

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**6 SERBESTLİK DERECELİ OTO VE KAMYON LASTİĞİ
PIŞIRME KALIPLARI İÇİN TEMİZLEME ROBOTU
TASARIMI VE GERÇEK ZAMANLI POZİSYON KONTROLÜ**

LATİF ORBAY

KOCAELİ 2019


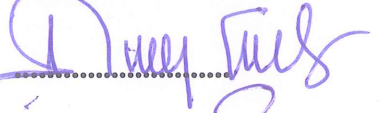

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

6 SERBESTLİK DERECELİ OTO VE KAMYON LASTİĞİ
PİŞİRME KALIPLARI İÇİN TEMİZLEME ROBOTU
TASARIMI VE GERÇEK ZAMANLI POZİSYON KONTROLÜ

LATİF ORBAY

Prof. Dr. Zafer BİNGÜL
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Serdar KÜÇÜK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Metin TOZ
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 05.11.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamı hazırlama sürecinde, sabır ve titizlikle verdiği tüm emekler ve tüm hayatım boyunca uygulayıp takip edebileceğim bilimsel bakış açısını ve problem çözme perspektifini kazandırdığı için sayın danışman hocam Prof. Dr. Zafer BİNGÜL'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışması süresince yardımlarını esirgemeyen ve çalışmalarım da ilerleyebilmem için gerekli hiçbir maddi ve manevi destekten kaçınmayan Lang Yüzer Otomotiv A.Ş firmasına ve tüm amirlerime teşekkür ederim.

Yüksek lisans Tez çalışmamın gerçekleşmesine 7131294 no'lu TUBİTAK 1507 projesi bünyesinde firmamız Lang Yüzer Otomotiv A.Ş' ye sağladıkları desteklerden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Aralık-2019

Latif ORBAY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. UYGULAMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Tezde Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	3
1.2. Kuru Buz Hakkında Genel Bilgilendirme	4
1.3. Kuru Buz İle Yüzey Temizleme	6
1.4. Oto Lastik Kalıbı Temizleme Yöntemleri	8
1.5. Robotların Temizleme İşlemlerinde Kullanılması.....	10
2. 6 SERBESTLİK DERECELİ OTO LASTİK KALIBI TEMİZLEME ROBOTU KAVRAMSAL TASARIMI	13
2.1. Uygulama İsterleri ve Tasarım Şartlarının Belirlenmesi	13
2.2. Sistemin Çalışma Senaryosunun Oluşturulması.....	15
2.3. Sistem Tasarımı İçin Literatür Araştırması.....	17
2.4. Sistem Taslak Tasarımı	19
3. 6 SERBESTLİK DERECELİ OTO VE KAMYON LASTİĞİ PİŞİRME KALIPLARI TEMİZLEME ROBOTU TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI.....	22
3.1. Mekanik Tasarım	22
3.2. Hareket Kontrol Tasarımı ve Ürün Seçimi	35
3.3. 6 Serbestlik Dereceli Robot Kinematik Analizi	42
3.4. Robot Kinematik Analizi Konusunda Literatür Özeti.....	42
3.5. İleri Kinematik Analizi.....	43
3.6. Ters Kinematik Analizi.....	47
3.7. Jakobiyen Analizi	52
4. 6 EKLEMLİ KALIP TEMİZLEME ROBOTU DİNAMİK ANALİZİ.....	62
4.1. Dinamik Analiz İçin Literatür Özeti.....	62
4.2. Robot Ters Dinamik Analizi.....	63
4.3. Robot İleri Dinamik Analizi	80
5. ROBOT GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ	96
5.1. Reçete Sistemi Oluşturulması	101
6. SİSTEMİN TEST EDİLMESİ.....	104
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR.....	108
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	111
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kuru buz üretim makinesi	5
Şekil 1.2.	Kuru buz çeşitleri	5
Şekil 1.3.	Yüzeyde kuru buz temizleme	6
Şekil 1.4.	Kuru buz püskürtme makinesi.....	7
Şekil 1.5.	Kuru buz ile yüzey temizleme örnekleri	7
Şekil 1.6.	Kumlama makinesi.....	9
Şekil 1.7.	Lazer ile oto lastiği yanak kalıbı temizliği	9
Şekil 1.8.	Kuru buz ile robotik kalıp temizliği	10
Şekil 1.9.	Lazer ile robotik uçak gövde kaplama temizliği	11
Şekil 2.1.	Robot çalışma uzayı ölçüleri	14
Şekil 2.2.	Oto lastik kalıbı kesiti çizimi	16
Şekil 2.3.	Dikdörtgen şekilli nozul tasarımının kinetik enerji etkisi	17
Şekil 2.4.	Continental firmasının kalıp temizleme robotu.....	18
Şekil 2.5.	Robot kalıp içinde çalışması taslak modeli	19
Şekil 2.6.	Altı serbestlik dereceli robotun kavramsal tasarımı	20
Şekil 2.7.	Altı serbestlik dereceli robotun eklemlerinin hareket yapısı.....	20
Şekil 3.1.	Birinci eklemin 3 boyutlu katı modeli.....	23
Şekil 3.2.	Birinci eklemin tahriğinin alttan görünüşü.....	24
Şekil 3.3.	İkinci eklemin 3 boyutlu katı modeli	24
Şekil 3.4.	Üçüncü eklemin tahriğinin 3 boyutlu katı modeli.....	25
Şekil 3.5.	Üçüncü eklemin 3 boyutlu kol katı modeli	25
Şekil 3.6.	Dördüncü eklemin 3 boyutlu kol katı modeli.....	26
Şekil 3.7.	Beşinci eklemin üç boyutlu katı modeli.....	26
Şekil 3.8.	Altıncı eklemin 3 boyutlu kol katı modeli	27
Şekil 3.9.	Altı serbestlik dereceli robotun 3 boyutlu katı modeli.....	27
Şekil 3.10.	Temizlik sepeti ve merkezleme halkasının 3 boyutlu katı modeli	28
Şekil 3.11.	Merkezleme halkasının 3 boyutlu katı modeli	28
Şekil 3.12.	Temizlik sepeti, robot ve kalıp kesitlerinin 3 boyutlu modeli.....	29
Şekil 3.13.	Robotun yandan görünümü	30
Şekil 3.14.	Robotun ön görünümü.....	30
Şekil 3.15.	Robotun üst görünümü	31
Şekil 3.16.	Robotun kalıp kesiti içerisinde görünümü	31
Şekil 3.17.	Taşıyıcı platform ve temizlik sepetinin 3 boyutlu montaj modeli.....	32
Şekil 3.18.	Altı serbestlik dereceli robot çalışma uzayı	33
Şekil 3.19.	Altı serbestlik dereceli robot bağ uzunlukları ve hareket yapısı	33
Şekil 3.20.	Beckhoff AM8111 servo motor teknik özellikleri.....	36
Şekil 3.21.	Beckhoff AM8121 servo motor teknik özellikleri	36
Şekil 3.22.	EL7211 sürücü	37
Şekil 3.23.	Beckhoff CP2215 endüstriyel kontrolcü teknik özellikleri.....	38
Şekil 3.24.	Robot hareket kontrol yapısı	39
Şekil 3.25.	Altı eklemlili robot fiziksel prototipi.....	40
Şekil 3.26.	Altı eklemlili robot ve temizlik sepeti fiziksel prototipi	41

Şekil 3.27. Temizlik sepeti ve platform fiziksel prototipi	41
Şekil 3.28. Robot eklemlerinin kartezyen uzayda koordinat yerleşimi	44
Şekil 3.29. Üç serbestlik dereceli düzlemsel seri robot	48
Şekil 3.30. Uç işlevci x ekseninde doğrusal hızı	55
Şekil 3.31. Uç işlevci y ekseninde doğrusal hızı	56
Şekil 3.32. Uç işlevci z ekseninde doğrusal hızı	56
Şekil 3.33. Uç işlevci x ekseninde açısal hızı	57
Şekil 3.34. Uç işlevci y ekseninde açısal hızı	57
Şekil 3.35. Uç işlevci z ekseninde açısal hızı	58
Şekil 3.36. Uç işlevcinin x ekseninde doğrusal ivmesi	58
Şekil 3.37. Uç işlevcinin y ekseninde doğrusal ivmesi	59
Şekil 3.38. Uç işlevcinin z ekseninde doğrusal ivmesi	59
Şekil 3.39. Uç işlevcinin x ekseninde açısal ivmesi	60
Şekil 3.40. Uç işlevcinin y ekseninde açısal ivmesi	60
Şekil 3.41. Uç işlevcinin z ekseninde açısal ivmesi	61
Şekil 4.1. Robotun eklemlerinin 3 boyutlu katı modeli	64
Şekil 4.2. Robot 3 boyutlu tasarım Matlab modeli	67
Şekil 4.3. Robot matlab simscape modeli	68
Şekil 4.4. Robot ters dinamik simulink modeli	69
Şekil 4.5. Birinci eklemin giriş gerçek konum sinyali	70
Şekil 4.6. Birinci eklemin giriş gerçek hız sinyali	71
Şekil 4.7. Birinci eklemin giriş gerçek ivme sinyali	71
Şekil 4.8. İkinci eklemin giriş gerçek konum sinyali	72
Şekil 4.9. İkinci eklemin giriş gerçek hız sinyali	72
Şekil 4.10. İkinci eklemin giriş gerçek ivme sinyali	73
Şekil 4.11. Üçüncü eklemin giriş gerçek konum sinyali	73
Şekil 4.12. Üçüncü eklemin giriş gerçek hız sinyali	74
Şekil 4.13. Üçüncü eklemin giriş gerçek ivme sinyali	74
Şekil 4.14. Dörüncü eklemin giriş gerçek konum sinyali	75
Şekil 4.15. Dörüncü eklemin giriş gerçek hız sinyali	75
Şekil 4.16. Dörüncü eklemin giriş gerçek ivme sinyali	76
Şekil 4.17. Beşinci eklemin giriş gerçek konum sinyali	76
Şekil 4.18. Beşinci eklemin giriş gerçek hız sinyali	77
Şekil 4.19. Beşinci eklemin giriş gerçek ivme sinyali	77
Şekil 4.20. Birinci eklemin hesaplanan tork sinyali	78
Şekil 4.21. İkinci eklemin hesaplanan tork sinyali	78
Şekil 4.22. Üçüncü eklemin hesaplanan tork sinyali	79
Şekil 4.23. Dördüncü eklemin hesaplanan tork sinyali	79
Şekil 4.24. Beşinci eklemin hesaplanan tork sinyali	80
Şekil 4.25. Robotun ileri dinamik kontrol modeli	81
Şekil 4.26. Robotun ileri dinamik alt sistem modeli	82
Şekil 4.27. Birinci eklem konum karşılaştırma sinyali	83
Şekil 4.28. Birinci eklemin konum hata sinyali	83
Şekil 4.29. İkinci eklemin konum karşılaştırma sinyali	84
Şekil 4.30. İkinci eklemin konum hata sinyali	84
Şekil 4.31. Üçüncü eklemin konum karşılaştırma sinyali	85
Şekil 4.32. Üçüncü eklemin konum hata sinyali	85
Şekil 4.33. Dördüncü eklemin konum karşılaştırma sinyali	86
Şekil 4.34. Dördüncü eklemin konum hata sinyali	86

Şekil 4.35. Beşinci eklemün konum karşılaştırma sinyali.....	87
Şekil 4.36. Beşinci eklemün konum hata sinyali.....	87
Şekil 4.37. Birinci eklemün hız karşılaştırma sinyali.....	88
Şekil 4.38. Birinci eklemün hız hata sinyali.....	88
Şekil 4.39. İkinci eklemün hız karşılaştırma sinyali	89
Şekil 4.40. İkinci eklemün hız hata sinyali	89
Şekil 4.41. Üçüncü eklemün hız karşılaştırma sinyali	90
Şekil 4.42. Üçüncü eklemün hız hata sinyali	90
Şekil 4.43. Dördüncü eklemün hız karşılaştırma sinyali.....	91
Şekil 4.44. Dördüncü eklemün hız hata sinyali.....	91
Şekil 4.45. Beşinci eklemün hız karşılaştırma sinyali.....	92
Şekil 4.46. Beşinci eklemün hız hata sinyali.....	92
Şekil 4.47. Birinci eklemün ivme sinyali	93
Şekil 4.48. İkinci eklemün ivme sinyali	93
Şekil 4.49. Üçüncü eklemün ivme sinyali.....	94
Şekil 4.50. Dördüncü eklemün ivme sinyali	94
Şekil 4.51. Beşinci eklemün ivme sinyali	95
Şekil 5.1. Hareket kontrolü için akış şeması	97
Şekil 5.2. Twincat 3 tabanlı robot kontrol yazılımı ve G kod editörü	98
Şekil 5.3. Hareket kontrol fonksiyon yazılımı.....	98
Şekil 5.4. 1-3. Eklem gerçek zamanlı hareket kontrolcüsü	99
Şekil 5.5. 4-6. Eklem gerçek zamanlı hareket kontrolcüsü	99
Şekil 5.6. Temel kullanıcı ara yüzü akış şeması	100
Şekil 5.7. Kullanıcı ara yüzü	101
Şekil 5.8. Kalıp reçetelerinin veri tablosu	102
Şekil 6.1. Kalıp kesiti şablonunda konum kontrol testi.....	104
Şekil 6.2. Robot gerçek zamanlı simülasyon testi.....	105
Şekil 6.3. Robotun sahada test edilmesi	106
Şekil 6.4. Temizlik testinde kalıbın test öncesi ve sonrası	106

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Continental robotu teknik özellikleri	18
Tablo 3.1. Sistem 3 boyutlu tam montaj alt grup listesi	29
Tablo 3.2. Taşıyıcı platform teknik özellikleri	32
Tablo 3.3. Eklemlerin çalışma aralığı ve hızları	34
Tablo 3.4. Alüminyum 6061 teknik özellikleri	34
Tablo 3.5. Robot tork ve hız istekleri	35
Tablo 3.6. Redüktörlerin teknik özellikleri	38
Tablo 3.7. Motor eklem teknik özellikleri	39
Tablo 3.8. Altı serbestlik dereceli robot teknik özellikleri	42
Tablo 3.9. DH tablosu	45
Tablo 4.1. Robotun kütle tablosu	65
Tablo 4.2. Kontrol parametreleri tablosu	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

N	: Newton
mm	: Milimetre
C	: Santigrat
D	: Boyut
T	: Dönüşüm matrisi,
s	: Sinüs
c	: Cosinus
θ	: Bağ açısı
l	: Bağ uzunluğu
a_{i-1}	: Bağlar arası uzunluk
α_{i-1}	: Bağlar arası açı
d_i	: Üst üste çakışan bağlar arası eklem kaçıklığı
ω	: Bağ açısal hız ifadesi
Δ	: Değişim
t	: Zaman
τ	: Tork
Db	: Decibel (Desibel)

Kısaltmalar

CO ₂	: Karbon Di Oksit
DH	: Denavit Hartenberg
Db	: Desibel
DOF	: Degree Of Freedom (Serbestlik Derecesi)
DA	: Doğru Akım
NCI	: Numeric Control Interpolation (Sayısal Kontrol İnterpolasyonu)
OCT	: One Cable Technology (Tek Kablo Teknolojisi)
PID	: Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türevsel)
TUBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

6 SERBESTLİK DERECELİ OTO LASTİK PİŞİRME KALIBI TEMİZLEME ROBOTU TASARIMI VE GERÇEK ZAMANLI POZİSYON KONTROLÜ

ÖZET

Oto lastik imalatı gerçekleştirilen fabrikalarda kullanılan pişirme kalıpları belirli bir imalat periyodunda temizlenmesi gerekmektedir. Bu kalıplar yarı mamul lastik pişirme esnasında lastik malzemesinden kaynaklı kauçuk bazlı kirlenmeye maruz kalmaktadır. Ortalama 2000 adet lastik imalatından sonra bu kalıpların temizlenmesi gerekmektedir.

