlığı.
- Esnek güç kaynağı seçenekleri; ST-Link, USB VBUS veya harici kaynaklar
- 3V ve 5V olarak harici uygulama için güç kaynağı
- STM32CubeF4 MCU paketinin bir parçası olan kapsamlı ücretsiz yazılım (içerisinde çeşitli örnekler içermekte olan) veya eski kütüphaneleri kullanabilmek için STSW-STM32068.
- USB yeniden numaralandırma özelliğine sahip yerleşik ST-LINK / V2-A hata ayıklayıcı / programlayıcı: yığın depolama, sanal COM bağlantı ve hata ayıklama bağlantı portu.
- IAR dahil çok çeşitli Entegre Geliştirme Ortamı (IDE'ler) desteği. Gömülü Workbench®, MDK-ARM ve STM32CubeIDE.
- Üzerinde 14 adet timer bulunmakta ve her timer'ın kendine özel kullanım alanları mevcuttur. Ayrıca her timerın birden fazla işlevi bulunmaktadır.

Kontrol kartına ait kanal-timer seçimi Şekil 2.54'te verilmektedir.

Timer	Channel 1			Channel 2			Channel 3			Channel 4		
	PP1	PP2	PP3	PP1	PP2	PP3	PP1	PP2	PP3	PP1	PP2	PP3
TIM 1	PA8	PE9		PA9	PE10		PA10	PE13		PA11	PE14	
TIM 2	PA0	PA5	PA15	PA1	PB3		PAZ	PB10		PA3	PB11	
TIM 3	PA6	PB4	PC6	PA7	PB5	PC7	PB0	PC8		PB1	PC9	
TIM 4	PB6	PD1Z		PB7	PD13		PB8	PD14		PB9	PD15	
TIM 5	PA0	PH10		PA1	PH11		PAZ	PH1Z		PA3	PI0	
TIM 8	PC6	PI5		PC7	PI6		PC8	PI7		PC9	PIZ	
TIM 9	PAZ	PE5		PA3	PE6							
TIM 10	PB8	PF6										
TIM 11	PB9	PF7										
TIM 12	PB14	PH6		PB15	PH9							
TIM 13	PA6	PF8										
TIM 14	PA7	PF9										

Şekil 2.54. PWM üreten timer-kanal seçimi

c) Kontrol Kartı Güç Kaynağı ve Güç Seçimi:

Besleme, ana bilgisayar tarafından USB kablosuyla veya harici bir 5 V güç kaynağıyla sağlanır.

D1 ve D2 diyotları, 5V ve 3V pinlerini harici güç kaynaklarından korur.

5V ve 3V, P1 ve P2 pinlerine başka bir uygulama kartı bağlandığında çıkış güç kaynakları olarak kullanılabilir.

Bu durumda, 5V ve 3V pinleri 5 V veya 3 V güç çıkışı sağlar burada dikkat edilmesi gereken güç tüketimi 100 mA'dan düşük olmalıdır.

5V giriş güç kaynakları olarak da kullanılabilir, örneğin USB konektörü PC'ye bağlı olmadığında.

Bu durumda, STM32F4DISCOVERY panosu, EN-60950-1: 2006 + A11 / 2009 standardına uygun bir güç kaynağı ünitesi veya yardımcı ekipmanla çalıştırılmalı ve sınırlı güç kapasitesine sahip Güvenli Ekstra Düşük Voltaj (SELV) olmalıdır.

d) Kontrol Kartı Üzerinde Yeralan Renklerin Anlamları:

LD1 COM: LD1 varsayılan durumu kırmızıdır. LD1, PC ile ST-LINK / V2-A arasında iletişimin devam ettiğini belirtmek için yeşile döner.

LD2 PWR: kırmızı LED, karta güç verildiğini gösterir.

Kullanıcı LD3: turuncu LED, STM32F407VGT6'nın I / O PD13'üne bağlı bir kullanıcı LED'idir.

Kullanıcı LD4: yeşil LED, STM32F407VGT6'nın I / O PD12'sine bağlı bir kullanıcı LED'idir.

Kullanıcı LD5: kırmızı LED, STM32F407VGT6'nın I / O PD14'üne bağlı bir kullanıcı LED'idir.

Kullanıcı LD6: mavi LED, STM32F407VGT6'nın I / O PD15'ine bağlı bir kullanıcı LED'idir.

USB LD7: yeşil LED, VBUS'un CN5'de bulunduğunu ve STM32F407VGT6'nın PA9'una bağlandığını gösterir.

USB LD8: kırmızı LED, CN5'in VBUS'undan aşırı akımı gösterir ve STM32F407VGT6'nın I / O PD5'ine bağlıdır.

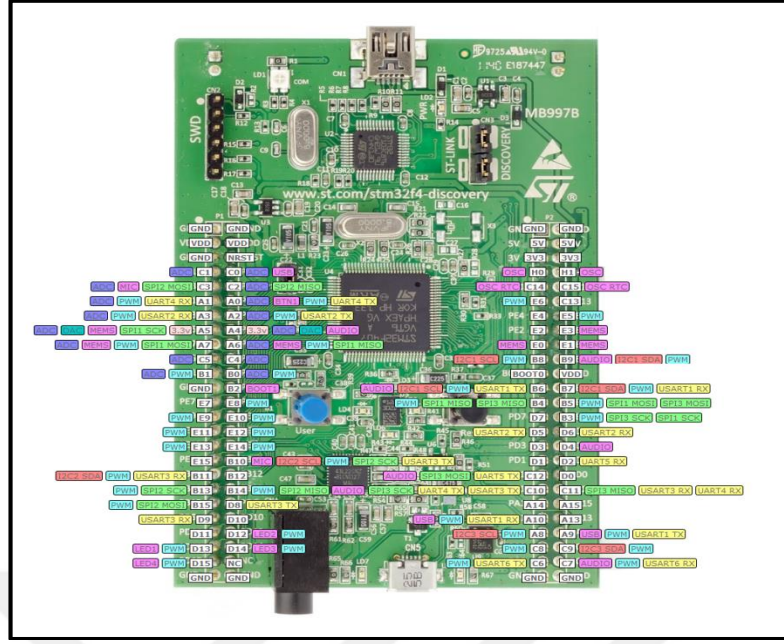
e) Kontrol Kartı Üzerinde Yeralan Push Buton İşlevleri:

B1 KULLANICI: Kullanıcı ve Uyandırma düğmeleri STM32F407VG'nin I / O PA0'ına bağlanır.

B2 RESET: NRST'ye bağlı olan buton, STM32F407VG'yi Resetlemek için kullanılır.

f) Kontrol Kartı Üzerinde Yeralan Pin Fonksiyonlarının Gösterimi:

STM32F407VG üzerinde yer alan tüm pinlerin hangi fonksiyonlarda kullanılabildiği Şekil 2.55'te belirtilmektedir.



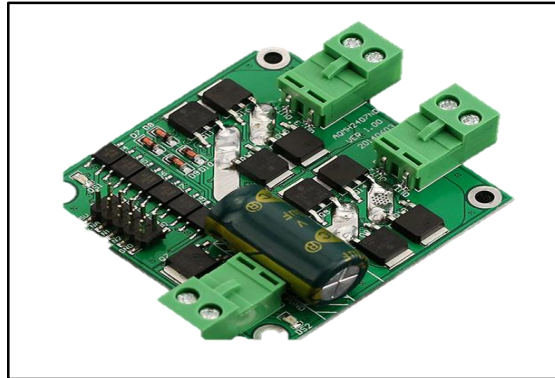
Şekil 2.55. STM32F407VG pin fonksiyonları

2.2.3.2. DC motor sürücü (SKU.DRI0041)

a) Sürücünün genel özellikleri

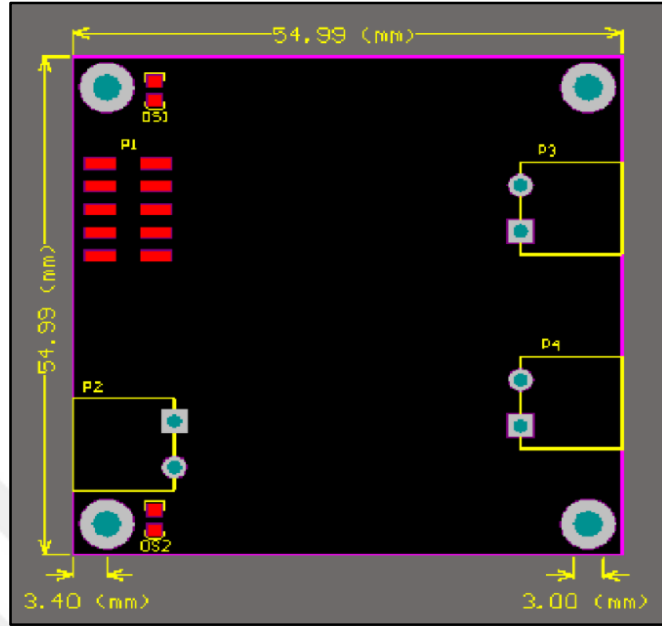
Şekil 2.56 görülen ürün ultra küçük çift DC motor sürücüsü olarak tanımlanmaktadır. Sistemde yer alan DC motorların sürülmesi amacıyla üç DC motor için iki adet kullanılacaktır. Düşük Voltaj Mandal-Çıkışı (UVLO) özelliğine sahip olması sayesinde sistemde güvenli koruma sağlamaktadır.

Motorun ters akımının kontrol sinyallerini etkilememesi için, tüm sinyallere foto kuplör izolasyonuna sahiptir. Ayrıca sürücüdeki tüm arayüzler ESD (elektronik deşarj) koruması içermektedir.



Şekil 2.56. SKU.DRI0041 fotoğraf

SKU.DRI004I Motor sürücüne ait iki boyutlu teknik resim ve ölçülendirmeler Şekil 2.57'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.57. SKU.DRI0041 teknik resim

b) Sürücünün teknik özellikleri

Besleme Gerilimi : DC 7 ~ 24 V

Besleme Gerilimi alt-üst limit değerleri : 6.5 ~ 27 V

Kontrol Sinyali Gerilimleri :

3.3V / 5V için uyumlu,

Yüksek: DC 3.0 ~ 6.5 V

Alçak: DC 0 ~ 0.8 V

Çıkış Kanal Sayısı : 2

Kontrol Sinyal Akımı : 3 ~ 11 mA (her güzergah için)

Maksimum Sürekli Operasyon Akımı : 7A

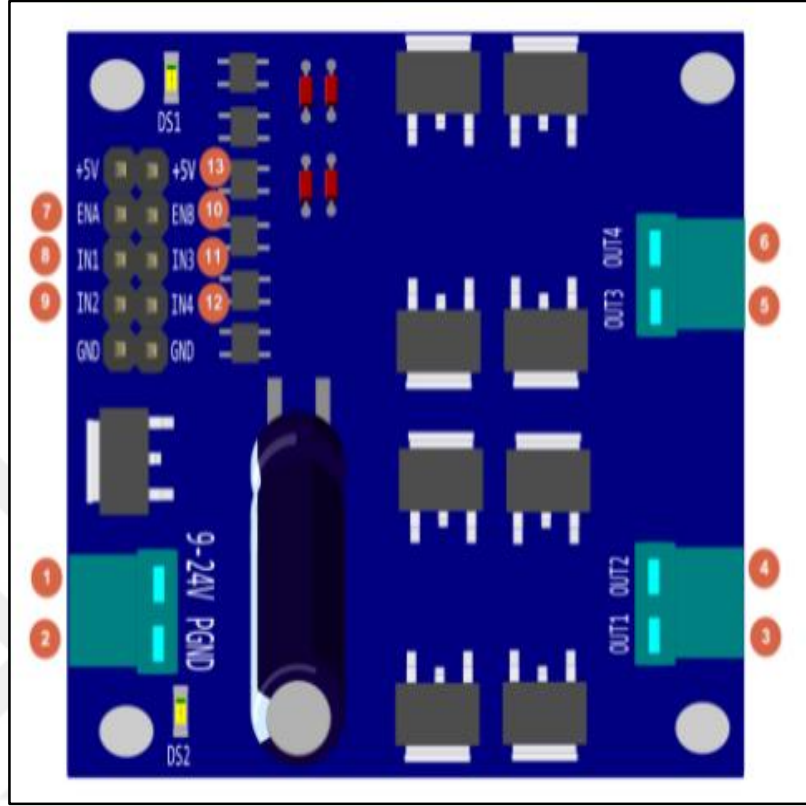
Zirve Akımı : 50A

Hız Kontrolü : PWM (Min geçerli darbe genişliği: 5 us)

Çalışma Sıcaklığı : -25 ~ 85 °C

c) Sürücü pin bağlantıları gösterimi

Motor sürücüsü üzerinde kullanılan pinler ve bu pinlerin bağlantıları aşağıdaki Şekil 2.58 ve Tablo 2.7’de yer almaktadır.



Şekil 2.58. SKU.DRI0041 pin bağlantıları

Tablo 2.7. SKU.DRI0041 pin tanımlamaları

No	Etiket	Tanım
1	9-24V	Besleme +
2	PGND	Besleme GND
3	OUT1	Motor1_+
4	OUT2	Motor1_-
5	OUT3	Motor2_+
5	OUT4	Motor2_-
7	ENA	Motor1 PWM
8	IN1	Motor1 Kontrol Sinyali
9	IN2	Motor1 Kontrol Sinyali
10	ENB	Motor2 PWM
11	IN3	Motor2 Kontrol Sinyali
12	IN4	Motor2 Kontrol Sinyali
13	+5V	Gerilim Referans Girişi +5V veya 3.3V

d) SKU.DRI0041 Çalışma sistemi

SKU.DRI0041 model sürücünün çalışma sistemini anlatan Tablo 2.8’de paylaşılmaktadır.

Tablo 2.8. SKU.DRI0041 çalışma sistemi

IN1	IN2	ENA/ENB	Motor1/2 Davranışı
0	0	X	Duruş
1	1	X	Boş
1	0	1	%100 İleri
0	1	1	%100 Geri
1	0	PWM	PWM hızında İleri
0	1	PWM	PWM hızında geri

2.2.3.3. 12V DC güç kaynağı (S-360-12)

Ürün boyutları 215*115*50mm olup, dahili EMI filtrelidir. Güç açık olduğunda üzerinde bunu gösteren bir LED mevcuttur. Ürünün ortalama hataya düşme süresi 50.000 saatten fazladır. Ürün görseli Şekil 2.59'da verilmektedir.



Şekil 2.59. 12V DC S-360-12 güç kaynağı

a) Güç kaynağının teknik özellikleri

Ürüne ait genel teknik özellikler Tablo 2.9'da verilmektedir.

Tablo 2.9. S-160-12 teknik özellikleri

Giriş Gerilimi	88-264VAC
GÜÇ	360W
Çıkış Akımı	30A
Çıkış Gerilimi	0-12V DC
Korumalar	Aşırı yük, Aşırı sıcaklık, kısa devre
AC ani boşalma akımı	Soğuk başlangıç,30A 230V AC
Çalışma Sıcaklığı	-20°C , +55°C
Depolama Sıcaklığı	-40°C, +85C
EMC Standartları	GB9254, EN55022 A Sınıfı
Soğutma	DC Soğutma Fanı

2.2.3.4. 5V güç kaynağı

Sistemde ihtiyaç duyulan 5V gerilim için kullanılan güç kaynağının besleme gerilimi 220V AC olup çift çıkış verebilmektedir. Ürün herhangi bir markaya ait olmayıp el yapımıdır. Bu nedenle herhangi bir katalog bilgisine sahip değildir.

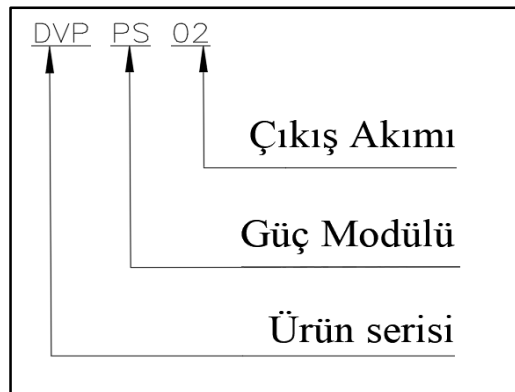
2.2.3.5. 24V DC güç kaynağı (DVPPS02)

a) DVPPS02 genel özellikleri



Şekil 2.60. 24V DC güç kaynağı (DVPPS02)

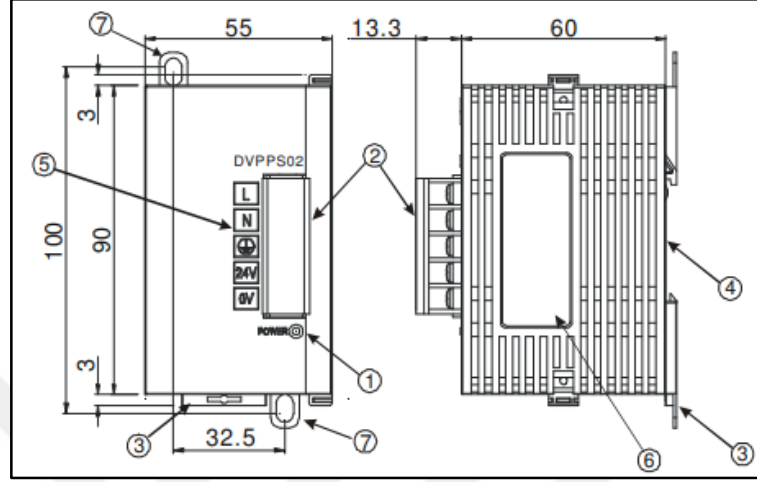
İkinci eklem motorunun besleme gerilimi ve yine fren besleme geriliminin 24V DC olması nedeniyle sistemde 24V DC gerilime ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle görseli Şekil 2.60'da paylaşılan Delta markasına ait DVP-PS02 model ürün kullanılmıştır. Ürünün model numarasının ne anlama geldiği Şekil 2.61'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.61. DVPPS02 model numarası

b) DVPPS02 pin bağlantıları

Şekil 2.62’de verilen DVPPS02 güç kaynağına ait numaralandırılmış pinlerin ne anlama geldiği hakkında bilgi veren Tablo 2.10 aşağıda paylaşılmaktadır.



Şekil 2.62. DVPPS02 pin bağlantıları

Tablo 2.10. DVPPS02 pin tanımlamaları

Pin No	Açıklama
1	Güç Lambası
2	Giriş ve Çıkış Terminali
3	Ray Klipsi (DIN)
4	Ray Bağlantı Yolu (DIN)
5	Giriş Çıkış Terminal Etiketleri
6	İsim Plakası
7	Montaj Yuvası

c) DVPPS02 teknik özellikler

DVPPS02 güç kaynağına ait teknik özellikler aşağıdaki Tablo 2.11’de verilmiştir.

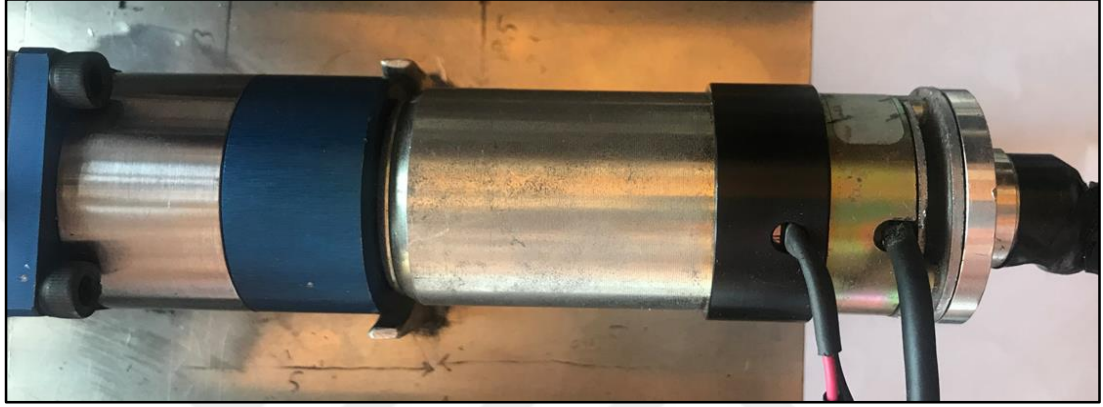
Tablo 2.11. DVPPS02 teknik özellikleri

No	Özellik	Değer/ Açıklama
1	Besleme Gerilimi	100-240V AC
2	Giriş Frekansı	50/60 Hz
3	Çıkış Gerilimi	24V DC
4	Çıkış Akımı	2A (max.)
5	Verimlilik	%78 ~ %87
6	Overload / Kısa Devre Koruma	Otomatik Kurtarma
7	Çalışma ortam Koşulları (Sıcaklık)	0°C ~ 55°C
8	Çalışma ortam Koşulları (Nem)	%50 ~ %90
9	Çalışma Ortam Koşulları (Kirlilik)	2

2.2.3.6. Faulhaber 50mNm DC mikromotor

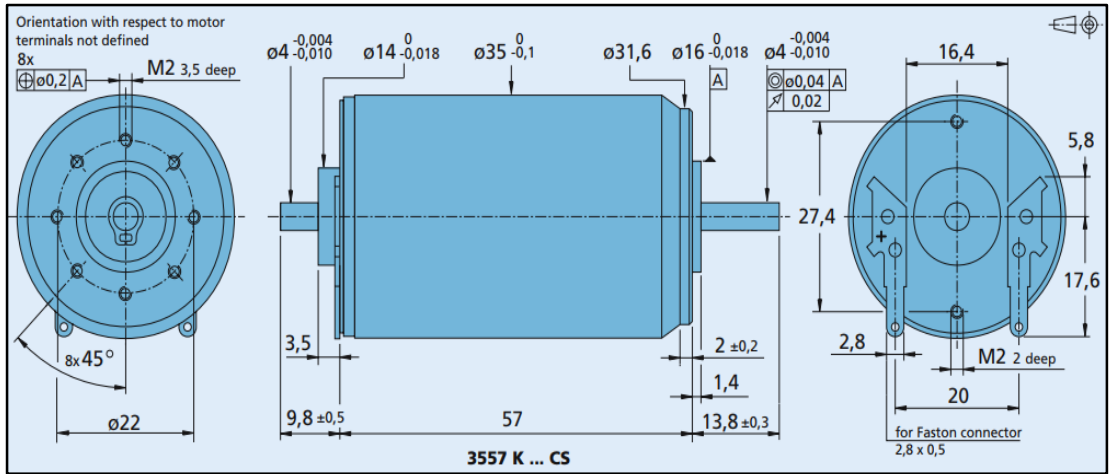
a) Motor genel özellikleri

Üzerinde enkoder ve motor frenini de akuple olarak bulunduran ikinci eklem motoru 50 mNm torka sahip olup sistemde yeralan en güçlü motordur. Motor miline montajlanan sonsuz dişli milinin tahriklenmesini sağlamaktadır. Motor görseli Şekil 2.63'te paylaşılmaktadır.



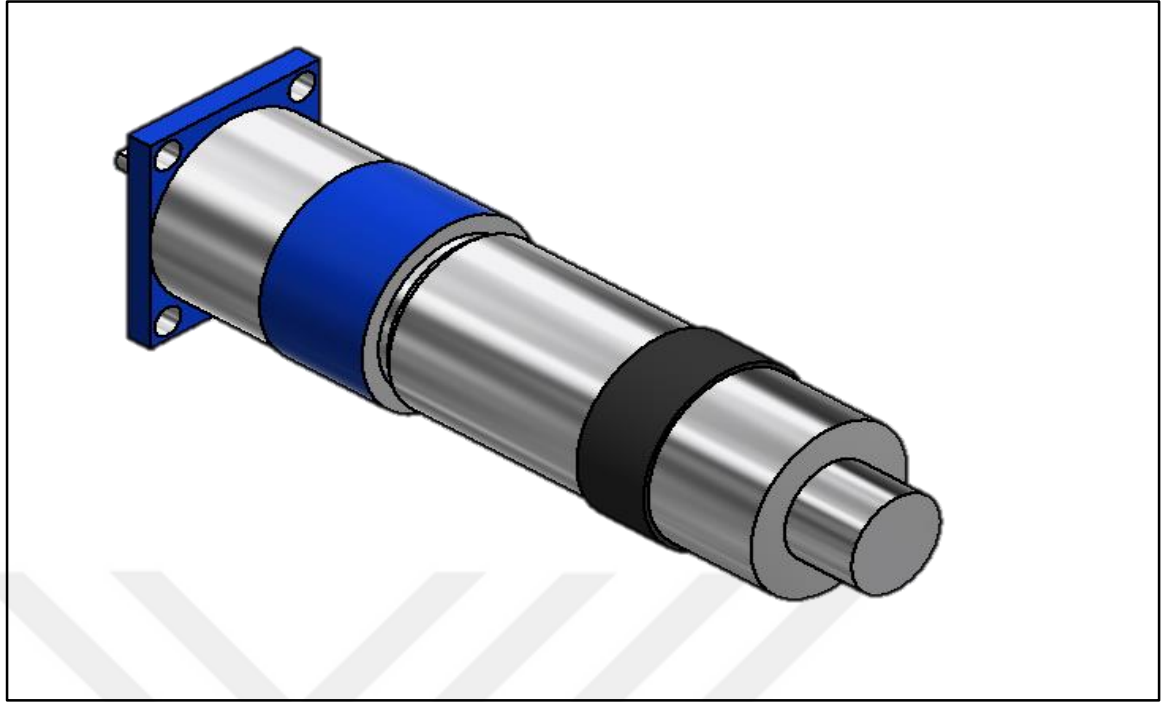
Şekil 2.63. Faulhaber 3557 DC motor fotoğraf

Motor model numarası 3557K020CS'dir. Ayrıca 38/1 redüktör ve HEDS 5500 kodlu enkoder de motorun üzerinde yer almaktadır. Motorun teknik resmi Şekil 2.64'te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.64. Faulhaber 3557 DC motor teknik resim

Motorun iki boyutlu teknik resim verilerine göre robot üzerinde Inventor ortamında montajının yapılabilmesi için üç boyutlu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.65'te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.65. Faulhaber 3557 DC motor 3D resim

b) Motorun teknik özellikleri

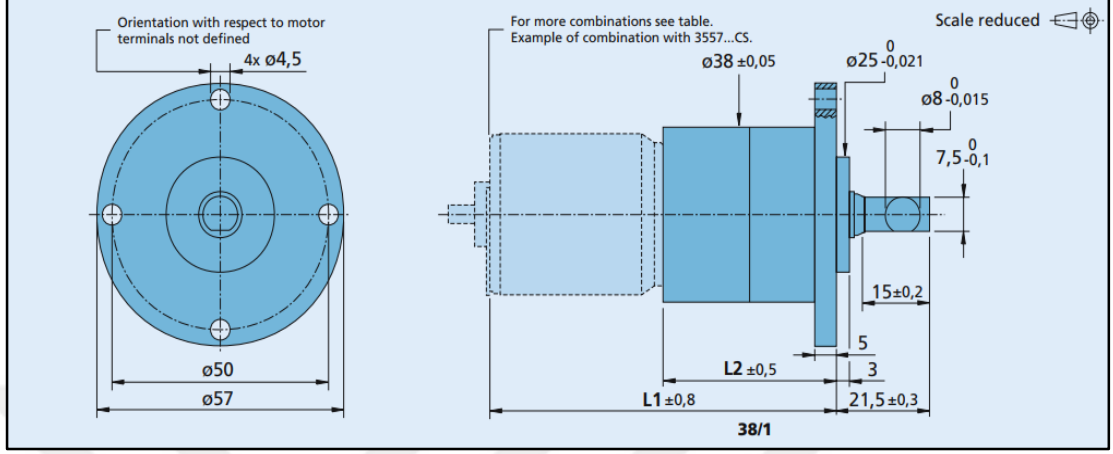
Motorun teknik verileri aşağıdaki Tablo 2.12’de verilmektedir.

Tablo 2.12. Faulhaber 3557 teknik özellikler

Özellik	Simge	020CS	Birim
Nominal Gerilim	U_N	20	V
Terminal Direnci	R	4	Ω
Çıkış Gücü	$P_2 \text{ max.}$	24.3	W
Verimlilik, max	η_{max}	79	%
Yüksüz Hız	n_0	5500	rpm
Yüksüz Akım	I_0	0.07	A
Sıkışma Torku	M_H	169	mNm
Sürtünme Torku	M_R	2.4	mNm
Hız Katsayısı	k_n	279	rpm/V
Arka-EMF Sabiti	k_E	3.59	Mv/rpm
Tork Sabiti	k_m	34.2	mNm/A
Akım Sabiti	k_i	0.029	A/mNm
n-M Eğrisinin Eğimi	$\Delta n/\Delta M$	32.5	Rpm/mNm
Rotor İndüktansı	L	630	μH
Mekanik Zaman Sabiti	τ_m	16	ms
Rotor Eylemsizliği	J	47	gcm^2
Açısal İvme	α_{max}	36	10^3 rad/s^2
Termal Direnç	$R_{\text{th1}}/R_{\text{th2}}$	1.5/9	K/W
Termal Zaman Sabiti	τ_{w1}/τ_{w2}	15/900	s

c) 38/1 Motor dişli kutusu (redüktörü)

Faulhaber 3557 fırçasız DC mikromotor ile birlikte kullanılmış olan 38/1 serisi, 10Nm planet dişli kutusunun teknik resmi Şekil 2.66’da verilmektedir.



Şekil 2.66. Faulhaber 3557 DC motor 38/1 serisi redüktör teknik resim

Burada L1 parametresi Faulhaber 3557 motorlarda kullanılan redüktörün çevrim oranına bağlı olarak değişmektedir. Bu projede 43:1 çevrim oranında redüktör kullanılacak olup bu nedenle L1 parametresinin değeri 104.9 mm’dir. L2 ise 47.9 mm’dir.

38/1 serisi 43:1 çevrim oranına sahip redüktörün teknik özellikleri Tablo 2.13’te paylaşılmaktadır.

Tablo 2.13. Faulhaber 3557 38/1 redüktör teknik özellikler

Özellik Adı	38/1 Serisi
Gövde Malzemesi	Metal
Dişli Mekanizması Malzemesi	Plastik/Çelik
Önerilen max. Giriş Hızı (Devamlı Çalışma)	4000 rpm
Çıkış mili yatağı	Bilye
Max. Mil Yüğü (radyal)	≤300 N
Max. Mil Yüğü (eksenel)	≤300 N
Mil baskı geçme Kuvveti	≤350 N
Operasyon Sıcaklığı	-20...+125°C
Diş kademesi	3
Sürekli Tork	1.4 Nm
Aralıklı Tork	1.9 Nm
Motorsuz Ağırlık	268 g
Max. verimlilik	%70
Dönüş Yönü	=
Çevrim Oranı	43:1

d) HEDS 5500 serisi Faulhaber enkoder

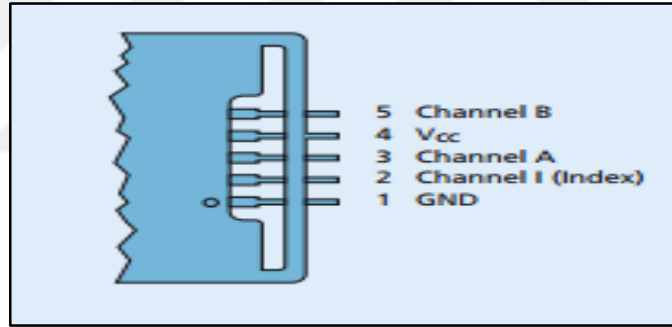
Faulhaber 3557 serisi ikinci eklem motorunda 5500 serisi optik enkoder kullanılmıştır.

Enkodere ait teknik özellikler Tablo 2.14'te paylaşılmaktadır.

Tablo 2.14. Faulhaber 3557 HEDS 5500 enkoder teknik özellikler

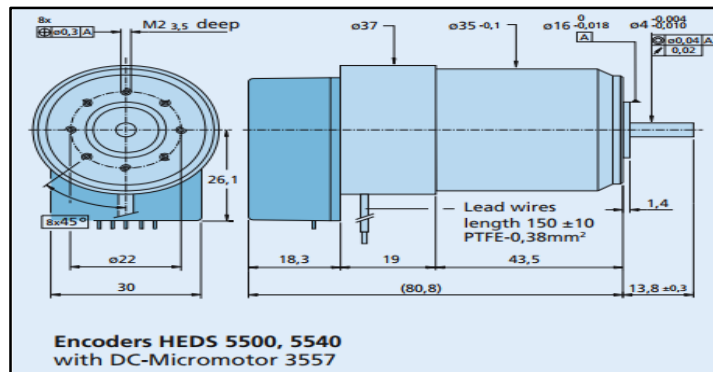
Özellik	Simge	Değer
Sinyal Gerilimi V_{cc}	V DC	4.5..5.5
Akım Tüketimi I_{cc} , Tipik ($V_{cc}=5V$ DC)	mA	17
Sinyal Çıkışı, Kare dalga	Kanal	2
Darbe Genişliği P	$^{\circ}e$	180±45
Faz Değişimi, Kanal A'dan B'ye, Φ	$^{\circ}e$	90±20
Mantık Durumu Genişliği	$^{\circ}e$	90±45
Çevrim	$^{\circ}e$	360±5.5
Sinyal Yükselme / Düşme Süresi	0.25 / 0.25	μs
Frekans Aralığı	100 e kadar	kHz

HEDS 5500 serisi enkoderin pin bağlantıları Şekil 2.67'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.67. Faulhaber HEDS 5500 enkoder

HEDS 5500 serisi Faulhaber enkoder ve 3557 Serisi Faulhaber motor montajı için iki boyutlu teknik resim Şekil 2.68'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.68. Faulhaber enkoder ve motor montaj resmi

2.2.3.7. Servo motor-1 HS-311 HITEC

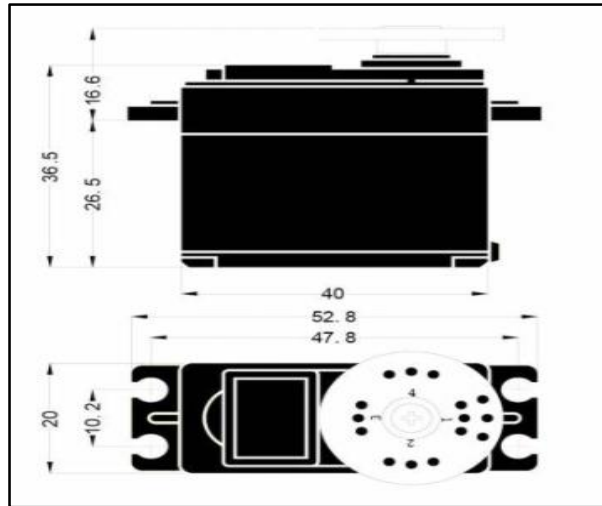
a) Motorun genel özellikleri

Robotun dördüncü, altıncı eklemlerinde ve uç işlevci üzerinde Hitec HS-311 model servo motor kullanılmaktadır. Motor görseli Şekil 2.69’da verilmektedir.



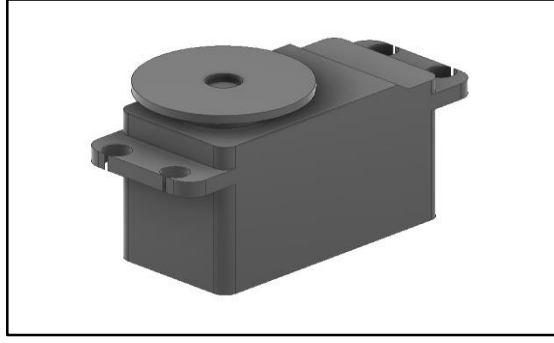
Şekil 2.69. HITEC HS-311 fotoğrafı

Hitec HS-311 model servo motorun birim uzunluklarını belirten resim Şekil 2.70’te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.70. HITEC HS-311 birim ölçüler

Motorun Inventor ortamında montajının gerçekleştirilebilmesi için hazırlanmış olan üç boyutlu tasarımını Şekil 2.71’de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.71. HITEC HS-311 motor 3D tasarım

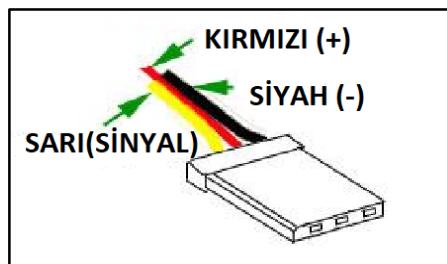
b) Motorun teknik özellikleri

HS-311 servo motorunun çalışması için darbe genişliğinin 0.6 ms'den daha yüksek bir değer olması gerekmektedir. Darbe genişliği 1.5 ms ise HS-311 90° ve darbe genişliği 2ms veya daha büyükse HS-311 180° dönüş gerçekleştirmektedir. Motora ait teknik özellikler Tablo 2.15'te verilmektedir.