Geleneksel temizleme yöntemleri kuru buz ve kumlama olup bu yöntemler manuel olarak uygulandığı için iş güvenliği ve proses zamanı açısından problem yaratmaktadır. Bu tez çalışmasında, iş güvenliği ve süreç zamanı kayıplarını ortadan kaldırmak amacıyla 6 serbestlik dereceli bir seri robotun tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiş olup bu robot oto lastik kalıp temizleme endüstrisinde ürün haline getirilmiştir. Robot endüstriyel bilgisayar tabanlı yazılım sayesinde gerçek zamanlı hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmalarında, 6 eklemlili robotun ileri ve ters kinematiği ve Jakobiyen analizi gerçekleştirilmiştir. Matlab-Simscap ortamında, robotun ters ve ileri dinamik analizi gerçekleştirilerek, robottan alınan gerçek yörünge verileriyle (konum, hız ve ivme) simülasyon sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sonuç olarak bu tezde, mekanik tasarım, hareket kontrol yazılımı ve kullanıcı ara yüzü tasarımı gerçekleştirilip 12 kg yük taşıma kabiliyetine sahip 0,25 mm hassasiyetli 6 serbestlik dereceli oto ve kamyon lastik kalıpları için temizleme robotunun prototipi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen prototipin fonksiyon ve saha testleri yapılmış, bu testler sonucunda başarılı sonuçlar elde edilmiş olup, oto ve kamyon lastik kalıpları temizleme robotu endüstrisi pazarında ürün haline getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 6 Eklemlili Robot, Ethercat, Kullanıcı Arayüzü, Ters Kinematik.

6 DOF TIRE CURING MOLD CLEANING ROBOT DESIGN AND REAL TIME POSITION CONTROL

ABSTRACT

The curing molds used in the factories where tire production is carried out need to be cleaned in a certain manufacturing period. These molds are exposed to rubber-based contamination from the rubber material during semi-finished tire baking. After an average of 2000 tires, these molds need to be cleaned.

Conventional cleaning methods are dry ice and sandblasting. These methods are applied manually and create problems in terms of work safety and process time. In this thesis, the design and manufacturing of a 6 degree of freedom robot has been discussed in order to eliminate job safety and process time losses. Real-time motion control was design with the help of industrial computer-based software. In the design studies, forward and inverse kinematics and Jacobian analysis of 6 articulated robots were performed. In Matlab-Simscape environment, reverse and advanced dynamics analysis of the robot were performed and the simulation results were confirmed by comparing the actual trajectory data (position, velocity and acceleration) obtained from the robot. As a result, in this thesis, mechanical design, motion control software and user interface design were realized and prototype of cleaning robot for 6 DOF auto and truck tire molds with 0.25mm precision and 12 kg load capacity were realized. Functional and field tests of the developed prototype have been made and these results have been obtained as a result of successful tests and auto and truck tire molds cleaning robot has become a product in industry the market.

Keywords: 6 Axis Robot, Ethercat, Human Machine Interface, Inverse Kinematics.

GİRİŞ

Günümüz dünyasında robotlar hayatımızda geniş bir alanda rol oynamaktadırlar. Endüstriyel otomasyon, elektronik ve yazılım konularında gelişen teknoloji sayesinde robotlar her alanda önemli bir rol oynamaktadırlar. Her alanda insanların ihtiyaçları analiz edilerek yapılan işi kolaylaştırmak için senaryolar oluşturularak bu senaryolarda çalışabilecek robotlar tasarlanmıştır. Bu sebeple medikal, otomotiv, savunma sanayi, havacılık ve uzay gibi birçok alana yönelik ihtiyaçlar doğrultusunda farklı tip ve çeşitlerde robotlar üretilmektedir. Farklı uygulamalarda farklı tiplerde robotlar kullanılmakta veya uygulamaya özel olarak tasarımları gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışmasında oto lastik endüstrisinde oto lastik imalatı sırasında prosesde kullanılan lastik pirişme kalıplarının kuru buz ile temizlenmesi için bir robot tasarım çalışması yapılmıştır. Oto lastik fabrikalarında yarı mamul haline gelen oto lastiği üretimin son aşaması olan pişirme bölümüne gelir ve vulkanizasyon tekniği ile pişirme işlemi gerçekleştirilir. Lastik pişirme işlemi lastiğin boyutlarına özel olarak tasarlanmış kalıplar içerisinde kızgın buharın kalıp içinde gezdirilerek kalıp 160° C 'ye kadar ısıtılır. Bu sıcaklık sürekli olarak kalıpta korunur ve yarı mamul lastik pişirme presine bağlı kalıp içerisinde lastik boyut, tip ve kimyasal yapısına göre ortalama oto lastiği için 10-20 dk aralığında pişirilerek son işlem tamamlanmış olur. Bu pişirme işlemi kamyon kalıpları için ortalama 1 saate kadar ulaşmaktadır. Yapılan bu pişirme işlemleri belirli bir pişirme adetinden sonra kalıbın kirlenmesine yol açmaktadır. Ortalama 2000 adet lastik pişiminden sonra kalıbın yüzeyinde lastik malzemesi olan kauçuk ve kimyasal diğer türevlerini içeren bir kirlilik meydana gelir. Bu kirlilik temizlenmediği takdirde pişirilen lastiğin yüzeyinde benekler ve görsel hatalar oluşturur. Bu sonuç imalat sürecinde kalite problemi olarak algınarak kusurlu ürün oluşmasına neden olur.

Bu sebeple kirlilik oluşan kalıpların bağlı olduğu presler imalat esnasında durdurularak temizlenmesi gerekmektedir. Bu işlem genellikle kalıbın presten sökülerek ayrı bir alanda temizlenmesi işlemiyle gerçekleştirilmektedir. Bu sökülme ve temizlik işlemleri sonrası tekrar presin imalata döndürülmesi işlemi yaklaşık 9

saat zaman kaybına yol açmaktadır. Bu çok ciddi üretim kaybına yol açmaktadır. Bunun engellenebilmesi için kalıbın presten sökülmeden temizlik işleminin gerçekleştirilmesi ve tekrar presin devreye alınması gerekmektedir. Bunun gerçekleştirilmesi mevcut yöntemlerde pres üzerinde çeşitli temizleme yöntemleri kullanılarak operatörler tarafından manuel olarak ayrı bir alanda gerçekleştirilmektedir. Pres üzerinde kuru buz püskürtme yöntemiyle temizlik işlemi yapıldığında temizlik operatörü kızgın buharla sürekli devir daim ile beslenen pres içerisine girerek işlemi gerçekleştirir. Bu iş sağlığı ve güvenliği açısından presin operatörün üzerine kapanma ve ortam sıcaklığının yüksekliğinin tansiyon gibi riskler doğurması, işçi güvenliği açısından oldukça olumsuz koşullar oluşturmaktadır. Ayrıca kuru buz ile manuel olarak kalıbın temizlenme işlemi esnasında ses izolasyonu olmadığı için fabrika ortamında 117 Db ses seviyesinde gürültü oluşmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği açısından yüksek gürültü seviyesi risk oluşturmaktadır. Bahsettiğimiz iş sağlığı ve güvenliği ve prosete oluşan zaman ve para kayıplarından dolayı temizlik işleminin kalıbın presten sökülmeden kuru buz ile temizlenebileceği, 85Db(desibel) altında gürültü seviyesinde çalışabilecek ve işlem süreci zamanını bir kalıp için yaklaşık 1 saat gibi süreçte tamamlayabilecek bir otomatik temizlik sistemi tasarımı gerekmektedir. Bu sistem ancak katlanabilir bir kol mekanizmasına bağlı bir ses izolasyonlu temizlik robotu ve onun preslere bağlanması ve saha içinde hareketini sağlayacak mobil bir taşıyıcı platform tasarımıyla gerçekleştirilebilecektir. Bu tez çalışmasında uygulanan yöntem ve süreç ele alındığında, tasarım istekleri ve uygulama ile ilgili koşullar referans alınarak tasarım limitleri oluşturulmuştur. Robotun çalışacağı alanın çalışma uzayı limitleri belirlenerek kavramsal tasarım için boyutlar belirlenmiştir. Uygulama ve süreç analizi gerçekleştirilerek çalışma senaryosu oluşturulmuştur. Çalışma senaryosu ve tasarım limitlerine göre kavramsal tasarım gerçekleştirilmiştir. Kavramsal tasarım doğrulaması yapılmış ve robotun üç boyutlu mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Robotun kinematik ve dinamik analizleri yapılarak hareket kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı tamamlanan robotun prototip imalatı gerçekleştirilerek birim fonksiyon testleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Robotun kontrol parametreleri gerçek zamanda yapılan testlere göre her bir eklem için en uygun değere ayarlanmıştır. Hareket kontrol matlab ortamında karşılaştırma analizi yapılarak doğrulanmıştır.

1. UYGULAMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, kalıp ve yüzey temizliği hakkında genel bilgiler verilmiştir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmalar açıklanmıştır. Tez çalışmasında ele alınan temizleme robotunda kullanılan temizlik uygulaması, tasarımı gerçekleştirilen robotun hangi alanda ve işlevinin ne şekilde olması gerektiği, farklı uygulamalar ele alınarak anlatılmıştır. Özellikle robotta kullanılan kuru buz hakkında bilgilendirme yapılmış ve temizlik uygulamalarında alternatif yöntem olarak kullanılan kumlama ve lazer teknolojisi ile yüzey temizliği anlatılmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasının amacı olan kuru buz ile oto lastik kalıbı temizliğinin tam otomatik gerçekleştirilebilmesi için gerçekleştirilen robot tasarımının sektörde hangi alanı doğrudan etkileyeceği farklı uygulama alternatifleri ışığında gösterilmiştir.

1.1. Tezde Gerçekleştirilen Çalışmalar

Bu tezde oto ve kamyon lastik pişirme kalıplarının temizlenmesi için 6 serbestlik dereceli bir robot, robotun içinde çalışacağı ses izolasyon sepeti, merkezleme ringi tasarımı ve imal edilmesi teorik, deneysel ve sahada test edilmesi incelenmiştir. Robotun gerçek zamanlı pozisyon kontrolü tasarımı ve kullanıcı arayüzü tasarımı ve test edilmesi incelenmiştir.

BÖLÜM 1’de kuru buz hakkında bilgilendirme, kuru buzun kullanım alanları, lastik kalıplarının temizlenme yöntemleri ve robotların temizlik işlemlerinde kullanılması hakkında bilgiler verilmiştir.

BÖLÜM 2’te 6 serbestlik dereceli kalıp temizleme robotu için konsept tasarımı, çalışma senaryosu, tasarım gereksinimleri ve bu alanda yapılan literatür taraması incelenmiştir.

BÖLÜM 3’te robotun ve sistemin tasarımının gerçekleştirilmesi, hareket kontrol ekipmanları ve malzeme seçimleri hakkında bilgi verilmiştir. Robotun teorik modellenmesi ve gerçek zamanlı pozisyon kontrolü için kinematik analizi incelenmiştir.

BÖLÜM 4'te robotun Matlab Simscape ortamında gerçekleştirilen dinamik analizi incelenmiştir.

BÖLÜM 5'te robotun gerçek zamanlı hareket kontrolü ve kullanıcı ara yüzü tasarımı hakkında bilgi verilmiştir. Kalıp temizleme işlemi için robot yörünge planlaması ve temizlik kalitesi için reçete sisteminin oluşturulması ve optimizasyonu hakkında bilgiler verilmiştir.

BÖLÜM 6'da prototipi üretilen sistemin fonksiyonel testleri, pozisyon kontrolü testleri ve sahada gerçekleştirilen kalıp temizleme testleri hakkında bilgiler ve elde edilen bulgular verilmiştir. Reçetelerin sahada temizlik testleri yapılmış ve optimizasyon parametrelili ve sonuçların değişimi hakkında elde edilen bulgular ayrıntılı olarak değerlendirilerek sonuçlar verilmiştir.

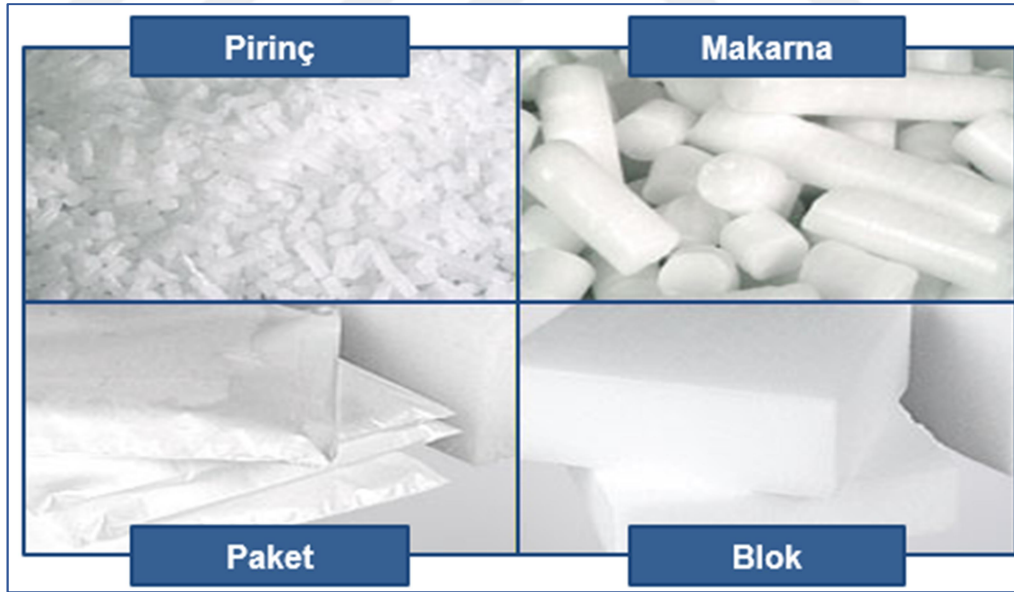
BÖLÜM 7'de yapılan çalışmalar hakkında sonuç ve değerlendirmeler verilmiştir. Geleceğe dönük iyileştirme açısından önermeler belirtilmiştir.

1.2. Kuru Buz Hakkında Genel Bilgilendirme

Kuru buz CO₂ gazının – 78 °C'deki katı halidir [1]. Kuru buz karbondioksit gazının 200 barın üzerinde bir kapalı hacim içerisinde sıkıştırılmasıyla ve sıkıştırılan gazın karlanmış hali yine basınç ve kuvvet altında elde edilmektedir [1]. Kuru buz katı halden doğrudan gaz haline geçiş yapar ve geçiş esnasında herhangi bir atık bırakmaz. Kuru buz birçok alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Kuru buz katı halde ve düşük sıcaklıkta olması sebebiyle soğuk zincir uygulamalarında medikal, ilaç, gıda, ağır sanayi, taşımacılık gibi sektörlerde soğutma işlemlerinde kullanılmaktadır. Kuru buz özelliğini yitirmeden bir haftaya kadar saklanabilmektedir. Kuru buzun üretimi gerçekleştiren makine Şekil 1.1' de gösterilmektedir. Farklı şekil ve boyutlarda kuru buz üretimi uygulamayayönelik olarak üretilmektedir. Yüzey temizleme uygulamasında pellet tipi kuru buz kullanılmaktadır [1]. Soğutucu amaçlı kullanımlarda daha farklı şekillerde kuru buzlar kullanılmaktadır. Kuru buz tipleri Şekil 1.2'de belirtilmiştir.



Şekil 1.1. Kuru buz üretim makinesi [1]



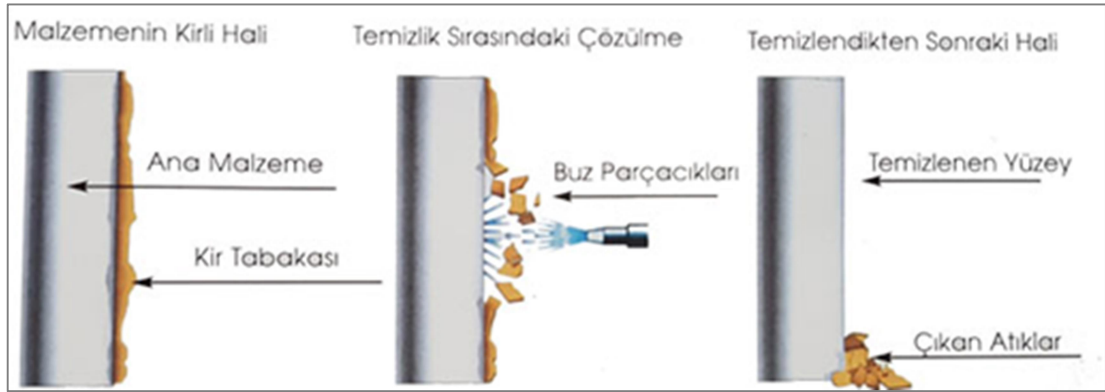
Şekil 1.2. Kuru buz çeşitleri [1]

Kuru buz şekilleri Şekil 1.2’de gösterildiği gibi 4 farklı tipte üretilebilir. Tez çalışmasında metal yüzey temizleme uygulaması için temizlik medyası olarak pirinç ismiyle tabir ettiğimiz 3 mm silindirik şekilli kuru buz kullanılmaktadır. Kuru buz ilaç sektöründe ilçaların soğutulması amacıyla, hastanelerde organ transferi sırasında

soğutma amaçlı, endüstride çeşitli metal veya diğer tip yüzeylerin temizlenme işlerinde ve soğutma işlemine ihtiyaç duyulan her türlü alanda kullanımını mevcuttur. Sonuç olarak bu tez çalışmasında test tasarımını gerçekleştireceğimiz robotta temizlik işlemi için kullanacağımız temizleme malzemesi kuru buzdur [1].

1.3. Kuru Buz İle Yüzey Temizleme

Kuru buz kullanım alanlarından bir tanesi de yüzey temizleme işlemidir. Özellikle endüstride popüler bir şekilde kullanılmaktadır. 3 mm veya daha küçük çaplarda silindirik şekilde pirinç tipi kuru buz herhangi bir kirli yüzeye ses hızında veya daha yüksek hızlarda püskürtüldüğü takdirde yüzeye çarptığı anda bir kinetik enerji oluşturmaktadır. Bu kinetik enerji ile kuru buz parçacığı yüzeyde kendi içinde barındırdığı $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki sıcaklık seviyesindeki ısının yüzeyde oluşturduğu ısı değişimi katkısıyla birleştiğinde mikrotermal patlamalar gerçekleşmektedir [1]. Bu patlamalar sayesinde kuru buz yüzeydeki kırıntı de moleküllere kendisiyle birlikte ayrıştırarak havaya karışır ve sıvı veya katı herhangi bir atık bırakmadan ve yüzeye hiçbir hasar vermeden temizlik işlemini gerçekleştirmektedir. Bu temizlik olayı Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Yüzeyde kuru buz temizleme [1]

Kuru buz ile temizlik işlemi, kuru buz püskürtme makinesi tarafından yapılabilmektedir. Bu makine 6-20 bar hava ile beslenen bir makinedir. Kuru buz makineden yüzeye ses hızına ulaşabilen bir nozul vasıtasıyla yüksek basınçlı havanın bir hortumda kuru buz ile karışarak nozula taşınımı ve nozuldan püskürtülmesiyle gerçekleşir. Kuru buz yüzey yüksek sıcaklığa sahip ise daha çok etki göstermektedir. Bu tez çalışmasında robot uç işlevcisinde bir adet temizlik işlemi için

nozulu tasarımı ve nozulu kuru buz ile besleyen bir kuru buz püskürtme makinesi kullanılmıştır. Kuru buz püskürtme makinesi Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Kuru buz püskürtme makinesi [1]

Kuru buz püskürtme makinesi kullanılarak farklı tip kirler temizlenebilmektedir. Pas, organik inorganik kirler, boya ve kaplama temizliği gibi işlemler yapılabilir. Kuru buz yüzeye nozulun etki mesafesine göre belirli bir mesafeden püskürtme işlemiyle temizlik olayı gerçekleşir. Yüzeye dik bir şekilde püskürtme yapıldığında kinetik enerjinin yüzeydeki etkisi en yüksek düzeyde olacağından temizliğin veriminde artar. Kuru buzla sanayide temizlik işlemi örne olarak Şekil 1.5' te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Kuru buz ile yüzey temizleme örnekleri [2]

1.4. Oto Lastik Kalıbı Temizleme Yöntemleri

Lastik fabrikalarında, lastik imalatının son aşaması pişirmedir. Yarı mamul haline gelen oto lastiği pişirme bölümünde kızgın buhar destekli pişirme preslerinde lastiğin desen ve boyutlarına göre özel üretilmiş kalıplar içerisinde kızgın buharla pişirilerek lastiğin son şekli verilir ve imalat süreci tamamlanır. Bu işlem 2000 lastik üretiminden sonra kalıp yüzeyinde yarı mamul hammaddesi bazlı kirlenmelere yol açar. Oluşan kirlenme temizlenmediği takdirde kalite hatası oluşturur ve üretilen lastikler kusurlu olur. Bu sonucun ortaya çıkamaması için lastik fabrikalarında kalıplar temizleme işlemine tabi tutulur. Farklı tiplerde temizleme yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler mevcut uygulamalarda genellikle presten kalıbın sökülmesi ya da sökülmeden pres üzerinde temizlenmesiyle gerçekleştirilmektedir. Kullanılan kalıp temizleme yöntemleri şu şekilde belirtilmiştir;

- Kuru buz ile temizleme
- Kumlama ile temizleme
- Lazer ışını ile temizleme

Geçmişten günümüze geleneksel olarak kumlama yöntemleri kullanılmış ve son yıllarda yerini kuru buzla temizlemeye bırakmıştır. Kumlama ile temizlik bir kumlama makinesi içerisine kalıbın yerleştirilerek kum püskürtme yöntemiyle temizlik işleminin gerçekleştirilmesidir. Kumlamanın yüzey aşındırma ve kalıba zamanla hasar verme durumundan dolayı kullanımı zamanla terk edilmiştir. Kumlama ile temizleme işlemi yapılan makine Şekil 1.6'da gösterilmektedir. Ayrıca kumlama uygulaması iş sağlığı ve güvenliği açısından sorun oluşturmaktadır. Kumlama makinesi ile çalışan kullanıcılar, püskürtme işleminde kullanılan kum tozuna maruz kalmaktadırlar. Kum tozu nefes yoluyla kullanıcıların akciğerlerine ulaşarak çeşitli meslek hastalıklarına yol açmaktadır . Bu sebeple iş sağlığı ve güvenliği konusunda politikalar geliştiren ülkelerde bu yöntem yasaklanmıştır. Günümüzde kaplama teknolojileri, ve tekstil alanlarında yüzey hazırlama işlemlerinde kumlama kullanılmaya devam etmektedir. Ancak bu tez çalışmasında, kalıp temizleme uygulaması için iş sağlığı ve yüzeyde oluşan temizlik sonrası hasarlar sebebiyle kumlama tercih edilmemiştir.



Şekil 1.6. Kumlama makinesi [3]

Diğer yandan lazer ışını ile temizleme, lazer teknolojisindeki gelişmeler ile kullanılmaya başlanmıştır. Lazer ile yüzey temizleme işlemi, genellikle kalıbın presten sökülmesi ile gerçekleştirilen bir uygulamadır. Ayrıca lazer ışınlarının iş sağlığı tehlikesi sebebiyle fabrika ortamında yüksek güvenlikli alanlarda yapılabilmektedir. Lazer parametreleri uygun ayarlanmadığı durumda, kumlama ile aynı dezavantaj ortaya çıkar ve özellikle işlem sonrasında kalıp yüzeyinde yarı mamül yapışmaları meydana gelir. Bu sorun kalite hatası oluşturur ve üretim kaybına yol açar. Lazer teknolojisi kullanılarak yüzey temizleme Şekil 1.7’de belirtilmiştir.



Şekil 1.7. Lazer ile oto lastiği yanak kalıbı temizliği

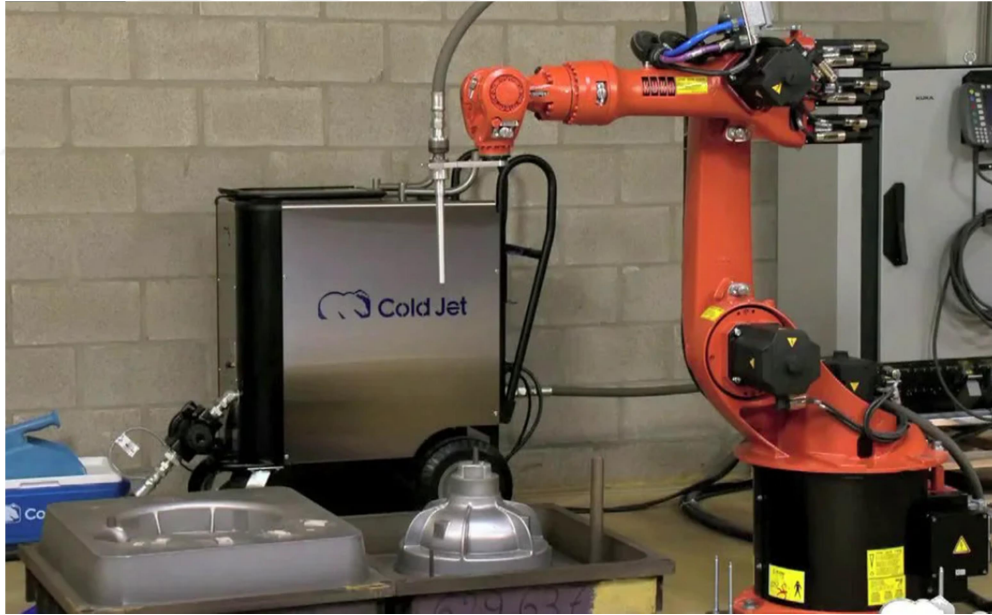
Son yöntem olarak kuru buz ele alındığında çalışma yöntemi bakımından geride atık bırakmaması, yüzeyde hasar oluşturmaması sebebiyle en çok tercih edilen temizleme

yöntemi haline gelmiştir. Bu tez çalışmasında kuru buz teknolojisi ile oto lastik kalıbı robotu tasarımı ve temizlik işlemleri ele alınacaktır.

1.5. Robotların Temizleme İşlemlerinde Kullanılması

Robotlar günümüzde birçok alanda kendisine kullanım alanı yaratmıştır. Özellikle endüstride endüstriyel tip robotlar birçok farklı uygulama için günümüzde kullanılmaktadır. Önce ki bölümde temizleme yöntemlerinden bahsetmiştik.