Tablo 2.15. HITEC HS-311 teknik özellikler

Teknik Özellik	Değer
Çalışma Gerilimi	4.8V-6.0V DC
Hız	0.19-0.15 sec/60°
Max. Tork	3.02 kg-cm (4.8V) 3.53 kg-cm (6.0V)
Yüksüz Akım	7.4 mA (4.8V)
Yüksüz Akım	7.7 mA (6V)
Dönme Aralığı	180°
Darbe Döngüsü	20 ms
Darbe Genişliği	900-2100 µs

Robot üzerinde üç farklı yerde kullanılan HITEC HS-311 model servo motor için pin bağlantıları Şekil 2.72'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.72. HITEC HS-311 motor pin bağlantısı

2.2.3.8. Servo motor-2 Robo Soul LD-2015

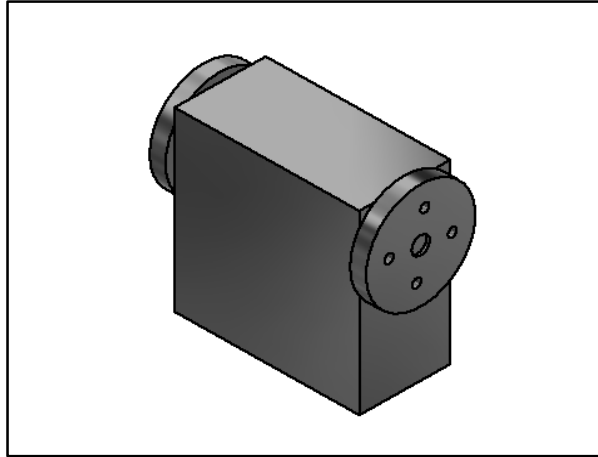
a) Motorun genel özellikleri

Zoro robotun beşinci eklemi üzerinde Robo Soul LD-2015 model servo motor kullanılmaktadır.



Şekil 2.73. Robo-Soul LD-2015 motor

Motorun Inventor ortamında montajının gerçekleştirilebilmesi için hazırlanmış olan üç boyutlu tasarımı Şekil 2.74'te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.74. Robo-Soul LD-2015 motor 3D tasarım

b) Motorun teknik özellikleri

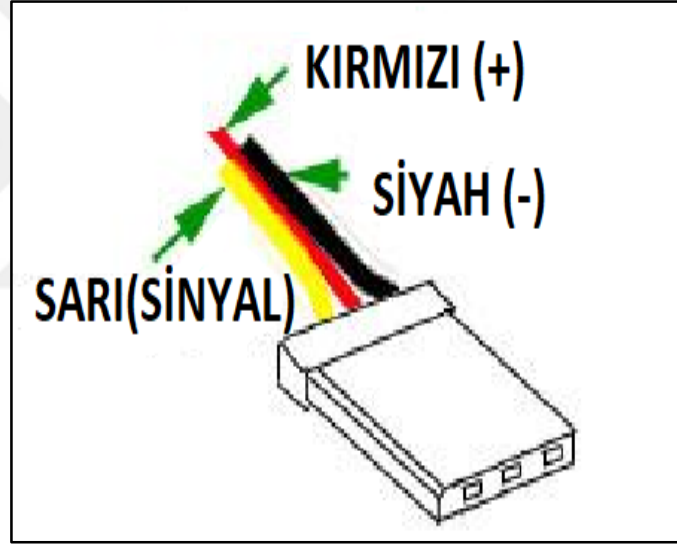
Boyutları 40x20x5 mm olan kendi sınıfına kıyasla yüksek tork üretebilen motorun dişli aksamaları metal olup, iki eksenle çalışabilme özelliğine sahiptir.

Motora ait teknik özellikler Tablo 2.16’da paylaşılmaktadır.

Tablo 2.16. Robo-Soul LD-2015 motor teknik özellikler

Teknik Özellik	Değer
Hız	0.16sn/60°
Duruş Torku	15kg/cm
Çalışma Gerilimi	6-7.4 V
Yüksüz Akım	100mA
Ağırlık	60g
Dönme Aralığı	180°
Darbe Genişliği	0.5ms-2.5ms

Robo-soul LD2015 model servo motor için pin bağlantıları Şekil 2.75’te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.75. Robo-Soul LD-2015 motor pin bağlantıları

2.2.3.9. 37D#4753-54 Pololu fırçalı DC motor

a) 37D#4753 Pololu fırçalı DC motor genel özellikleri

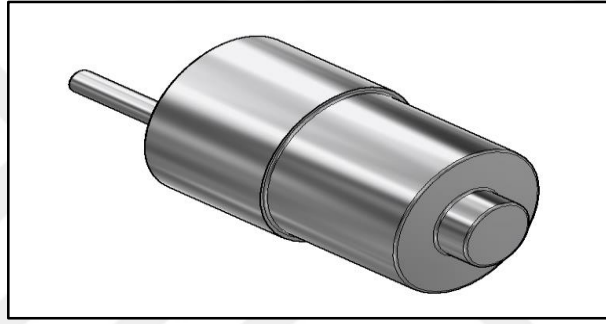
Robot ilk eklem ve üçüncü eklem üzerinde kullanılan 37D#4753 Pololu redüktörlü motor, 50:1 redüktör oranına ve 12V besleme gerilimine sahip bir fırçalı DC motordur. Motorun görseli Şekil 2.76’da paylaşılmaktadır.

Dişli kutusu genellikle düz dişlilerden oluşmaktadır, ancak gürültüyü azaltmak ve verimliliği artırmak için ilk bölümde helisel dişliler bulunmaktadır. Redüktör çıkış mili 16mm uzunluğunda 6mm çapında D şeklindedir.



Şekil 2.76. 37D#4753 pololu DC motor

Motorun Inventor ortamında montajının gerçekleştirilebilmesi için hazırlanmış olan üç boyutlu tasarımı Şekil 2.77’de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.77. 37D#4753 pololu DC motor 3D tasarım

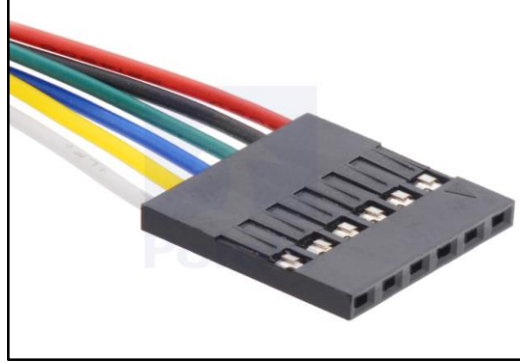
b) Motorun teknik özellikleri

Motorun teknik özellikleri Tablo 2.17’de paylaşılmaktadır.

Tablo 2.17. 37D#4753 pololu DC motor teknik özellikler

Teknik Özellik	Değer
Boyut	37Dx70L mm
Ağırlık	205 g
Mil çapı	6mm
Besleme Gerilimi	12V
Dişli Oranı	50:1
Yüksüz Hız	200 rpm
Yüksüz Akım	0.2A
Duruş Akımı	5.5A
Duruş Torku	21 kg.cm
Max. Çıkış Gücü	10W
Max. Verimlilik	%51
Max. Verimlilikte Hız	180 rpm
Max. Verimlilikte Tork	2.2 kg.cm
Enkoder Çözünürlüğü	64 CPR

37D#4753 Pololu enkoderli DC motora ait kablo pinleri Şekil 2.78'de ve bağlantı bilgilerini içeren Tablo 2.18'de aşağıda paylaşılmaktadır.



Şekil 2.78. 37D#4753 pololu DC motor kablo pinleri

Tablo 2.18. 37D#4753 pololu DC motor kablo pinleri

Renk	Fonksiyon
Kırmızı	Motor Beslemesi
Siyah	Motor Beslemesi
Yeşil	Enkoder GND
Mavi	Enkoder Vcc (3.5-20V)
Sarı	Enkoder Çıkış A
Beyaz	Enkoder Çıkış B

2.2.3.10. Leap motion

Günümüzde bir çok bilim çalışmasına konu olan insan-makine arayüzü geliştirmeleri, robot kontrolünde oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır. İnsan hareketlerinin robota aktarılabilmesi için insan vücudundaki sinyalleri almak amacıyla çeşitli sensörler, görüntü işleme cihazları vb. Elektronik ekipmanlar kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında insan elinden alınan veriler ile altı eksenli robotun hareketleri kontrol edilmektedir. Bu nedenle alınan verilerin doğruluğunu sağlayabilmek büyük bir önem taşımaktadır.

Robotun hareketlerini kontrol edebilmek için kullanılan gelişmiş birim Leap Motion isimli sensördür. Amerika'da Leap Motion isimli şirket tarafından, el hareketlerinin boşluktaki hareketini herhangi bir şeye dokunmaya gerek kalmadan algılamak amacıyla tasarlanmıştır. Bilgisayara USB kanalı ile bağlanarak el hareketlerini üç boyutlu olarak algılayabilme kabiliyetine sahiptir. Şekil 2.79'da ilgili görsel verilmektedir.



Şekil 2.79. Leap Motion-1

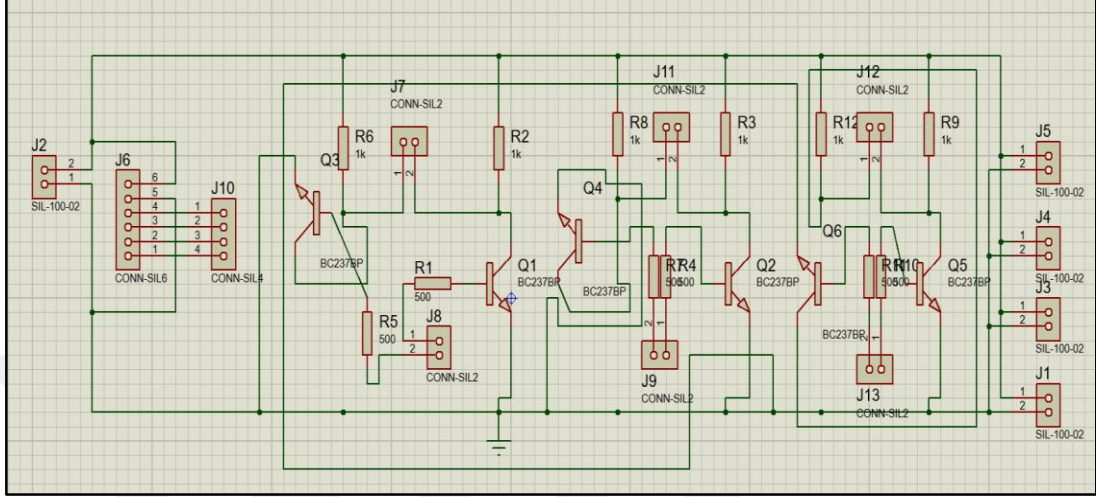
Leap Motion el hareketlerini algılayabilmesi için yukarı bakacak şekilde yerleştirilmelidir. Üzerinde iki monokromatik IR kamera ve üç kızılötesi LED kullanılan cihaz yaklaşık 1 metrelik mesafeye kadar gözlem yapabilmektedir. Ledler desensiz IR ışığı [19] üretmekte olup kameralar saniyede ortalama 200 kare yansıtılan veriler üretir. Alınan veriler USB kablosu ile bilgisayara gönderilir ve Leap motion yazılımı kullanılarak analiz edilmektedir. Sonucunda iki kamera tarafından üretilen 2D pozisyon verileri kıyaslanarak 3D konum verileri sentezlenir. Sensöre ait görsel Şekil 2.80'de verilmektedir.



Şekil 2.80. Leap Motion-2

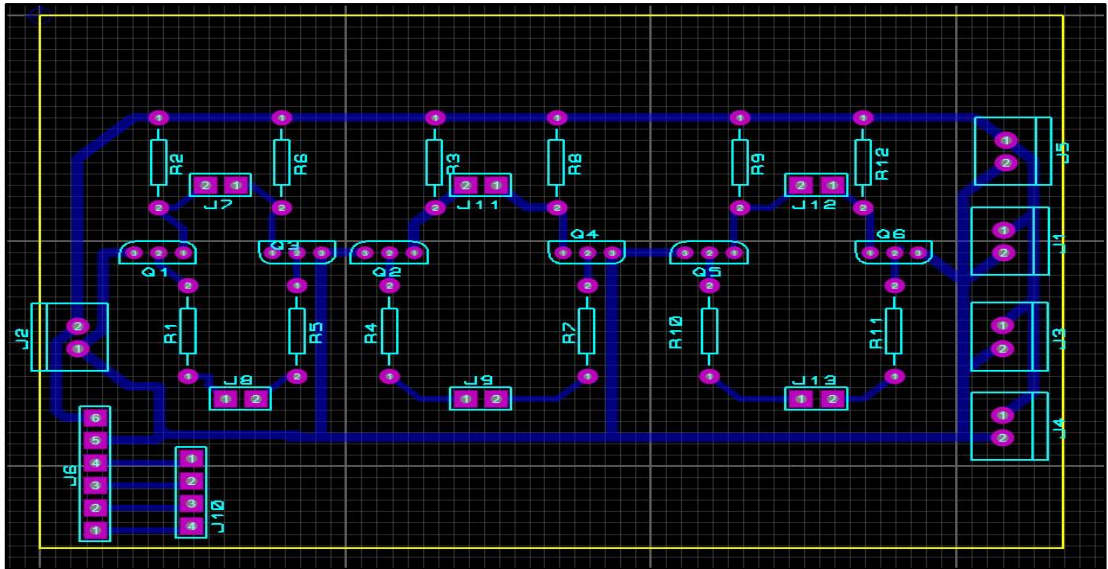
2.2.3.11. Dağıtım kartı

5V besleme geriliminin dağıtımının sağlanması amacıyla tasarlanmış olan PCB kartın Proteus ve Ares programlarında tasarımı Şekil 2.81 ve 2.82’de paylaşılmaktadır.



Şekil 2.81. Dağıtım PCB kartı proteus tasarımı

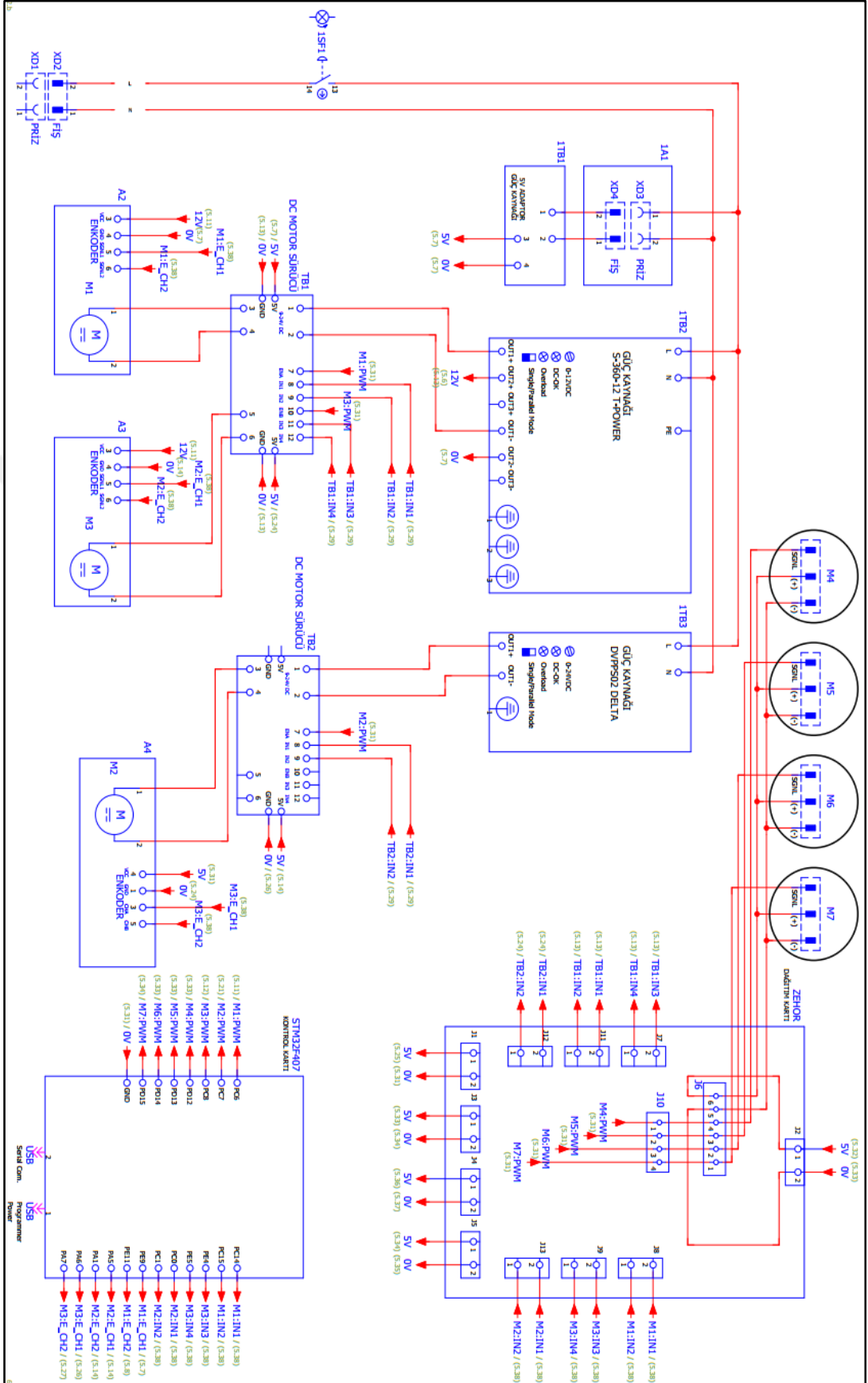
Baskı devre yapılarak hazırlanan kart üzerinde kullanılan pinlerin detaylı gösterimi genel elektrik şemasının hazırlandığı E-plan program alıntısında gösterilmektedir.



Şekil 2.82. Dağıtım PCB kartı ares tasarımı

2.2.4. Elektronik tasarım şemasının hazırlanması

Sistemin tüm elektronik ve elektriksel ekipmanları arasında yapılan bağlantının E-plan programı kullanılarak hazırlanan şeması Şekil 2.83’te paylaşılmaktadır.



Şekil 2.83. ZORO E-Plan şeması

3.2. İleri Kinematik Modeli

İleri kinematik, referans eksen takımına göre uç işlevcinin konum ve yönelimini belirlemek için yapılmaktadır. Bir başka deyişle, eklem uzayından kartezyen uzaya geçişi sağlayan problemi ifade eder. Her bir eklem değişkenin konum ve yönelimlerinin uç işlevcinin konum ve yönelimine olan etkisini belirler.

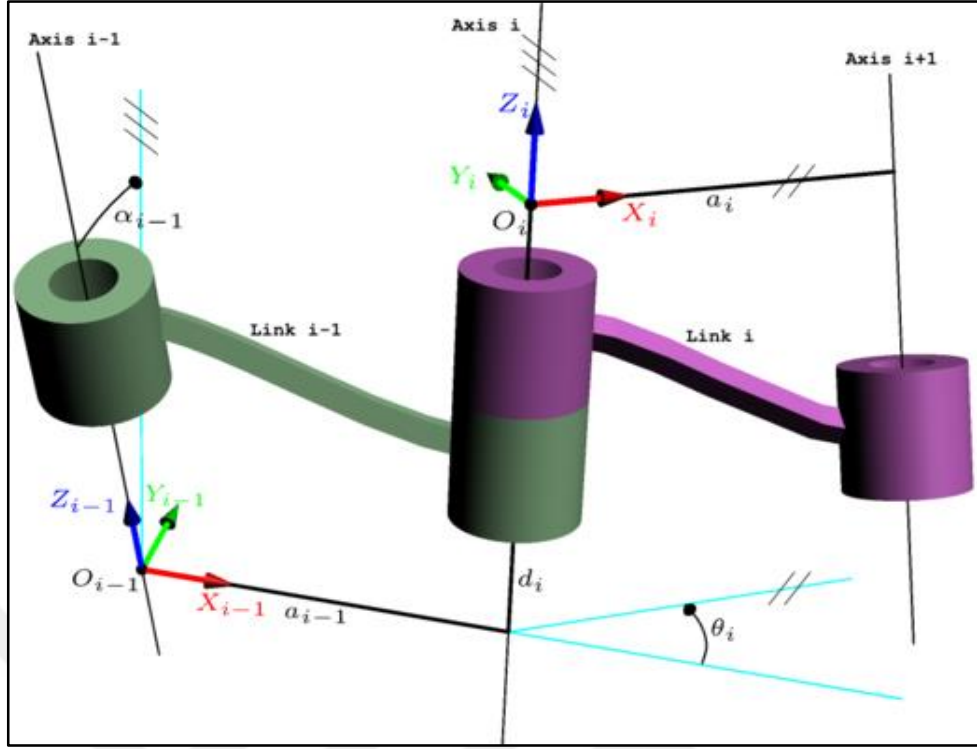
İleri kinematik modeli elde edebilmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanların başında Denavit-Hartenberg yöntemi gelmektedir. Özellikle seri ve tek serbestlik dereceli eklemlere sahip robotlarda kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında da bu yöntem kullanılmıştır.

3.2.1. Denavit-Hartenberg(D-H) yöntemi

Yöntem kullanılırken, “n” sayıda eklemi bulunan bir robotu ele alalım. Bu robotta, i . eklem değişkeni q_i olarak gösterilir. Dolayısıyla eğer ilgili eklem dönel ise q o eksenin açılma konumunu, eğer prizmatik ise doğrusal konumunu ifade etmektedir. D-H yöntemi kullanılırken yapılacak ilk iş, robotun eksenlerine koordinat sistemlerinin yerleştirilmesidir. Dönel eklemlerin dönme eksenlerine, prizmatik eklemlerin ise hareket doğrultusu yönünde olacak şekilde Z_i eksenleri yerleştirilmektedir. Ardından X_i birim vektörleri, takip eden Z_i eksenlerinin birbirlerinin durumuna göre yerleştirilir. Referans koordinat sisteminden son koordinat sistemine kadar, her bir eksen takımının bir önceki eksen takımına göre konum ve yönelim bilgilerini elde etmek için bir transformasyon matrisi ${}^{i-1}_i T$ bulunmalıdır. Bu transformasyon matrisini elde etmek için ardışık iki eksen takımının X_{i-1} doğrultusunda açılma ve doğrusal ötelemeleri ile Z_i doğrultusundaki açılma ve doğrusal ötelemeleri bulunmalıdır. Bu dört bilgi D-H parametreleri olarak ifade edilir [20].

$${}^{i-1}_i T = R_X(\alpha_{i-1})D_X(a_{i-1})R_Z(\theta_i)D_Z(d_i) \quad (3.1)$$

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \quad (3.2)$$
$$\dots \begin{bmatrix} c \theta_i & -s \theta_i & 0 & 0 \\ s \theta_i & c \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.2. DH parametreleri

Şekil 3.2’de görülen bu parametrelerin sözel ifadeleri aşağıda açıklanmıştır:

Z_{i-1} ve Z_i arasında X_{i-1} yönündeki bağ uzunluğu a_{i-1} ,

Z_{i-1} ve Z_i arasında X_{i-1} boyunca ölçülen bağ açısı α_{i-1} ,

X_{i-1} ve X_i arasındaki Z_i yönündeki eklem kaçıklığı d_i ,

X_{i-1} ve X_i arasındaki Z_i boyunca oluşan eklem açısı θ_i ,

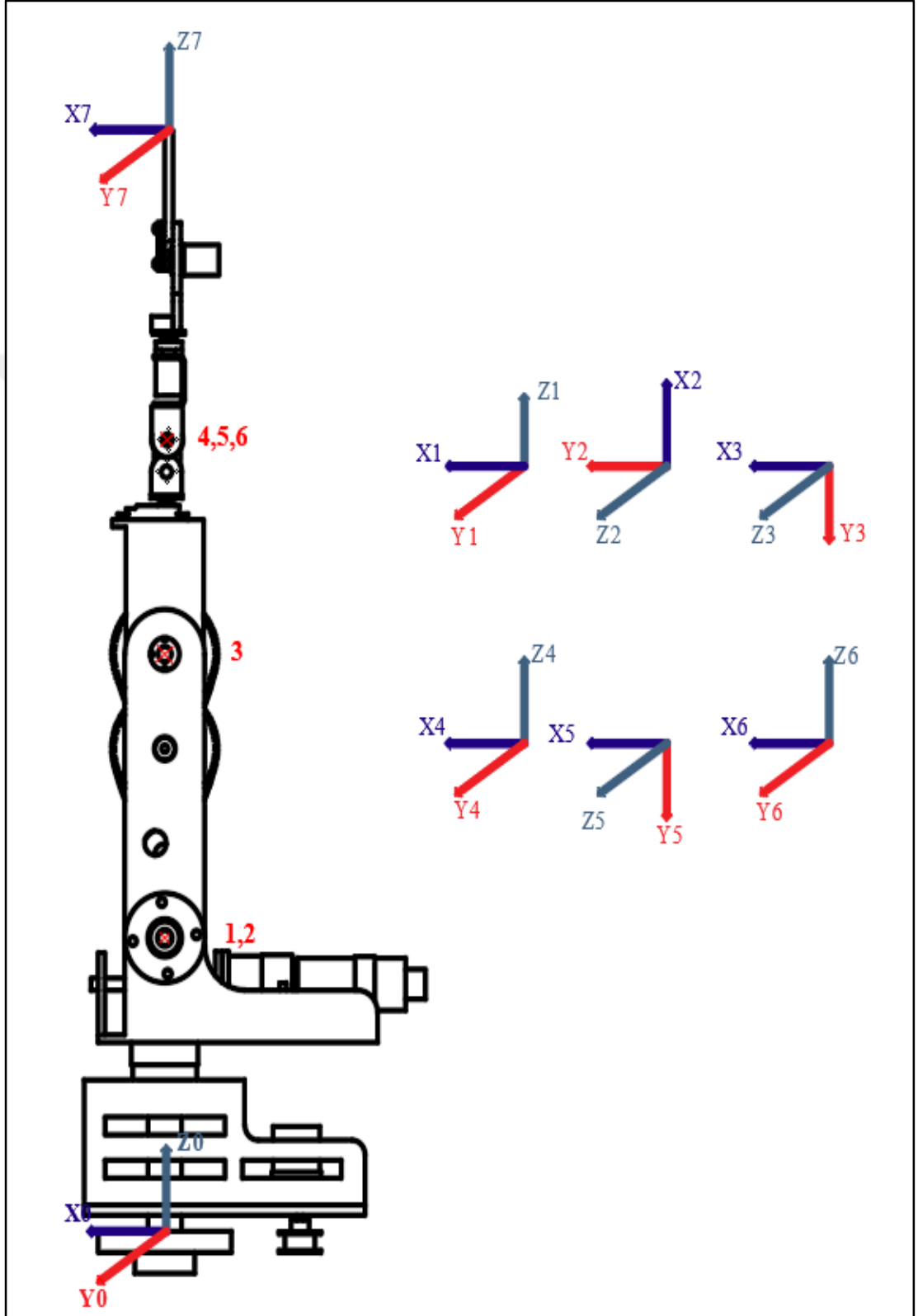
Bu parametrelere bağlı olarak ardışık iki eksen takımının birbirlerine göre konum ve yönelim bilgilerini taşıyan transformasyon matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c \theta_i & -s \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s \theta_i c \alpha_{i-1} & c \theta_i c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} d_i \\ s \theta_i s \alpha_{i-1} & c \theta_i s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

3.2.2. Robotun ileri kinematik modelinin elde edilmesi

Geliştirilen 6 eksenli seri robotun eklemlerine yerleştirilen koordinat sistemleri Şekil 3.3’te gösterilmiştir ve şekilde robotun üzerindeki kırmızı renkteki rakamlar eksen

takımlarının orijin noktalarının bulunduğu yerleri göstermektedir. Bu eksenlere göre hazırlanan D-H tablosu ise Tablo 3.1'deki gibi bulunmuştur.



Şekil 3.3. Robotun eksenlerinin yerleştirilmesi

Tablo 3.1. Robotun DH tablosu

D-H	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0°	0	h_1	θ_1
2	-90°	0	0	$\theta_2 - 90^\circ$
3	0°	h_2	0	$\theta_3 + 90^\circ$
4	90°	0	h_3	θ_4
5	-90°	0	0	θ_5
6	90°	0	0	θ_6
7	0°	0	h_4	0

Bu aşamadan sonra robotun ileri kinematik modelinin oluşturulması için her bir ekleme ait dönüşüm matrisinin bulunması gerekmektedir. Bu doğrultuda Denklem 3.3'teki eşitlik kullanılmaktadır. Her bir eksen takımının bir önceğine göre olan transformasyon matrisleri aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} -s\theta_3 & -c\theta_3 & 0 & h_2 \\ c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -h_3 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$${}^6_7T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Robotun uç işlevcisinin referans koordinat sistemine göre konum ve yönelim bilgisini taşıyan ileri kinematik transformasyon matrisi Denklem 3.11'deki matris çarpımı ile hesaplanır.

$${}^0_7T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T {}^6_7T \quad (3.11)$$

Bu işlemleri gerçekleştiren MATLAB dosyası EK-1'de verilmiştir.

3.3. Ters Kinematik Modeli

Ters kinematik problemi, robotun uç işlevcisinin istenilen bir konum ve yönelime gidebilmesi için eklem değişkenlerinin sahip olması gereken değerlerin hesaplanmasıdır. Dolayısıyla ileri kinematiğin tersine kartezyen uzaydan eklem uzayına geçilmesini sağlamaktadır. Robotun eklem tipleri ve konstrüksiyon özelliklerine bağlı olarak, uç işlevcinin aynı konum ve yönelime gitmesini sağlayan birden fazla çözüm kümesi bulunabilir. Bundan dolayı ters kinematik çözümlemesi yapıldığı zaman robotun en uygun çözümle istenilen yere yönelmesi için seçim yapılmalıdır.

Ters kinematik problemlerinde yaygınca kullanılan yöntemler iki temel grupta toplanmaktadır; analitik ve nümerik yöntemler. Tüm robotların ters kinematik problemi analitik yöntemler kullanılarak çözümlenememektedir. Analitik yöntemin kullanılabilmesi için robotun çeşitli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu yöntemde temel olarak 0'dan n'inci ekleme kadar olan ileri kinematik transformasyon matrisi istenilen konum ve yönelim bilgileri taşıyan parametrik bir transformasyon matrisine eşitlenmektedir.

$${}^0_nT^* = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \dots {}^{n-1}_nT \quad (3.12)$$

$${}^0_nT^* = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Eşitliğin sağ tarafında çarpım durumunda bulunan transformasyon matrislerinin tersi alınarak sola atılır ve çıkan denklemler çözümlenerek eklem değişkenleri bilinenler cinsinden bulunur. Ancak bazı robotlar için birden çok değişkenin çarpımı olan eşitlikler bulunduğu zaman analitik yöntem çözüm vermemektedir. Bu gibi durumlarda Newton yöntemi gibi nümerik çözümlere başvurulmaktadır. Analitik yöntemle çözüme ulaşabilen robot tipleri endüstride çok yaygınca kullanılmakta ve yeni robotlar da bu yöntemlerle çözülebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Tez kapsamında geliştirilen robotta da analitik yöntemle çözülebilen bir tasarım kullanılmıştır.

Tez kapsamında, robotun ters kinematik çözümünde temel analitik çözüm yöntemi kullanılmaktadır bu yöntem ile robotun her bir eklem değişkeninin değeri verilen referans konum ve yönelim ifadelerine göre temel trigonometrik eşitliklerden yararlanılarak hesaplanmaktadır.

ZORO robotunun ters kinematik probleminin analitik olarak çözülebilmesi için Denklem 3.14'teki eşitlik kullanılmıştır.

$${}^0T^* = {}^0T_1T_2^2T_3^3T_4^4T_5^5T_6^6T_7^7 \quad (3.14)$$

Bu eşitlikte 6T ifadesinin tersi ile eşitliğin her iki tarafı çarpılacak olursa pozisyon vektörleri aşağıdaki şekilde gelmektedir:

$${}^0T^* [{}^6T^{-1}] = {}^0T_1T_2^2T_3^3T_4^4T_5^5T_6^6T \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} p_x - h_4r_{13} \\ p_y - h_4r_{23} \\ p_z - h_4r_{33} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_1(h_2s\theta_2 + h_3s\theta_{23}) \\ s\theta_1(h_2s\theta_2 + h_3s\theta_{23}) \\ h_1 + h_2c\theta_2 + h_3c\theta_{23} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Burada önce birinci ve ikinci satırlar taraf tarafa oranlanarak θ_1 , daha sonra da bir ve üçüncü satırlar kullanılarak sırasıyla θ_3 ve θ_2 şu şekilde bulunmuştur:

$$\theta_1 = \text{Atan2}(-\overline{p_y}, -\overline{p_x}) \text{ veya } \theta_1 = \text{Atan2}(\overline{p_y}, \overline{p_x}) \quad (3.17)$$

$$\theta_3 = \text{Atan2}(\pm K_2, K_1) \quad (3.18)$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}(rd - sc, rc + sd) \quad (3.19)$$

Burada belirtilen ifadeler ise aşağıda verilmiştir:

$$a = h_3, \quad b = h_2, \quad c = \overline{p_z} - h_1, \quad d = \frac{\overline{p_x}}{c\theta_1}$$

$$K_1 = \frac{c^2 + d^2 - a^2 - b^2}{2ab}, \quad K_2 = \sqrt{1 - K_1^2}$$

$$r = a * c\theta_3 + b, \quad s = a * s\theta_3$$

$$\bar{p}_x = p_x - h_4 r_{13}, \quad \bar{p}_y = p_y - h_4 r_{23}, \quad \bar{p}_z = p_z - h_4 r_{33}$$

Robotun ilk üç eklem değişkeni bulunduktan sonra θ_4, θ_5 ve θ_6 eklemlerini hesaplamak için ise aşağıdaki rotasyon matrisi eşitliğinden yararlanılır:

$${}^0R^* = {}^0R_3 {}^3R \quad (3.20)$$

Bu eşitlikte, ${}^0R^*$ matrisi ile değeri hesaplanan ilk üç eklem bilgilerini içeren 0R matrisi bilinenlerdir. Dolayısıyla son üç eklem değişkeni de sistematik bir şekilde aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir:

$$[{}^0R^{-1}]_7 {}^0R^* = {}^3R \quad (3.21)$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \bar{r}_{11} & \bar{r}_{12} & \bar{r}_{13} \\ \bar{r}_{21} & \bar{r}_{22} & \bar{r}_{23} \\ \bar{r}_{31} & \bar{r}_{32} & \bar{r}_{33} \end{bmatrix} = [{}^0R^{-1}]_7 {}^0R^* \quad (3.22)$$

Yukarıda verilen matrisin satır ve sütun elemanları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\bar{r}_{11} = c\theta_{23} c\theta_1 r_{11} + c\theta_{23} s\theta_1 r_{21} - s\theta_{23} r_{31} \quad (3.23)$$

$$\bar{r}_{21} = -s\theta_{23} c\theta_1 r_{11} - s\theta_{23} s\theta_1 r_{21} - c\theta_{23} r_{31} \quad (3.24)$$

$$\bar{r}_{31} = -s\theta_1 r_{11} + c\theta_1 r_{21} \quad (3.25)$$

$$\bar{r}_{12} = c\theta_{23} c\theta_1 r_{12} + c\theta_{23} s\theta_1 r_{22} - s\theta_{23} r_{32} \quad (3.26)$$

$$\bar{r}_{22} = -s\theta_{23} c\theta_1 r_{12} - s\theta_{23} s\theta_1 r_{22} - c\theta_{23} r_{32} \quad (3.27)$$

$$\bar{r}_{32} = -s\theta_1 r_{12} + c\theta_1 r_{22} \quad (3.28)$$

$$\bar{r}_{13} = c\theta_{23} c\theta_1 r_{13} + c\theta_{23} s\theta_1 r_{23} - s\theta_{23} r_{33} \quad (3.29)$$

$$\bar{r}_{23} = -s\theta_{23} c\theta_1 r_{13} - s\theta_{23} s\theta_1 r_{23} - c\theta_{23} r_{33} \quad (3.30)$$

$$\bar{r}_{33} = -s\theta_1 r_{13} + c\theta_1 r_{23} \quad (3.31)$$

Aynı şekilde 3R matrisi de şu şekildedir:

$${}^3_7R = \begin{bmatrix} c\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 - s\theta_4 s\theta_6 & -c\theta_4 c\theta_5 s\theta_6 - s\theta_4 c\theta_6 & c\theta_4 s\theta_5 \\ s\theta_5 c\theta_6 & -s\theta_5 s\theta_6 & -c\theta_5 \\ s\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 + c\theta_4 s\theta_6 & -s\theta_4 c\theta_5 s\theta_6 + c\theta_4 c\theta_6 & s\theta_4 s\theta_5 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Bu iki matrisin eşitliğinden son üç eklem değişkenleri şu şekilde bulunmuştur:

$$\theta_5 = \text{Atan2}\left(\pm\sqrt{\bar{r}_{13}^2 + \bar{r}_{33}^2}, -\bar{r}_{23}\right) \quad (3.33)$$

$$\theta_4 = \text{Atan2}\left(\frac{\bar{r}_{33}}{s\theta_5}, \frac{\bar{r}_{13}}{s\theta_5}\right) \quad (3.34)$$

$$\theta_6 = \text{Atan2}\left(-\frac{\bar{r}_{22}}{s\theta_5}, \frac{\bar{r}_{21}}{s\theta_5}\right) \quad (3.35)$$

Robot için yapılan ve yukarıda ifade edilen analitik yöntemde, sırası ile θ_1 , θ_3 , θ_2 , θ_5 , θ_4 ve θ_6 bulunmuştur. θ_1 , θ_3 ve θ_5 açıları, iki farklı çözüme sahip olduğu için robotun ters kinematiğinin çözüm kümesi 8 elemanlı olmaktadır. Bu çözüm kümeleri Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Ters kinematik çözüm kümeleri

ÇK1	ÇK2	ÇK3	ÇK4	ÇK5	ÇK6	ÇK7	ÇK8
$\theta_1(+)$	$\theta_1(+)$	$\theta_1(+)$	$\theta_1(+)$	$\theta_1(-)$	$\theta_1(-)$	$\theta_1(-)$	$\theta_1(-)$
$\theta_3(+)$	$\theta_3(+)$	$\theta_3(-)$	$\theta_3(-)$	$\theta_3(+)$	$\theta_3(+)$	$\theta_3(-)$	$\theta_3(-)$
θ_2	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2
$\theta_5(+)$	$\theta_5(-)$	$\theta_5(+)$	$\theta_5(-)$	$\theta_5(+)$	$\theta_5(-)$	$\theta_5(+)$	$\theta_5(-)$
θ_4	θ_4	θ_4	θ_4	θ_4	θ_4	θ_4	θ_4
θ_6	θ_6	θ_6	θ_6	θ_6	θ_6	θ_6	θ_6

Tüm bu işlemler MATLAB’de gerçekleştirilmiş olup, yazılan kod EK-B’de verilmiştir.

Ters kinematik probleminin çözümü sonucunda elde edilen sekiz çözüm kümesinden en doğru çözüm kümesini seçmek için aşağıdaki işlemler sırasıyla gerçekleştirilmektedir.

Öncelikle ileri kinematik ile her birçözüm kümesinin doğruluğu test edilmektedir.

Sonrasında mekanik tasarım kısmında belirlenen ve belirtilen eklem çalışma sınırlarının dışında kalan tüm çözüm kümeleri geçersiz kılınmaktadır. Hala birden fazla çözüm kümesi mevcut ise aşağıda denklem 3.36'da paylaşılan enerji fonksiyonuna göre enerji minimizasyonu yapılarak, uç işlevcinin istenen noktaya ve yönelime gidebilmesi için en uygun çözüm kümesi seçilir.

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{i,\text{ref}} - \theta_i)^2} \quad (3.36)$$

3.4. Robotun Jakobiyen Analizi

Robotun ileri ve ters kinematiği, eklemlerin birbirlerine göre konumları hakkında veri oluştururken, Jakobiyen matrisi eklem değişkenlerinin hızları ile uç işlevcinin doğrusal ve açısal hızları arasındaki geçişi sağlamaktadır. Bu matris $6 \times n$ boyutta olup n eklem değişkeni sayısını ifade etmektedir. Bu tez kapsamında Jakobiyen matrisinin ilk üç satırını oluşturan ve doğrusal hızlarla ilgili olan kısmı J_v doğrudan türevalma yöntemi ile hesaplanırken, son üç satırı oluşturan ve açısal hızlarla ilgili olan kısmı J_ω ise rotasyon matrislerinin içerisindeki ilgili kısımdan alınmıştır. Doğrudan türevalma yöntemi kullanılırken uç işlevcinin referans koordinat sistemine göre konum bilgileri p_x , p_y ve p_z 'nin her bir ekleme göre kısmi türevleri bulunur.

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$J_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial q_1} & \frac{\partial p_x}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial p_x}{\partial q_{n-1}} & \frac{\partial p_x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial p_y}{\partial q_1} & \frac{\partial p_y}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial p_y}{\partial q_{n-1}} & \frac{\partial p_y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial p_z}{\partial q_1} & \frac{\partial p_z}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial p_z}{\partial q_{n-1}} & \frac{\partial p_z}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$J_\omega = [{}^0R\hat{Z}_1\xi_1 \quad {}^0R\hat{Z}_2\xi_2 \quad \dots \quad {}^{n-1}R\hat{Z}_{n-1}\xi_{n-1} \quad {}^nR\hat{Z}_n\xi_n] \quad (3.39)$$

Her eklemin açısal ve doğrusal hızları bulunurken, önceki eklemlerin Jakobiyen hesabından faydalanılmaktadır, bu nedenle eklemlerin açısal veya prizmatik olması

durumu tüm Jakobiyeni etkilemektedir. Prizmatik eklemlerin açısal hızlara etkisi bulunmadığından bunu ifade etmek için ξ_i ifadesi J_ω 'nın içine çarpan olarak eklenmiş olup bu parametre dönel eklemlerde 1, prizmatik eklemlerde ise 0'dır. Aynı zamanda \hat{Z}_i ise $[0 \ 0 \ 1]^T$ vektörünü gösterir.

Burada uç işlevcinin hızı ile eklem hızları arasındaki bağıntı şu şekilde yazılmaktadır:

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (3.40)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_{n-1} \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Yukarıda u_x , u_y ve u_z ile ω_x , ω_y ve ω_z uç işlevcinin sırasıyla X, Y ve Z eksenindeki doğrusal hızları ve açısal hızlarıdır. \dot{q} matrisi ise eklem değişkenlerinin hızlarını ifade etmektedir. Tez kapsamında geliştirilen ZORO robotunun 6 adet eklem değişkeni bulunmaktadır ve oluşan Jakobiyen matrisi parametrik olarak bulunmuştur.

$$J = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} & j_{14} & j_{15} & j_{16} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & j_{24} & j_{25} & j_{26} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} & j_{34} & j_{35} & j_{36} \\ j_{41} & j_{42} & j_{43} & j_{44} & j_{45} & j_{46} \\ j_{51} & j_{52} & j_{53} & j_{54} & j_{55} & j_{56} \\ j_{61} & j_{62} & j_{63} & j_{64} & j_{65} & j_{66} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Bu matrisin elemanlarının bulunmasını sağlayan MATLAB kodu EK-A'da verilirken, matris elemanlarının açık şekilde yazımı EK-C'dedir.







4. DİNAMİK MODEL

4.1. Giriş

Bu bölümde ZORO robotunun dinamik modelinin oluşturulması ele alınmıştır. Dinamik, cisimlerin maruz kaldıkları kuvvetleri ve bu kuvvetlerin etkisiyle oluşan hareketleri inceleyen mekanik bilim alanıdır. Tez kapsamında dinamik modeli elde etmek için Lagrange-Euler denklemleri kullanılmıştır. Bu yöntem enerji tabanlı bir yaklaşımdır ve sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjilerini içeren Lagrangian'ı bulunur ve hareket denklemleri de bu sayede elde edilebilir.

Robotun dinamiği ile ilgili iki farklı problem bulunmaktadır. İlk problem, robot eklemlerinin konumları, hızları ve ivmelerine verilen yörüngeyi takip edebilmek için gerekli olan eklem torklarının hesaplanmasını sağlayan ters dinamik problemidir. Diğer problem ise eklem torkları verilerek ivme, hız ve açıların elde edilmesini içeren ileri dinamiktir. Bu bölümde bu problemler irdelenmiştir.

Ayrıca Inventor'de tasarlanan üç boyutlu mekanik modelin MATLAB – Simscape ortamına aktarılmasıyla da dinamik model geliştirilmiştir. Inventor programında parçalara malzeme ataması yapıldığı için, MATLAB'e aktarıldığında dinamik parametreler (kütle, atalet vb.) de otomatik olarak da hesaplanmaktadır hesaplanan değerler Şekil 4.1'de verilmektedir.

Kütle merkezinin dönme merkezine olan uzaklıkları (/mm)			İlgili bağ için kendi ağırlık merkezine göre ifade edilmiş Kütle Atalet Tensörü Parametreleri -/(kg·mm ²)										Bağ Ağırlığı/ kg	Bağ Numarası	ZORO robotun Inventor ortamında tasarlanmış Üç Boyutlu Bağ Modeli		
x	y	z	I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}	I _{xy}	I _{yz}	I _{xz}	I _{yx}	I _{zy}	I _{zx}	I _{xy}	I _{yz}	I _{xz}			
-47.542	0	-78.005	10572.06	0.059	3802.042	0.059	17290.493	0.007	3802.042	0.007	9058.911	2.035	Bağ 2				
86.295	1.263	-17.659	1477.554	26.017	515.407	26.017	4461.891	-10.538	515.407	-10.538	3423.855	0.923	Bağ 3				
0.819	-32.331	-0.319	0.554	28.286	-0.121	28.286	433.858	3.747	-0.121	3.747	899.802	0.554	Bağ 4				
-0.04	0	-11.647	23.906	0	0.058	0	14.573	0	0.058	0	13.791	0.075	Bağ 5				
-2.584	-38.391	-6.776	32.482	-0.43	-0.33	-0.43	16.94	-3.153	-0.33	-3.153	20.776	0.054	Bağ 6				
9.921	-0.206	118.945	69.603	-0.074	-0.447	-0.074	57.278	0.088	-0.447	0.088	36.555	0.088	Bağ 7				

Şekil 4.1. ZORO robot dinamik model parametreleri

4.2. Robot Dinamiğinde Lagrangian Fonksiyonu

Lagrangian, hareket eden bir cismin kinetik-potansiyelini gösteren bir fonksiyondur. Robot dinamiğinde Lagrangian (L), robottaki her gövdenin sahip olduğu kinetik enerjilerin toplamı (K) ile potansiyel enerjilerin toplamının (P) arasındaki farktır[21]:

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q) \quad (4.1)$$

Burada q dönel eklemler için eklem açısını, prizmatik denklemler için ise eklem için ise yapılan doğrusal deplasmanı gösterirken \dot{q} ise eklem hızlarını ifade eder. Robotun sahip olduğu toplam kinetik enerjiyi yazacak olursak:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (V_i)^T m_i V_i + (\omega_i)^T I_i \omega_i \quad (4.2)$$

olarak yazılır. Buradaki m_i i . gövdenin kütesini, I_i ise i . gövdenin ağırlık merkezinin referans koordinat merkezine göre atalet tensörünü ifade etmektedir. Denklemdaki doğrusal ve açısal hızlar robot eklem hızları cinsinden yazılacak olursa Jakobiyen matrisinin de yardımıyla şu şekilde bir eşitlik elde edilir:

$$V_i = J_v \dot{q} \quad (4.3)$$

$$\omega_i = J_\omega \dot{q} \quad (4.4)$$

Denklem 4.3 ve 4.4'ü denklem 4.2'de yerine yazacak olursak;

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n \left[(J_{v_i})^T m_i J_{v_i} + (J_{\omega_i})^T I_i J_{\omega_i} \right] \dot{q} \quad (4.5)$$

ifadesi elde edilir. Burada toplam formülü içerisindeki terime kütle (mass) matrisi denir.

$$D(q) = \sum_{i=1}^n \left[(J_{v_i})^T m_i J_{v_i} + (J_{\omega_i})^T I_i J_{\omega_i} \right] \quad (4.6)$$

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (4.7)$$

Robotun sahip olduğu potansiyel enerji ifadesi ise şu şekilde bulunabilir:

$$P(q) = - \sum_{i=1}^n m_i g h_i \quad (4.8)$$

Burada g yerçekimi ivmesi, h_i ise i . gövdenin referans koordinat sistemine göre yer çekiminin yönü doğrultusundaki konumudur. Lagrangian fonksiyonu ise aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} + mgh \quad (4.9)$$

4.3. Lagrangian Fonksiyonu Yardımıyla Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Robotun hareket denklemlerinin elde edilmesi için kullanılan formül şu şekildedir:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (4.10)$$

Yukarıda τ , eklemlerde aktüatörler tarafından uygulanan $n \times 1$ boyutlu tork vektörüdür. Yukarıdaki ifade L fonksiyonunun potansiyel ve kinetik enerji olarak ayrılması ile şu şekilde de yazılabilir:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial K}{\partial q} + \frac{\partial P}{\partial q} = \tau \quad (4.11)$$

Buradaki ifadeler robotlar için çözümlenecek olursa denklem 4.12 elde edilir:

$$\ddot{q} = D^{-1}(q) [\tau - C(q, \dot{q}) - G(q)] \quad (4.12)$$

Bu denklemde ilk terim yukarıda da söz edilen $n \times n$ 'lik $D(q)$ kütle matrisidir. İkinci terim ise coriolis ve merkez kaç kuvvetlerini içeren $n \times 1$ 'lik $C(q, \dot{q})$ Coriolis vektörüdür. Son terim ise yer çekimi kuvvetlerini içeren $n \times 1$ 'lik $G(q)$ yer çekimi vektörüdür. Bu ifade robot dinamik denklemdir. ZORO'nun Lagrange-Euler tabanlı dinamik modeli EK-D'de verilen yazılım ile oluşturulmuş EK-E'de de bu modelin yer çekimi vektörü verilmiştir.

4.4. Robotun Yörünge Planlaması

Tez kapsamında yapılan ters dinamik problemini çözmek için, her bir ekleme ayrı ayrı yörüngeler tanımlanmıştır. Bu yörüngeler oluşturulurken beşinci dereceden bir polinom kullanılmıştır. Her bir eklemin t zamanındaki konum, hız ve ivme bilgileri oluşturulan ve aşağıda açık şekilde ifade edilen denklemlerle bulunmaktadır.

$$\theta(t) = s_0 + s_1 t + s_2 t^2 + s_3 t^3 + s_4 t^4 + s_5 t^5 \quad (4.13)$$

$$\dot{\theta}(t) = s_1 + 2s_2t + 3s_3t^2 + 4s_4t^3 + 5s_5t^4 \quad (4.14)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2s_2 + 6s_3t + 12s_4t^2 + 20s_5t^3 \quad (4.15)$$

$$s_0 = \theta_0, s_1 = \dot{\theta}_0, s_2 = \frac{\ddot{\theta}_0}{2} \quad (4.16)$$

$$s_3 = \frac{20(\theta_f - \theta_0) - (8\dot{\theta}_f + 12\dot{\theta}_0)t_f + (\ddot{\theta}_f - 3\ddot{\theta}_0)t_f^2}{2t_f^3} \quad (4.17)$$

$$s_4 = \frac{30(\theta_0 - \theta_f) + (14\dot{\theta}_f + 16\dot{\theta}_0)t_f + (3\ddot{\theta}_0 - 2\ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^4} \quad (4.18)$$

$$s_5 = \frac{12(\theta_f - \theta_0) - 6(\dot{\theta}_f + \dot{\theta}_0)t_f - (\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^5} \quad (4.19)$$

Robottan istenen hareketlerin gerçekleştirilmesi için her bir eklemdaki aktüatörün sisteme sağlaması gereken tork değerleri, yukarıda verilen denklemlerden elde edilen konum, hız ve ivme verilerinin dinamik modele verilmesi ile hesaplatılmıştır.

4.5. Geliştirilen Robot Kontrolörü

Sistemin hedef pozisyon ve yöneline gidebilmesi için kontrolör tasarımı yapılması gerekmektedir. Tez kapsamında kontrol işleminin gerçekleştirilmesi için PID tabanlı kontrolör tasarlanmıştır. PID kontrolör hakkında temel bilgileri ve ZORO robotu için MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan kontrol modeli ile alakalı bilgileri aşağıdaki alt başlıklarda, gerçek zamanlı kontrol ile alakalı bilgileri ise deneysel sonuçlar bölümü içerisinde yer verilmektedir.

4.5.1. PID kontrolör

PID kontrolör, endüstride yaygın bir şekilde kullanılan ve uygulaması kolay olan kontrolörlerden biridir. Kontrol edilen değişkenden alınan geri besleme ile bu değişkenin referans değeri arasındaki farkı yani hata sinyalini minimum seviyede tutmak amaçlanmaktadır. Doğrusal bir kontrol yöntemi olan PID'nin etkinliği, uygulandığı sistemin doğrusal olmayan bileşenleri arttıkça azalmaktadır.

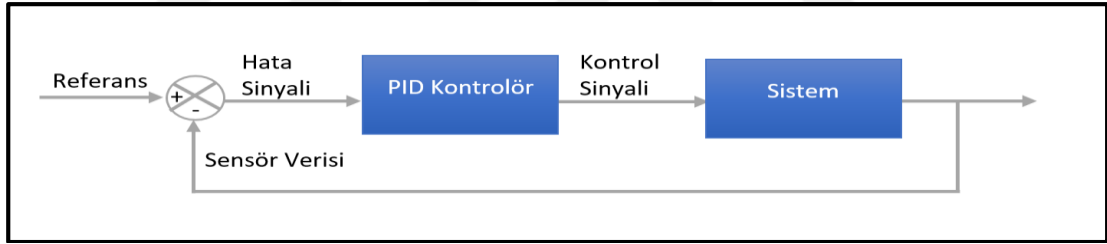
Bu kontrol yönteminde kontrol sinyali üç temel bileşenden elde edilir. Bunlardan ilki oransal sabit K_p ile hata sinyalini çarpılmasıyla elde edilir. Buradaki amaç çıkışın hızlı bir şekilde referans değerine yaklaşmasını sağlamaktır. Fakat bu yaklaşım aynı zamanda aşım oluşmasına neden olmakta ve tek başına kullanıldığında kalıcı durum

hatasına yol açmaktadır. Kalıcı durum hatasını yok etmek için K_I integral sabiti kullanılmaktadır. Hataların toplamı ile çarpılan bu parameter sonucu elde edilen ikinci bileşen sistemin derecesini arttırarak kalıcı durum hatasının yok edilmesini sağlamaktadır. Son olarak K_p katsayısı da son iki hata arasındaki fark ile çarpılarak PID kontrolörünün üçüncü bileşeni elde edilmektedir. Bu parametrenin amacı ise aşımı azaltmaktır.

Genel olarak bu kontrolörler ihtiyaç durumuna göre kullanılan parametrelerin adıyla anılarak P, PI, PD, PID formlarında da kullanılabilirler. Matematiksel olarak kontrolör çıkışı; $e(t)$ hata sinyali, $r(t)$ giriş sinyali, $y(t)$ sistemin çıkış sinyali, $u(t)$ kontrolcü çıkışını ifade edecek olursa kontrol sinyali aşağıda verilen denklemlerle bulunmaktadır:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.20)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.21)$$



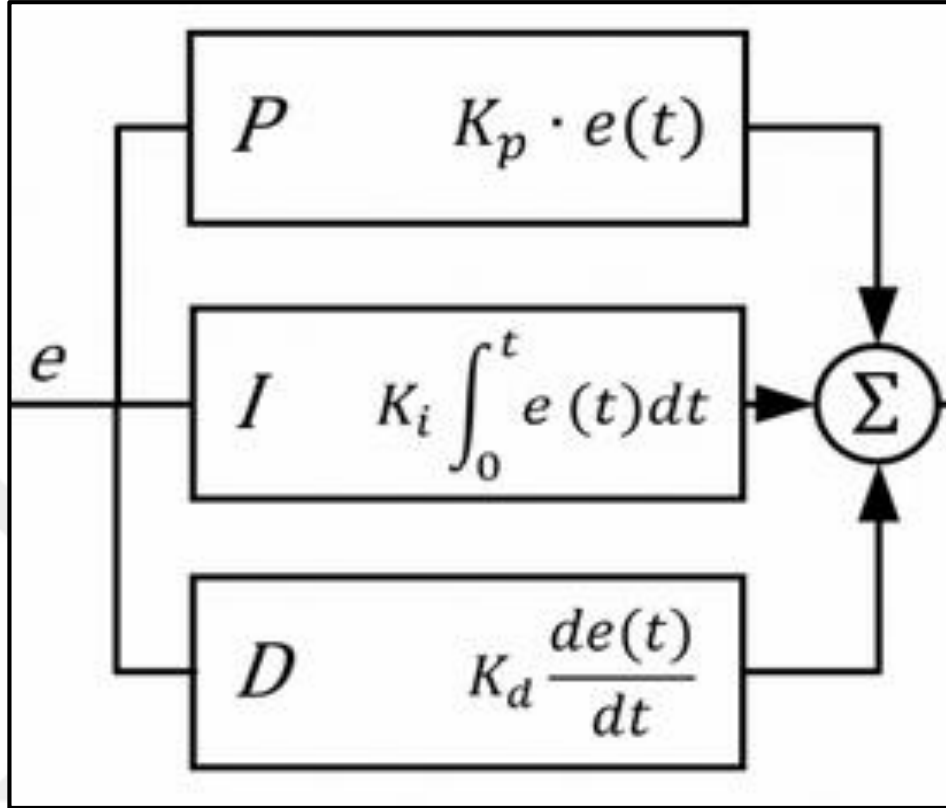
Şekil 4.2. PID kontrol şeması

PID katsayılarının artışının sistemin geçici durum parametrelerine etkisi Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. PID katsayıları

Katsayılar	Aşım	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
K_p	Artar	Azalır	Etkisi az	Azalır
K_I	Artar	Azalır	Artar	Yok eder
K_D	Azalır	Etkisi az	Azalır	Etkisi az

PID kontrolörün iç yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu şema, denklem 4.20'de verilen ifadeyi net şekilde göstermektedir.

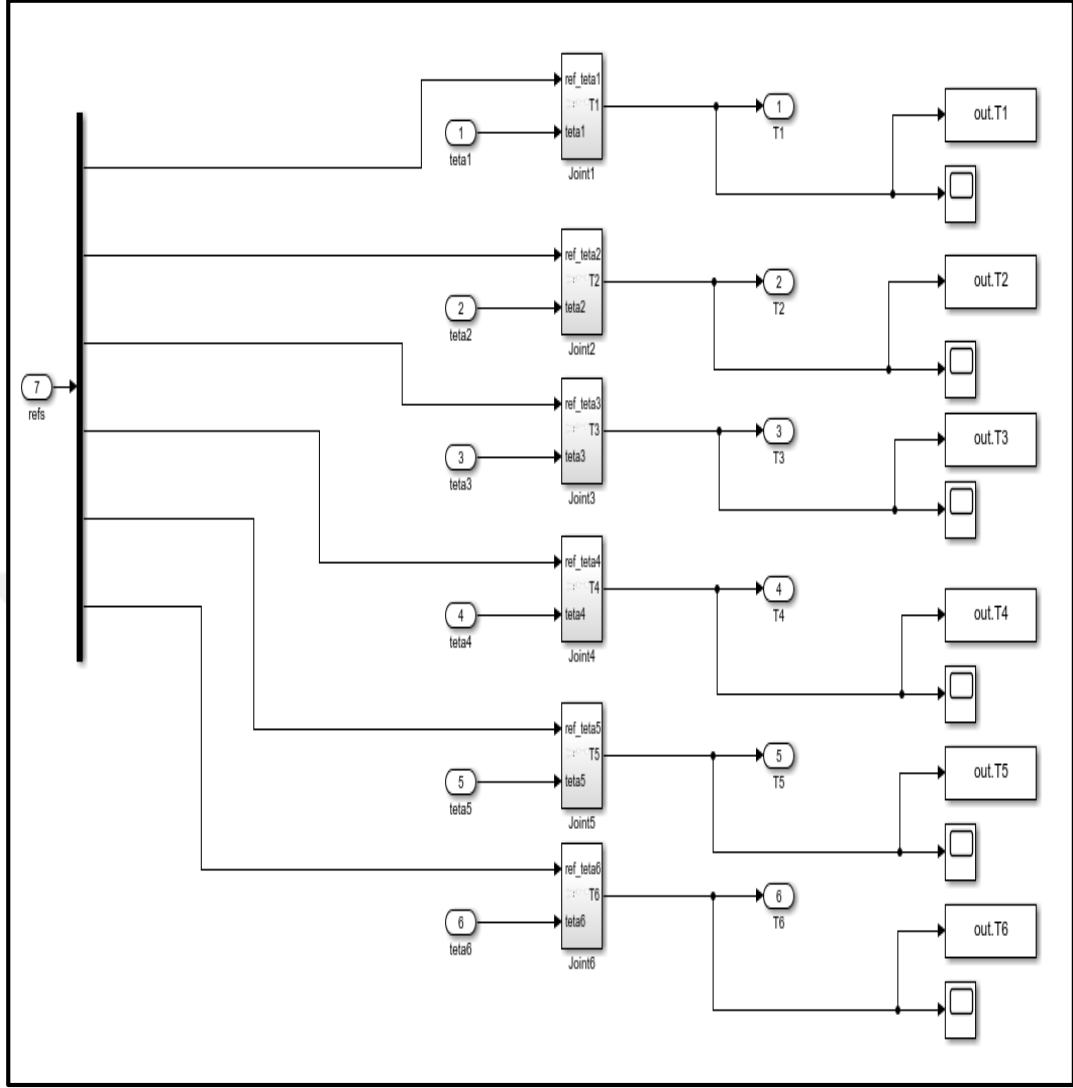


Şekil 4.3. PID kontrolör iç yapısı

4.5.2. MATLAB/Simulink kontrolör modeli

Tez içerisinde PID kontrol yöntemi hem simulasyon hem de gerçek zamanlı çalışmalarda kullanılmış olup sisteme verilen kontrol sinyali ve sistemden alınan veriler ilerleyen bölümde paylaşılmıştır. Burada simulasyon ortamında kullanılan blokla ilgili bilgi verilecektir.

MATLAB-Simulink ortamında oluşturulan dinamik modelde, robotun hareketi için kartezyen uzayda verilen konum ve yönelim referans verisi ilk olarak ters kinematik fonksiyonuna girerek eklem uzayı referans verileri oluşturulmaktadır. Bu referans verileri ile robotun o anki eklem açıları kullanılarak yörünge planalyıcısında yörünge hesaplanmaktadır. Yani tüm eklemlerin zamana bağlı açı referans değerleri elde edilmekte ve kontrol alt sistemine gönderilmektedir. Bu alt sistemin içerisinde, her bir eklem için ayrı olmak üzere 6 adet PID kontrolör bloğu kullanılmıştır. Tasarlanan kontrol bloğu Şekil 4.4'te verilmiştir.



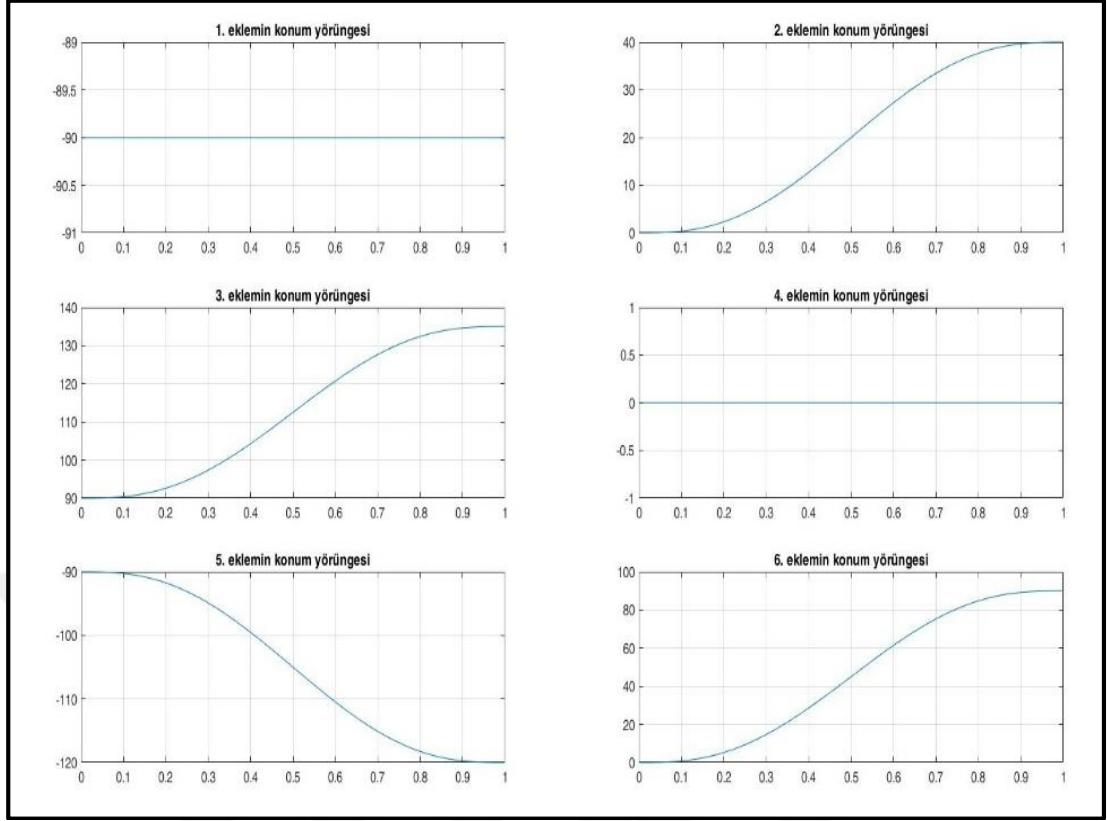
Şekil 4.4. MATLAB/Simulink kontrolör alt sistemi

Bu alt sistem kullanılarak robotun istenen konuma en kısa sürede oturması ve aşımaların da en az seviyede tutulması amaçlanmıştır ve bu hedefe ulaşılmıştır.

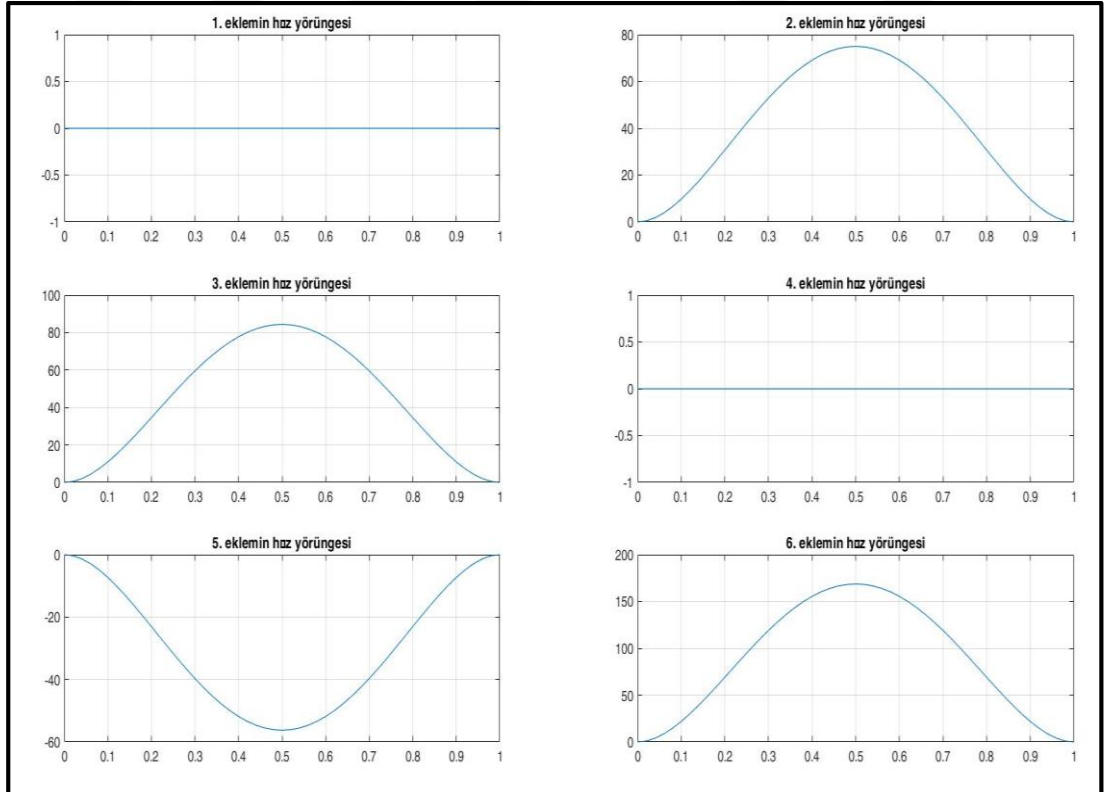
4.6. Ters Dinamik Model

Bir önceki alt bölümde bahsedilen işlemler gerçekleştirilerek sistemin ters dinamik modeli elde edilmiştir. MATLAB-Simulink programında oluşturulan ters dinamik modelinin şeması EK-F’te sunulmuştur.

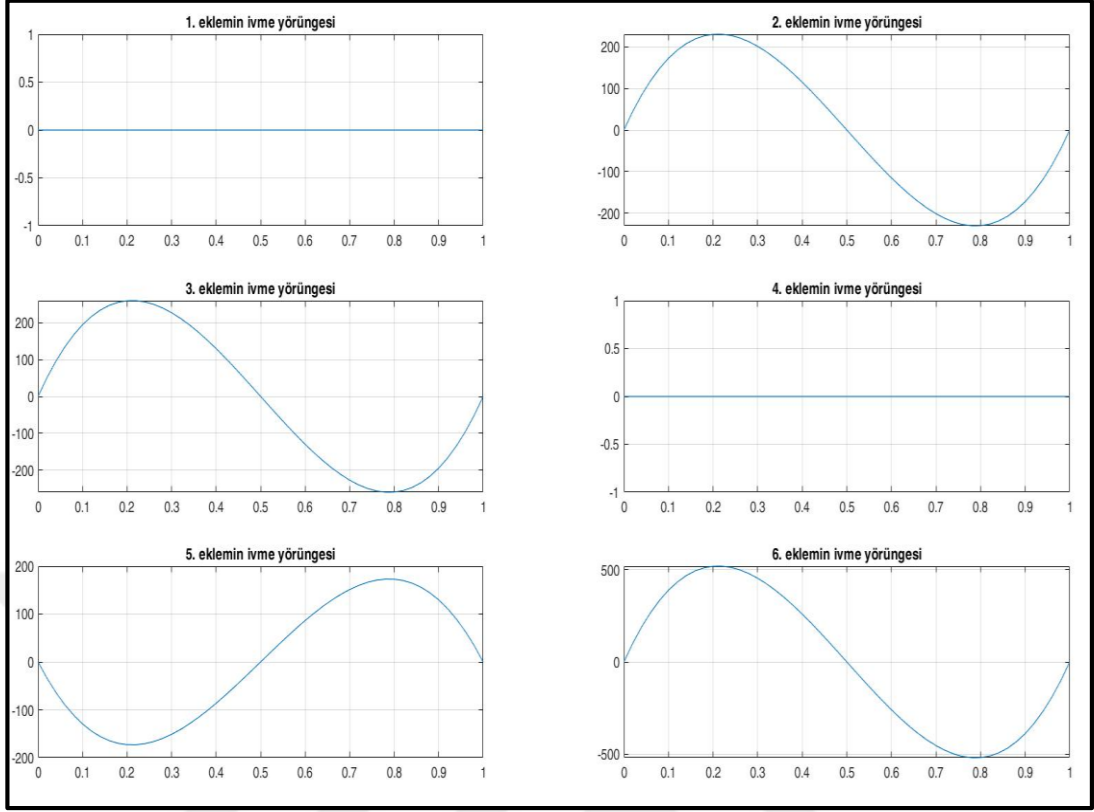
$\theta(0) = \{-90,0,90,0, -90,0\}$, $\dot{\theta}(0) = \{0,0,0,0,0,0\}$, $\ddot{\theta}(0) = \{0,0,0,0,0,0\}$ ve $(t_f) = \{-90,40,135,0, -120,90\}$, $\dot{\theta}(t_f) = \{0,0,0,0,0,0\}$, $\ddot{\theta}(t_f) = \{0,0,0,0,0,0\}$ olarak verilen eklemlerin konum, hız, ivme başlangıç ve son değerleri için oluşturulan yörüngeler sırasıyla Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7’de, eklemlerin torqları ise Şekil 4.8’de verilmiştir.