Bu bölümde temizlemeyöntemlerinin robotik sistemlere entegrasyonu bahsedilmiştir. Kuru buz teknolojisi seri üretim bant uygulamalarında kalıpların ve materyallerin temizliği için veya sahada farklı tipte temizlik ihtiyaçları doğrultusunda robotik sistemlere entegrasyonu ihtiyaç duyulmuş ve çözümler geliştirilmiştir. Özellikle otomotivde parçaların emizliği için endüstriyel tip robotlar kuru buz ve lazer teknolojisi ile entegrasyonu gerçekleştirilerek kullanılmaktadır.



Şekil 1.8. Kuru buz ile robotik kalıp temizliği [2]

Şekil 1.8’de Cold jet firması tarafından uygulanan otomotiv sektöründe kullanılan kalıpların temizlenmesine yönelik endüstriyel tip bir robot ile kuru buz püskürtme makinası entegrasyonu görülmektedir. Uygulamada 6 serbestlik dereceli bir seri kinematik robot kullanılmıştır. Son yıllarda lazer teknolojisi de endüstriyel tip robotlarla entegre edilmeye başlanmış ve sanayde temizlik işlemlerinde kullanıma sunulmuştur.



Şekil 1.9. Lazer ile robotik uçak gövde kaplama temizliği [4]

Şekil 1.9’da lazer teknolojisi kullanılarak robotik entegrasyonun temizlik işlemlerinde kullanımına havacılık sektöründen bir örnek belirtilmiştir. Uygulamada uçakların gövdelerinde bulunan kaplamanın ana bakım işlemi sırasında lazer teknolojisi kullanılarak gövdeden kaplamanın kaldırılması işlemi gerçekleştirilmiştir [4].

Lazer ışınları işleme yüzeyine belirli odak mesafesinden odaklanarak yüzeyde belirli frekans ve darbe gücünde ısı etkisi oluşturulmakta ve bu etki ile yüzeydeki partiküller temizlenmektedir. Kaplama tabakası da aynı etki kullanılarak yüzeyden hassas bir şekilde kaldırılmaktadır. Ancak lazer ışınları yüzeyde pürüzlülüğe sebep olmaktadır.

Işığın parametrelerinin çok iyi bir şekilde ayarlanması durumunda ve ışığın yüzeyde sabit hızda hareket ettirilmesi durumunda pürüzsüz bir temizlik gerçekleştirileilmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için kirlilik oranında ve yüzey yapısındaki değişkenlerin sabit olması gerekmektedir. Ancak oto lastik endüstrisinde, imalat süreçlerinde kirliliğe sebep olan lastik hammadde karışımında sürekli değişiklikler yapılmaktadır. Bu değişiklikler lazer ışını parametrelerinin sürekli gözden geçirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Uygulamanın sürdürülebilirliği açısından kalite yönünden standartta sürekli sapmaya sebep olacak için teknolojinin

yönetimi uygulamamız açısından zordur . Bu sebeple tez çalışmasında uygulama için lazer teknolojisi tercih edilmemiştir.



2. 6 SERBESTLİK DERECELİ OTO LASTİK KALIBI TEMİZLEME ROBOTU KAVRAMSAL TASARIMI

Kuru buz teknolojisi kullanılarak oto ve kamyon lastikleri pişirme kalıplarını temizleyen robot sistemi tasarımı bu bölümde incelenmiştir. Öncelikle robot sistemi tasarımı için müşteri isterleri ve çalışma şartları incelenmiş tasarım limitleri belirlenmiştir. Sistemin içereceği birimler ve sınır şartlar oluşturularak öncelikle uygulama için kullanılacak standart robotlar ve uygulamaya yönelik bu zamana kadar gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir. Yapılan literatür taraması ve karşılaştırma aşırması sonrasında proje kapsamı belirlenerek taslak tasarım gerçekleştirilmiştir.

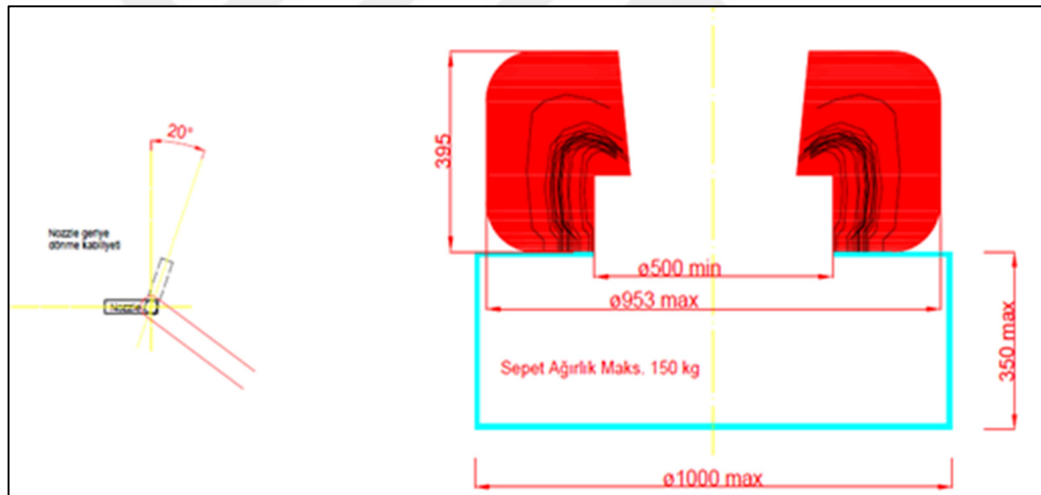
2.1. Uygulama İsterleri ve Tasarım Şartlarının Belirlenmesi

Proje tasarım çalışmasından önce müşterilerin beklentileri incelenerek tasarım için ihtiyaçlar oluşturulmuştur. Bu kapsamda proje giriş isterleri temizlik prosesi için şu şekilde listelenebilir;

- 13"-24" jant ebatları aralığındaki tüm oto ve kamyon lastik kalıpları içerisinde bir çalışma uzayına sahip Şekil 2.1'de belirtilmiştir.
- Pres üzerinde segmentleri kapalı halde ya da segmentler açık halde iken kalıba monte edilerek kapalı alanda işlemin gerçekleşmesi
- 85 Db altında ses seviyesi
- Kullanıcı için güvenlik önlemleri
- Her tipte prese montajın gerçekleştirilebilmesi için robotun mobil taşınabilmesi ve pres çevresel ekipmanlarında zorluk yaşanmadan montajın sağlanabilmesi için katlanabilir kol mekanizması ve taşıyıcı platform.
- Kolay kullanım ve basit bir kullanıcı ara yüzü
- Bir saat ortalama bir temizleme süresi
- Kapalı alanda çalışma durumunda operatörün robotun hangi bölgede temizlik gerçekleştirdiğini takip edebilmesi
- Proses hakkında ve oluşan arıza durumlarında otomatik bilgi oluşturulması

- Kalıbın 2 boyutlu kesit çizimi referans alınarak bir yörünge planlaması
- Minimum kuru buz sarfiyatı
- İstenildiği takdirde farklı uygulama için özel g code tabanlı yörünge planlama yapılabilmesi
- IP64 sınıfı koruma kabiliyetinde tozlu, nemli ortamlarda çalışabilme
- Lastik kalıbı üzerinde bulunan desen bıçakları köşe ve dip noktalarına kadar ve kalıp yanak kısmında bulunan ring bölgesinin maksimum kalitede temizlenebilmesi
- -20- +60 °C' ortam sıcaklığında çalışma
- Kalıba montajlanacak robotun toplam ağırlığının maximum 150 kg olması
- Robotun bir ses izolasyon kapalı alanı içinde çalışması. (Temizlik sepeti)
- 12kg payload

Olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.1. Robot çalışma uzayı ölçüleri

Şekil 2.1'de robot tasarımı için belirlenen çalışma uzayı ölçüleri verilmiştir. Öncelikle yeni bir robot tasarımı gerçekleştirilmeden hazır endüstriyel tip robotların kullanılıp kullanılmayacağı konusunda araştırma yapılmış ancak hazır robotların tasarım girdileriyle uyumlu olmaması sebebiyle yeni bir robot tasarımı ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu uyumsuzluklar şöyle sıralanabilir;

- Robotun ses izolasyonu için kapalı bir ses izolasyon sepeti içinde çalışmasının gerekli olması sebebiyle mevcut robotla kapalı alanın boyutları itibarıyla dar alanda çalışamayacak bir çalışma uzayına sahiptirler.

- Çalışma uzayı limitlerinde 13” kalıplar içinde hareket etme gereksinimi mevcut eklemlili robotların kalıba çarpma riskini oluşturmakta ve daha özel bir bilek yapısına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Kalıp sırt kısmında bulunan bıçak kenarları temizliği için 20 derecelik bir rotasyon hareketi gerekmekte ve bu mevcut standart robotlarda 6.eklemlilik boyutundan dolayı mümkün olamamaktadır.
- Sepet içinden kalıba ve kalıptan sepet içinde başlangıç konumuna hareket için yatayda 500 mm çapında bir çember içine robotun katlanabilmesi gerekmektedir. Bu katlanma hareketi çalışma uzayının maximum boyutları baz alındığında standart robotlarla mümkün olmamaktadır.
- Literatür taramasında continental firması tarafından uygulama için geliştirilmiş robot incelenmiş ancak çalışma uzayında yalnızca oto kalıpları için uyum sağladığından müşteri isteklerini karşılamadığı gerekçesiyle yeni robot tasarımı ihtiyacı oluşmuştur.

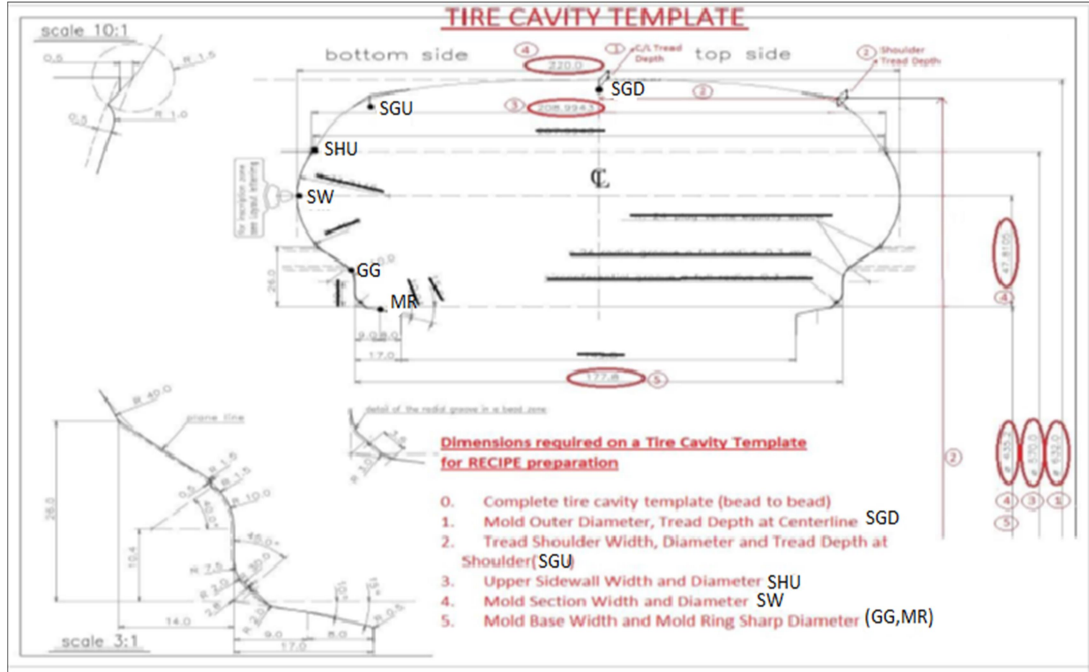
2.2. Sistemin Çalışma Senaryosunun Oluşturulması

Proje müşteri ister çalışmasından elde edilen tasarım girdileri kapsamında uygulama için bir çalışma senaryosu belirlenmiştir. Proje giriş isteklerine göre oluşturulan çalışma senaryosu temelde Temizlik işlemi robotun kalıba pres üzerinde veya presten ayrı ortamda montajlanarak kullanıcı ara yüzünden pozisyon haritası seçilerek bir 2 boyutlu kalıba özel bir yörünge planı oluşturulması, robot tarafından uç işlevcisine yerleştirilecek nozulundan kuru buz püskürtülerek yörünge boyunca temizlik işleminin gerçekleştirilmesidir [5]. Bu işlem için aşamalar şöyle listelenebilir;

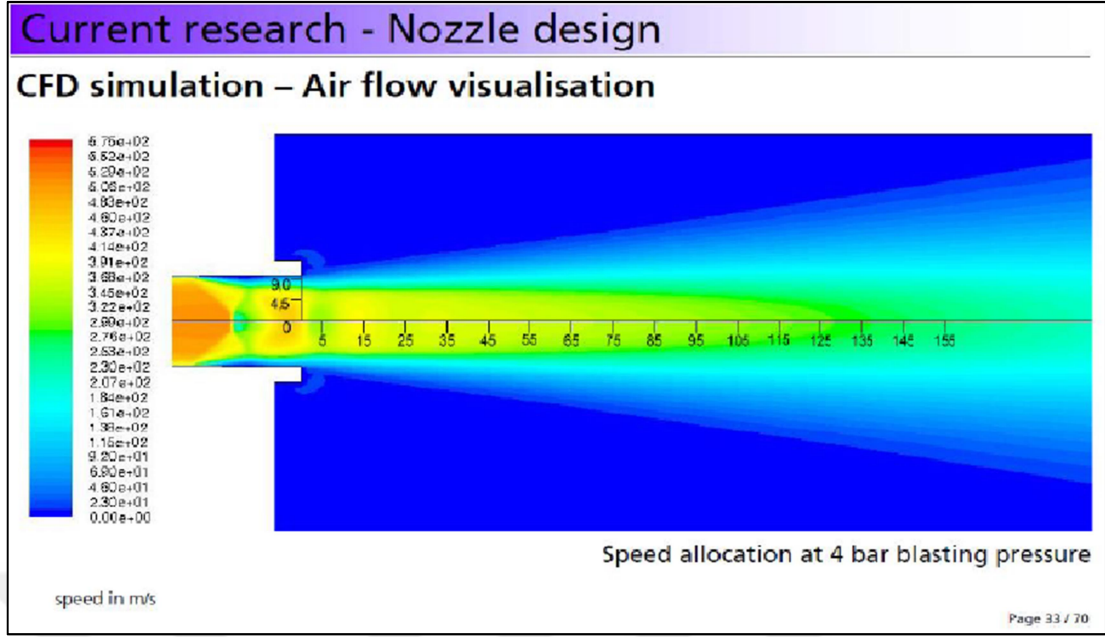
- Müşteriden alınan kalıp teknik resimlerinden taranack noktaların x ve z koordinatlarının belirlenmesi.
- Belirlenen noktalar için autocad çizim programında kalıba birebir şablon resminin çıkarılması.
- Robotun çıkarılan şablonda belirlenmiş x ve z noktalarına göre manuel yanıştırılarak uç işlevci püskürtme açısının belirlenmesi
- Kalıbın kirlilik oranlarının müşteriden alınarak noktalar arası adım mesafesi, püskürtme mesafesi, eksen hızları ve joint hareketleri belirlenerek reçete sistemine belirlenmiş x z ve q püskürtme açılarıyla birlikte girilmesi.