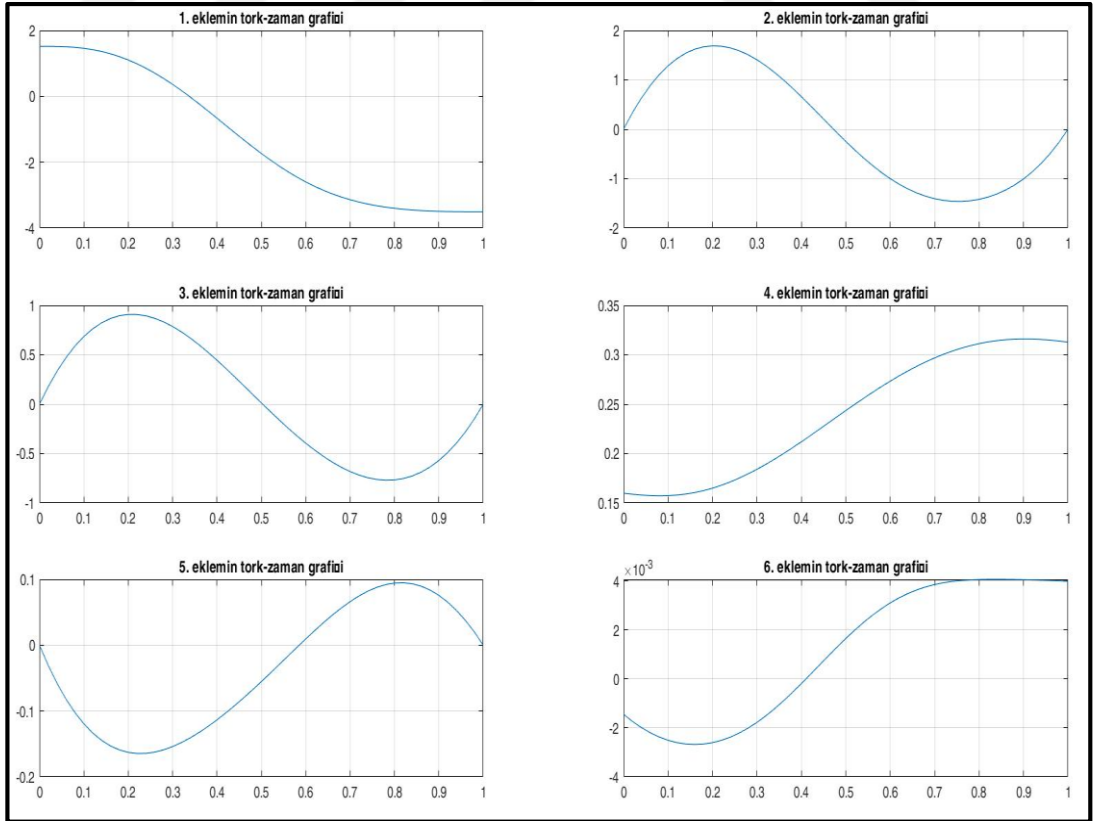
Şekil 4.5. Eklemlerin zamana göre konum değişimleri



Şekil 4.6. Eklemlerin hız-zaman grafiği



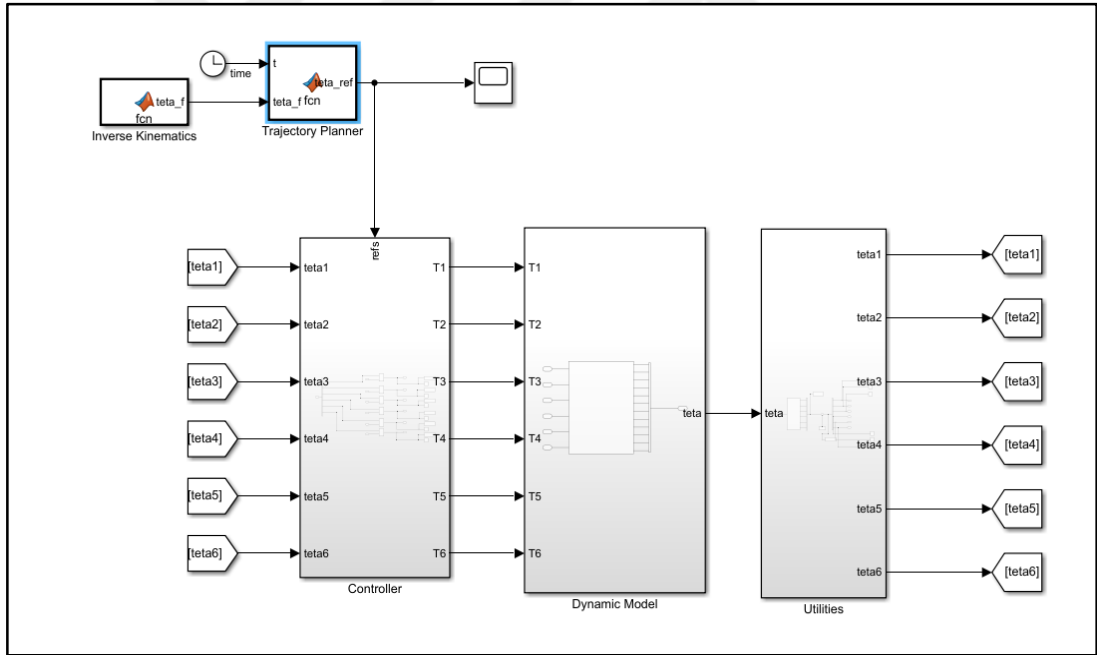
Şekil 4.7. Eklemlerin zamana göre ivme grafikleri



Şekil 4.8. Eklem torkları

4.7. Robotun MATLAB/Simulink Dinamik Modeli

Inventor programında oluşturulan üç boyutlu tasarım uygun ilişkiler (constraint) tanımlanarak MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır. Simulink modeli, daha basit ve kolay incelenebilir olması için alt sistemler kullanılmış ve Şekil 4.9'daki model oluşturulmuştur. Bu modelde, "Utilites" alt sistemi robotun eklemlerinin açı ve hız ifadelerinin zamana bağlı değerlerini görüntülemek için kullanılmıştır. "Controller" alt sisteminde ise robotun istenen pozisyona gitmesi için PID tabanlı kontrolörler kullanılmıştır. "Trajectory Planner" fonksiyonu ise robot için istenen yörünge oluşturulmasını sağlamak ve her bir eklem için referans değeri üretmektedir. Bu işlem gerçekleşirken "Inverse Kinematics" fonksiyon bloğundan yörünge planlamasında gerekli olan " θ_f " değerleri aktarılır. Aynı zamanda zaman verisini işlemektedir. Inverse Kinematics bloğunda ise istenen konum ve yönelime uygun θ çözüm kümeleri hesaplanır ve içlerinden en uygunu seçilerek çıkış üretilir.



Şekil 4.9. Sistemin dinamik modeli

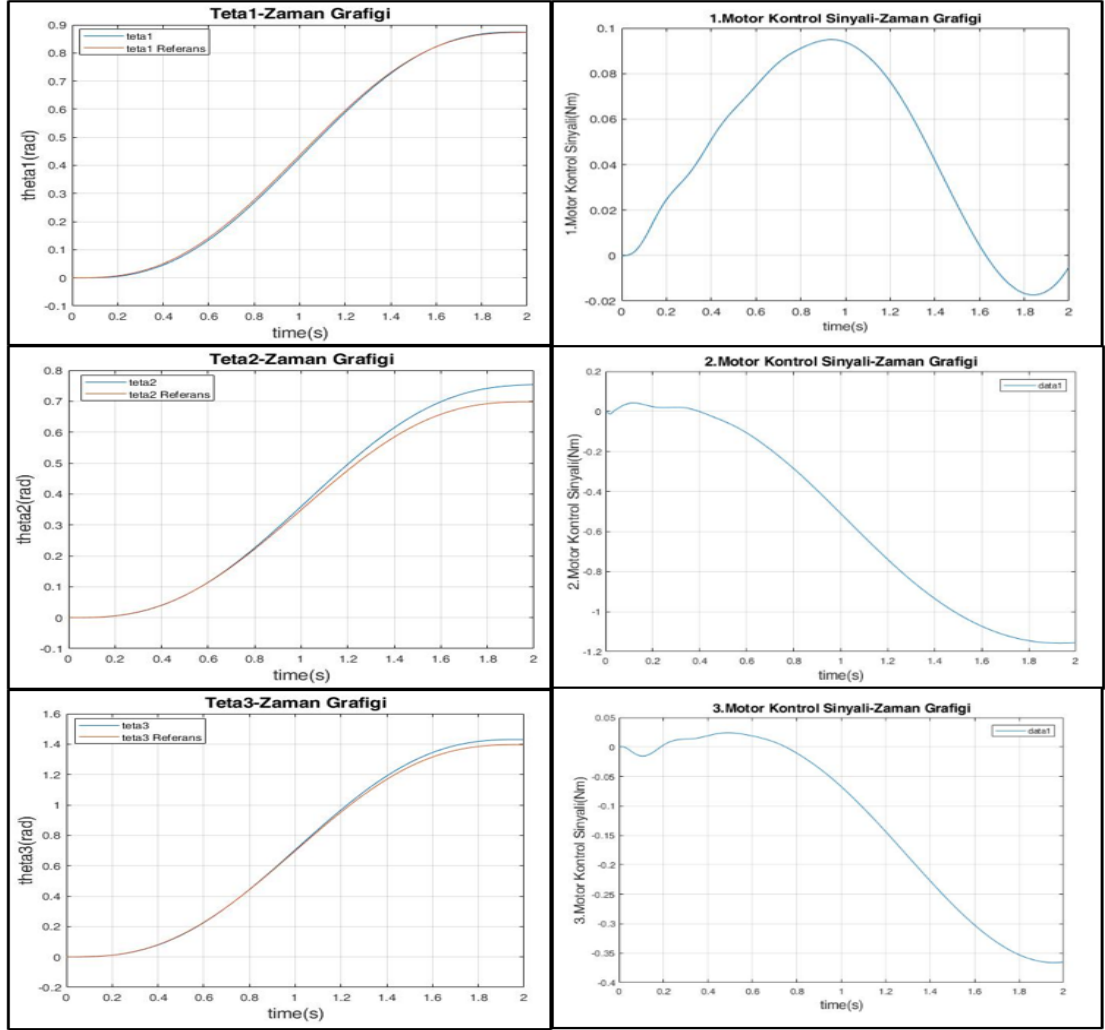
Oluşturulan robot dinamik modelindeki her bir ekleme PID kontrolör blokları eklenerek sistemin kontrolü sağlanmıştır. PID parametreleri belirlenirken gerçekte kullanılan motorların uygulayabileceği sınırlar göz önünde bulundurulmuştur. Kontrol bloklarıyla birlikte sistemin genel modeli MATLAB – Simulink'te EK-G'deki gibi oluşturulmuştur.

İleri Dinamik Simülasyon Çalışması-1

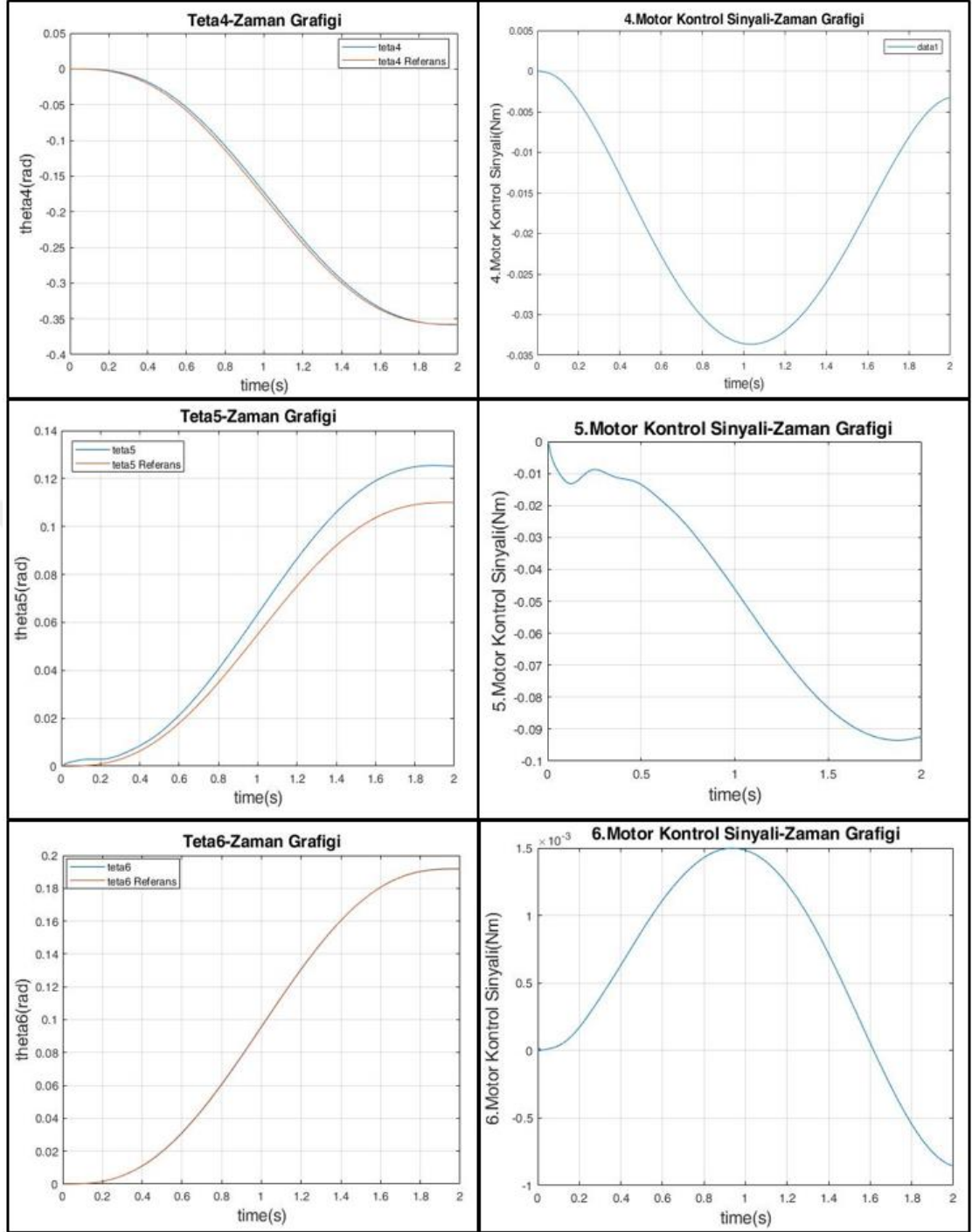
Robotun başlangıç (home) konumundan aşağıda matris şeklinde ifade edilen pozisyona iki saniye içerisinde hareketinin simülasyonu sonucu oluşturulan eklem açısı-zaman grafikleri, açı referansı-zaman grafikleri ve kontrol sinyali-zaman grafikleri Şekil 4.10'da ve Şekil 4.11'de verilmektedir.

$$T_{\text{hedef}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$= \begin{bmatrix} -0.2503 & -0.797 & -0.5519 & 544.3525 \\ -0.5519 & 0.584 & 0.5953 & 623.9826 \\ -0.7955 & -0.1543 & -0.586 & 297.995 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

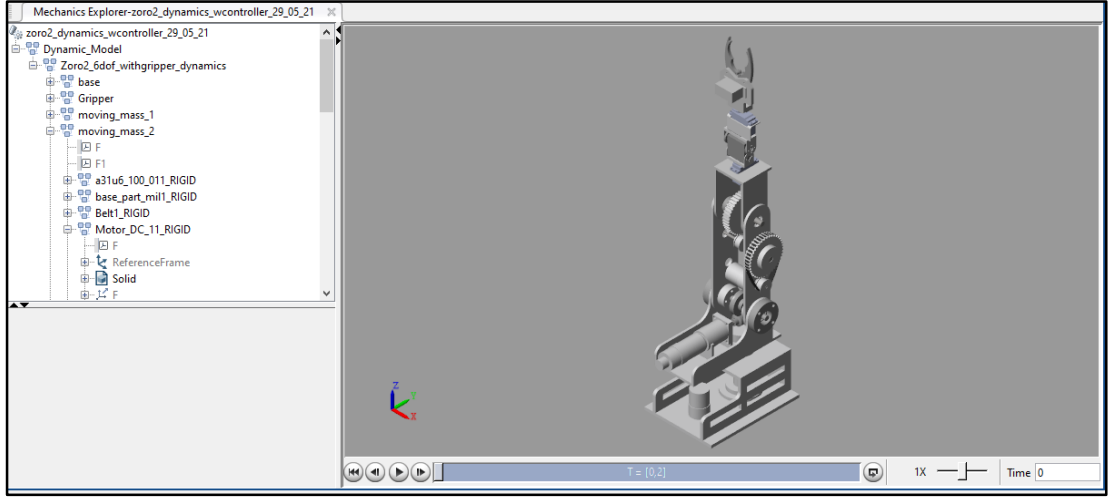


Şekil 4.10. İleri dinamik simülasyon çalışması-1 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-1

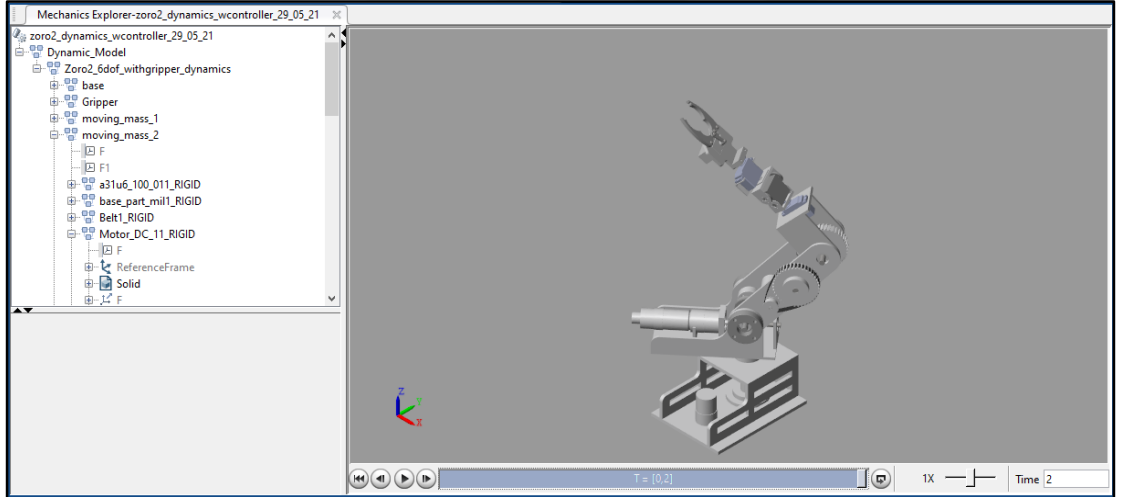


Şekil 4.11. İleri dinamik simülasyon çalışması-1 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-2

Bu işlemler gerçekleştirilirken önceki bölümlerde bahsedilmiş olan ters kinematik analiz çözümünden ve beşinci dereceden polinom yörüngesi bilgilerinden faydalanılmıştır. MATLAB-Simscape ortamında gerçekleştirilen yörünge planlaması simülasyonuna ait başlangıç konumu ve son pozisyon konumu görüntüleri sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de paylaşılmaktadır.



Şekil 4.12. İleri dinamik simülasyon çalışması-1 / ZORO başlangıç pozisyonu görüntüsü



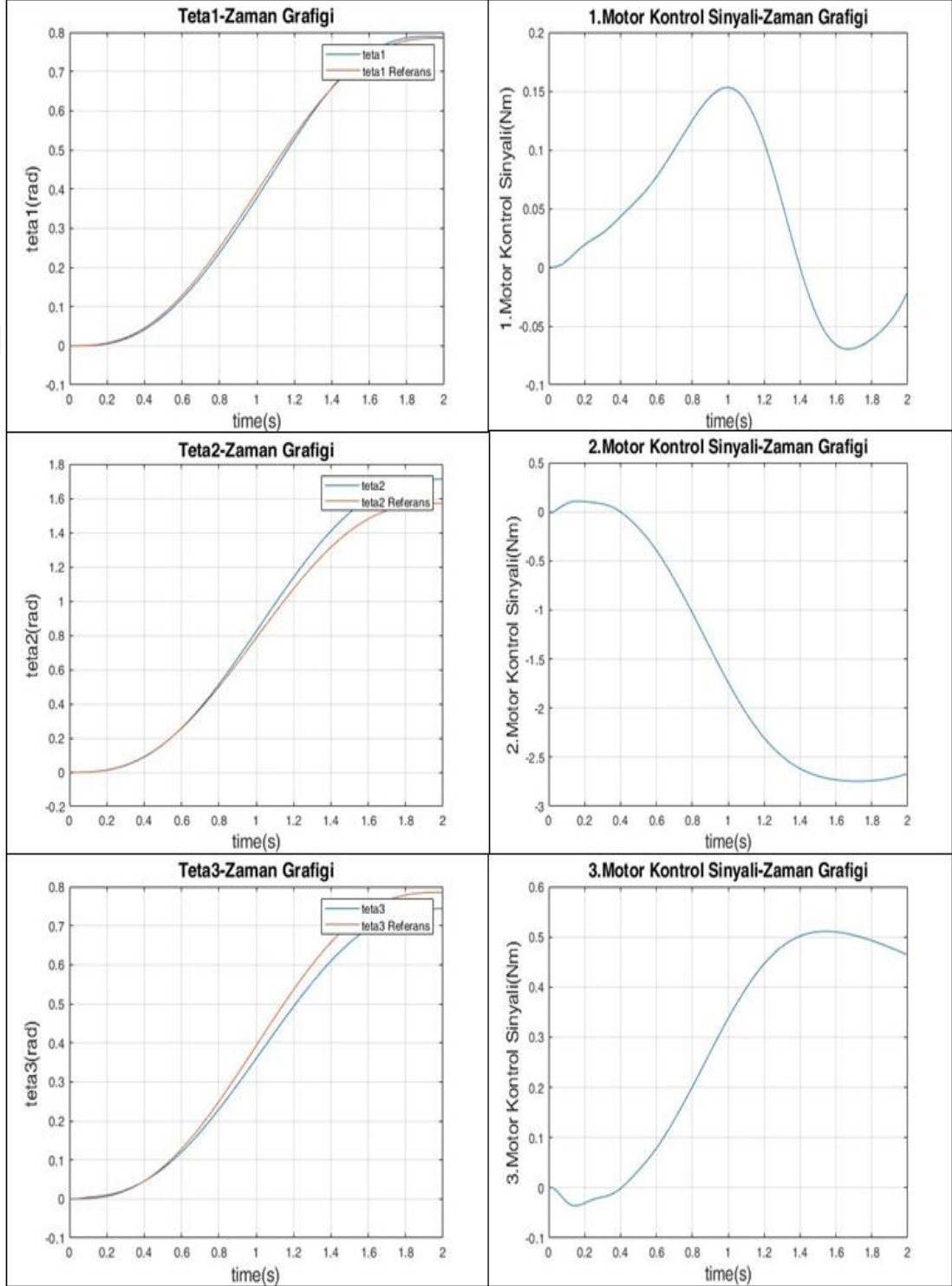
Şekil 4.13. İleri dinamik simülasyon çalışması-1 / ZORO hedef pozisyon görüntüsü

İleri Dinamik Simülasyon Çalışması-2

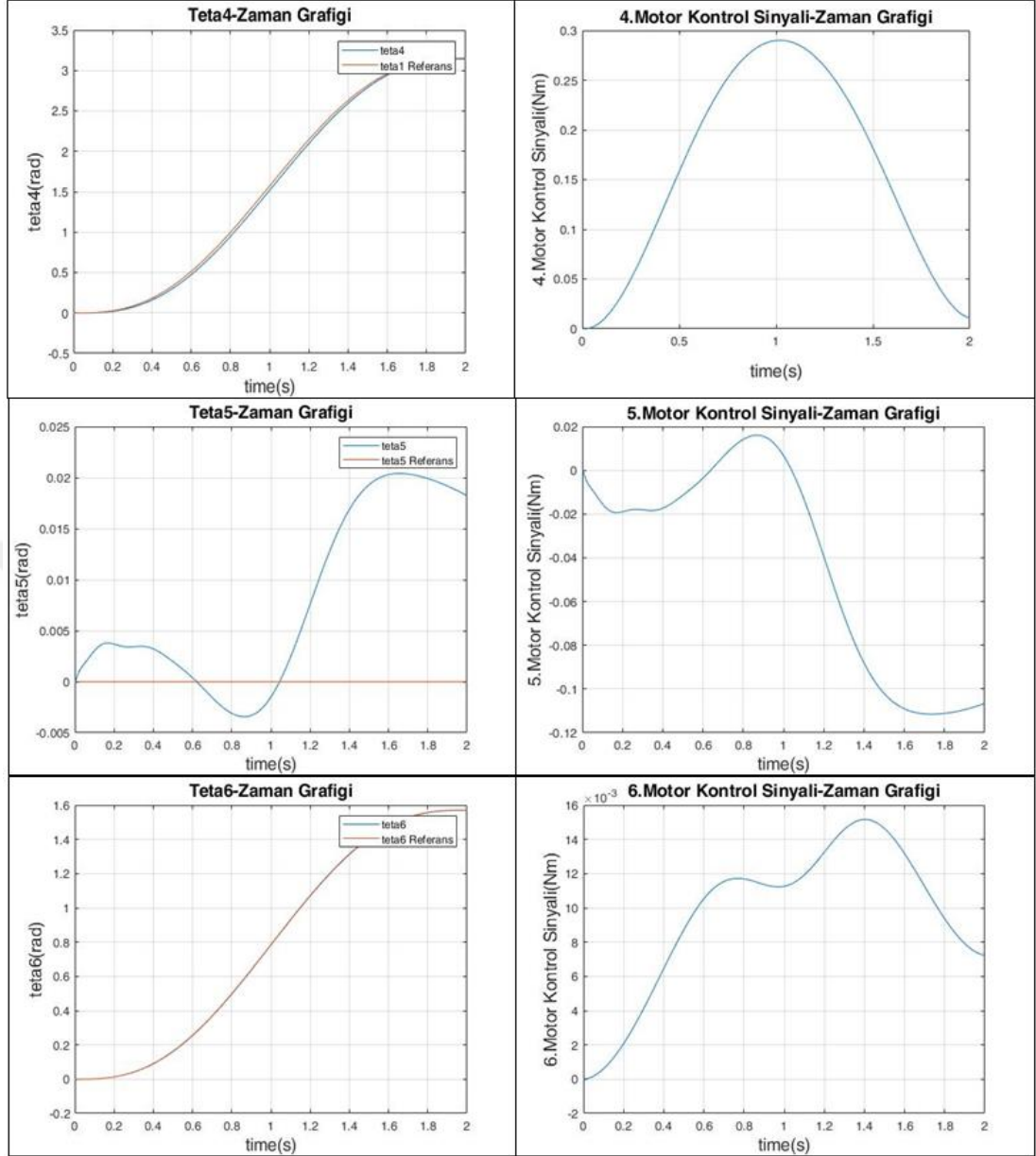
Yapılan başka bir simülasyon denemesinde yine robotun başlangıç (home) konumundan aşağıda matris formatında (formül 4.22) belirtilen hedef pozisyonuna iki saniyede gerçekleştirilen harekete ait eklem açısı-zaman grafikleri, açı referansı-zaman grafikleri ve kontrol sinyali-zaman grafikleri Şekil 4.14'te ve Şekil 4.15'te verilmektedir.

$$T_{\text{hedef}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$= \begin{bmatrix} -0.7071 & 0.5 & 0.5 & 619.2006 \\ 0.7071 & 0.5 & 0.5 & 619.2006 \\ 0 & 0.7071 & -0.7071 & -102.6819 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$



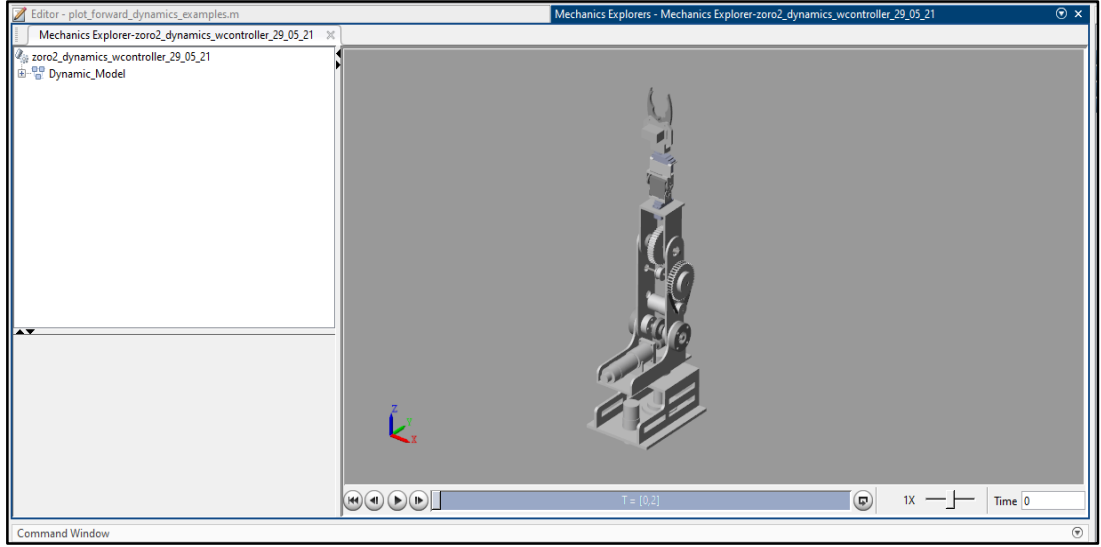
Şekil 4.14. İleri dinamik simülasyon çalışması-2 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri



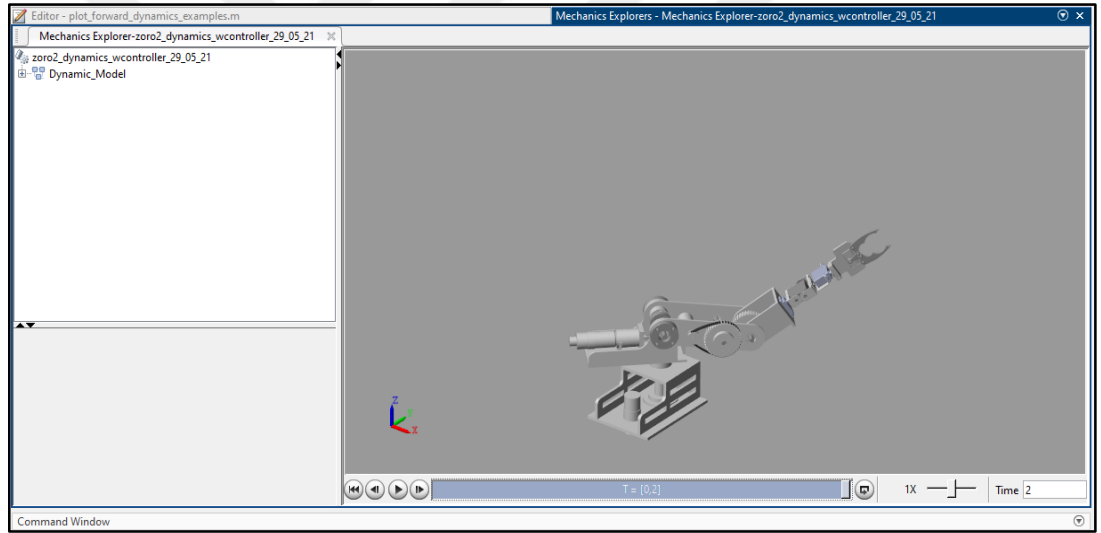
Şekil 4.15. İleri dinamik simülasyon çalışması-2 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-1

θ_5 - zaman grafiği incelendiğinde referans açı değeri sıfır olarak verilmekte olup, ilgili grafik incelendiğinde düşey ekseninde açısal değerler incelendiğinde aslında oldukça küçük olup, nedeniyse diğer açılardaki değişimden kaynaklı titreşimin etkileridir.

Simülasyonun gerçekleştirildiği MATLAB-Simscape ortamından alınmış olan Şekil 4.16'da ve Şekil 4.17'de sırasıyla başlangıç pozisyonunda ve hedef pozisyonundaki ZORO robotun görüntüleri paylaşılmaktadır.



Şekil 4.16. İleri dinamik simülasyon çalışması-2 / ZORO başlangıç pozisyonu görüntüsü



Şekil 4.17. İleri dinamik simülasyon çalışması-2 / ZORO hedef pozisyon görüntüsü

İleri Dinamik Simülasyon Çalışması-3

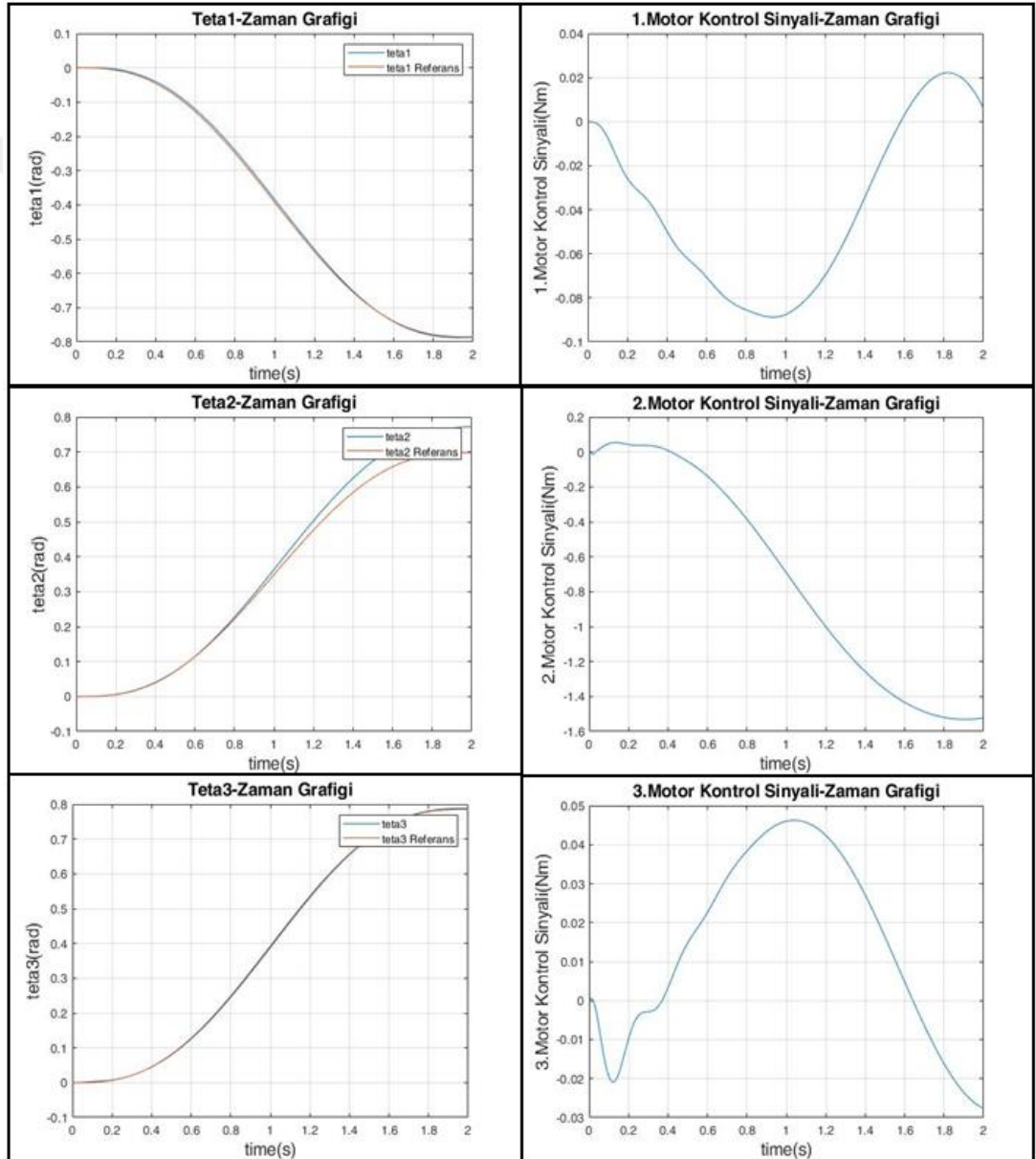
Tez kapsamında MATLAB/Simulink ortamında farklı bir hedef pozisyon belirlenerek başlangıç konumundan ilgili konuma iki saniye süre ile gerçekleştirilen harekete ait ileri dinamik simülasyon çalışması yapılmıştır.

Çalışma için belirlenen hedef pozisyona ait veriler formül 4.24'te paylaşılmaktadır.

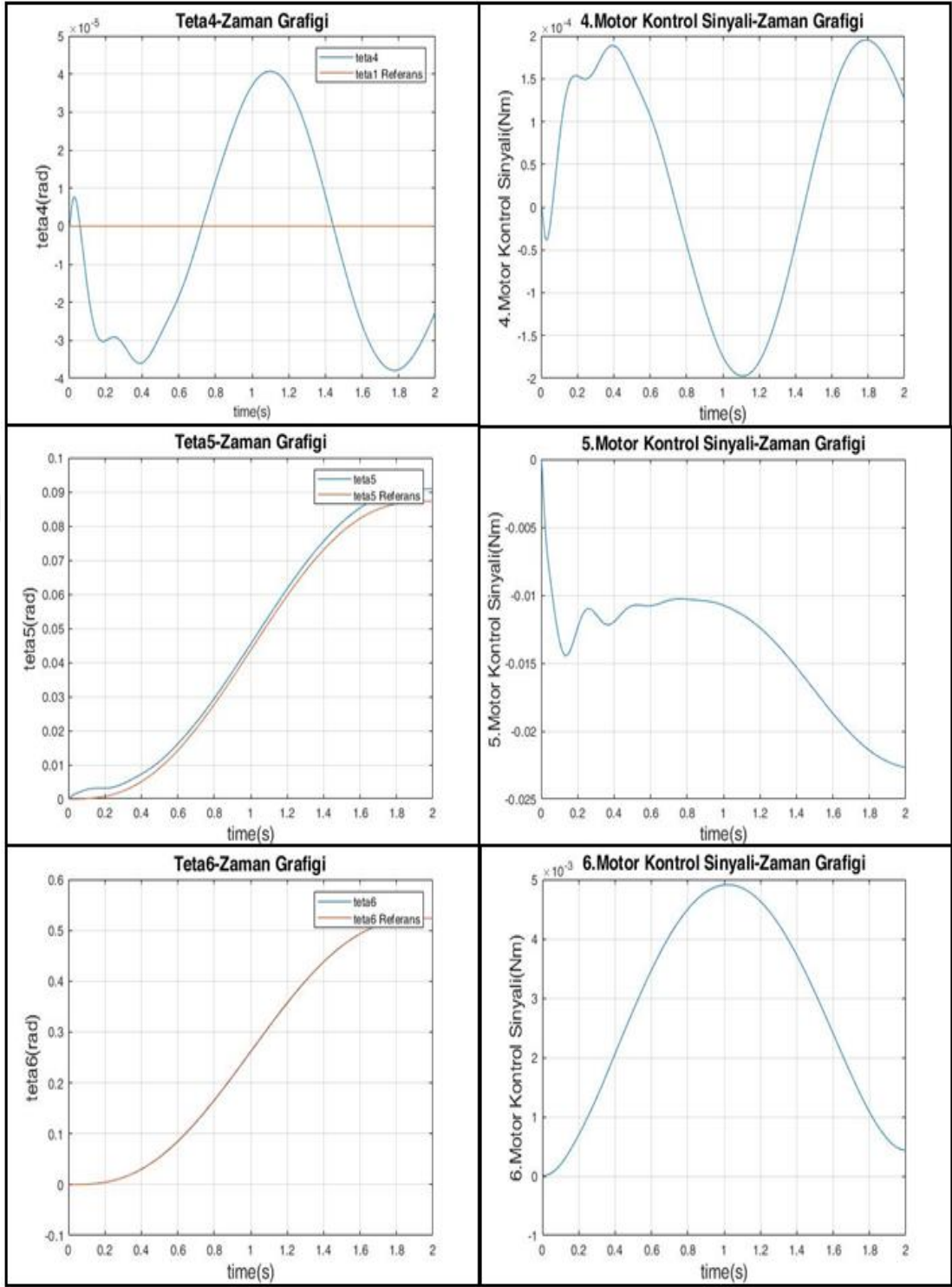
$$T_{\text{hedef}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$= \begin{bmatrix} 0.3536 & 0.6124 & 0.7071 & 667.627 \\ 0.3536 & 0.6124 & 0.7071 & -667.627 \\ -0.866 & 0.5 & 0 & 709.1106 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Belirlenen hedef pozisyona ait referans açı verilerinin ve simülasyon açı verilerinin karşılaştırıldığı θ -zaman grafikleri, ayrıca kontrol sinyali-zaman grafikleri birinci, ikinci, üçüncü motorlar için Şekil 4.18’de, dördüncü, beşinci, ve altıncı motorlar için ise Şekil 4.19’da paylaşılmaktadır.