- Operator tarafından taşıyıcı platformun prese yanaştırılması
- Temizlik sepetinin persteki kalıbın bağlı olduğu konteyner yapısına göre uygun merkezleme halka montajı yapılması
- Temizlik robotunun katlanabilir kol mekanizması ve taşıyıcı platform hareket kabiliyeti yardımıyla kalıba merkezlenmesi
- Operator tarafından kullanıcı arayüzde bulunan kalıp reçete veritabanından bağlanan kalıba uygun reçetenin seçilmesi
- Seçilen reçete sonrası kuru buz püskürtme makinası hava bağlantıları ve kuru buz tedarikinin yapılması
- İşlemler tamamlandıktan sonra seçilen reçete için kullanıcı ara yüzden start butonuna basılarak temizlik işleminin başlatılması
- Temizlik işleminin takibi için ara yüzde oluşturulacak online simülasyondan robot hareketlerinin ve temizlenen bölgelerin izlenmesi
- Online simülasyon ve system yazılımında işlemin bitmesiyle sepetin kalıptan sökülmesi şeklinde çalışma senaryosu konsepti belirlenmiştir [5].

Şekil 2.2’de kalıp kesit çizimi verilmiştir. Gerçekleştirilecek konum yörünge noktaları ve yörünge şekli gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Oto lastik kalıbı kesiti çizimi



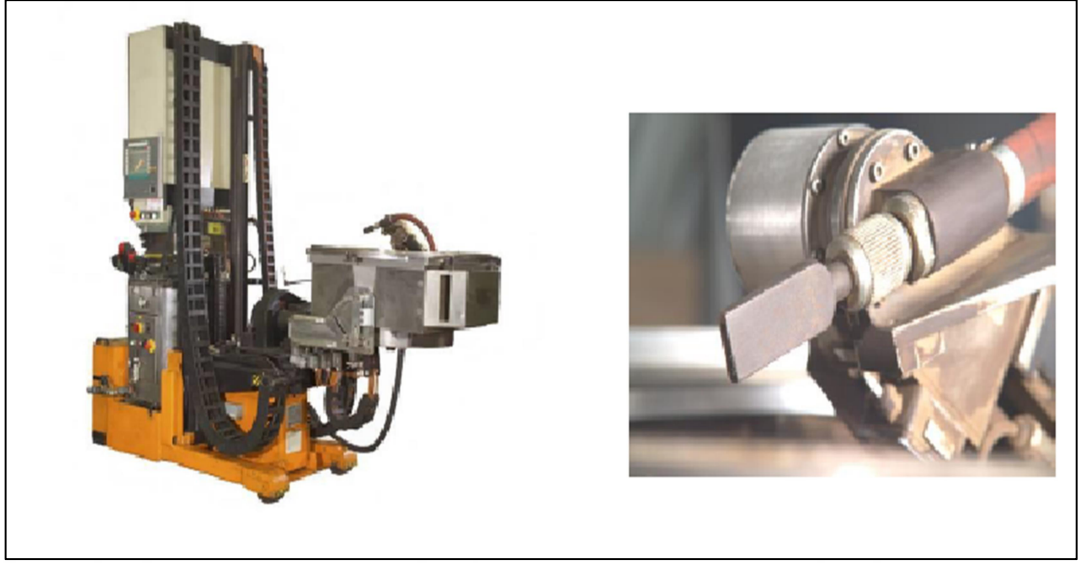
Şekil 2.3. Dikdörtgen şekilli nozul tasarımının kinetik enerji etkisi

Şekil 2.3'te gösterilen akışkan analizi çalışmasında dikdörtgen şekilli bir nozul tasarımının püskürte yüzeyine mesafesine göre 4 bar hava basıncında kinetik enerji etkisi verilmiştir. Çalışma referans alındığında 40 mm mesafeden nozul yüzeye püskürtme işlemi gerçekleştirdiğinde etkili bir temizlik elde edilebilir. Fabrikalarda kuru buz püskürtme için besleme havası 6 bardır. Ancak hortum ve makine kayıpları göz önünde bulundurulduğunda nozul ucunda ortalama 4 bar etki oluşur. Bu çalışmada alınan referans robot tasarımı için yaklaşım mesafesini belirlediği için çalışma uzayı ve buna bağlı olarak tasarım boyutları açısından önemli bir parametredir.

Konsept çalışma senaryosu ve tasarım girdilerine göre sistem hakkında literatür araştırması yapılmış ve girdilere uygun muadil özelliklerde hazır robot kullanımı araştırılmıştır.

2.3. Sistem Tasarımı İçin Literatür Araştırması

Proje müşteri isterleri ve oluşturulan çalışma senaryosuna göre bir bu zamana kadar yapılan çalışmalar ve endüstride kullanılan ürünler incelenmiştir. Uygulama için en yakın ürün olan Continental firması tarafından üretilen kalıp temizleme robotu detaylı incelenmiş ve analiz edilmiştir. Şekil 2.4'te robotun resmi verilmektedir.



Şekil 2.4. Continental firmasının kalıp temizleme robotu [1]

Continental firması tarafından üretilen makine, kuru buz püskürterek lastik kalıplarını temizlemektedir. 4 Eklemlilik olarak tasarımı yapılan kuru buz ile lastik kalıbı temizleme robotu, pres hatlarına robotun girip çıkmasını sağlayan taşıyıcı forklift, temizlik sepetinden oluşmaktadır. Söz konusu cihaz, tasarımı ile farklı şekil, yapı ve ölçülerde olabilen alt ve üst kalıpları temizleyebilmekte, farklı şekillerdeki preslerin adaptör ringlerine bağlanabilmektedir. Ses yalıtımını arttırmak için, yalıtım kapağının iç duvarlarında ses emici malzeme kullanılmaktadır. Bu sayede ses yalıtımı yapılmaktadır. Continental firması kuru buz ile kalıp temizleme makinasının teknik özellikleri Tablo 2.1’de verilmektedir.

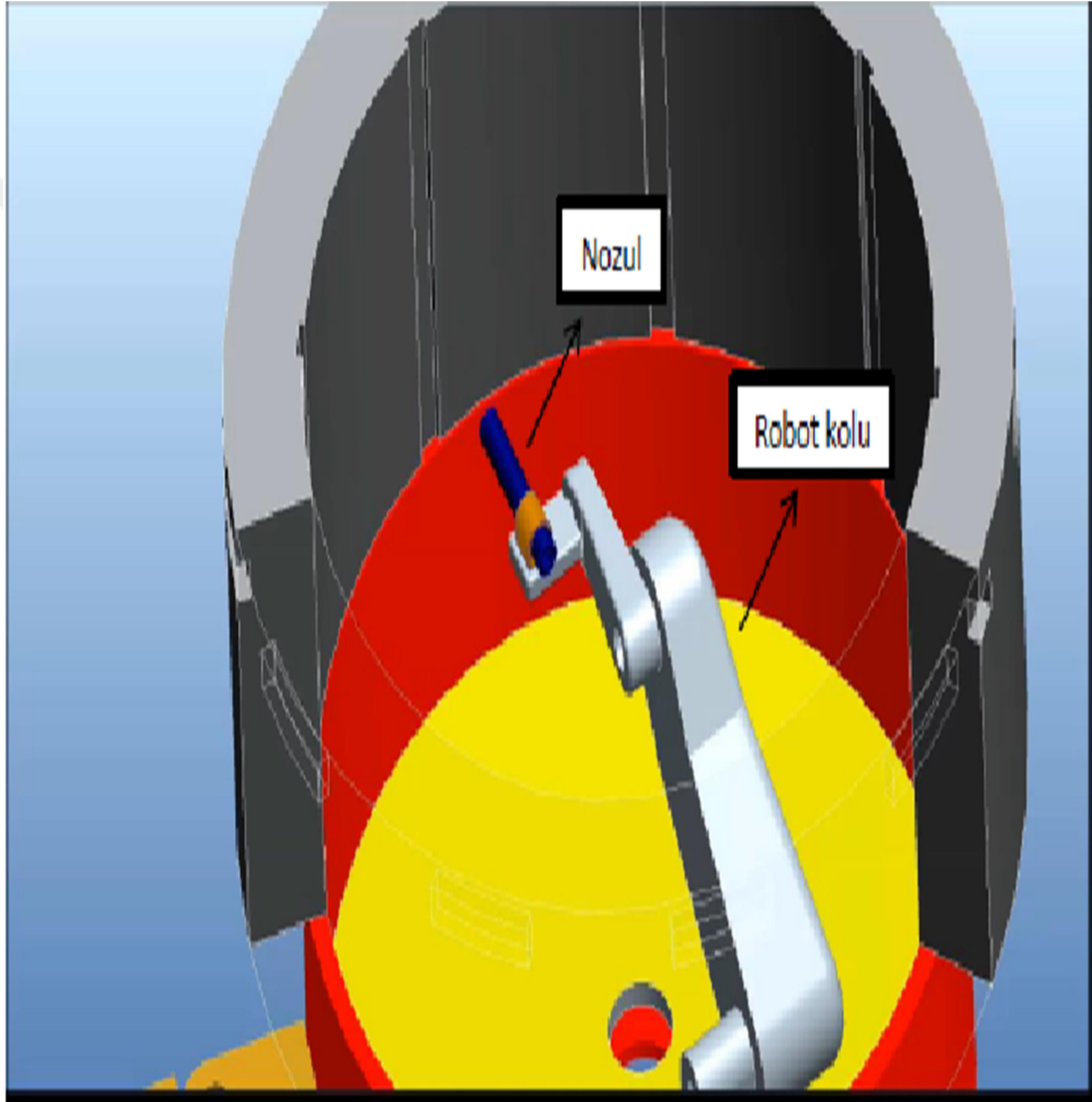
Tablo 2.1. Continental robotu teknik özellikleri [1]

Uzunluk (mm)	3170
Genişlik (mm)	950
Ağırlık (kg)	2500
Yükseklik (mm)	2500
Gürültü Seviyesi (dB)	84
Çalışma aralığı (kalıp ölçüleri)	13” – 18” oto kalıpları

Sistemin kullanıcı tarafında, Windows XP işletim sistemi yüklü endüstriyel bilgisayar, EtherCAT haberleşme protokolü, TwinCAT 2 derleyici platform yer almaktadır. Bu yönüyle kullandığı hareket kontrol yapısı oldukça eski bir teknolojidir.

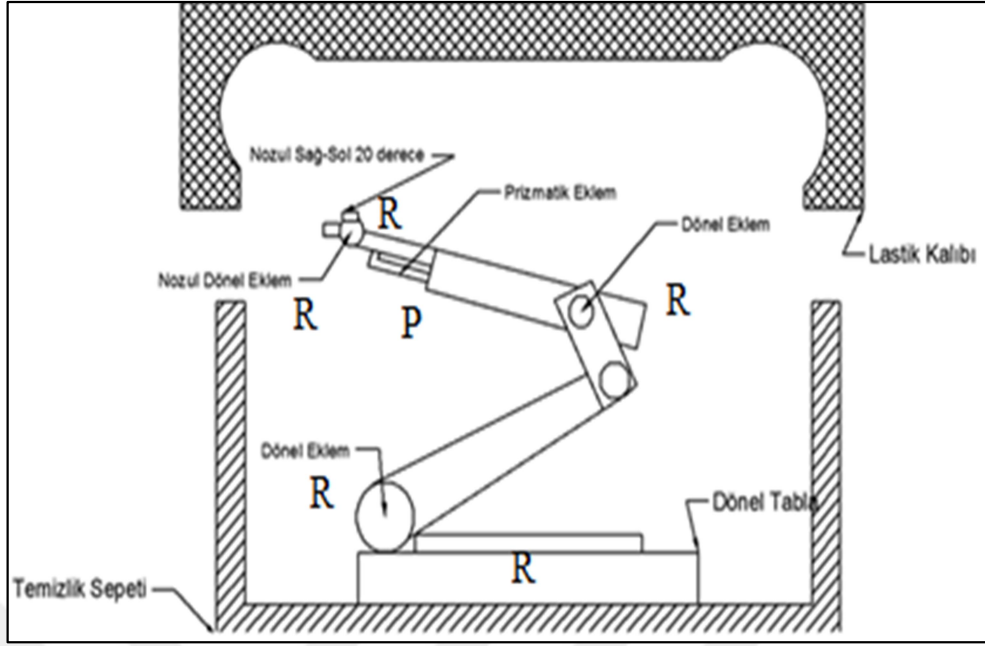
2.4. Sistem Taslak Tasarımı

İsterler, oluşturulan çalışma senaryosu ve literatür taraması ışığında sistem için bir taslak kavramsal tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sistem şu alt birimlerden oluşmaktadır. Katlanabilir kol mekanizması, taşıyıcı platform, 6 eklemlili seri kinematik robot, kuru buz püskürtme makinası, ses izolasyon sepeti ve merkezleme halkası şeklindedir. Sistemin kavramsal modeli Şekil 2.5’te belirtilmiştir.

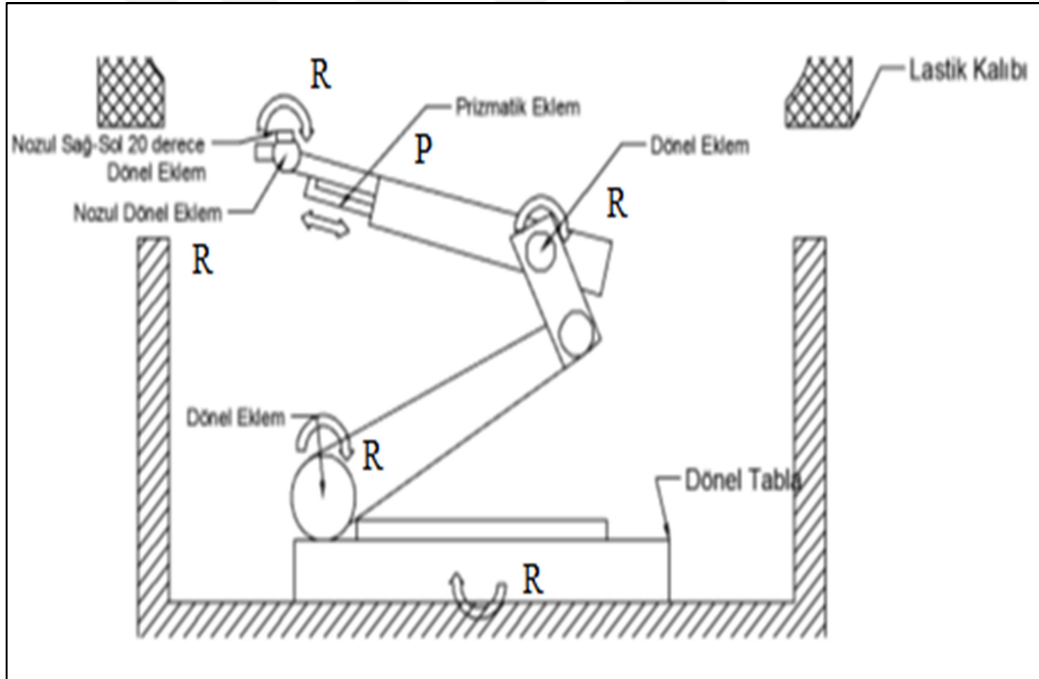


Şekil 2.5. Robot kalıp içinde çalışması taslak modeli

Yapılan taslak çizimler ışığında robot kolunun hareketleri belirlenmiştir. Belirlenen hareket yapısına göre kavramsal tasarımı oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen tasarım Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.6. Altı serbestlik dereceli robotun kavramsal tasarımı [5]



Şekil 2.7. Altı serbestlik dereceli robotun eklemlerinin hareket yapısı [5]

Oto ve kamyon kalıpları için temizlik işlemi gerçekleştirilirken belirlenen çalışma senaryosunda robotun takip edeceği yörünge, kalıbın kesitinin 7 ayrı bölgeye ayrılarak her iki bölge arasında tanımlanacak yatay ve düşey konumlarına göre bir lineer doğrular birleşimidir. Bu doğrular üzerinde bölge kesişim noktalarında oluşan noktalara robotun uç işlevcisinin yaklaşım açısı oryantasyon olarak kullanılacaktır.

Bu oryantasyon açıları temizlik kalitesinin maksimum olabileceği ve kalıbın doal şekline en yakın taramanın gerçekleşeceği bir oryantasyondur. Bu sebeple kavramsal tasarımda eklem bağ yapıları belirlenirken yörünge ve çalışma uzayında istenilen hareketler baz alınmıştır. Ayrıca 2 boyutlu kesit yörüngesi boyunca robotun uç işlevcisi her konumladığında o noktada sabit 367° dönme hareketi kalıp hacminden kaynaklı olarak gereklidir. Bu bilgiler ışığında;

- Kesitteki her noktada nozulun 367° kalıbın o nokta boyunca çevresel temizliği için robotun bağlı olduğu dönel tabla 1. Eklem olarak belirlenmiştir [5].
- 500 mm çapında bir alan içine katlanabilen ve kesitte belirlenen iki boyutlu konuma yatayda ulaşabilmesi adına 2.eklem rotasyonel olarak belirlenmiştir [5].
- Sepet hacmi içinden noktaya ulaşabilmesi ve sepet içine 500 mm çapında alandan katlanarak başlangıç pozisyonuna robotun konumlanabilmesi için 3. Eklem rotasyonel olarak belirlenmiştir.
- Kamyon kalıplarının kartezyen uzayda kesit koordinatlarının büyük olması sepet içinden robotun konumlamaya çıktıktan sonra yörüngeye ulaşırken ek uzama gereksinimi duyulmaktadır. Bu sebeple 4.Eklem prizmatik eklem olarak belirlenmiştir.
- Robot uç ilevcisinin kesit yörüngede noktaya oryantasyon yaklaşımı için 5.eklem oryantasyon için rotasyonel olarak belirlenmiştir.
- Kalıp segment kısmında bulunan desen bıçaklarının yanal yüzeylerine ulaşabilmek adına opsiyonel seçimli 20° hareket kabiliyeti 6.eklem dönme eklemi olarak belirlenmiştir.

Belirlenen bu hareket yapısına göre robot istenilen pozisyon yörüngesi 2 boyutludur. 3. Boyut sabit dönüş olan 367° olarak robotun bağlı olduğu dönel tabladır [5].

3. 6 SERBESTLİK DERECELİ OTO VE KAMYON LASTİĞİ PİŞİRME KALIPLARI TEMİZLEME ROBOTU TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

Kavramsal tasarımı gerçekleştirilen sistemin son tasarım çalışması temelde iki ana kısma ayrılmaktadır;

- Mekanik tasarım
- Hareket kontrol tasarımı

İlk aşamada mekanik tasarım çalışması yapılarak gerçekleştirilen mekanik tasarımın gerçek zamanlı pozisyon kontrolü için kinematik analizi gerçekleştirilmiştir.

Mekanik tasarıma göre malzeme, motor, redüktör seçimleri gerçekleştirilmiş. Hareket kontrol elektrik ve tahrik tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Hareket kontrol tasarımında Twincat 3 ve Ethercat haberleşmesi tabanlı hareket kontrol yazılımı, C# tabanlı kullanıcı ara yüzü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

3.1. Mekanik Tasarım

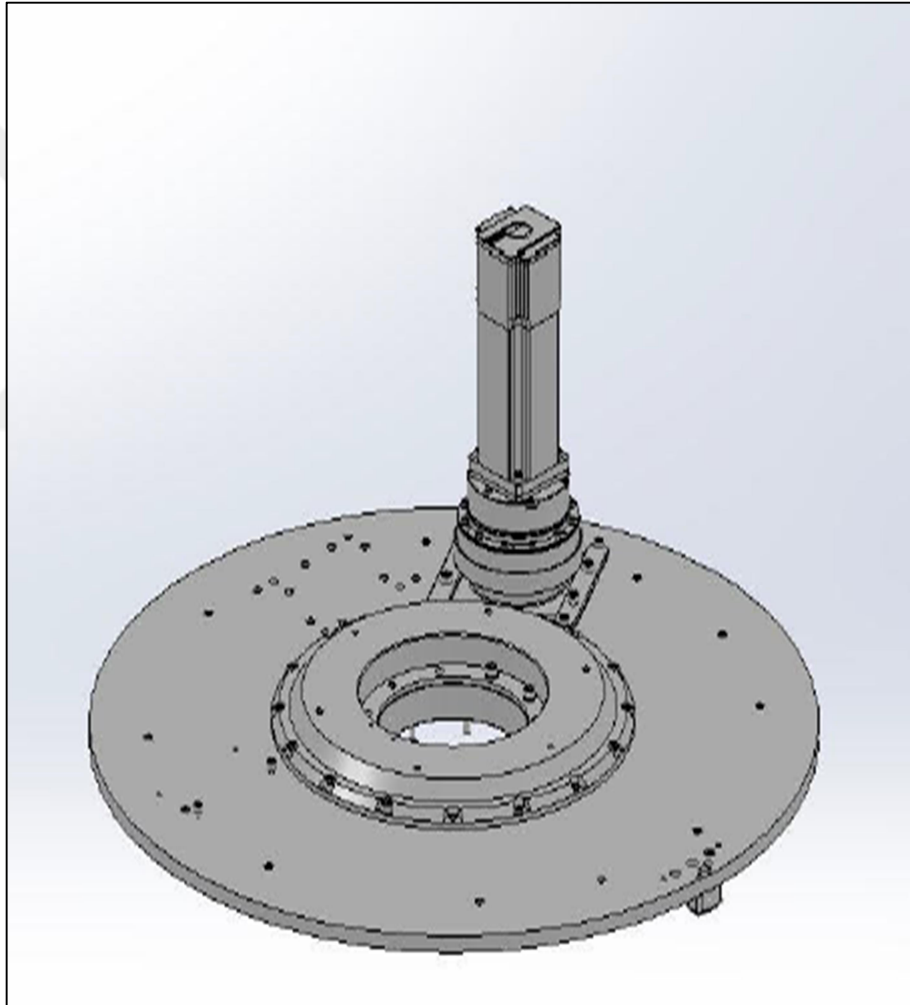
Kavramsal tasarımı gerçekleştirilen robotun detaylı mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Detaylı mekanik tasarım istenilen çalışma uzayı ve belirlenen hareket yapısına göre kol boyları ve yapılarının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan method ve yöntem şu şekildedir;

- Kolların tasarımı Solidworks yardımıyla gerçekleştirilmiştir.
- Robotun mekaniğinin Solidworks'te kolların hareketi kısıtların 3 boyutlu çizimi içerisinde robot hareket ettirilerek kalıba çarpıp çarpmadığı simule edilmiştir.
- Tasarım tamamlanarak onaylandıktan sonra iç detay tasarımları gerçekleştirilmiştir.
- Detay tasarımları tamamlanan robot için mekanik payload, kol ağırlıkları ve hızla göre motor ve redüktör seçimleri gerçekleştirilmiştir.
- 2 Boyutlu imalata yönelik çizimler gerçekleştirilerek imalatı tamamlanmıştır.

Robot mekanik tasarımı 3 birime ayrılabilir;

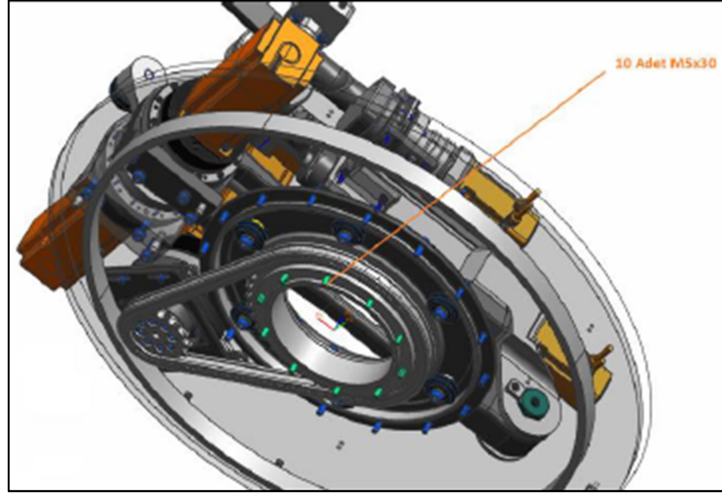
- Robot kol tasarımı
- Merkezleme halkası tasarımı
- Ses izolasyonlu temizlik sepeti tasarımı

Robot kol merkezleme halkası ve temizlik sepeti toplam ağırlığının 150 kg'ı geçmemesi gerekmektedir. Her bir eklem için 3 boyutlu katı model tasarımı bu sınırlamalara göre gerçekleştirilmiştir. Birinci ekleme ait tasarım katı modeli Şekil 3.1'de verilmiştir.



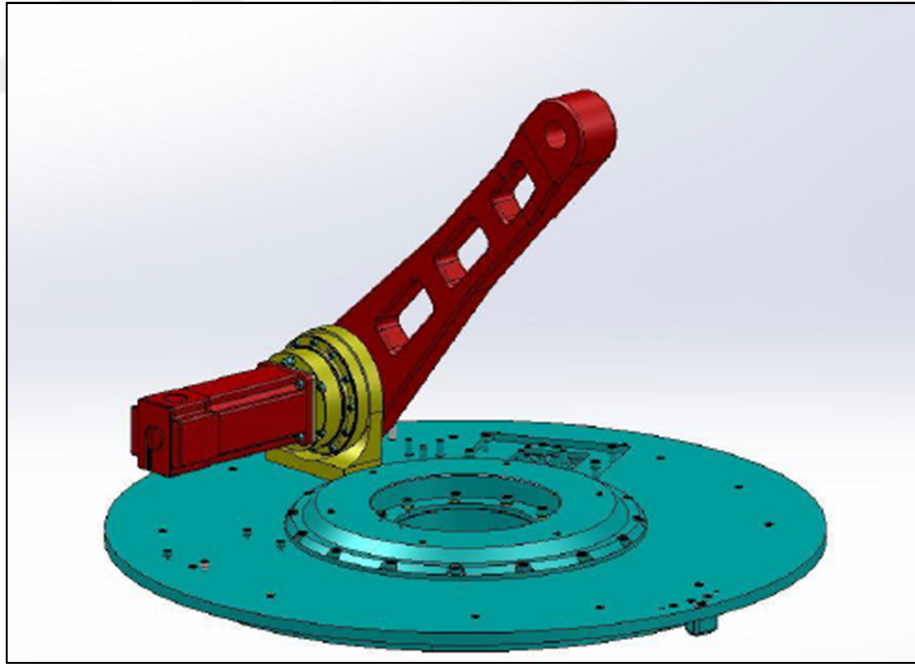
Şekil 3.1. Birinci eklemin 3 boyutlu katı modeli