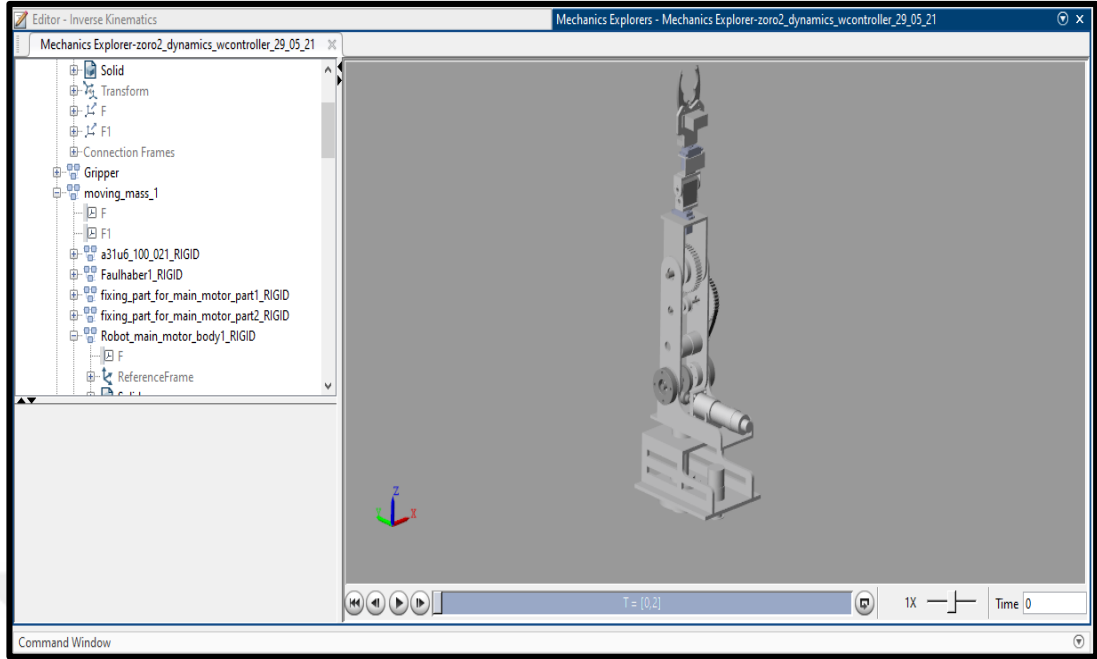


Şekil 4.18. İleri dinamik simülasyon çalışması-3 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-1



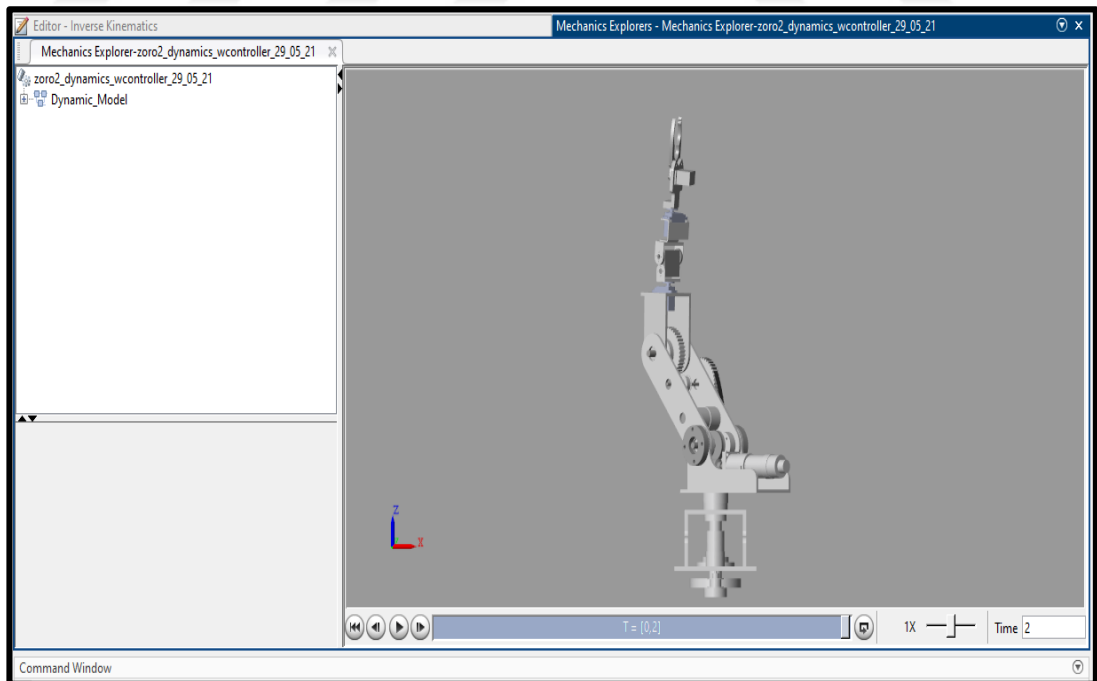
Şekil 4.19. İleri dinamik simülasyon çalışması-3 / açı-zaman ve tork zaman grafikleri-2

Simülasyon ortamında robotun başlangıç pozisyonuna ait üç boyutlu görüntüsü Şekil 4.20'da paylaşılmaktadır.



Şekil 4.20. İleri dinamik simülasyon çalışması-3 / ZORO başlangıç pozisyonu görüntüsü

Simülasyon sonucu robotun ulaşması istenen hedef pozisyonadaki üç boyutlu görüntüsü, Şekil 4.21'deki gibidir.



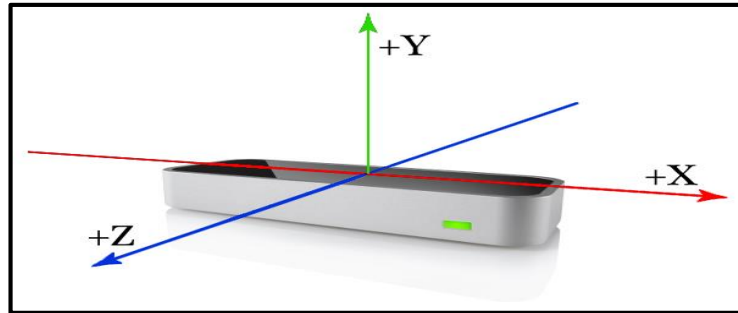
Şekil 4.21. İleri dinamik simülasyon çalışması-3 / ZORO hedef pozisyonu görüntüsü

5. İNSAN-ROBOT ARAYÜZÜ(HRI)

İnsanların robotlarla aynı ortamda çalışmasını veya robotların uzaktan kontrolünü sağlamak amacıyla geliştirilen sistemler insan-robot arayüzü olarak ifade edilmektedir. Bu alanda literatür incelendiğinde pek çok sistemin geliştirildiği görülmektedir [22-26]. Bu arayüzlerde, insan jestleri [27], insan sesi [28] gibi çeşitli girdiler uygun sensörler kullanılarak algılanmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen arayüzde görüntü tabanlı bir sistem kullanılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalarda kameralardan belirli bir FPS’de alınan görüntüler kullanılarak elin konum ve yönelim bilgileri tespit edilerek bu hareketin robot üzerine aktarılması ve robotun istenilen hareketi yapması sağlanmaktadır [29].

ZORO’nun insan elinden alınan verileri takip etmesini sağlamak amacıyla bir insan-robot arayüzünün oluşturulmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu arayüzde, insan elinin konum ve yönelim verileri Leap Motion sensörü kullanılarak alınmaktadır. Bu cihaz, insan elinin bulunduğu bir görüntüyü işleyerek aynı anda en fazla iki el verisi olacak şekilde insan avuç içinin konum ve yönelim verilerini bulabilmektedir. Bu cihazın yazılım geliştiriciler için farklı platformlarda kullanılmak üzere kütüphaneleri bulunmaktadır.

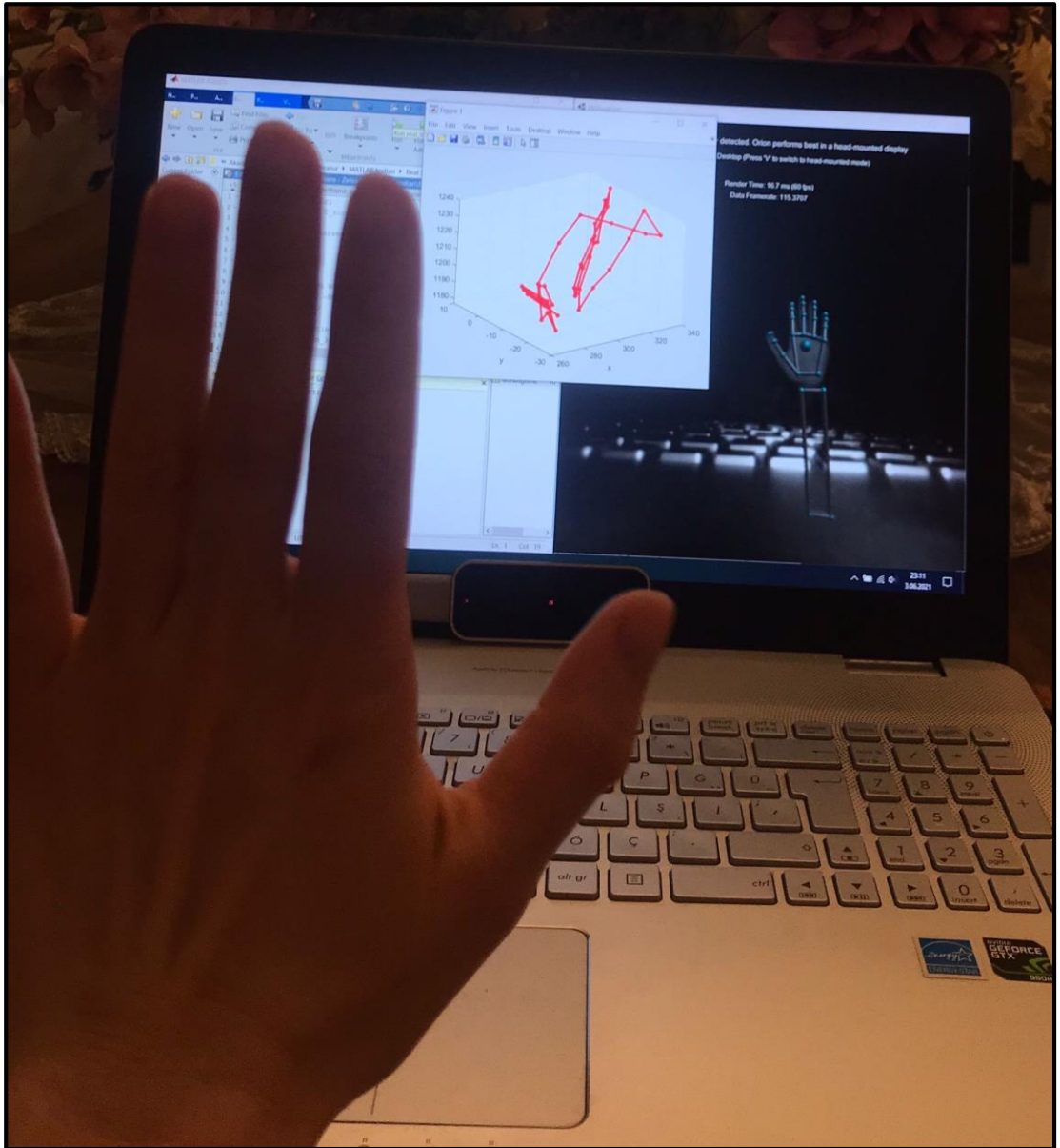
Tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar MATLAB programında yapıldığı için ve bu cihazın da MATLAB için hazır kütüphanesi bulunduğundan bu platformda çalışılması tercih edilmiştir. Cihazın işlem yaparken kullandığı kendi referans koordinat sistemi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Leap Motion referans koordinat sistemi

Bu koordinat sistemi robotun referans koordinat sistemiyle çakıştırmak için bir rotasyon matrisi bulunmuş ve bu sayede eksen örtüşmesi sağlanarak alınan el hareketlerinin çalışma doğrultusu ile robotun çalışma doğrultusunun eşleştirilmesi sağlanmıştır. İnsan-robot arayüzü ilk çalıştırıldığında aşağıdaki eşitlikteki robot ile Leap motion verileri arasındaki yönelim verilerinin aktarılmasını sağlayan $ZOROR_{LMR}$ rotasyon matrisinin hesaplanmasını sağlar. Bundan sonra alınan her yönelim verisi bu rotasyon matrisi ile çarpılarak robot çalışma uzayına aktarılmaktadır.

$$ZOROR_{ER} = ZOROR_{LMR} LMR_{ER} \quad (5.1)$$



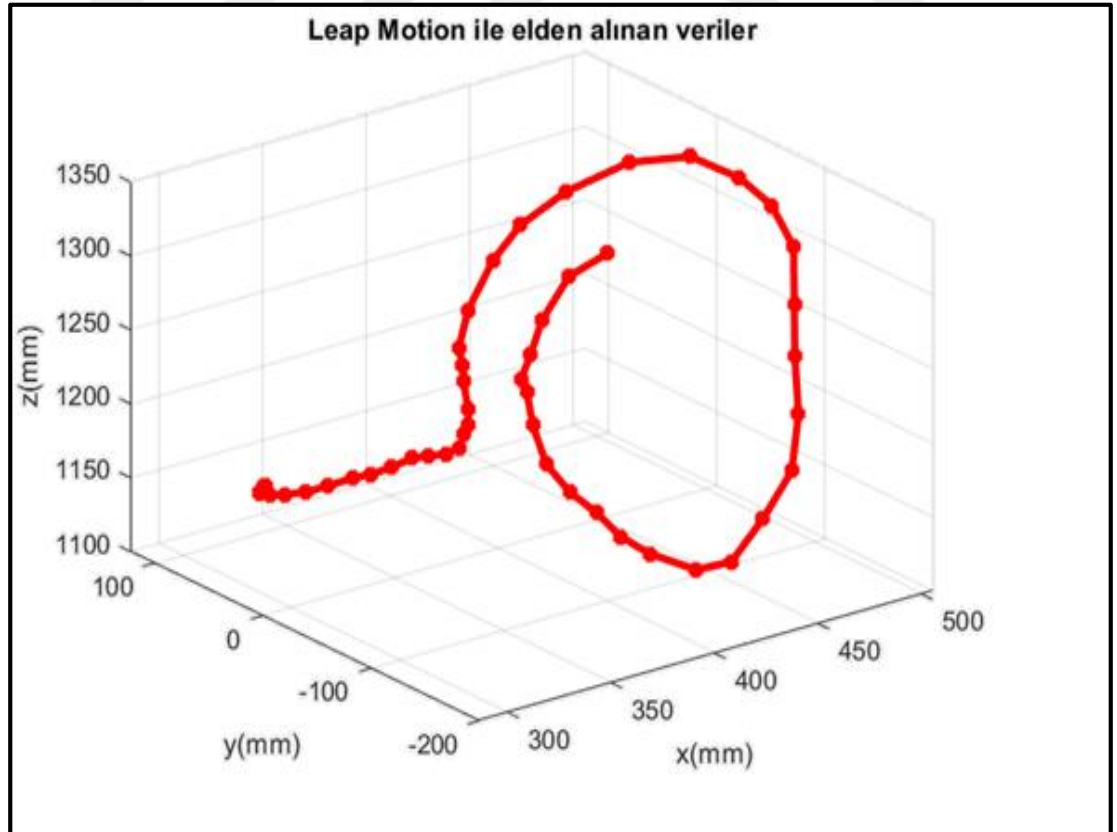
Şekil 5.2. Çevrimiçi olarak el verisinin alınması

Aynı şekilde insan elinden alınan konum bilgilerinin de robot çalışma uzayına aktarılmasını sağlamak amacıyla, öncelikle robot referans koordinat sistemi ile Leap motion referans koordinat sisteminin eşleştirilmesini sağlayan bir rotasyon matrisi tanımlanmış, ve bu matris kullanılarak eksenler çakıştırılmıştır. Daha sonra ise elin ilk konumunun robotun ilk konumuna eşleştirilmesinin sağlanması amacıyla, ilk çalıştırmada bir öteleme konum vektörü hesaplanmaktadır. Bu vektör sonraki çalışmalarda kullanılarak aktarılma sağlanmıştır.

$$ZOROP = ZOROLMRLEMP + P_{\text{öteleme}} \quad (5.2)$$

İnsan elinden çevrimiçi olarak veri alınmasını sağlayan yazılım MATLAB'te oluşturulmuş olup EK-H'da sunulmaktadır. Bu yazılım çalıştırıldığında elden alınan ilk verinin robotun o anki konum verisiyle eşleştirilmesi sağlanarak ilk etapta robotun ani hareketlerinin önüne geçilmiştir.

Bu yazılım kullanılarak insan elinden alınan verilerin üç boyutlu eksenle zamana göre çizdirildiği bir örnek Şekil 5.3'te verilmiştir. Bu örnekte robotun başlangıç konum vektörü olarak [287 0 1187]' ifadeleri kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Geliştirilen HRI ile insan elinden alınan verinin üç boyutlu olarak çizimi

Geliştirilen İnsan-Robot Arayüzü(HRI), bu eşleştirmeyi sağladıktan sonra, 250 ms aralıklarla insan elinden veri olarak robot çalışma uzayına aktarılmasını sağlamaktadır. Bu veriler kartezyen uzay referans verilerini ifade etmektedir. Bu verileri eklem uzayı olarak ifade edebilmek için ters kinematik fonksiyonu kullanılmaktadır. Robotun bulunduğu konumdan, HRI'nın hesapladığı yeni referans konuma gitmesini sağlamak amacıyla her 250 ms'de bir alınan veriler kullanılarak bir sonraki veri alınana kadar takip edilmesi gereken yörünge, beşinci dereceden bir polinom kullanılarak hesaplanmakta ve bu yörüngeden elde edilen eklem referans verileri 50 ms aralıklarla STM32 kartına verilmektedir.



6. DENEYSEL SONUÇLAR

Sistemin ileri kinematik, ters kinematik, ileri dinamik, ters dinamik modelleri oluşturularak yörünge planı hazırlanmıştır. İstenen yörüngeyi takibini gerçekleştirebilmek için uygun kontrolör sistemi (bu tez için PID) tasarlanmıştır.

Gerçek zamanda yapılacak deneysel çalışmalara alt yapı hazırlamak amacı ile öncelikle MATLAB/Simulink ortamında ileri kinematik için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Tasarlanan modelin uygunluğu doğrultusunda gerçek zamanda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

İleri kinematik modelin oluşturulmasının ardından ters kinematik için ilgili hesaplamalar yapılmıştır ve MATLAB ortamında problemin çözümü gerçekleştirilmiştir.

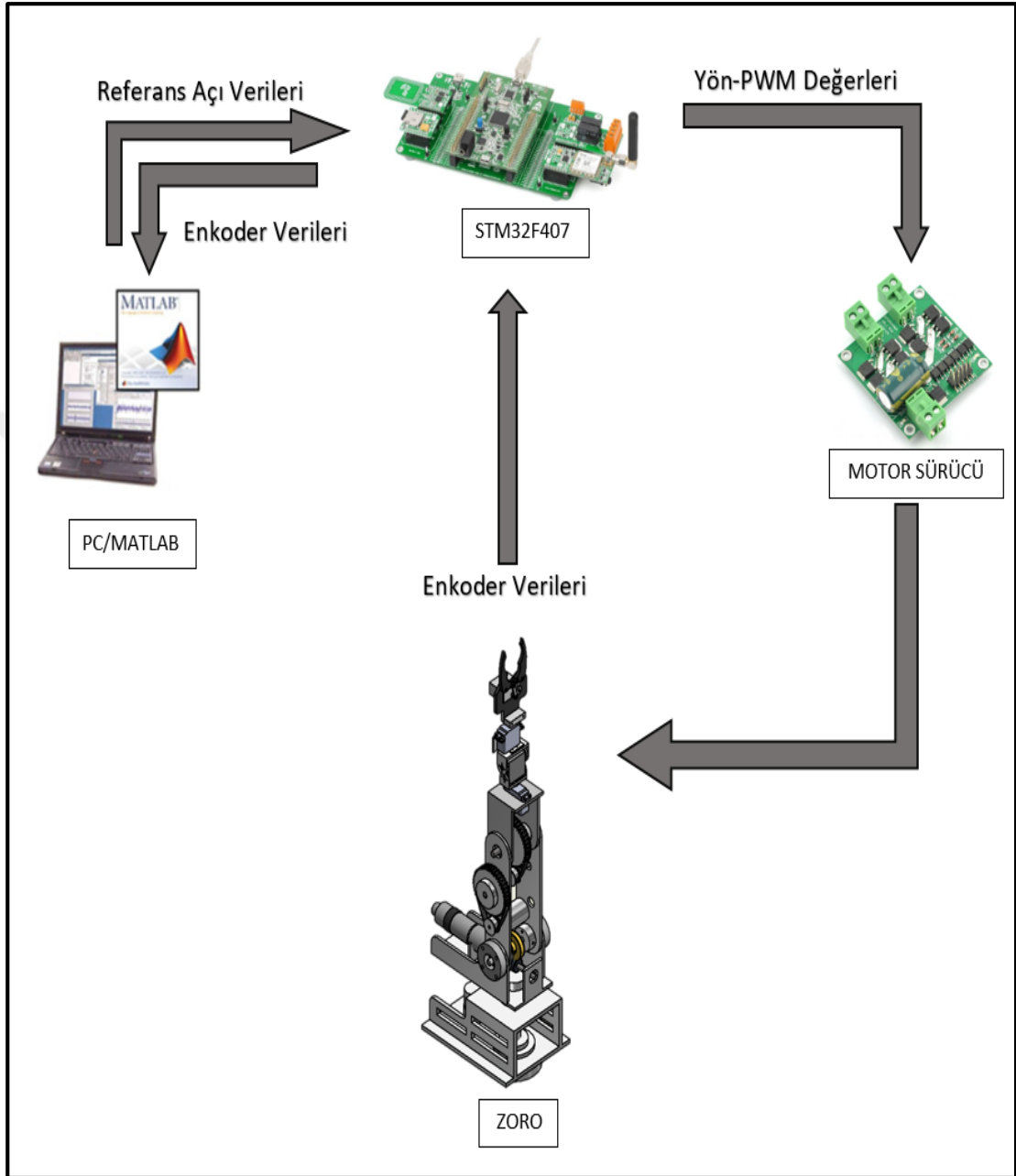
Dinamik modeli oluştururken robotun gerçek zamanlı çalışmalarına en yakın fiziksel şartları sağlayabilmesi için Inventor ortamında üç boyutlu tasarımı gerçekleştirilen ZORO robotun, üç boyutlu modelinin bu ortamdan MATLAB/Simulink ortamına transferinin sağlanabilmesi için eklenti modülü (Add-On) kullanılmıştır. Bu simülasyon programlarının kullanılmasıyla, tasarımın en iyilenmesi sağlanmış böylelikle ön tasarım aşamasında oluşturulan robotun gereksiz kütleleri sistemden çıkartılmıştır. Aynı şekilde istenen yörüngeleri takip edebilecek kabiliyete sahip motorlar seçilmiştir.

6.1. Doğrudan Verilen Açık Referansları ile Yapılan Çalışmalar

İleri kinematik hesaplanırken robotun hedef eklem açıları yani eklem motorlarının dönme değerleri sisteme girdi olarak verilirken analiz sonucunda ise robotun uç işlevcisinin son pozisyonu oluşmaktadır.

Yapılan ilk gerçek zamanlı çalışmada her bir eklem için istenen referans değerleri MATLAB ortamında belirlenerek seri haberleşme kullanılarak STM32 kontrol kartına aktarılmıştır. STM32 kartında gelen referans verilerinin alınması sağlanmıştır. Robot üzerinde yer alan motorlara ait enkoderlerden veriler alınarak gelen referans verisi ile karşılaştırılmış ve hata sinyali üretilmiştir. Bu hata sinyali

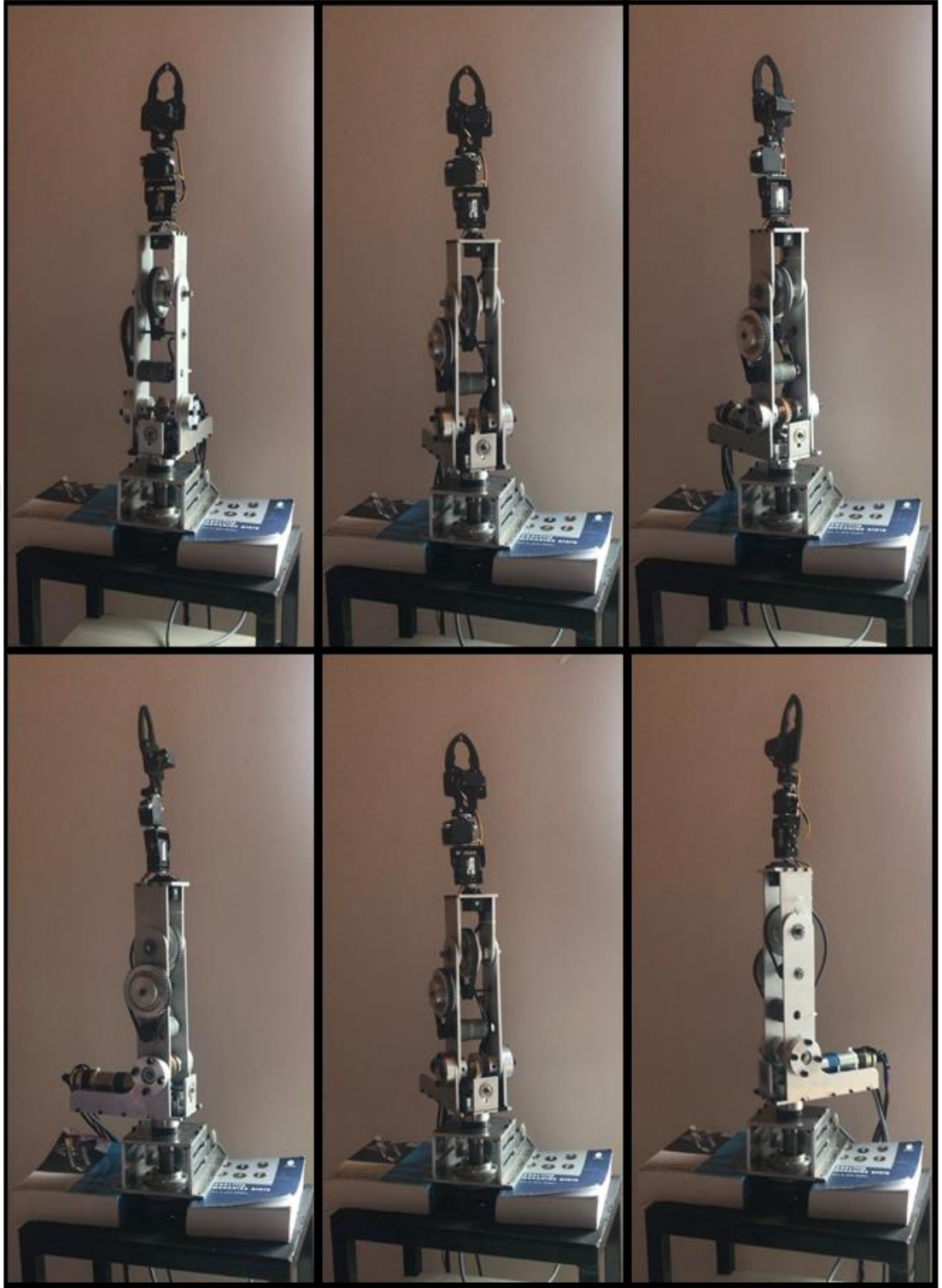
kullanılarak STM32 içerisinde geliştirilen PID kontrolörlerden gerekli kontrol sinyali üretilmiştir. Şekil 6.1’de ilgili veri akış şeması paylaşılmaktadır.



Şekil 6.1. Doğrudan verilen veriler için akış şeması

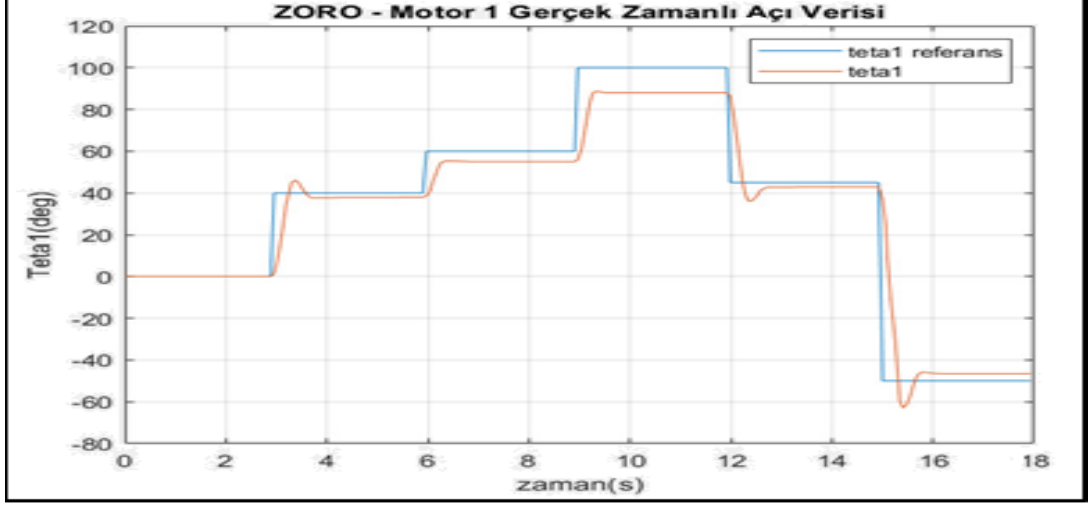
6.1.1. Birinci eklem için referans verisi ile çalışma

Şekil 6.2’de Sisteme MATLAB ortamından doğrudan verilen referans açı değerleri ile robotun gerçek zamanda hareketleri paylaşılmaktadır. Başlangıç konumundan sırasıyla, 40°, 60°, 100°, 45°, ve -50° referans açılarına olan hareketinin görüntüleri paylaşılmaktadır.



Şekil 6.2. İlk çalışma-referans veriler (a) $t=0$ anındaki görüntü (b) $t=4$ anındaki görüntü (c) $t=6$ anındaki görüntü (d) $t=10$ anındaki görüntü (e) $t=12$ anındaki görüntü (f) $t=12$ anındaki görüntü

Yapılan çalışmaya ait gerçek zamanlı veri ve referans verinin karşılaştırılabilmesi için MATLAB ortamından alınan grafikler Şekil 6.3'te paylaşılmaktadır.

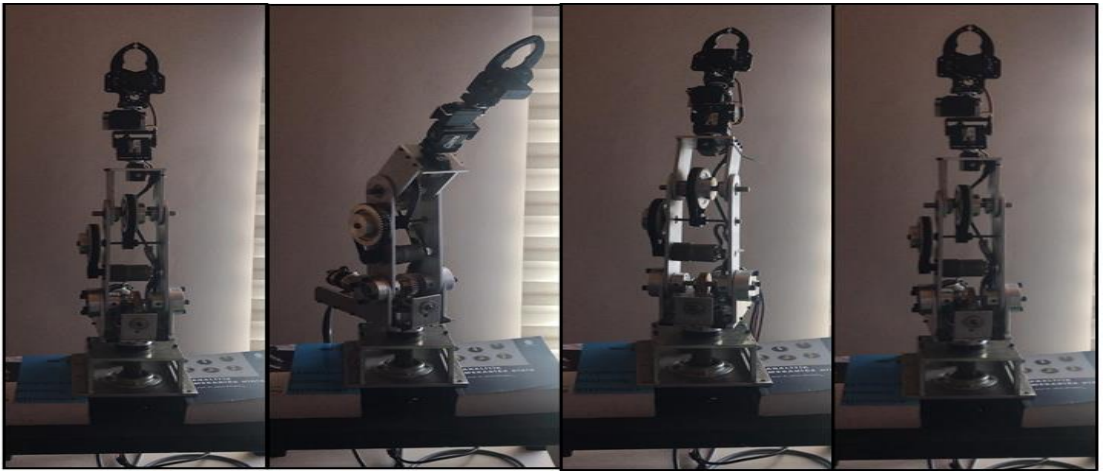


Şekil 6.3. İlk çalışma, referans veri-gerçek zamanlı veri

6.1.2. Birinci ve üçüncü eklem için referans veri ile çalışma

Gerçekleştirilen gerçek zamanlı deneysel çalışma için sisteme doğrudan açı referans verisi gönderilmektedir. Birinci eklem yani θ_1 için verilmiş olan referans açılar sırası ile, 30° , -20° ve son olarak 0° yani robotun başlangıç konumuna geri dönmesi için verilen açıdır.

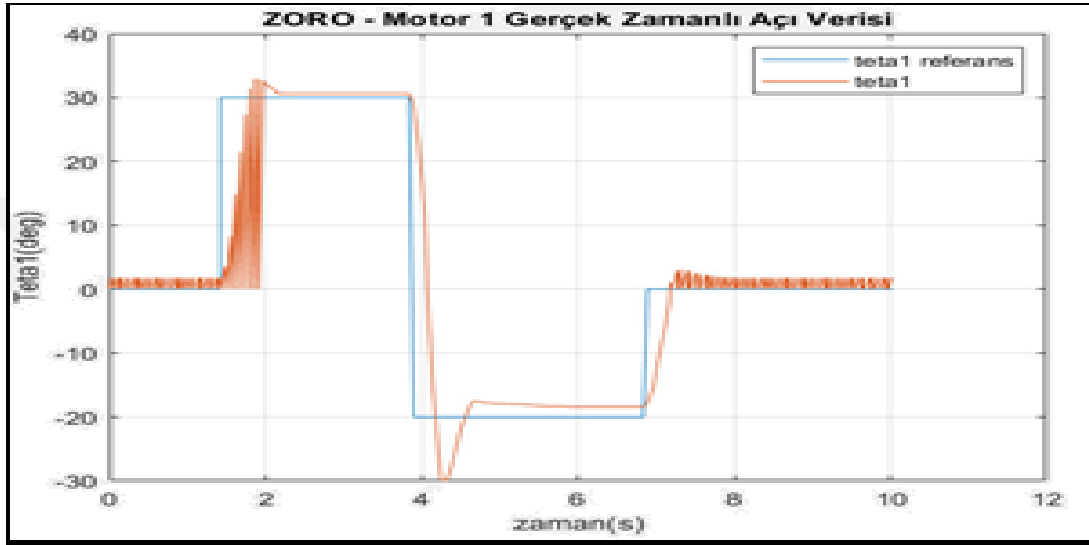
Üçüncü eklem yani θ_3 için verilen referans açı değerleri ise sırası ile, 40° , -20° , 0° yani başlangıç pozisyonuna geri dönecek şekilde verilmektedir. Her iki ekleme verilen bu referans açılara ulaşabilmek için robotun eklemlerinde eş zamanlı hareket sağlanmaktadır. Şekil 6.4'te robotun her iki eklemi için gerçek ve eş zamanlı hareketleri paylaşılmaktadır.



Şekil 6.4. Birinci ve üçüncü eklem gerçek zamanda hareket (a) $t=0$ anındaki görüntü (b) $t=2$ anındaki görüntü (c) $t=4$ anındaki görüntü (d) $t=8$ anındaki görüntü

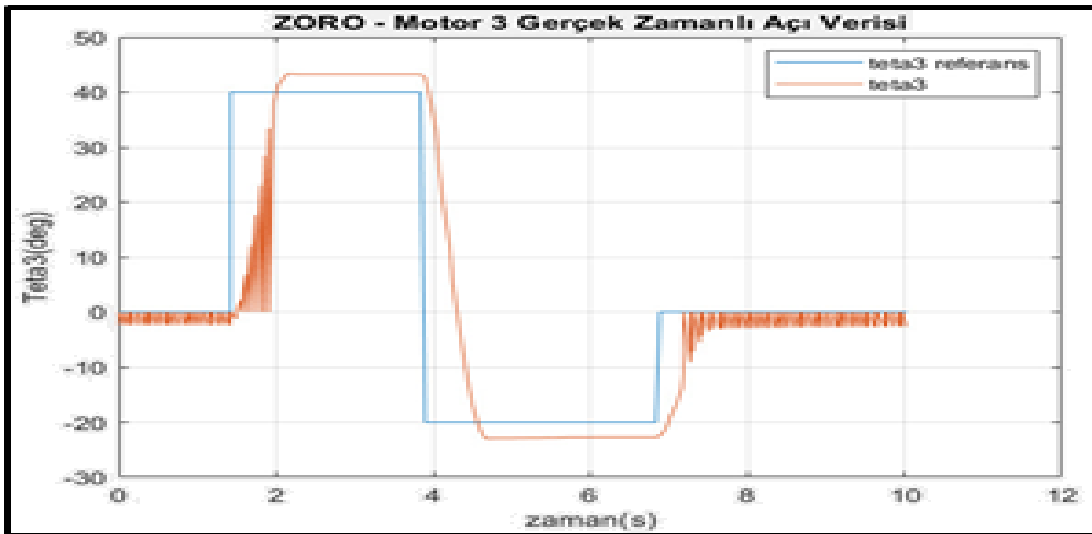
Verilen referans açı değerlerine olan hareketi gerçekleştirmesi için robota verilen süre on saniyedir olarak tanımlanmaktadır. Her iki eklemin on saniye içerisinde aynı anda hareket etmesi beklenmektedir.

Birinci eklem için MATLAB ortamında oluşturulan ve gerçek zamanlı θ_1 verisi ile referans açı olarak sisteme gönderilmiş olan referans θ_1 değerlerinin hareket boyunca karşılaştırılabildiği veri grafiği Şekil 6.5'te verilmektedir.



Şekil 6.5. Birinci eklem için θ_1 ve referans θ_1 veri grafiği

Üçüncü eklem için MATLAB ortamında oluşturulan ve gerçek zamanlı θ_3 verisi ile referans açı olarak sisteme gönderilmiş olan referans θ_3 değerlerinin hareket boyunca karşılaştırılabildiği veri grafiği Şekil 6.6'da verilmektedir.



Şekil 6.6. Üçüncü eklem için θ_3 ve referans θ_3 veri grafiği

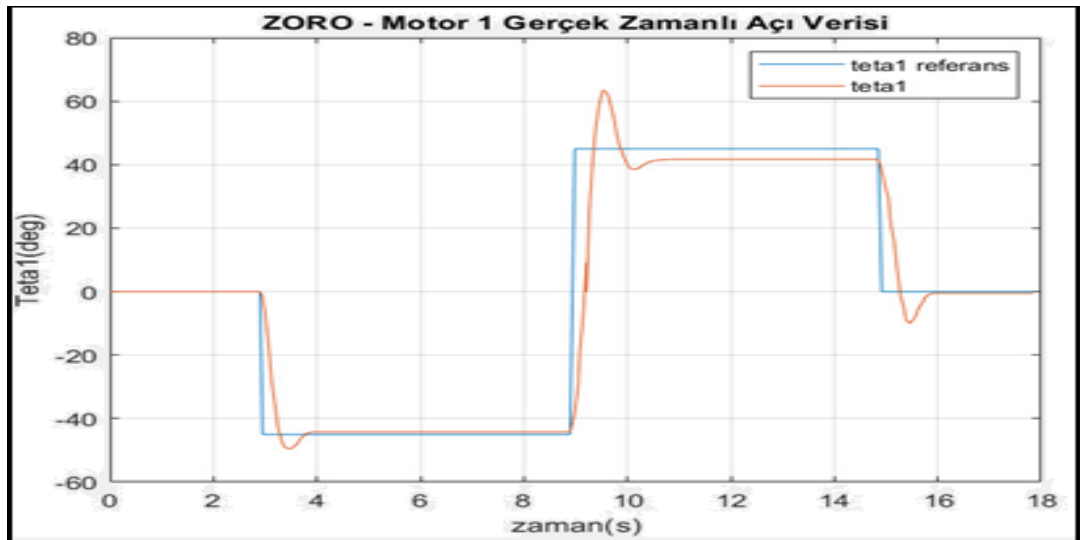
6.1.3. Tüm eklemler için referans veri ile çalışma

Robotun gerçek zamanda eş zamanlı olarak tüm eklemlerinin çalışmasını gözlemlemek amacı ile referans açı verileri MATLAB ortamından doğrudan verilmektedir. Her bir eklemin hedef açı değerlerine hareketi gözlemlenmiş ve gözlem sonucu referans açı ve enkoder verisi kıyaslanarak açı-zaman grafikleri elde edilmiştir.

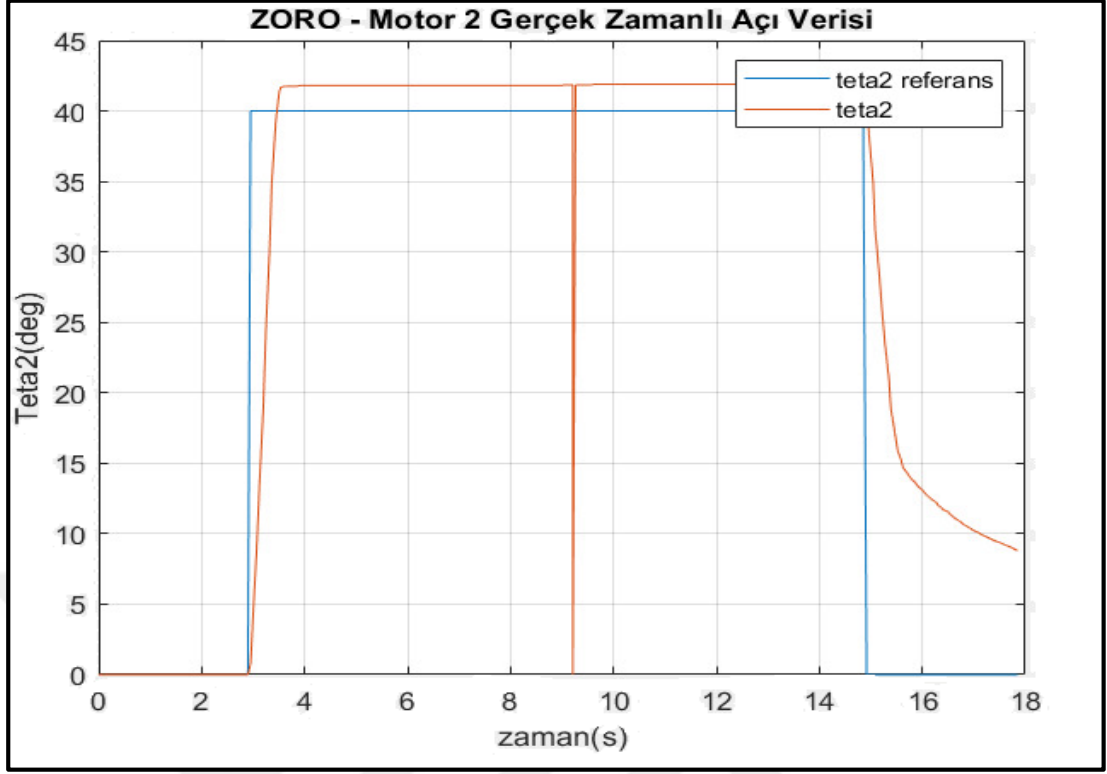


Şekil 6.7. Altı eklemin doğrudan veri ile eş zamanlı çalıştırılması

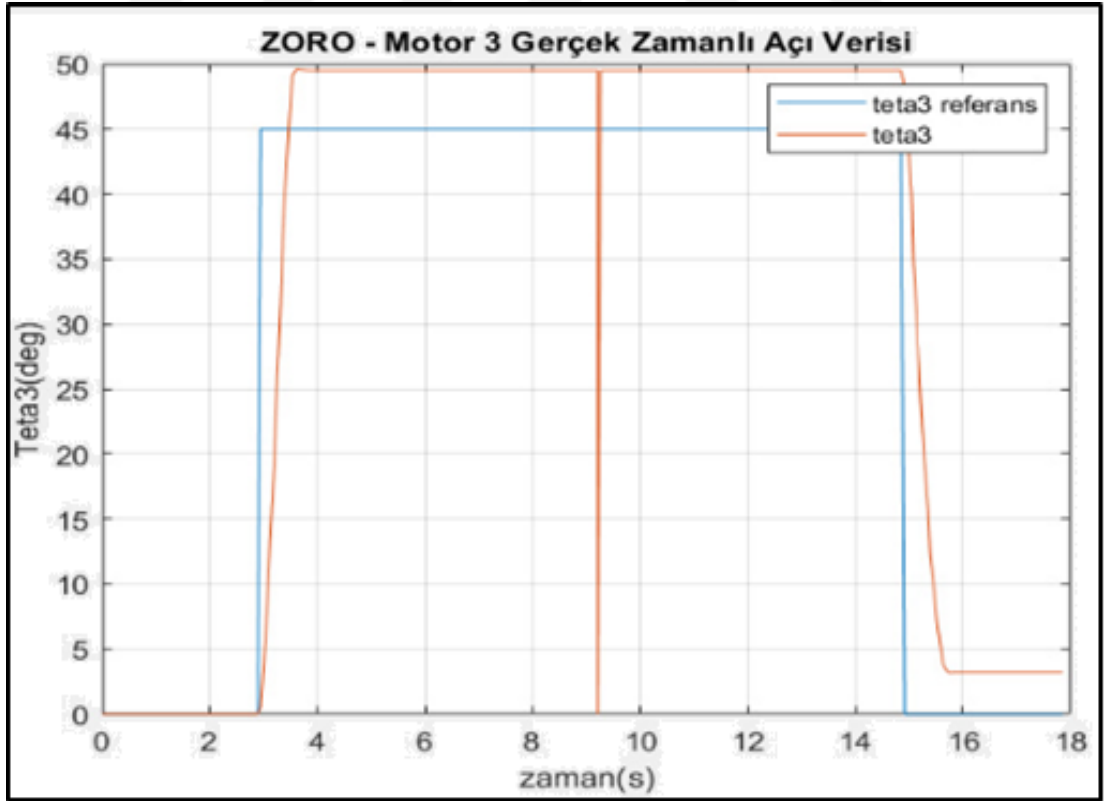
İlk üç ekleme verilen referans değerlere hareketinin sağlanmasıyla ilgili çalışma gerçekleştirilmiştir. Tüm hareketleri diğer eklemler ile eş zamanlı olarak gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Şekil 6.8’de θ_1 ve referans θ_1 ’e ait açı-zaman grafiği, Şekil 6.9’da θ_2 ve referans θ_2 ’ye ait açı-zaman grafiği, Şekil 6.10’da θ_3 ve referans θ_3 ’e ait açı-zaman grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 6.8. Birinci ekleme motoru gerçek zamanlı çalışma / altı ekleme eş zamanlı



Şekil 6.9. İkinci eklem motoru gerçek zamanlı çalışma / altı eklem eş zamanlı



Şekil 6.10. Üçüncü eklem motoru gerçek zamanlı çalışma / altı eklem eş zamanlı

6.2. İleri Kinematik Model Kullanılarak Gerçek Zamanlı Yörünge Takibi Çalışmaları

Gerçek zamanda hareketlerin daha yumuşak ve kontrollü olarak gerçekleştirilebilmesi için bir yörünge fonksiyonu oluşturulduğu önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Öncelikle ileri kinematik model kullanılarak elde edilen konum ve yönelim bilgilerinin yörünge fonksiyonuna verilmesi ve bu fonksiyon sonucunda üretilen zamana bağlı referans yörüngelerin sisteme gerçek zamanlı olarak verilmesi ile yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki gibidir.

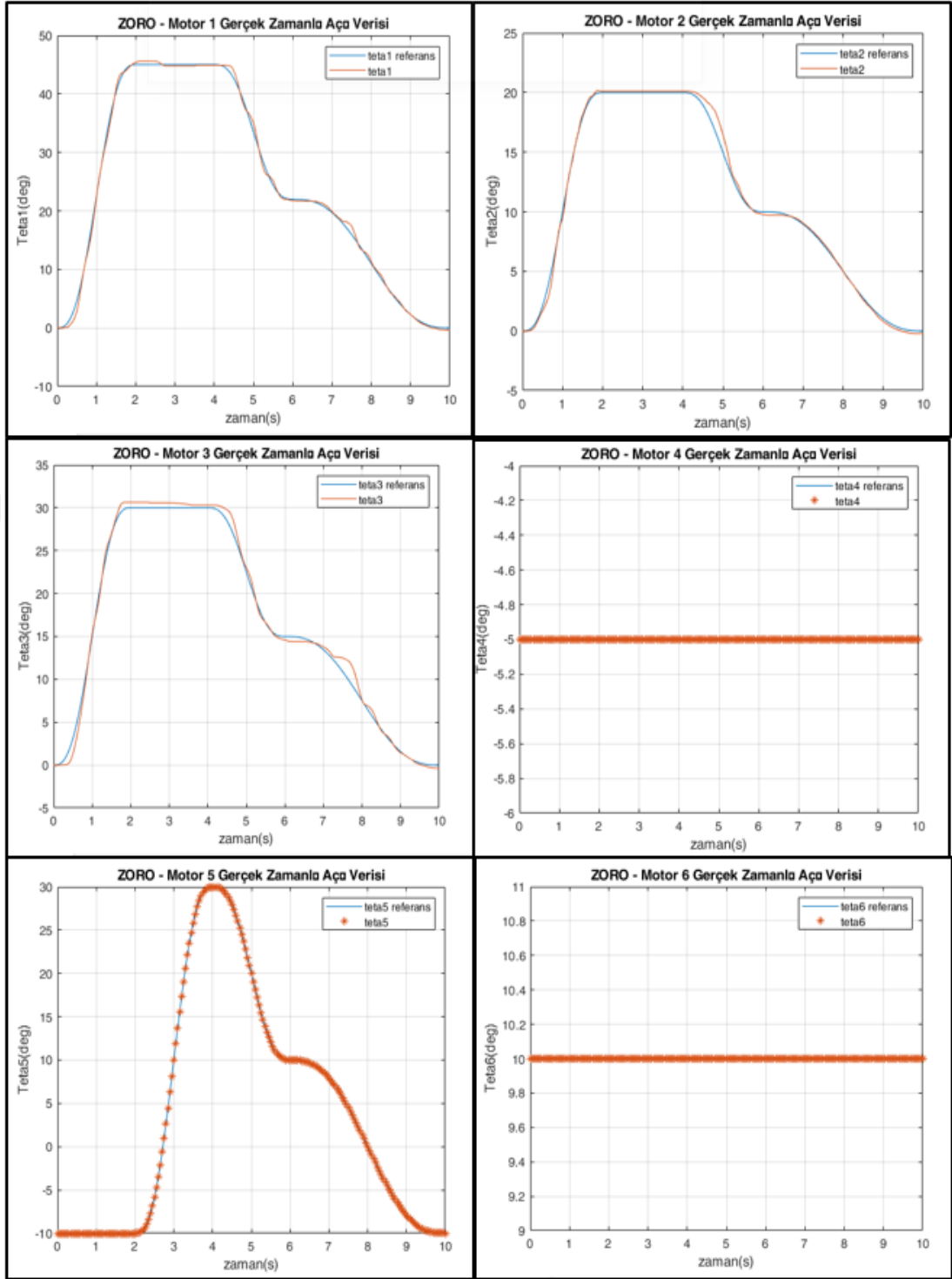
6.2.1. Çalışma-1

Robotun eklem değişkenlerine verilen referans değerlerini yumuşak bir şekilde takip edebilmesi amaçlanmaktadır. Deney sonucunda yörünge fonksiyonu kullanılmadan gerçekleştirilen deneylere göre çok daha yumuşak hareketler gözlenmiştir.



Şekil 6.11. İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-1 (a)t=2 anındaki görüntü (b) t=5 anındaki görüntü (c) t=10 anındaki görüntü

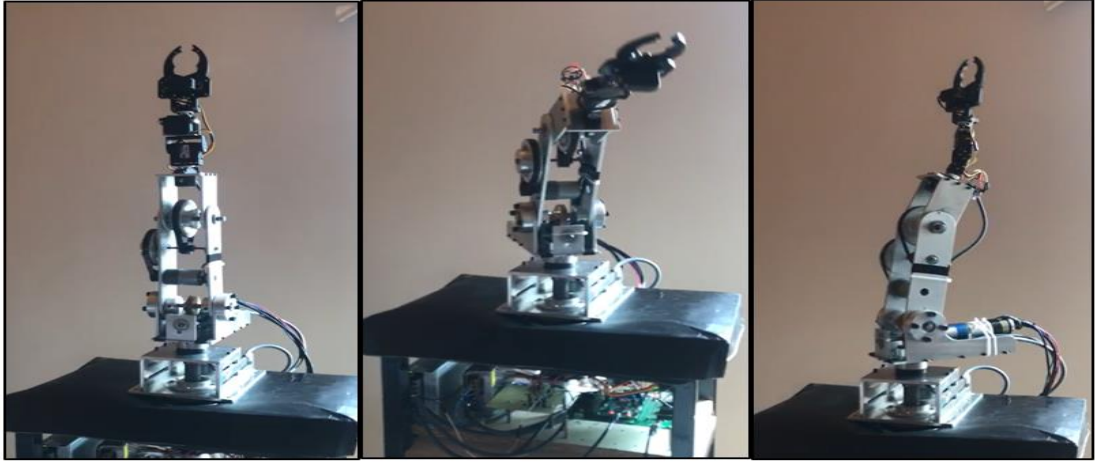
Gerçek zamanlı çalışma sonucu, robotta bulunan her bir ekleme verilen referans yörüngeleri ve bu yörüngelere karşılık motorlardaki sensörlerden alınan veriler Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.12. İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-1/motor verileri

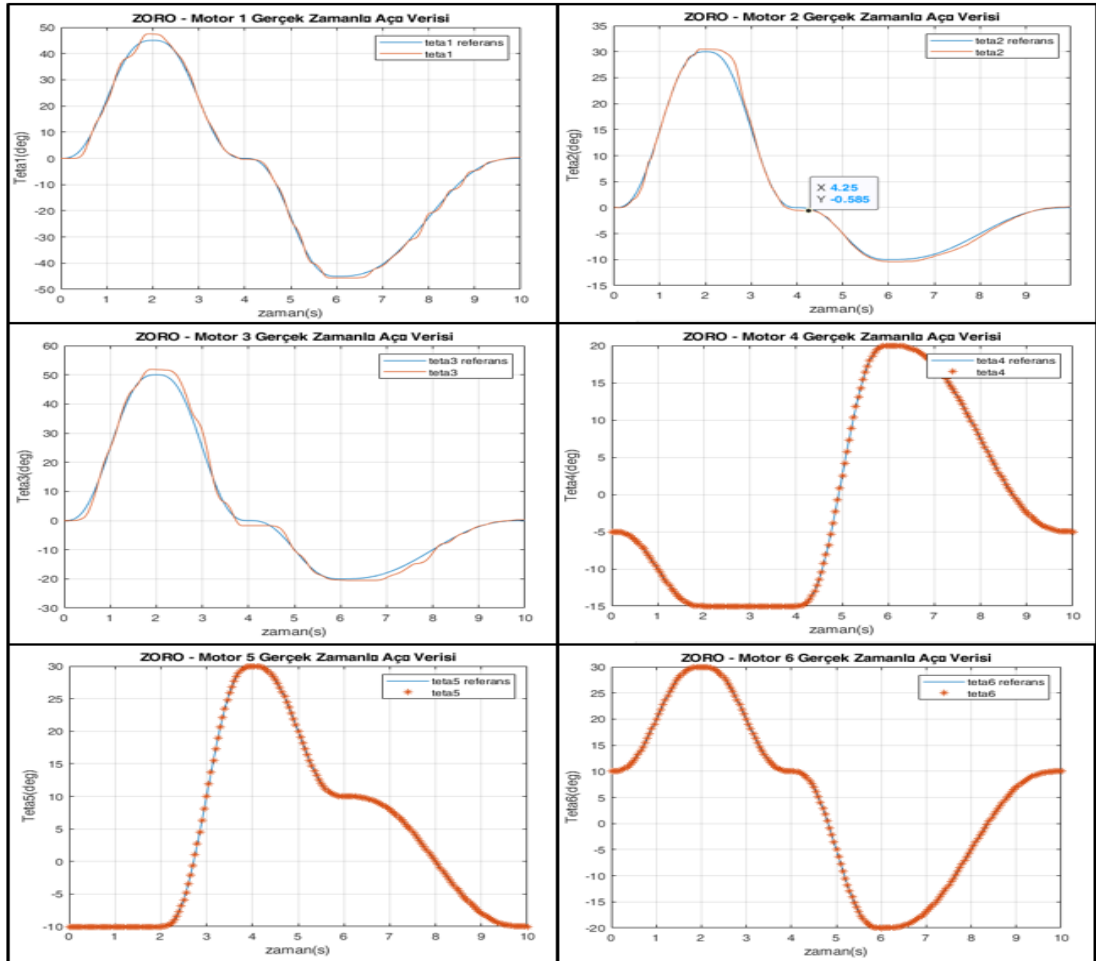
6.2.2. Çalışma-2

İleri Kinematik model kullanılarak gerçekleştirilen bir diğer yörünge takibi çalışması aşağıda paylaşılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda hazırlanmış olan yörünge fonksiyonunun düzgün çalıştığı ortaya konulmuştur.



Şekil 6.13. İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-2

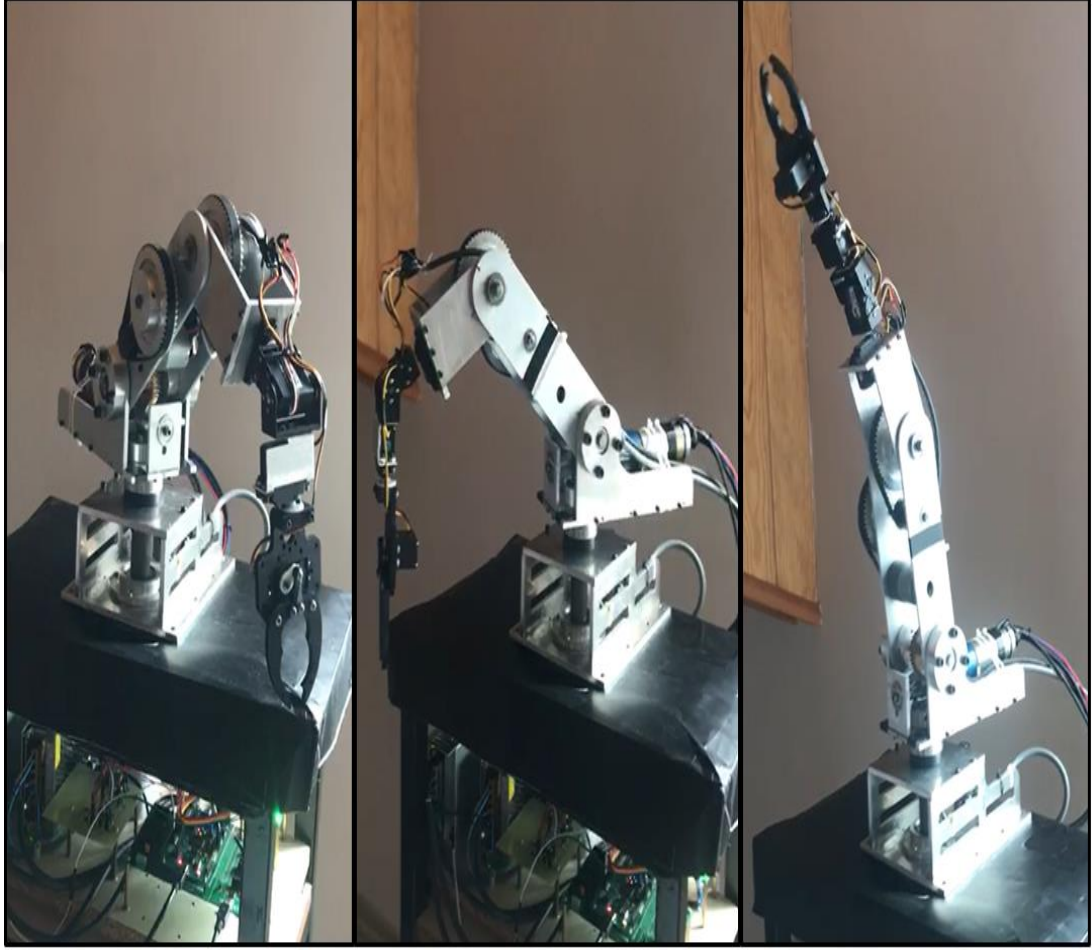
Gerçek zamanlı çalışma sonucunda MATLAB ortamında elde edilen, motorların zamana bağlı açı verileri grafiklerinde referans açı değerleri ve gerçek zamanlı değerler karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.14. İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-2/motor verileri

6.2.3. Çalışma-3

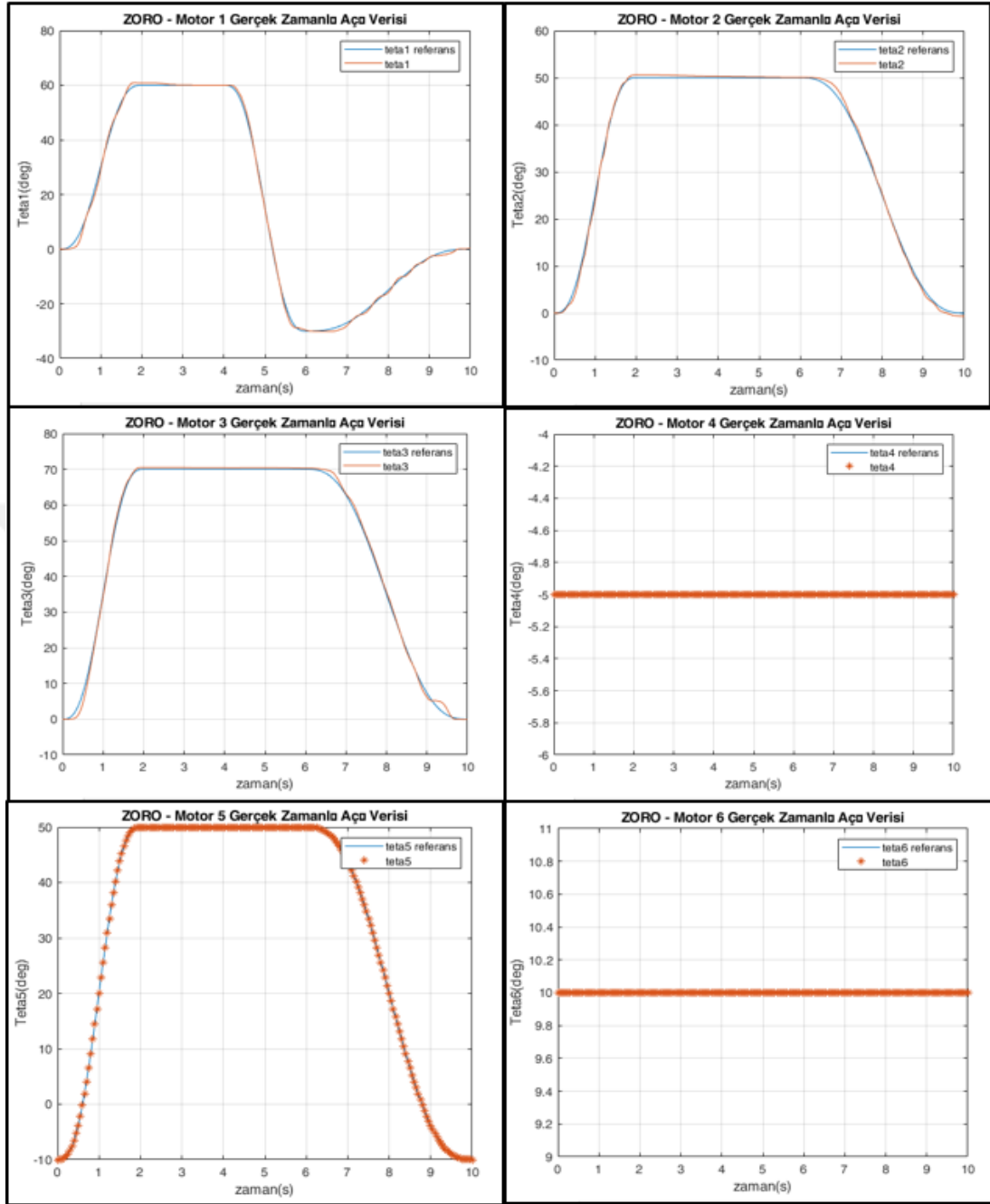
Robotun yörünge planlama fonksiyonunun üretmiş olduğu referans veriler ile gerçek zamanlı hareketi sağlanmıştır. Robotun istenen referans değerleri takip edebildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma esnasında robottan alınan görüntüler Şekil 6.15'te paylaşılmıştır.



Şekil 6.15. İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-3 (a) $t=2$ anındaki görüntü (b) $t=6$ anındaki görüntü (c) $t=10$ anındaki görüntü

Çalışmalar sonucunda tüm eklemlerin zamana bağlı olarak istenen konum ve yönelime sahip olabilmek için gerçekleştirmiş olduğu hareketlerin doğruluğu aktuatörler üzerinde yer alan enkoder verileri ile gözlemlenmiştir. Gerçek zamanlı veriler ve referans verilerin kıyaslandığı veri grafikleri Şekil 6.16'da yer almaktadır.

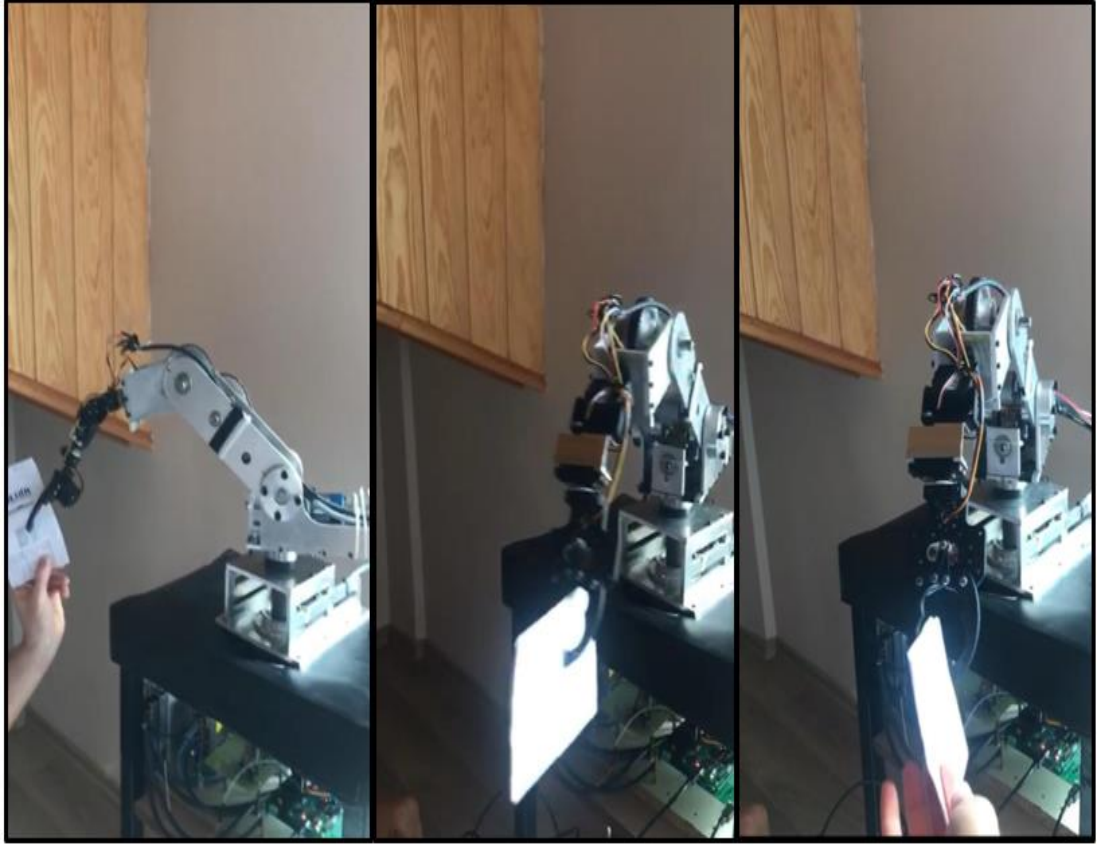
Grafiklerden de görülebileceği gibi geliştirilen kontrol algoritması sisteme verilen yörüngeyi takip etme konusunda son derece başarılı olmuştur.



Şekil 6.16. İleri kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-3/motor verileri

6.3. Tut-Bırak Uygulaması

Zoro robotun tasarımı esnasında faydalı yük kapasitesi 500 gram olarak belirlenmiştir. Uç işlevci ile tut-bırak deneyi gerçekleştirilerek istenen işlemlerin yapılabilirliği test edilmiştir. Şekil 6.17’de görüldüğü gibi robota bir kağıt verilerek istenen yörünge boyunca taşınması ve daha sonra kağıdı bırakması amaçlanmıştır ve gerçek zamanlı olarak denenmiştir.



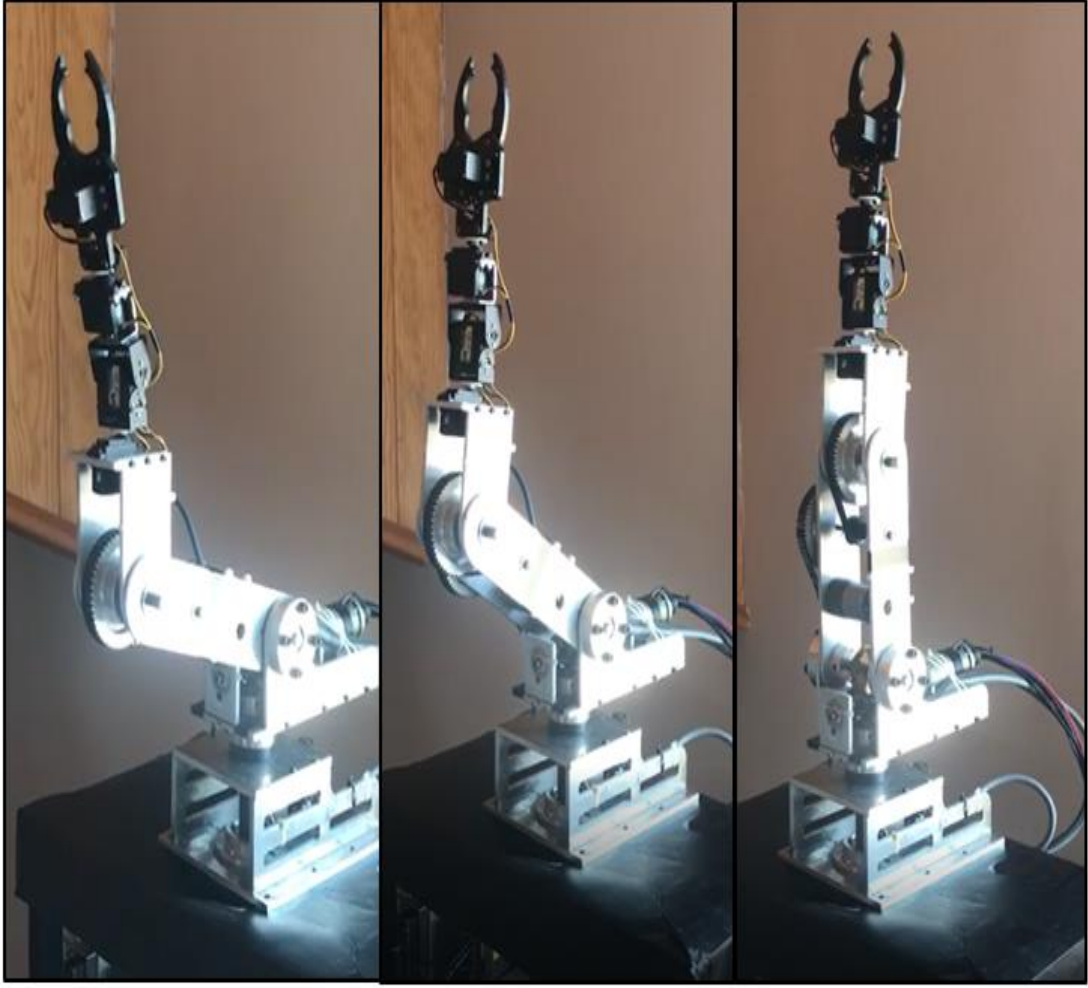
Şekil 6.17. ZORO tut-bırak uygulaması

6.4. Ters Kinematik Model Kullanılarak Gerçek Zamanlı Yörünge Takibi Çalışmaları

Ters kinematik fonksiyonuna gönderilen referans konum ve yönelim bilgileri ters kinematik çözümü sonucu eklem uzayı referans değişkenleri olarak elde edilir. Bu çözümleme esnasında birden fazla çözüm kümesinin elde edilmesi durumunda gerçekleştirilen işlemler Bölüm 3.3'te anlatılmaktadır. Eklem uzayı değişkenlerinin yörünge planlama fonksiyonuna gönderilmesi sonucunda zamana bağlı olarak elde edilen referans konum yörüngeleri STM32 kontrol kartına gönderilir ve sonrasında sistemin yumuşak hareketlerle istenen hedef noktaya gitmesi sağlanır.