1. Eklem dönme tablasıdır. Dönme hareket yapısına sahiptir. Motora bağlı dişli ve dişlinin tahrik ettiği zincir vasıtasıyla merkezleme plakasının bağlı olduğu rulmanlar aracılığıyla dönme hareketi gerçekleştirilir. Tahrik yapısı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Birinci eklemin tahriğinin alttan görünüşü

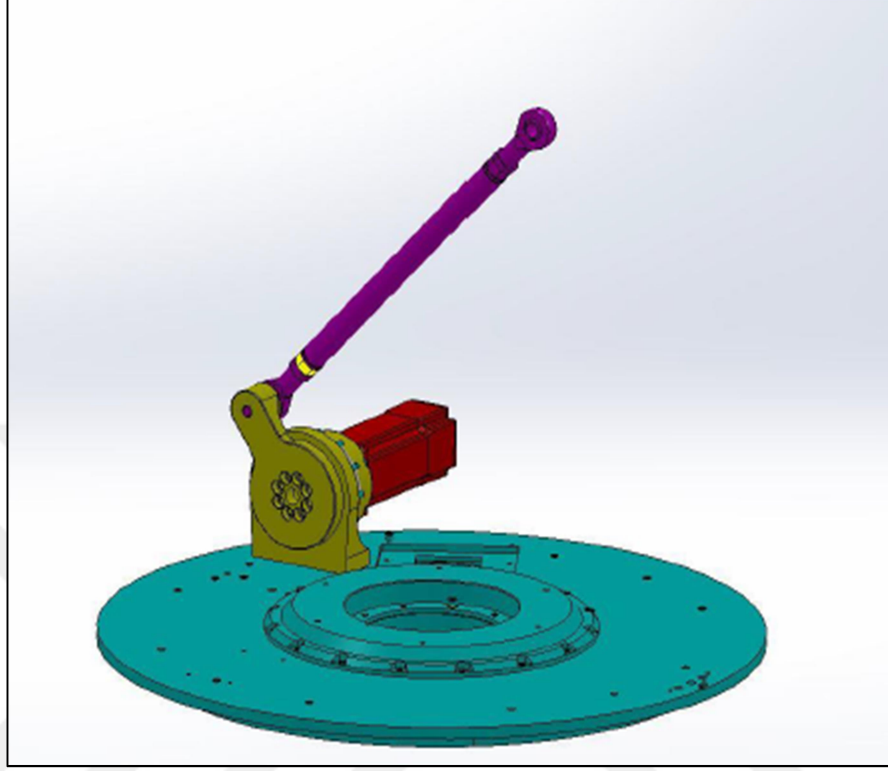
Dönme eklemi olan 2. eklemin üç boyutlu tasarımı Solidworks'te gerçekleştirilmiş ve 3 boyutlu modeli Şekilde gösterilmektedir. 2 eklem kol tasarımında tahrik harmonic tip bir reduktor ve servo motor aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tasarım resmi Şekil 3.3'te verilmiştir.



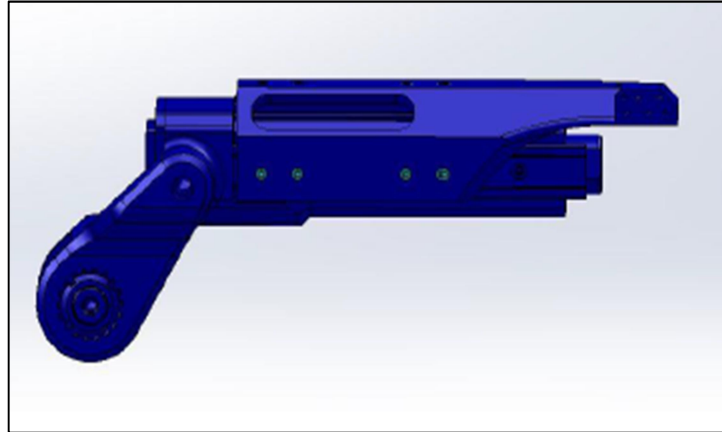
Şekil 3.3. İkinci eklemin 3 boyutlu katı modeli

2.Eklem dönme hareketi yapan bir eklemdir. Tasarım esnasında robotun dar alanda hareketini gerçekleştirebilmesi için motor ve reduktoru dönel tabla üzerine yerleştirilmiştir. Dönel tabla üzerinden tahrik kola 4 kol mekanizması oluşturacak bir kol ile aktarılmaktadır. Bu hareket kontrol tasarımında pozisyon kontrolü için birlikte

çalışma ilişkisi ortaya çıkarmıştır. Üçüncü eklem kol 3 boyutlu katı modeli Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

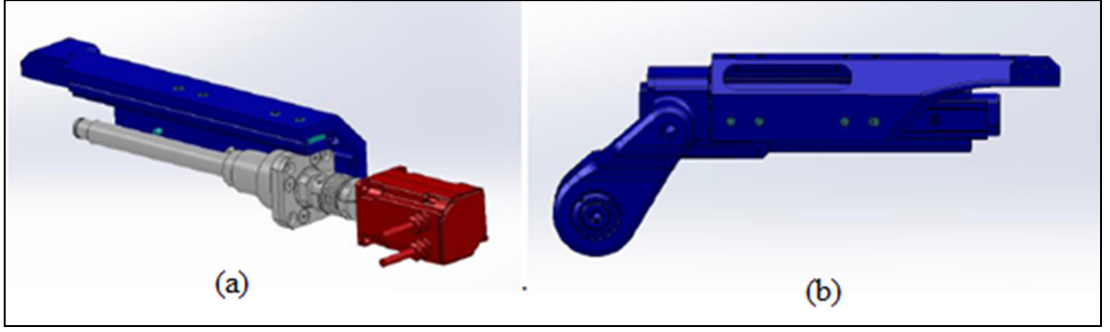


Şekil 3.4. Üçüncü eklem tahriğinin 3 boyutlu katı modeli



Şekil 3.5. Üçüncü eklem kol katı modeli

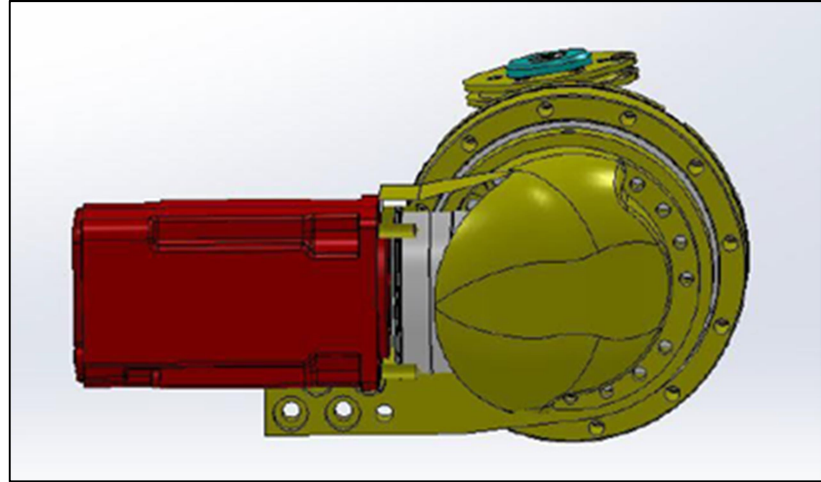
4.eklem kavramsal tasarımı prizmatik eklem olarak belirlenmiştir. Tasarımı 3.eklem kol üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonsuz vida mekanizması ve ona bağlı lineer ray üzerinden tahrik sağlanmıştır. Sonsuz vida motora bir kaplin vasıtasıyla bağlanmıştır. 4.Eklem 3 boyutlu katı modeli ve tahrik mekanizması Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Dördüncü eklemün 3 boyutlu kol katı modeli

5.Eklem nozulun bağlı olduğu eklem olup rotasyonel tip bir bağ yapısına sahiptir.

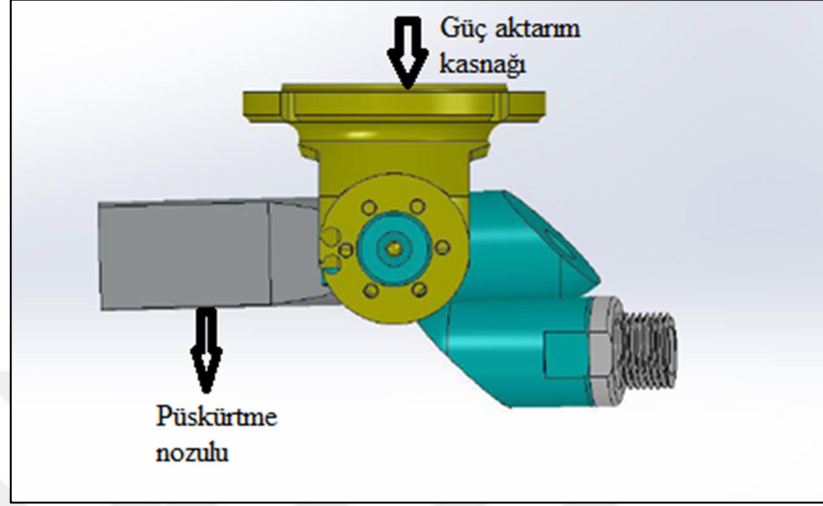
4.Eklem kol ucuna bir bağlantı parçası ile bağlanabilir şekilde tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da a resminde dördüncü eklemün i tahrik yapısı, b resminde yandan genel görünümu verilmektedir. Motor reduktör ve konik dişliler sayesinde hareket aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bunun amacı kalıp içerisinde çarpmayı engellemektir. Kalıp temizliği esnasında kalıp yüzeyine robotun çarpmaması için motorun 4.eklem koluna paralel yerleştirilmesi gerekmektedir. Güç aktarımı tasarımında tozlu ve nemli ortamda çalışma şartları sebebiyle kayış kasnak aktarımı kullanılmamıştır. Şekil 3.7'de 3 boyutlu katı modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Beşinci eklemün üç boyutlu katı modeli

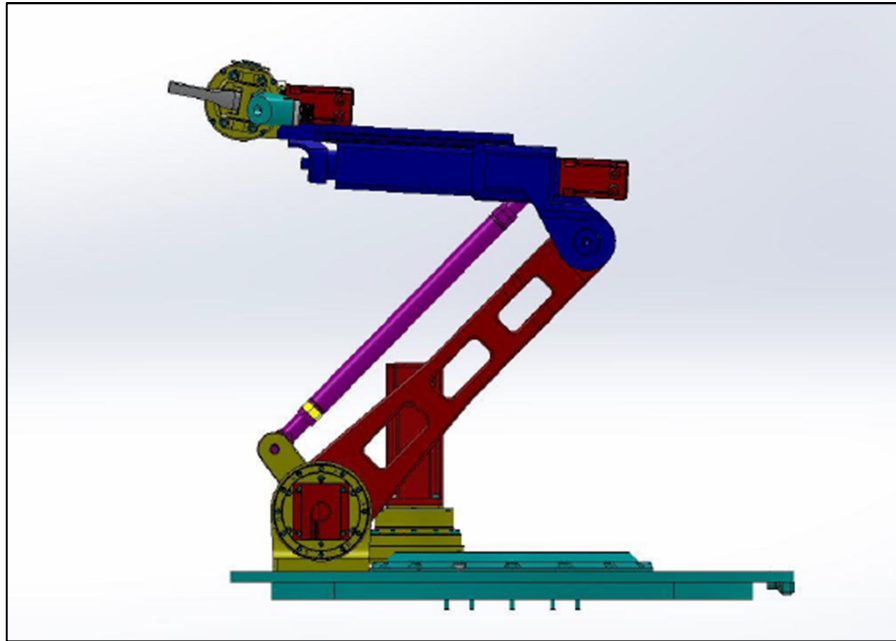
6. Eklem 5.eklem üzerinde tasarlanmıştır. Bulunduğu bölge kalıba çarpma riskinin en yüksek olduğu yer olduğu için motor ve reduktör dönel tabla üzerine yerleştirilmiştir. Hareket 6.ekleme teller vasıtasıyla aktarılmaktadır. Hareket eden nozul olup nozulun bağlı olduğu flanş üst bölümünde bir kasnağa bağlıdır. Kasnak her iki tarafından iki

ayrı tele bağlanmıştır. Teller nozulun istenilen hareketi gerçekleştirebilmesi için motordan gelen tahriği aktarmaktadır. Şekil 3.8’de 3 boyutlu katı modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Altıncı eklemin 3 boyutlu kol katı modeli

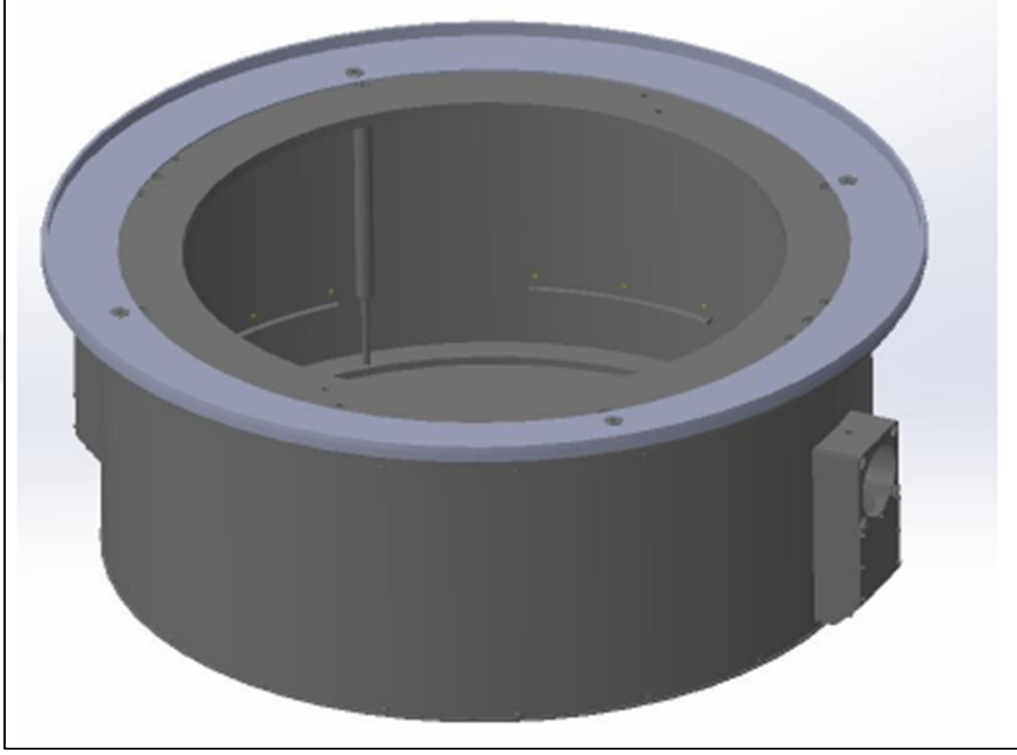
Eklemlerin tasarımı gerçekleştirildikten sonra Solidworks ortamında 3 boyutlu montaj çalışması yapılmıştır. Robotun 3 boyutlu modeli Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Altı serbestlik dereceli robotun 3 boyutlu katı modeli