6.4.1. Çalışma-1

İlk çalışmada robotun uç işlevcisinin Z eksenine doğrultusunda hareket etmesi amaçlanmıştır. Ters kinematik model kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada sisteme verilen referans yörüngeleri ile robotun istenen konum ve yönelime ulaşmak için gerçekleştirmiş olduğu hareketin yumuşak bir şekilde yapılması sağlanmaktadır. Şekil 6.18'de gerçekleştirilen çalışmanın görselleri verilmiştir.

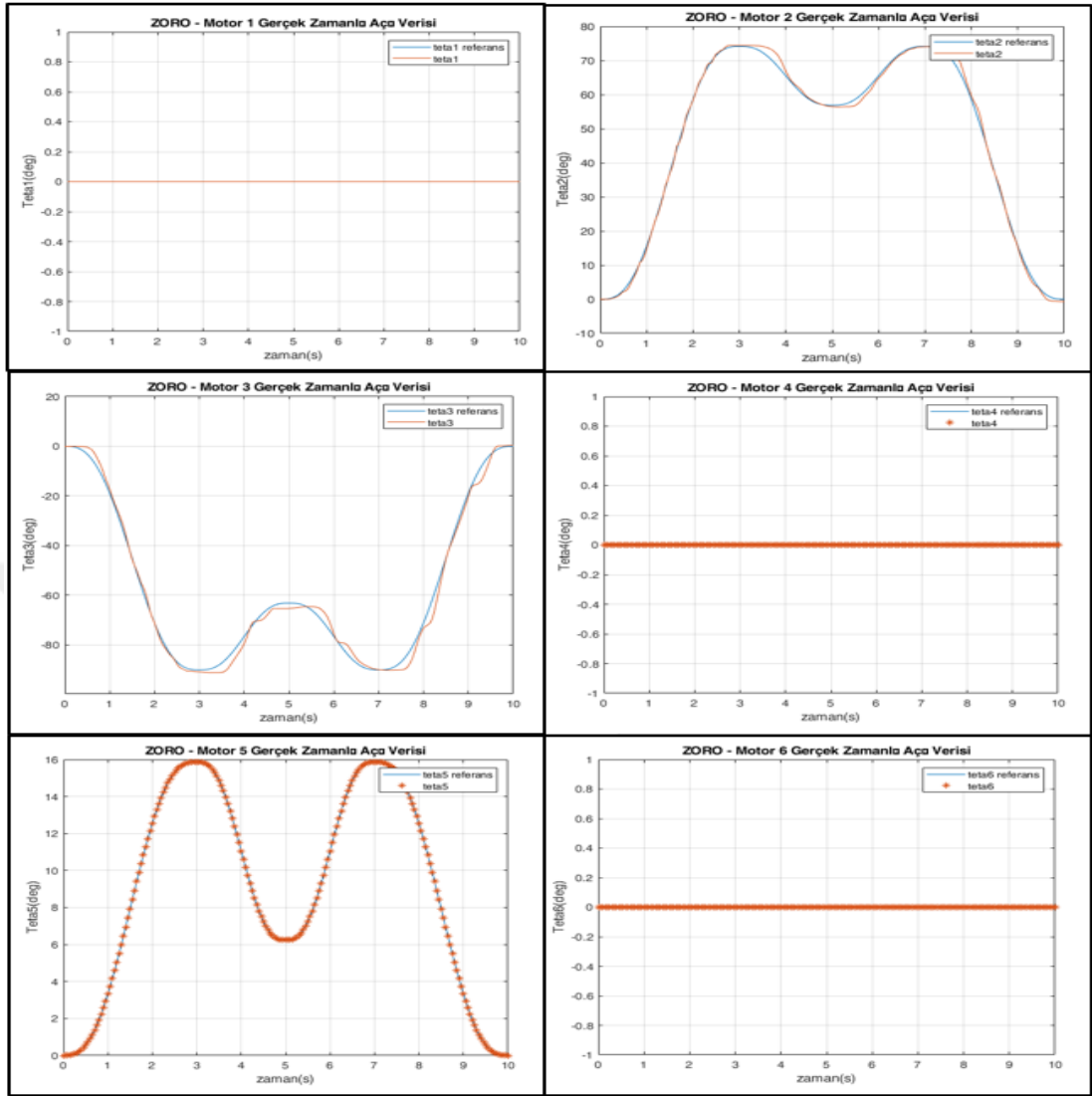


Şekil 6.18. Ters kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-1

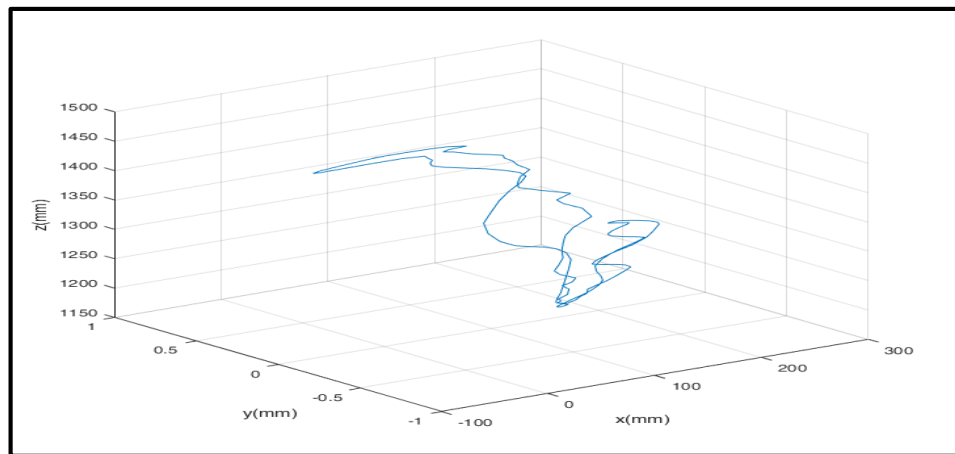
Bu çalışmalar kapsamında algoritmada her bir döngü içerisinde ters kinematik fonksiyonu, yörünge fonksiyonu ve veri gönderme fonksiyonları sırasıyla çağrılmaktadır. Ters kinematik fonksiyonunda, kartezyen uzay referansları kullanılarak eklem uzayı referansları hesaplanmaktadır. Bir sonraki adımda, yeni hesaplanan referans değerlere şuanda bulunan konumdan yumuşak bir şekilde geçişi sağlamak amacıyla yörünge fonksiyonu kullanılmaktadır. Yörünge fonksiyonu sonucu elde edilen değerler ise, sırasıyla STM32 kartına gönderilmekte ve bu kart içerisindeki kontrolör yapısı kullanılarak robottan istenen hareketin en az aşım ve en kısa oturma süresi sağlanacak şekilde çalışması gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında eklem uzayının referans değerleri ile gerçek zamanlı verilerin karşılaştırılabilmesi için elde edilen grafikler Şekil 6.19’da paylaşılmıştır.

Uç işlevcinin kartezyen uzayında izlediği yörüngey Şekil 6.20’de paylaşılmaktadır.



Şekil 6.19. Ters kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-1 / motor verileri



Şekil 6.20. Robotun uç işlevcisinin kartezyen uzayında izlediği yörünge / çalışma-1

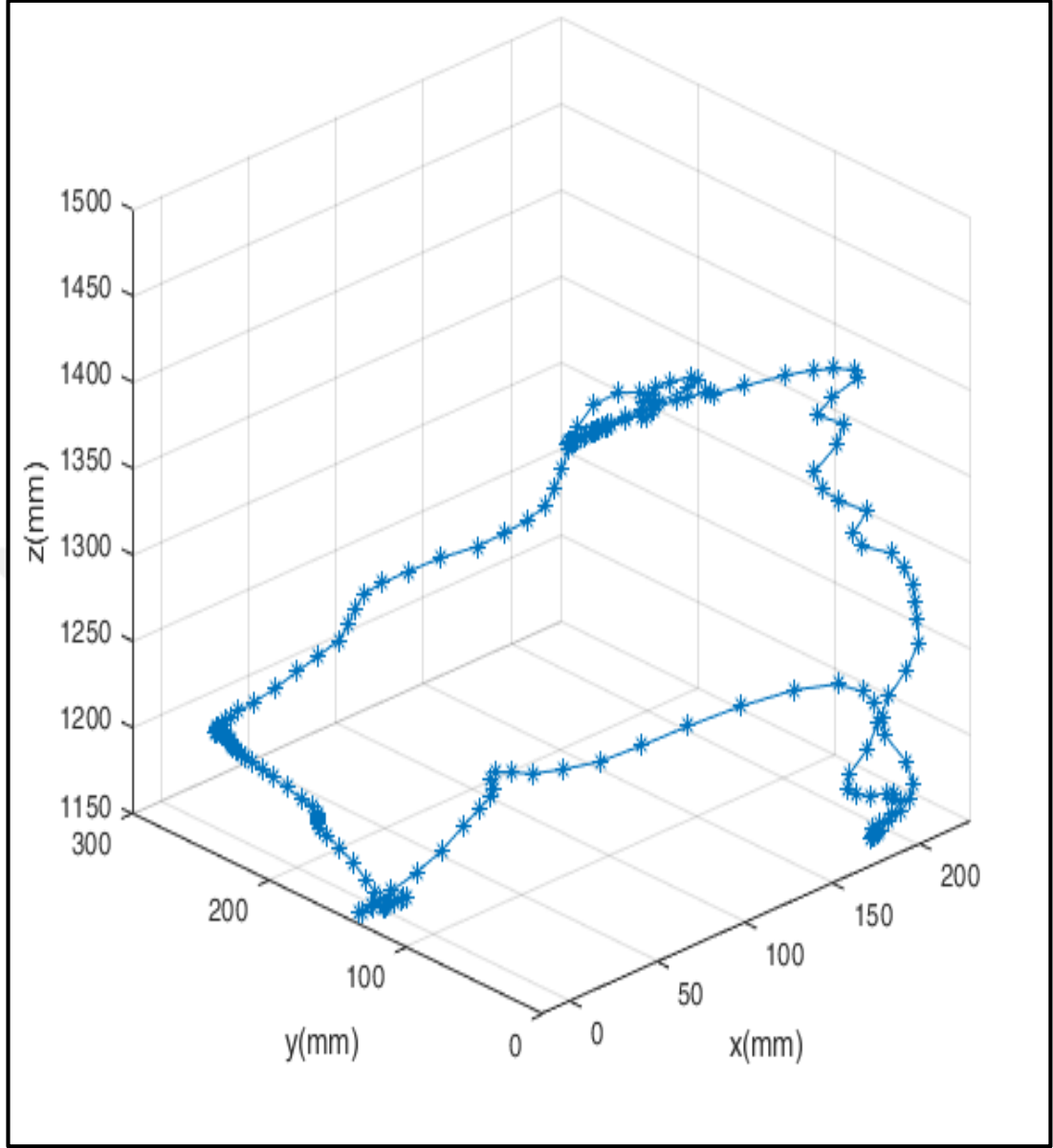
6.4.2. Çalışma-2

Birinci çalışmada olduğu gibi robotun uç işlevcisine konum ve yönelim referans verileri gönderilmiştir. Bu kartezyen uzay verilerinden ters kinematik çözümü sonucunda eklem değişkenleri elde edilmiştir. Elde edilen referans veriler yörünge fonksiyonuna gönderilmiş ve fonksiyonun çıkışından elde edilen konum yörüngelerinin sisteme gönderilmesi sağlanmıştır. Tüm çalışmalar göstermektedir ki robotun kartezyen uzaydan eklem uzayına geçilerek yörünge takibi yapabilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 6.21. Ters kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-2

Gerçek zamanlı çalışmadan elde edilen robot görüntüleri Şekil 6.21’de paylaşılmaktadır. Robotun gerçekleştirmiş olduğu hareketler sonucunda eklem değişkenlerinin gerçek zamanlı verileri ile referans verilerinin kıyaslandığı grafikler Şekil 6.22’de paylaşılmaktadır.

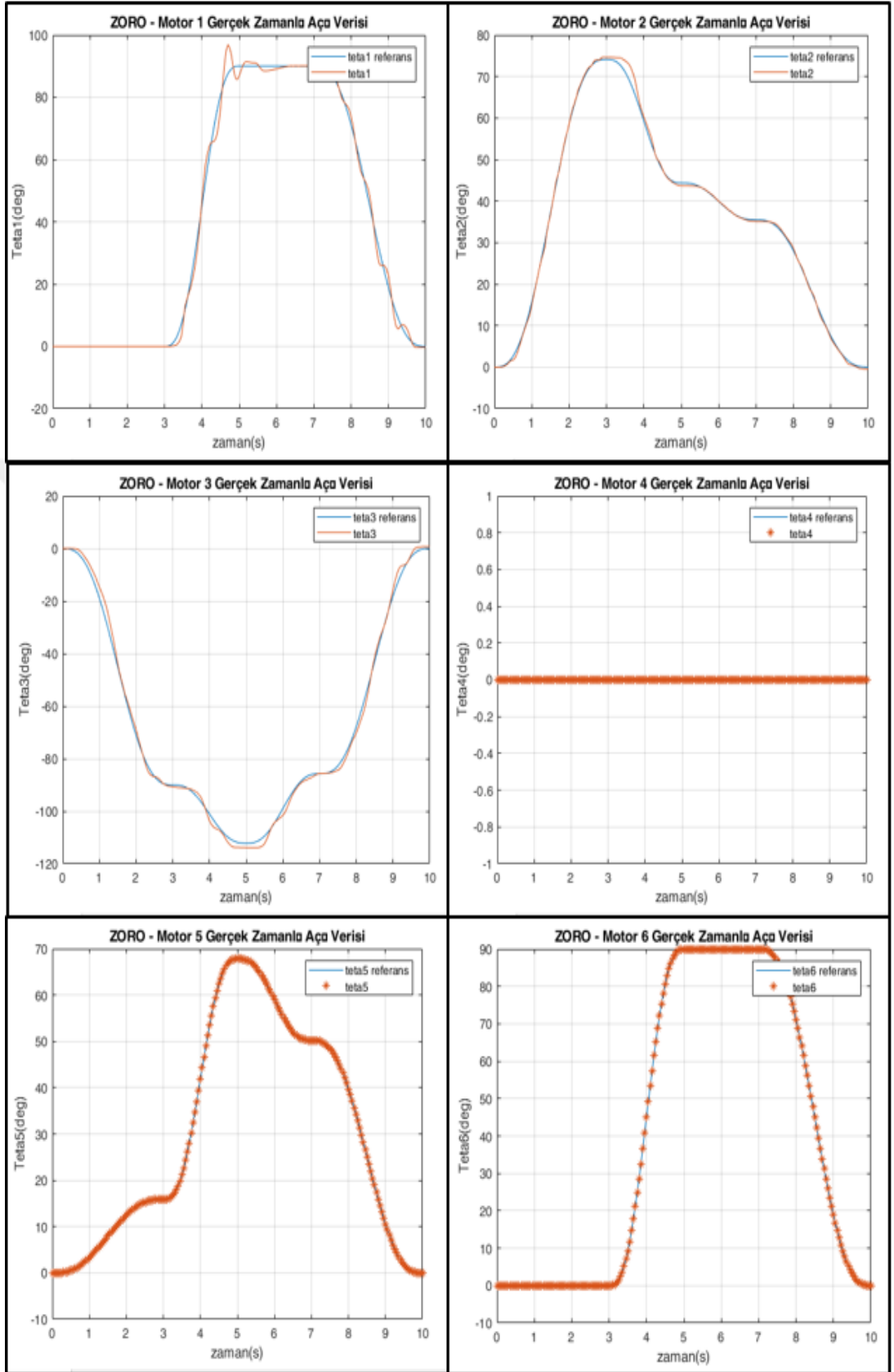


Şekil 6.22. Robotun uç işlevcisinin kartezyen uzayında izlediği yörünge / çalışma-2

Şekil 6.23'te de görülebileceği gibi robotun istenen hareketi gerçekleştirebilmesi için dördüncü eklemi dışındaki tüm eklemlerinde hareket gerçekleşmektedir.

Ters kinematik çözümlenerek gerçekleştirilen deneylerin elden alınan veriler ile robotun uzaktan kontrolü çalışmaları için alt yapı oluşturması amaçlanmıştır. Uzaktan el hareketleri ile kontrol edilebilmesi için sistemin yörünge takibi yapabildiğini gözlemlemek önemli bir kriter olarak belirlenmiştir.

Gerçek zaman ve referans verileri kıyaslandığında görülmektedir ki, istenen yörüngeyi takibi sağlanabilmektedir.



Şekil 6.23. Ters kinematik model kullanılarak yörünge takibi / çalışma-2/motor verileri

6.5. İnsan-Robot Arayüzü Kullanılarak Robotun Gerçek Zamanlı Kontrolü

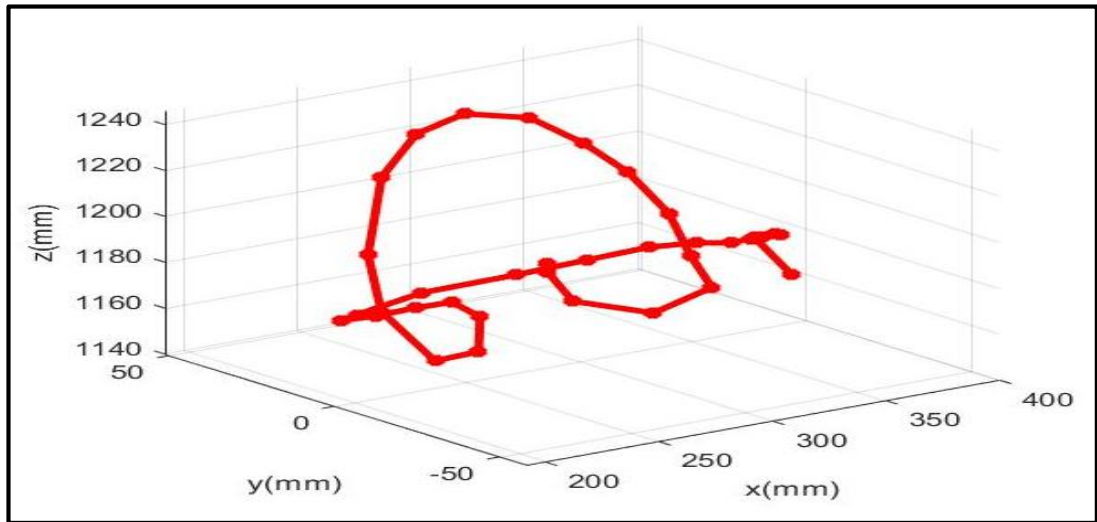
Şuana kadar yapılan çalışmalar robotun insan makine arayüzü ile çalıştırılmasını sağlamak amacı ile gerçekleştirilmiş aşamalardır. Bu aşamalarda kullanılan fonksiyonlar benzer şekilde bu çalışmada da kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan algoritma, öncelikle 5.bölümde değinilen insan-makine arayüzünü kullanarak insaneli verilerini MATLAB platformunda toplamaktadır. Daha sonra alınan bu verileri robot çalışma uzayı ile eşleştirerek, robota uygun kartezyen uzay referanslarını oluşturmaktadır. Bu işlem bir geçiş transformasyon matrisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu geçiş transformasyon matrisi alınan ilk verinin robotun ilk konumu ile eşleştirilmesinden elde edilmiştir.

Bir sonraki aşamada kartezyen uzay referansları ters kinematik fonksiyonu kullanılarak eklem uzay referanslarına dönüştürülmüştür. Robotun bulunduğu konumdan yeni hesaplanan konumuna geçişi yumuşak bir şekilde gerçekleştirmek amacıyla yörünge fonksiyonu önceki çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da kullanılmıştır.

İnsan-makina arayüzü kullanılan kontrol kartı ve bilgisayarın işlem kapasitesi doğrultusunda saniyede dört çerçeve alınacak şekilde tasarlanmıştır. Alınan her çerçeveden oluşturulan yörüngelerin her biri 50ms periyotlar halinde kontrol kartına referans verisi göndermektedir. Bu durum her beş işlemde bir yeni çerçeve alınarak yukarıda yapılan işlemlerin tekrar gerçekleştirilmesi anlamına gelmektedir.

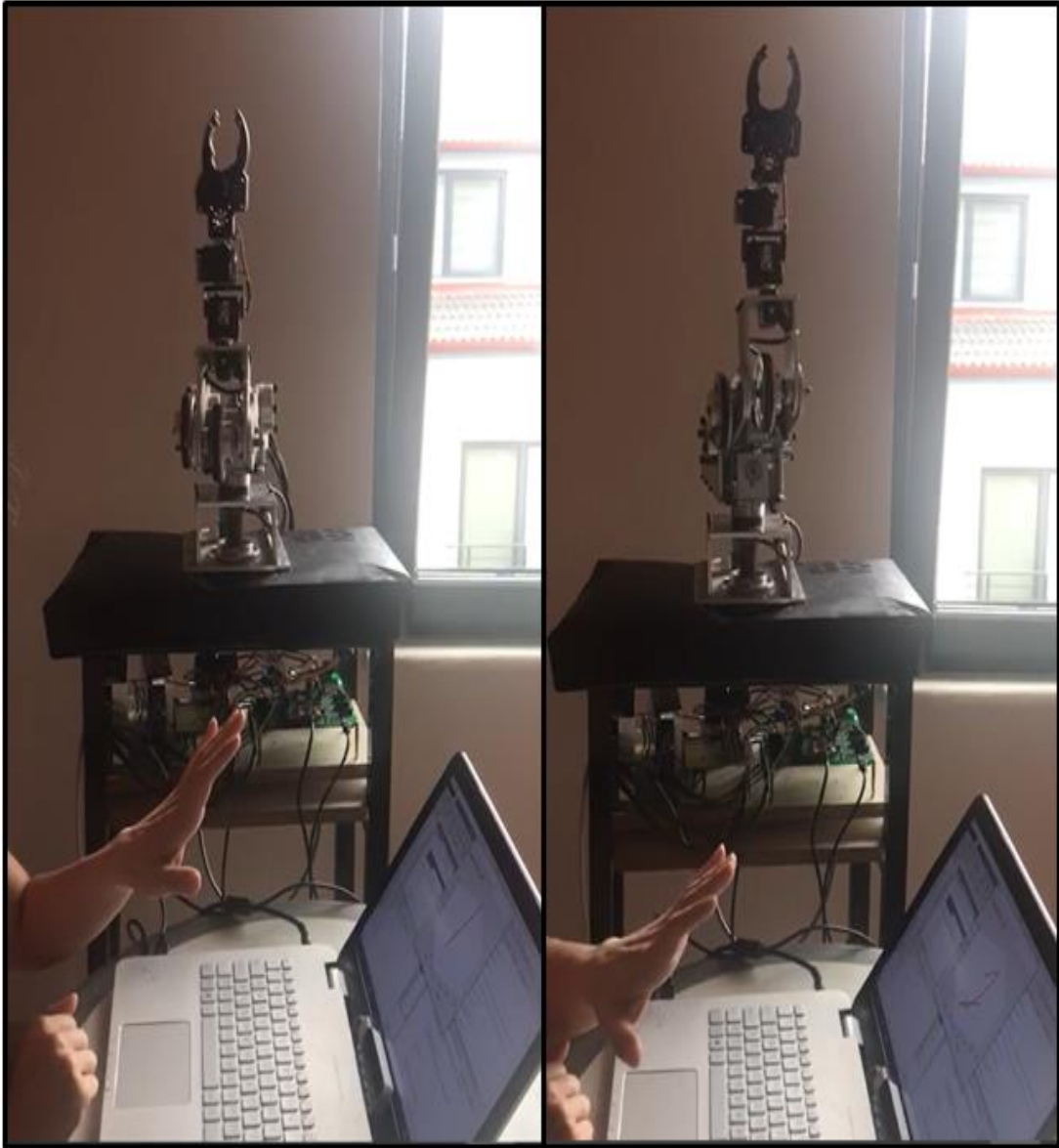
6.5.1. Çalışma-1



Şekil 6.24. İnsan elinden alınan verinin HRI çıkış sinyali

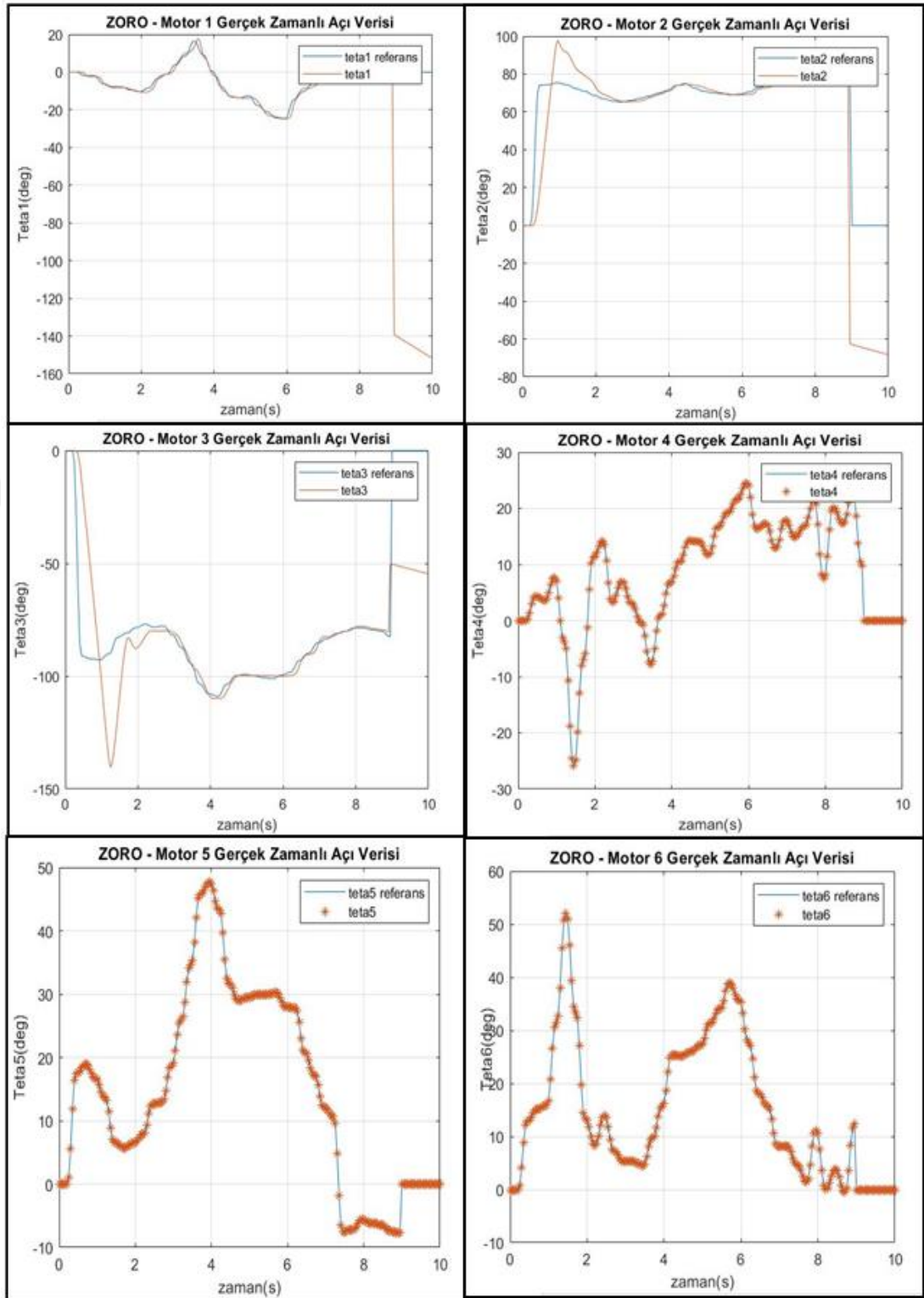
Yukarıda anlatılan işlemler doğrultusunda yapılan ilk çalışmayla ilgili sonuçlar bu bölümde paylaşılmıştır. Şekil 6.24'te insan elinden alınan verinin robot çalışma uzayına aktarılmış sinyalin üç boyutlu uzayda takip ettiği konuma ait grafik paylaşılmıştır.

Gerçek zamanlı olarak yapılan çalışma esnasına ait robot görüntüleri Şekil 6.25'te paylaşılmaktadır.



Şekil 6.25. Leap Motion ile robotun gerçek zamanlı kontrolü

Robotun eklem değişkenlerine ait gerçek zamanlı enkoder verileri ve referans verilerinin karşılaştırıldığı veri grafikleri Şekil 6.26'da paylaşılmaktadır.

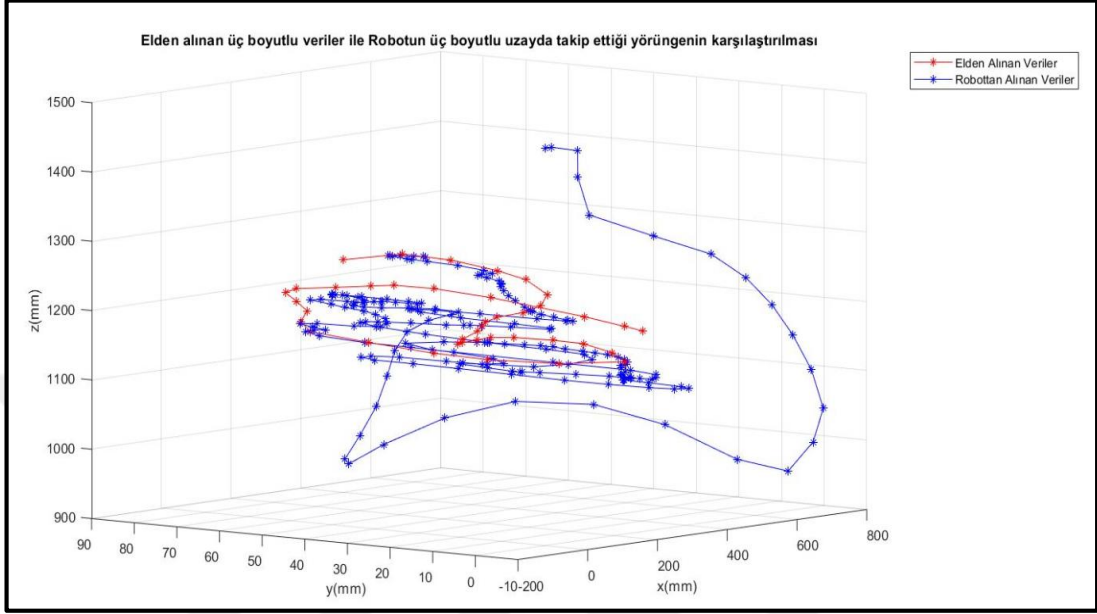


Şekil 6.26. Leap Motion ile gerçek zamanlı kontrol / motor-zaman verileri

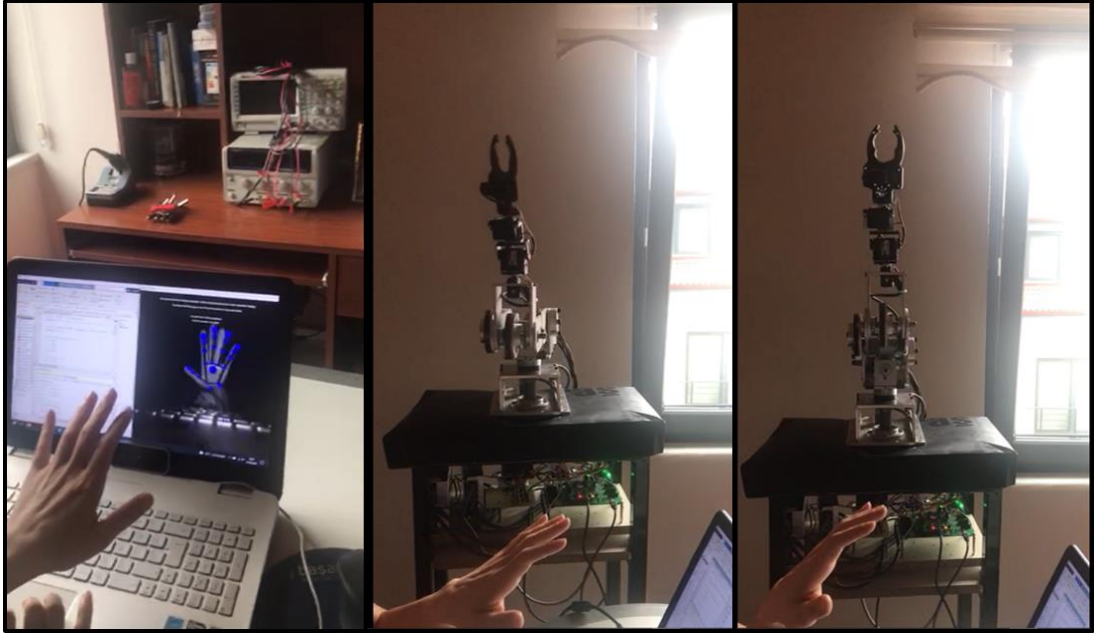
6.5.2. Çalışma-2

Yapılan çalışmaların doğruluğunu kontrol edebilmek amacıyla gerçekleştirilen ikinci denemede de robot, insan el hareketlerini takip edebilmeyi başarmıştır. Burada

doğruluğun gözlemlenebilmesi için elden alınarak oluşturulan referans veri ve robotun takip ettiği gerçek zamanlı verinin karşılaştırılması yapılmış ve Şekil 6.27'deki grafiği çizdirilmiştir.

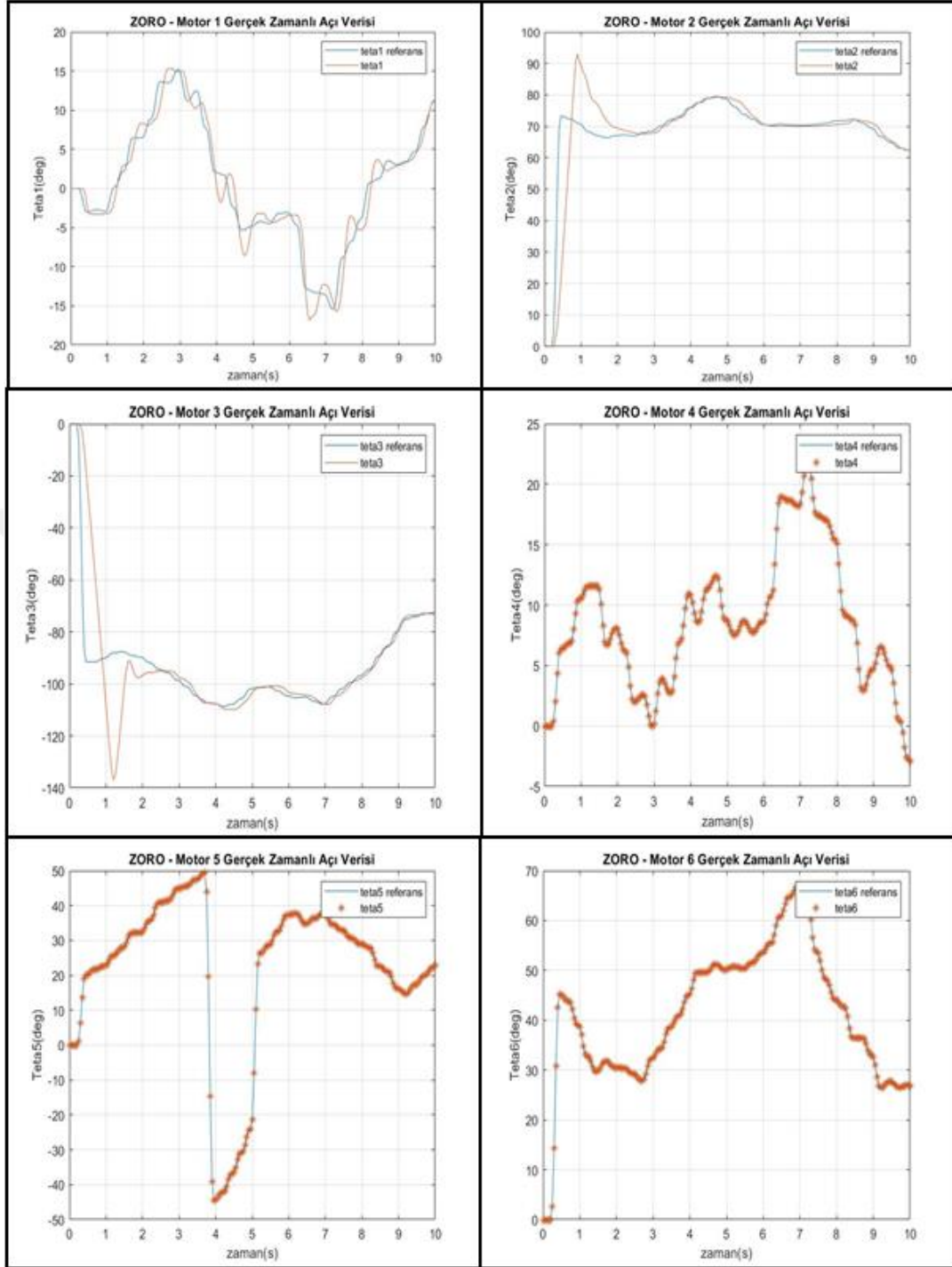


Şekil 6.27. Elden alınan veriler ile robotun üç boyutlu uzayda takip ettiği yörünge



Şekil 6.28. Leap Motion ile robotun gerçek zamanlı kontrolü-2

İkinci çalışmaya ait gerçek zamanlı görseller Şekil 6.28'de paylaşılmaktadır, ayrıca zamana bağlı olarak gösterilen eklem değişkenleri ile referans verilerin karşılaştırıldığı grafikler Şekil 6.29'da verilmiştir.



Şekil 6.29. Leap Motion ile gerçek zamanlı kontrol 2 / motor-zaman verileri

7. SONUÇLAR

Tez kapsamında altı eklemlili endüstriyel seri robot olan ZORO'nun mekanik, kontrol, elektrik ve elektronik tasarımı yapılmıştır. Bu anlamda ilk olarak literatür taraması yapılarak ilgili alanda yapılan önceki çalışmalar göz önünde bulunularak bir ön tasarımı oluşturulmuştur. Bu ön tasarımı, kinematik ve dinamik simülasyon modellerinde optimize edilerek iyileştirilmelere gidilmiş ve uygun malzemeler seçilerek son tasarım oluşturulmuştur.

Yapılan analizlerle robota uygun motorların seçimleri gerçekleştirilmiş, motorlara uygun sensörler belirlenmiş ve eklemler için gerekli yük olan hız-tork karakteristiğine sahip olması için ilgili güç aktarım elemanları belirlenmiştir.

Belirlenen motorlara uygun sensörler ve sürücüler seçilmiş ve elektronik bileşenler ve yapılacak işleme uygun kontrol kartı araması yapılarak STM32F407VG kontrol kartının kullanılmasına karar verilmiştir. Sistemin güç gereksinimi belirlenerek buna uygun gerilim-akım seviyelerine sahip güç kaynakları seçilmiştir.

Belirlenen tüm elektrik-elektronik donanıma göre bir elektronik şema E-Plan programı kullanılarak oluşturulmuştur. Kontrol kartı I/O çıkış gerilimi olan 3 V seviyesinin seçilen DC motor sürücülerinin yön tayini için yeterli olmayacağı tespit edilerek 3 V seviyesinden 5 V seviyesine geçişi sağlayacak ve aynı zamanda 5 V ile beslenmesi gereken tüm elektronik bileşenlerin güçlerini taşıyacak şekilde bir PCB tasarımı Proteus programı kullanılarak yapılmıştır.

Tasarım aşaması tamamlanan robotun prototip üretimi gerçekleştirilmiş gerekli görülen modifikasyonlar hızlı bir şekilde yapılmıştır.

ZORO ileri kinematik modeli Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılarak parametrik olarak elde edilmiştir. Robotun ters kinematik modeli ise analitik çözüm kullanılarak oluşturulmuştur ve eklemler açılımları tasarım parametreleri ve istenen konum ve yönelim cinsinden bulunmuştur. Aynı şekilde robotun hız kinematiği de Jakobiyan analizi yapılarak bulunmuştur. Elde edilen modellerin doğruluğu simülasyon üzerinde yapılan çalışmalarla belirlenmiştir.

ZORO'nun nümerik dinamik modeli Inventor programında oluşturulan üç boyutlu modelin MATLAB-Simscape'e iki programın arasında kullanılan eklenti yardımıyla aktarılmasıyla elde edilmiştir. Robotun robotun ters ve ileri dinamik analitik modeli oluşturularak tasarımın doğrulanması ve simülasyon çalışmalarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılmak için gerekli yörünge planlaması da geliştirilmiştir.

Robotun uç işlevcisinin hareketini, insan eliyle kontrol edebilmek için bir insan-makine arayüzü tasarlanmıştır. Arayüzde Leap Motion cihazı kullanılarak insan elinden alınan veriler MATLAB ortamına aktarılmıştır. Yapılan pratik çalışmalar sonucu HMI verilerinin robotun çalışma uzayına eşleştirilmesi sağlanmıştır.

HMI'dan alınan veriler MATLAB'te yazılan ters kinematik ve yörünge planlaması fonksiyonları kullanılarak referans verileri hesaplanmakta ve bu referansların da periyodik olarak STM32 kartına gönderilmesi sağlanmıştır. Kontrol kartı içerisinde motor enkoderlerinden gelen geri besleme verileri ile gelen referans verileri oluşturulan PID fonksiyonuna gönderilir. Her motor için uygun PID parametreleri belirlenerek referans verilerine en kısa sürede ve en düşük aşım yapılacak şekilde gidilmesi sağlanmıştır.

Motor enkoder verileri STM32 kartından periyodik olarak MATLAB ortamına seri haberleşme kullanılarak aktarılmaktadır. Bu şekilde robotun yörünge izleme kabiliyeti, bilgisayar platformundaki MATLAB ortamına gelen bu veriler kullanılarak oluşturulan grafiklerin analiz edilmesiyle gözlenebilmektedir.

Tüm bu aşamalar tamamlandıktan sonra robotun deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla doğrudan kartezyen uzay referanslarıyla, eklem uzayı referanslarıyla ve son olarak da HMI ile hareket ettirilme deneyleri gerçekleştirilmiş ve robotun istenen yörüngeyi takip ettiği görülmüştür. Çalışma performansının iyileştirilmesi için PID parametre ve yörünge optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır.

Gelecek çalışmalarda, robotun çalışmasının daha da iyileştirilmesi için uyarlamalı kontrol ve çeşitli doğrusal olmayan kontrol yöntemleri üzerinde çalışılması hedeflenmektedir. Gerekli bütçe bulunduğu takdirde için daha kaliteli motor-sensör kullanılarak ilerleyen yıllarda daha hassas konumlandırma yapabilen robot prototipi üretimi mümkün olacaktır.

Aynı zamanda, robotun insanlarla aynı ortamda çalışabilmesini sağlayacak kuvvet sensörleri ve kuvvet tabanlı kontrolörlerin geliştirilmesi de ilerleyen yıllarda yapılması düşünülen bir başka amaçtır.



KAYNAKLAR

- [1] Atzori L., Iera A., Morabito G., The Internet of Things : A survey, *Computer Networks*, DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [2] Szabolcsi R., The Birth of the Term Robot, *Advances in Military Technology*, 2014, **9**(1), 117-129.
- [3] Unimate The First Industrial Robot, A Tribute to Joseph Engelberger, <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>, (Ziyaret Tarihi: 15 Ağustos 2019).
- [4] Yeshmukhametov A., Kalimoldayev M., Mamyrbayev O., Amirgaliev Y., Design and Kinematics of Serial/Parallel Hybrid Robot, *3rd International Conference on Control, Automation and Robotics* , Nagoya, Japonya, 24-26 Nisan 2017.
- [5] Huashan L., Xiaobo L., Shiqiang Z., Xiaofei L., Jerk-Bounded and -Continuous Trajectory Planning for a 6-DOF Serial Robot Manipulator with Revolute Joints, *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, Yantai, Çin, 22-24 Temmuz 2011.
- [6] Gautier M., Briot S., Dynamic Parameter Identification of a 6 DOF Industrial Robot Using Power Model, *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Almanya, 6-10 Mayıs 2013.
- [7] Wang H., Qi H., Xu M., Tang Y., Yao J., Yan X., Li M., Research on the Relationship Between Classic Denavit-Hartenberg and Modified Denavit-Hartenberg, *2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design*, DOI: 10.1109/ISCID.2014.56.
- [8] Denavit J., Hartenberg R. S., A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1955, **22**(2), 215-221.
- [9] Veitschegger W., Wu C., Robot Accuracy Analysis Based on Kinematics, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1986, **2**(3), 171-179.
- [10] Kumar V., Sen S., Roy S. S., Das S. K., Shome S. N., Inverse Kinematics of Reduntan Manipulator using Interval Newton Method, *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 2015, **5**(2), 19-29.

- [11] Anand S., Software for Control and Dynamic Simulation of Unimate Puma 560 Robot, Master of Science, Ohio University, The Faculty of the College of Engineering and Technology, Athens, 1993.
- [12] Zada V., Belda K., Mathematical Modeling of Industrial Robots Based on Hamiltonian Mechanics, *17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, High Tatras, Slovakia, 29-01 Mayıs-Haziran 2016
- [13] Kunquan L., Rui W., Closed-Form Dynamic Equations of the 6-RSS Parallel Mechanism Through the Newton-Euler Approach, *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Shangshai, Çin, 6-7 Ocak 2011.
- [14] Zhang D., Wei B., Design of a Joint Control System for Serial Mechanical Arms Based on PID and MRAC Control, *Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems(ACIRS)*, Tokyo, Japonya, 20-22 Temmuz 2016.
- [15] Katliar M., Drop F.M., Teufel H., Diehl M., Bühlhoff H.H., Real-Time Nonlinear Model Predictive Control of a Motion Simulator Based on a 8 DOF Serial Robot, *European Control Conference (ECC)*, Limassol, Güney Kıbrıs Rum Kesimi, 12-15 Haziran, 2018.
- [16] Bingül Z., Karahan O., Fractional PID Controllers Tuned by Evolutionary Algorithms for Trajectory Control, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2012, **20**(1), 1123-1136.
- [17] Bingül Z., Karahan O., A Fuzzy Logic Controller Tuned with PSO for 2 DOF Robot Trajectory Control, *Expert Systems with Applications*, 2011, **38**(1), 1017-1031.
- [18] Varol H. A., Bingül Z., A New PID Tuning Tecnique Using Ant Algorithm, *American Control Conference*, Boston MA, ABD, 30-3 Haziran-Temmuz, 2004.
- [19] Weichert F., Bachmann D., Rudak B., Fisseler D., Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller, *Sensors*, 2013, **13**(5), 6380-6393.
- [20] Bingül Z., Küçük S., *Robot Kinematiği*, 1.Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2009.
- [21] Bingül Z., Küçük S., *Robot Dinamiği ve Kontrolü*, 1.Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2008.
- [22] Ni T., Yamada H., Teleoperation System with Virtual Reality Based on Stereo Vision, *International Conference on Transportation, Mechanical and Electrical Engineering(TMEE)*, Changchun, Çin, 16-18 Aralık, 2011.

- [23] Zhou X., He J., Qi W., Hu Y., Dai J., Xu Y., Hybrid IMU/muscle Signals Powered Teleoperation Control of Serial Manipulator Incorporating Passivity Adaptation, *5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics(ICARM)*, Shenzhen, Çin, 3-6 Temmuz 2020.
- [24] Su H., Schmirander Y., Li Z., Zhou X., Ferrigno G., Bilateral Teleoperation Control of a Redundant Manipulator with an RCM Kinematic Constraint, *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, Paris, Fransa, 31-31 Mayıs-Ağustos 2020.
- [25] Pillajo C., Human Machine Interface HMI using Kinect Sensor to control a SCARA robot, *IEEE Colombian Communication Conference(COLCOM)*, Kolombiya, 2013.
- [26] Ruan X., Li J., Xu F., Yu N., The motion control of mobile self-balancing robot base on vision-teleoperation, *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Pekin, Çin, 6-8 Temmuz 2012.
- [27] Raj M. D., Gogul I., Thangaraja M., Sathiesh Kumar V., Static Gesture Recognition based Precise Positioning of 5-DOF Robotic Arm using FPGA, *Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA)*, Chennai, Hindistan, 6-8 Ocak 2017.
- [28] Zinchenko K., Wu C. Y., Song K. T., A Study on Motion Control of a Robotic Endoscope Holder Using Speech Recognition, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Taipei, Tayvan, 14-17 Mart 2016.
- [29] Schou C., Damgaard J. S., Bogh S., Madsen O., Human-Robot Interface for Instructing Industrial Tasks using Kinesthetic Teaching, *International Symposium on Robotics (ISR)*, Seul, Güney Kore, 24-26 Ekim 2013.



EKLER

EK-A : İLERİ KİNEMATİK MODELİNİN MATLAB'TE HESAPLANMASI

```
%close; clear; clc;
cont = 2;
if (cont == 1)
    syms h1 h2 h3 h4;
    th= sym('th',[1 6]);
    t = [th(1) th(2)-(pi/2) th(3)+(pi/2) th(4) th(5) th(6) 0];
    al = [0 -90 0 90 -90 90 0];
else
    t = zeros(1,6);
    h1 = 393;
    h2 = 380;
    h3 = 287;
    h4 = 414;
    t(1) = 0;
    t(2) = 0;
    t(3) = 90;
    t(4) = 0;
    t(5) = -90;
    t(6) = 0;
    t = [t(1) t(2)-90 t(3)+90 t(4) t(5) t(6) 0];
    al = [0 -90 0 90 -90 90 0];
end
a = [zeros(1,2) h2 zeros(1,4)];
d = [h1 zeros(1,2) h3 zeros(1,2) h4];
Ttmp = eye(4);
T_ard_tmp = eye(4);
Jw = zeros(3,2,3);
R = zeros(3,3,3)*t(1);
for i = 1:length(d)
    if (cont == 1) %tetalar parametrik ise
        T_ard_tmp = [cos(t(i)), -sin(t(i)), 0, a(i); sin(t(i))*cosd(al(i)),
cos(t(i))*cosd(al(i)), -sind(al(i)), -sind(al(i))*d(i); sin(t(i))*sind(al(i)),
cos(t(i))*sind(al(i)), cosd(al(i)), cosd(al(i))*d(i); 0, 0, 0, 1];
        T_ard(:,i) = simplify(T_ard_tmp);
        Ttmp = simplify(Ttmp* T_ard_tmp);
    else %tetalara değer verildiyse
        Ttmp = Ttmp*[cosd(t(i)), -sind(t(i)), 0, a(i); sind(t(i))*cosd(al(i)),
cosd(t(i))*cosd(al(i)), -sind(al(i)), -sind(al(i))*d(i); sind(t(i))*sind(al(i)),
cosd(t(i))*sind(al(i)), cosd(al(i)), cosd(al(i))*d(i); 0, 0, 0, 1];
    end
    if (cont == 1)
        T(:,i) = simplify(Ttmp);
    else
        T(:,i) = Ttmp;
    end
    Rtmp = T(1:3,1:3,i);
    R(:,i) = Rtmp;
end
```

```
end
syms r11 r12 r13 r21 r22 r23 r31 r32 r33 px py pz;
T_sym = [r11 r12 r13 px; r21 r22 r23 py ; r31 r32 r33 pz; 0 0 0 1];
```



EK-B : TERS KİNEMATİK PROBLEMİNİN MATLAB’TE ÇÖZÜMÜ

```
clc; clear; close;
sol_arr = zeros(6,8); %çözüm kümesi
tic;
%konstrüksiyon parametreleri
h1 = 393;
h2 = 380;
h3 = 287;
h4 = 414;

%ters kinematik parametreleri
r11 = -0.2503;
r12 = -0.797;
r13 = 0.5497;
r21 = -0.5519;
r22 = 0.584;
r23 = 0.5953;
r31 = -0.7955;
r32 = -0.1543;
r33 = -0.586;
R_des = [r11 r12 r13; r21 r22 r23; r31 r32 r33];
px = 544.3525; %gitmesi istenen px i girin
py = 623.9826; %gitmesi istenen pxy yi girin
pz = 297.995; %gitmesi istenen pz yi girin
P_des = [px; py; pz];
T_des = [R_des P_des ; 0 0 0 1];

sol_arr(1,5:8) = atan2(-py_,-px_);
for i = 1:8
k1 = mod(i,4);
k2 = mod(i,2);
d = px_/cos(sol_arr(1,i));
A = (c^2+d^2-a^2-b^2)/(2*a*b);
B = sqrt(1-A.^2);
if (k1==1) || (k1==2)
    sol_arr(3,i) = atan2(B,A);
else
    sol_arr(3,i) = atan2(-B,A);
end
r = a*cos(sol_arr(3,i))+b;
s = a*sin(sol_arr(3,i));
sol_arr(2,i) = atan2(r.*d-s.*c,r.*c+s.*d);
r13_ =
r13*cos(sol_arr(1,i))*cos(sol_arr(2,i)+sol_arr(3,i))+r23*sin(sol_arr(1,i))*cos(sol_arr
(2,i)+sol_arr(3,i))-r33*sin(sol_arr(2,i)+sol_arr(3,i));
r33_ = -r13*sin(sol_arr(1,i))+r23*cos(sol_arr(1,i));
r21_ = -r11*cos(sol_arr(1,i))*sin(sol_arr(2,i)+sol_arr(3,i))-
r21*sin(sol_arr(1,i))*sin(sol_arr(2,i)+sol_arr(3,i))-r31*cos(sol_arr(2,i)+sol_arr(3,i));
```

```

r22_ = -r12*cos(sol_arr(1,i))*sin(sol_arr(2,i)+sol_arr(3,i))-
term = sqrt(r13_^2+r33_^2);
if (k2 == 1)
    sol_arr(5,i) = atan2(term,r23_);
else
    sol_arr(5,i) = atan2(-term,r23_);
end
sol_arr(4,i) = atan2(r33_/sin(sol_arr(5,i)),r13_/sin(sol_arr(5,i)));
sol_arr(6,i) = atan2(-r22_/sin(sol_arr(5,i)),r21_/sin(sol_arr(5,i))); n
sol_arrdeg = (180/pi)*sol_arr;
end
a = 1;
for i = 1:8
    th = sol_arr(:,i);
    px_des = cos(th(1))*(h3*sin(th(2) + th(3)) + h2*sin(th(2))) -
h4*(sin(th(5))*(sin(th(1))*sin(th(4)) - cos(th(2) + th(3))*cos(th(1))*cos(th(4))) -
sin(th(2) + th(3))*cos(th(1))*cos(th(5)));
    py_des = h4*(sin(th(5))*(cos(th(1))*sin(th(4)) + cos(th(2) +
th(3))*cos(th(4))*sin(th(1))) + sin(th(2) + th(3))*cos(th(5))*sin(th(1))) +
sin(th(1))*(h3*sin(th(2) + th(3)) + h2*sin(th(2)));
    pz_des = h1 + h3*cos(th(2) + th(3)) + h2*cos(th(2)) + h4*(cos(th(2) +
th(3))*cos(th(5)) - sin(th(2) + th(3))*cos(th(4))*sin(th(5)));
    err = (px_des-px)+(py_des-py)+(pz_des-pz);
    if (err<1e-3)
        reel(:,a) = sol_arrdeg(:,i);
        a = a+1;
    end
end
end

```

EK-C : ZORO ROBOTUNUN JAKOBİYEN MATRİSİNİN HESAPLANMASI

$$J = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} & j_{14} & j_{15} & j_{16} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & j_{24} & j_{25} & j_{26} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} & j_{34} & j_{35} & j_{36} \\ j_{41} & j_{42} & j_{43} & j_{44} & j_{45} & j_{46} \\ j_{51} & j_{52} & j_{53} & j_{54} & j_{55} & j_{56} \\ j_{61} & j_{62} & j_{63} & j_{64} & j_{65} & j_{66} \end{bmatrix}$$

$$j_{11} = h_3(s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_3) + h_4(s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 s\theta_5 - c\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 - s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\theta_5 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 c\theta_5 - s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_5)$$

$$j_{12} = c\theta_1[-h_2 c\theta_2 + h_3(s\theta_2 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3) + h_4(s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_5 - c\theta_2 c\theta_3 c\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 c\theta_5 + c\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 s\theta_5)]$$

$$j_{13} = -c\theta_1[h_3(s\theta_2 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3) + h_4(s\theta_2 s\theta_3 c\theta_5 - c\theta_2 c\theta_3 c\theta_5 + c\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 s\theta_5 + s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_5)]$$

$$j_{14} = h_4(s\theta_1 c\theta_4 s\theta_5 - c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 s\theta_5 + c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 s\theta_4 s\theta_5)$$

$$j_{15} = h_4(c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 c\theta_5 - c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 s\theta_5 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 s\theta_5 - s\theta_1 s\theta_4 c\theta_5 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 c\theta_5)$$

$$j_{16} = 0$$

$$j_{21} = h_2 c\theta_1 s\theta_2 + h_3(c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_3 s\theta_2) + d_7(s\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 + c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\theta_5 + c\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 c\theta_5 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_5 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 s\theta_5)$$

$$j_{22} = -s\theta_1[h_3(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3) - h_2c\theta_2 \\ + h_4(s\theta_2s\theta_3c\theta_5 - c\theta_2c\theta_3c\theta_5 + c\theta_2s\theta_3c\theta_4s\theta_5 + s\theta_2c\theta_3c\theta_4s\theta_5 \\ + c\theta_1s\theta_2s\theta_3c\theta_4s\theta_5)]$$

$$j_{23} = -s\theta_1[d_4(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3) + h_4(s\theta_2s\theta_3c\theta_5 - c\theta_2c\theta_3c\theta_5 + \\ c\theta_2s\theta_3c\theta_4s\theta_5 + s\theta_2c\theta_3c\theta_4s\theta_5)]$$

$$j_{24} = h_4(c\theta_1c\theta_4s\theta_5 - s\theta_1c\theta_2c\theta_3s\theta_4s\theta_5 + s\theta_1s\theta_2s\theta_3s\theta_4s\theta_5)$$

$$j_{25} = h_4(c\theta_1s\theta_4c\theta_5 - s\theta_1c\theta_2s\theta_3s\theta_5 - s\theta_1s\theta_2c\theta_3s\theta_5 + s\theta_1c\theta_2c\theta_3c\theta_4c\theta_5 \\ - s\theta_1s\theta_2s\theta_3c\theta_4c\theta_5)$$

$$j_{26} = 0$$

$$j_{31} = 0$$

$$j_{32} = -h_2s\theta_2 + h_3(c\theta_2s\theta_3 - c\theta_3s\theta_2) + h_4(s\theta_2s\theta_3c\theta_4s\theta_5 - c\theta_2s\theta_3c\theta_5 \\ - s\theta_2c\theta_3c\theta_5 - c\theta_2c\theta_3c\theta_4s\theta_5)$$

$$j_{33} = -h_3(s\theta_2c\theta_3 + c\theta_2s\theta_3) + h_4(s\theta_2s\theta_3c\theta_4s\theta_5 - c\theta_2s\theta_3c\theta_5 - s\theta_2c\theta_3c\theta_5 \\ - c\theta_2c\theta_3c\theta_4s\theta_5)$$

$$j_{34} = h_4s(\theta_2 + \theta_3)s\theta_4s\theta_5$$

$$j_{35} = h_4(s\theta_2s\theta_3s\theta_5 - c\theta_2c\theta_3s\theta_5 - c\theta_2s\theta_3c\theta_4c\theta_5 - s\theta_2c\theta_3c\theta_4c\theta_5)$$

$$j_{36} = 0$$

$$j_{41} = 0$$

$$j_{42} = -s\theta_1$$

$$j_{43} = -s\theta_1$$

$$j_{44} = c\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3)$$

$$j_{45} = c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 s\theta_4 - c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 - c\theta_4 s\theta_1$$

$$j_{46} = c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\theta_5 - s\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 + c\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 c\theta_5 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_5 \\ - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 s\theta_5$$

$$j_{51} = 0$$

$$j_{52} = c\theta_1$$

$$j_{53} = c\theta_1$$

$$j_{54} = s(\theta_2 + \theta_3)s\theta_1$$

$$j_{55} = c\theta_1 c\theta_4 - s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 s\theta_4$$

$$j_{56} = c\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 + s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\theta_5 + s\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 c\theta_5 + s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_5 \\ - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 s\theta_5$$

$$j_{61} = 1$$

$$j_{62} = 0$$

$$j_{63} = 0$$

$$j_{64} = c(\theta_2 + \theta_3)$$

$$j_{65} = s(\theta_2 + \theta_3)s\theta_4$$

$$j_{66} = c\theta_2 c\theta_3 c\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 c\theta_5 - c\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 s\theta_5 - s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_5$$

EK-D : ROBOTUN LAGRANGE-EULER MODELİNİN ELDE EDİLMESİ

```
close; clear; clc;
% syms lf lt ltr m1 m2 mt Im1 Im2 Im3 g;
syms h1 h2 h3 h4 g;
dof = 6; %de?i?ken say?s?
Z_ax = [0 0 1]';

%sembolik dinamik ifadeler
m = sym('m',[1 dof]);
Ixx = sym('Ixx',[1 dof]);
Iyy = sym('Iyy',[1 dof]);
dh_x = sym('dh_x',[1 dof]);
dh_y = sym('dh_y',[1 dof]);
dh_z = sym('dh_z',[1 dof]);
for i=1:dof
    Im(:,i) = [Ixx(i) Ixy(i) Ixz(i); Ixy(i) Iyy(i) Iyz(i); Ixz(i) Iyz(i) Izz(i)];
    dh(:,i) = [dh_x(i) dh_y(i) dh_z(i) 1];
end
th = sym('th',[1 dof]);
t = [th(1) th(2)-(pi/2) th(3)+(pi/2) th(4) th(5) th(6) 0];
%al = [0 pi/2 pi/2 pi/2 0 pi/2 pi/2];
% te = sym('t',[1 6]);
td = sym('td', [1 dof]);
% t2 = 0;
% t3 = 0;
% lh = 25;
% l2 = 19;
% l3 = 23;
% lf = 23.5;
al = [0 -90 0 90 -90 90 0];
a = [zeros(1,2) h2 zeros(1,4)];
d = [h1 zeros(1,2) h3 zeros(1,2) h4];
Ttmp = eye(4);
A = zeros(3,6,6)*t(1);
B = zeros(3,6,6)*t(1);
I = zeros(3,3,6)*t(1);
mass = zeros(6,6,6)*t(1);
D = zeros(6,6)*t(1);
G = zeros(6,1)*t(1);
for i=1:dof
    for j=1:dof
        Cmux(i,j) = td(i)*td(j);
    end
end
for i = 1:dof%+1
```

```

Ttmp = [cos(t(i)), -sin(t(i)), 0, a(i); sin(t(i))*cosd(al(i)), cos(t(i))*cosd(al(i)), -
sind(al(i)), -sind(al(i))*d(i); sin(t(i))*sind(al(i)), cos(t(i))*sind(al(i)), cosd(al(i)),
cosd(al(i))*d(i); 0, 0, 0, 1];
T_ard(:, :, i) = Ttmp;
if i>1
    T(:, :, i) = T(:, :, i-1)*Ttmp;
else
    T(:, :, i) = Ttmp;
end
Rtmp = T(1:3, 1:3, i);
R(:, :, i) = Rtmp;

htmp = simplify(T(:, :, i)* dh(:, i));
h(:, i)=htmp(1:3);
cont = 1;
for j=1:6
    Atmp(:, j) = simplify(diff(h(:, i), th(j)));
    if j>i
        cont = 0;
    end
    Btmp(:, j) = cont*simplify(R(:, :, j)*Z_ax);
end
A(:, :, i) = Atmp;
% Btmp = [R(:, :, 1)*[0 0 1]' R(:, :, 2)*[0 0 1]' R(:, :, 3)*[0 0 1]'];
B(:, :, i) = Btmp;
I(:, :, i) = simplify(simplify((R(:, :, i)*Im(:, :, i))*transpose(R(:, :, i))));
mass(:, :, i) = simplify(m(i)*transpose(A(:, :, i))*A(:, :, i)+
D = simplify(mass(:, :, i)+D);
end

for i = 1:dof
    for j = 1:dof
        for k = 1:dof
            Cx(k, j, i) = simplify(diff(D(i, j), th(k))-0.5*diff(D(k, j), th(i)));
        end
    end
end
Cx = simplify(Cx);
C = simplify([simplify(sum(sum(Cx(:, :, 1).*Cmux))));
simplify(sum(sum(Cx(:, :, 2).*Cmux))]; simplify(sum(sum(Cx(:, :, 3).*Cmux))));
simplify(sum(sum(Cx(:, :, 6).*Cmux))]);
for i=1:6
    G_tmp = 0;
    for j=i:6
        G_tmp = simplify(G_tmp+simplify(A(3, i, j)*m(j)*(-g)));
    end
    G(i) = G_tmp;
end
end

```


EK-E : ZORO LAGRANGE-EULER TABANLI DİNAMİK MODEL YERÇEKİMİ VEKTÖRÜ

$$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \\ G_6 \end{bmatrix}$$

$$G_1 = 0$$

$$\begin{aligned} G_2 = & m_2 g \Delta h_{x2} s_2 + m_3 g [h_2 s_2 - \Delta h_{y3} s_{23}] + m_4 g [h_2 s_2 + h_3 s_{23} + \Delta h_{z4} s_{23}] \\ & + m_5 g [h_2 s_2 + h_3 s_{23} - \Delta h_{x5} (s_{23} s_5 - c_{23} c_4 c_5) \\ & - \Delta h_{y5} (s_{23} c_5 + c_{23} c_4 c_5) - \Delta h_{z5} (c_{23} s_4)] \\ & + m_6 g [h_2 s_2 + h_3 s_{23} - \Delta h_{x6} (c_{23} (s_4 s_6 - c_4 c_5 c_6) + s_{23} s_5 c_6)] \end{aligned}$$

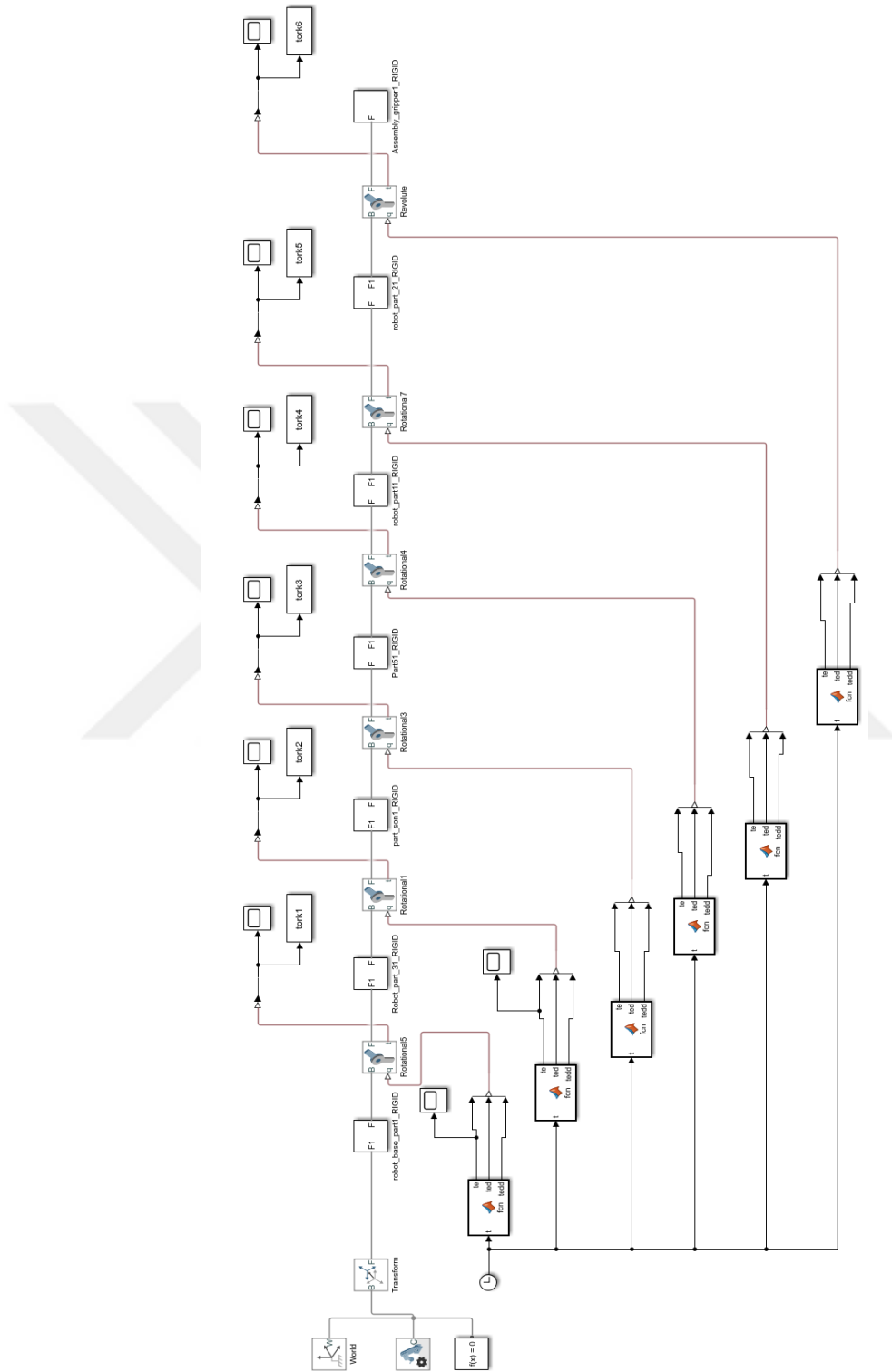
$$\begin{aligned} G_3 = & -m_3 g \Delta h_{y3} s_{23} + m_4 g [(h_3 + \Delta h_{z4}) s_{23}] \\ & + m_5 g [h_3 s_{23} - \Delta h_{x5} (s_{23} s_5 - c_{23} c_4 c_5) - \Delta h_{y5} (s_{23} c_5 + c_{23} c_4 c_5) \\ & - \Delta h_{z5} (c_{23} s_4)] \\ & + m_6 g [h_3 s_{23} - \Delta h_{x6} (c_{23} (s_4 s_6 - c_4 c_5 c_6) + s_{23} s_5 c_6)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_4 = & -m_5 g [\Delta h_{x5} s_{23} s_4 - \Delta h_{y5} s_{23} s_4 s_5 + \Delta h_{z5} s_{23} c_4] \\ & - m_6 g [\Delta h_{x6} (s_{23} (c_4 s_6 - s_4 c_5 c_6))] \end{aligned}$$

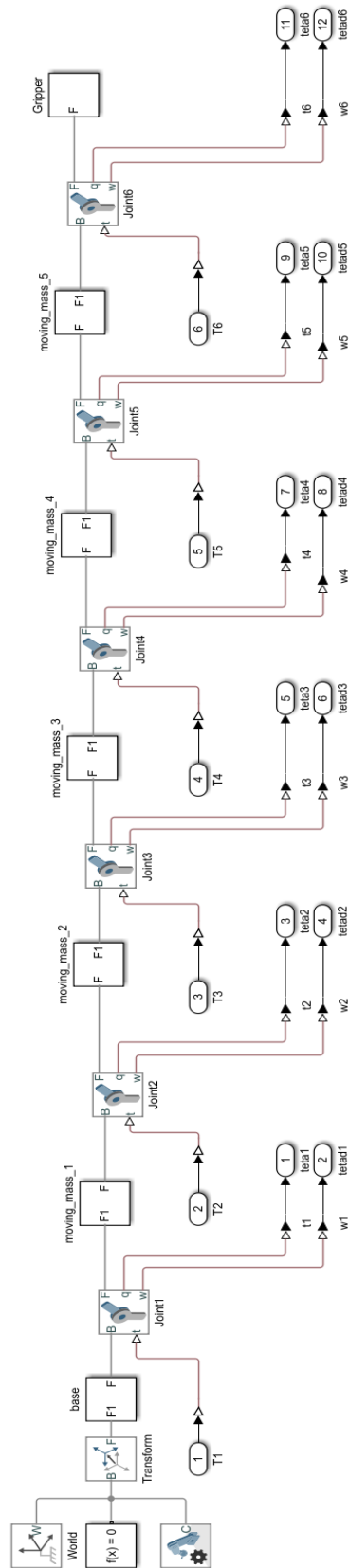
$$\begin{aligned} G_5 = & m_5 g [\Delta h_{x5} (c_{23} c_5 - s_{23} c_4 c_5) - \Delta h_{y5} (c_{23} s_5 + s_{23} c_4 c_5)] \\ & - m_6 g [\Delta h_{x6} (c_{23} c_5 - s_{23} c_4 s_5)] \end{aligned}$$

$$G_6 = -m_6 g \Delta h_{x6} [c_{23} s_5 s_6 + s_{23} (s_4 c_6 + c_4 c_5 s_6)]$$

EK-F : ZORO'NUN TERS DİNAMİK MODELİ



EK-G : ZORO'NUN İLERİ DİNAMİK MODELİ



EK-H : MATLAB İNSAN-ROBOT ARAYÜZÜ KODLARI

```
clear; close; clc;
global i or pos T_zoro_0 Rtr p_zoro_0 pos_l2r workingtime per pos_start h1 h2 h3
h4 joint_lims jo_vals jo_0;

%konstrüksiyon parametreleri
h1 = 393;
h2 = 380;
h3 = 287;
h4 = 414;
joint_lims = [-90 90; -80 80; -120 120; -90 90; -90 90; -90 90];
jo_0 = [0 0 90 0 -90 0];
workingtime = 10;
per = 0.2;
n_loop = workingtime/per;
jo_vals = zeros(n_loop,6);
pos = zeros(n_loop,3);
pos_l2r = zeros(n_loop,3);
pos_start = zeros(1,3);
i = 1;
Rtr = [ 0 1 0; 1 0 0; 0 0 -1];
p_zoro_0 = [287 0 1187];
T_zoro_0 = [-1 0 0 287; 0 0 -1 -414; 0 -1 0 773; 0 0 0 1];
timer_zoro = create_timer_zoro;
start(timer_zoro);
```

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Yılmaz Z.**, Yılmaz O., Bingül Z., Design, Analysis and Simulation of a 6-DOF Serial Manipulator, *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 2020, **3**(1), 9-15.



ÖZGEÇMİŞ

İlkokul eğitimini Hendek’de tamamlamıştır. 2006 yılında Sakarya Anadolu Lisesi’nde orta öğretimine başlamış, 2010 yılında mezun olmuştur. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünü kazanmıştır ve 2015 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2015 yılında Alimex Alüminyum A.Ş.’de ÜR-GE uzmanı olarak çalışma hayatına başlamıştır. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği anabilim dalında 2017 yılında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2018 yılında Alimex Alüminyum A.Ş.’den ayrılıp UZER MAKİNA VE KALIP SANAYİİ A.Ş.’de Press Otomasyon ve Kontrol Mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır ve halen çalışmaya devam etmektedir.