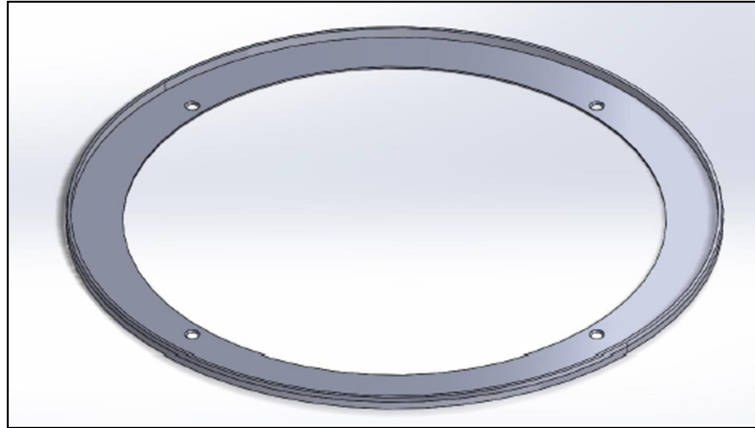
Robot tasarımı sonrasında içinde çalışacağı ve dönel tabladan montajlanacağı ses izolasyonlu temizlik sepeti tasarımı gerçekleştirilmiştir. Temizlik sepeti ses

izolasyonu sağlamak için duvarlarına ses izolasyon malzemesi montajlanmıştır. Temizlik sepeti üzerine çapı 500 mm olan açıklığa sahip flanş tasarlanmıştır. Merkezleme halkası bu flanşa bağlanıp kalıp üzerine merkezleme gerçekleştirilecektir. Temizlik sepeti 3 boyutlu modeli Şekil 3.10’da verilmiştir.



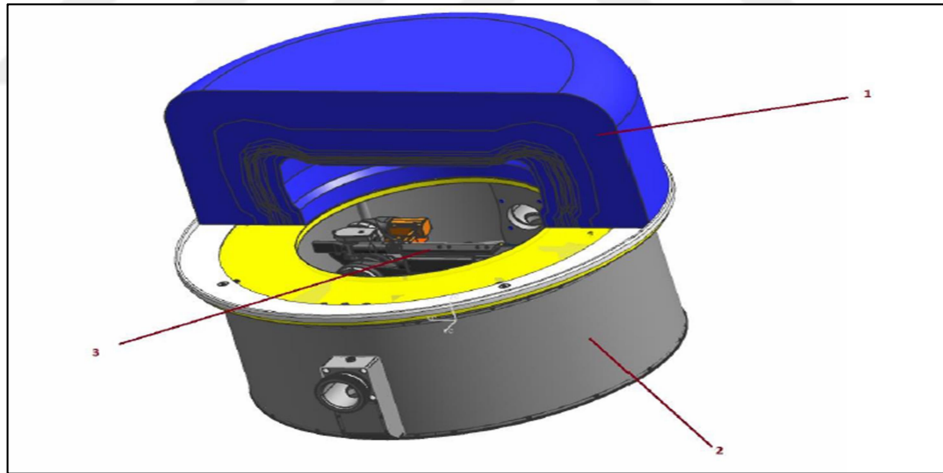
Şekil 3.10. Temizlik sepeti ve merkezleme halkasının 3 boyutlu katı modeli

Merkezleme halkası kalıbın bağlı olduğu konteynır ismi verilen yapının ölçülerine göre tasarımı gerçekleştirilir. Örnek tasarımı gerçekleştirilen merkezleme halkası Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Merkezleme halkasının 3 boyutlu katı modeli

Temizlik sepeti ve robot tasarımı tamamlandıktan sonra Solidworks'te montajı gerçekleştirilmiştir. Montaj çalışmasından sonra minimum ve maksimum kalıp ölçülerine göre tasarlanan üç boyutlu çalışma uzayında kalıp kesitleri içerisinde Solidworks ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu montaj Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Tasarım öncesi belirlenen isterlerin tasarım tamamlandığında prototip imalatı öncesinde doğrulanması gereklidir. Bu sebeple isterlerin her aşaması için tasarım çalışması analiz edilerek son tasarım aşaması tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışması kalıp kesitleri içerisinde robotun eklemlerinin hareketinin gözlemlenmesi ve olası kalıba çarpma durumlarının analiz edilmesini amaçlamıştır. Ayrıca üç boyutlu tasarımın haricinde ortam koşulları sınırları da tasarımın son şeklinin verilmesi için önemli girdi koşul olarak değerlendirilmiştir. Özellikle nem ve toz koruması robotun sürekli çalışma durumunu etkileyeceğinden detay tasarım sırasında toz ve nemin dinamik mekanizmaların içerisine ulaşmaması gereklidir. Bu sebeple tüm mekanizmaların iç kısımları toz koruma için kapatılmıştır. Montaj alt grup listesi Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Temizlik sepeti, robot ve kalıp kesitlerinin 3 boyutlu modeli

Tablo 3.1. Sistem 3 boyutlu tam montaj alt grup listesi

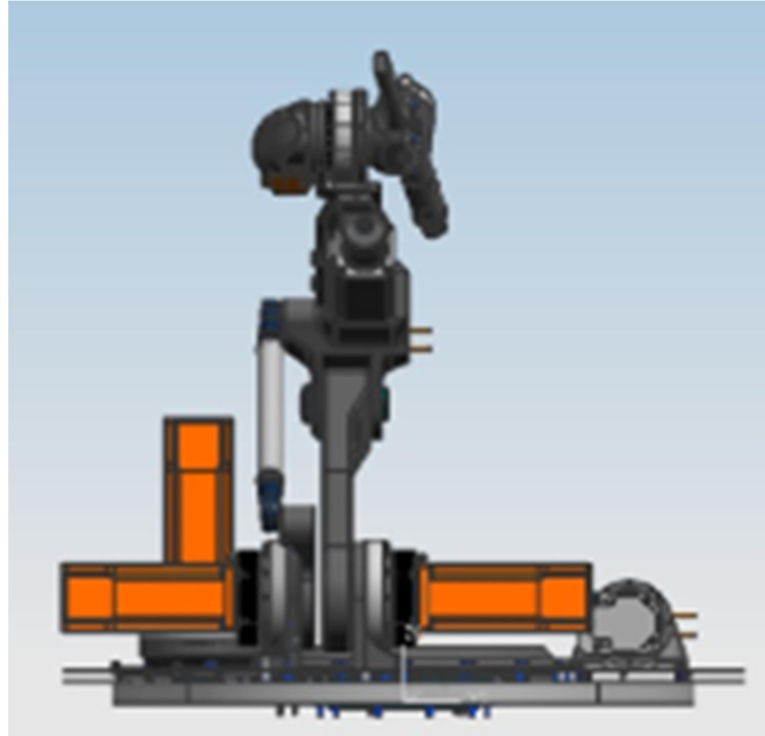
1	Minimum maksimum kalıp kesit modeli
2	Temizlik sepeti
3	6 Serbestlik dereceli robot

Robotun Solidworks ortamında simülasyon çalışması 2 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada sepete montajı yapılmadan bağların hareketi

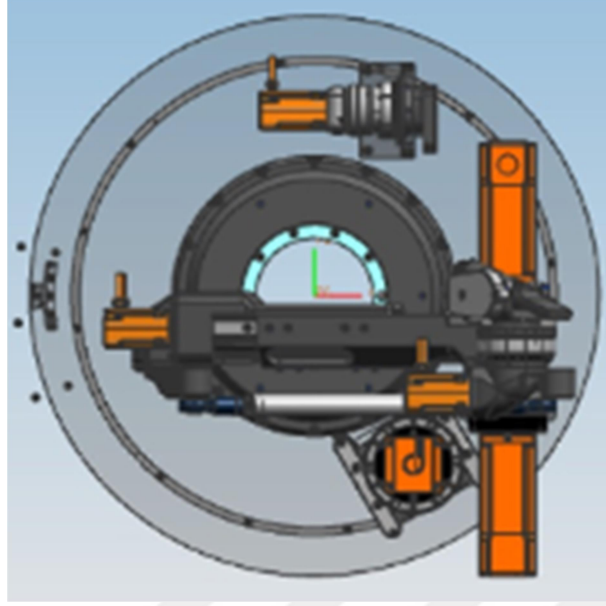
gözlenmiş ikinci aşamada sepet içine yerleştirilerek kalıp kesit modeli üzerinde simülasyon gerçekleştirilmiştir. İlk aşama için yapılan çalışma ve robot görünümü Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Robotun yandan görünümü

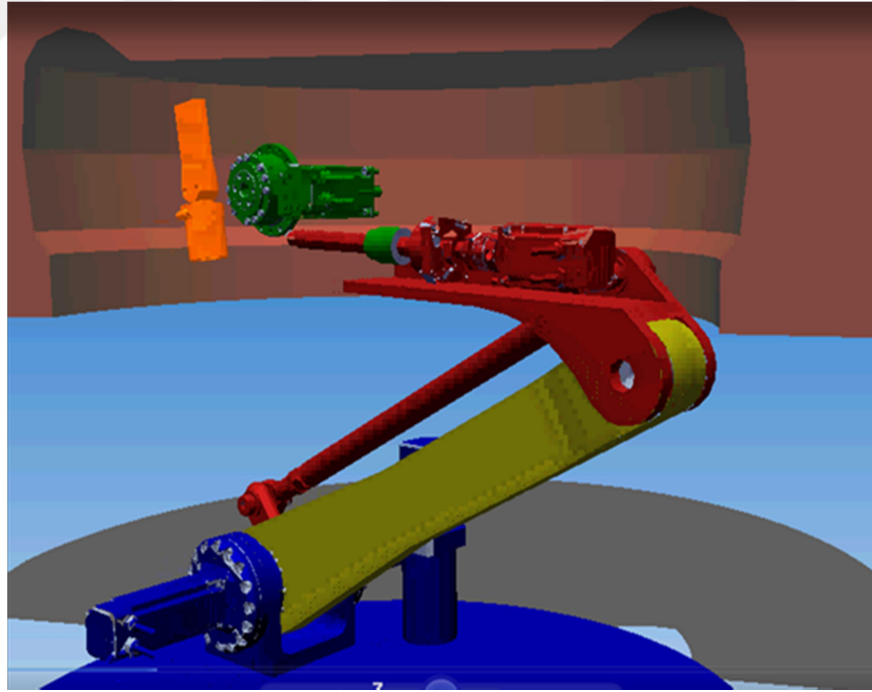


Şekil 3.14. Robotun ön görünümü



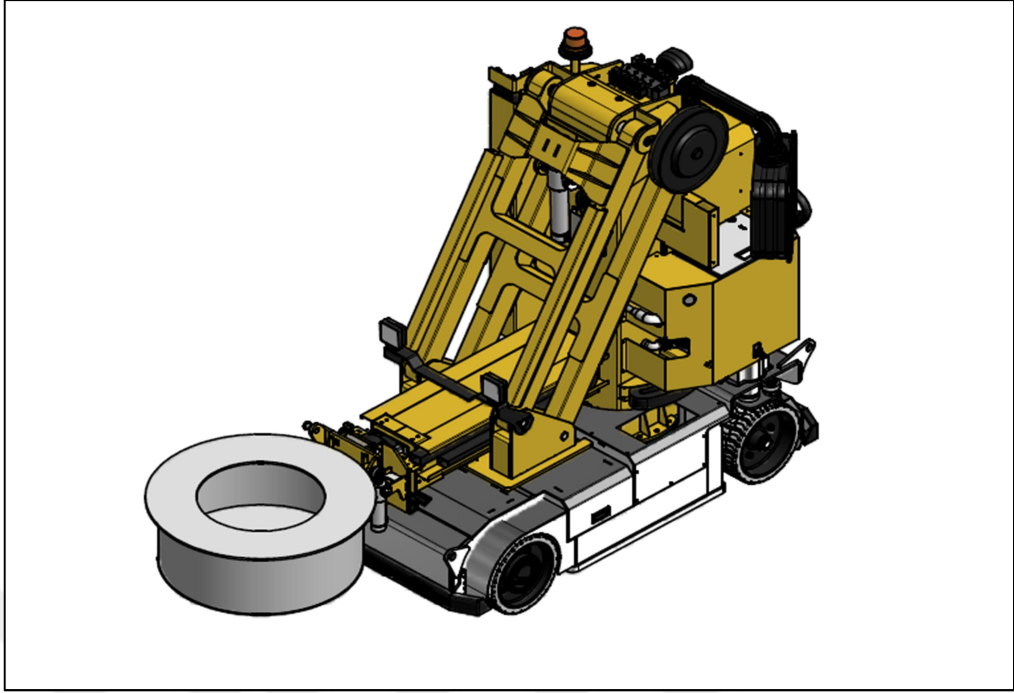
Şekil 3.15. Robotun üst görünümü

Kalıplar içinde simülasyon çalışması için robotun boyutları korumak şartıyla basitleştirilmiş modeli kullanılmıştır. Bunun sebebi programın tam montajı işleme güçlüğüdür. Kalıp içinde robot görünüşü Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Robotun kalıp kesiti içerisinde görünümü

Robot ve temizlik sepetinin bağlanacağı taşıyıcı platform harici olarak tasarlanmıştır katlanabilir platform ve robot montaj resmi Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Taşıyıcı platform ve temizlik sepetinin 3 boyutlu montaj modeli

Taşıyıcı platformun teknik özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

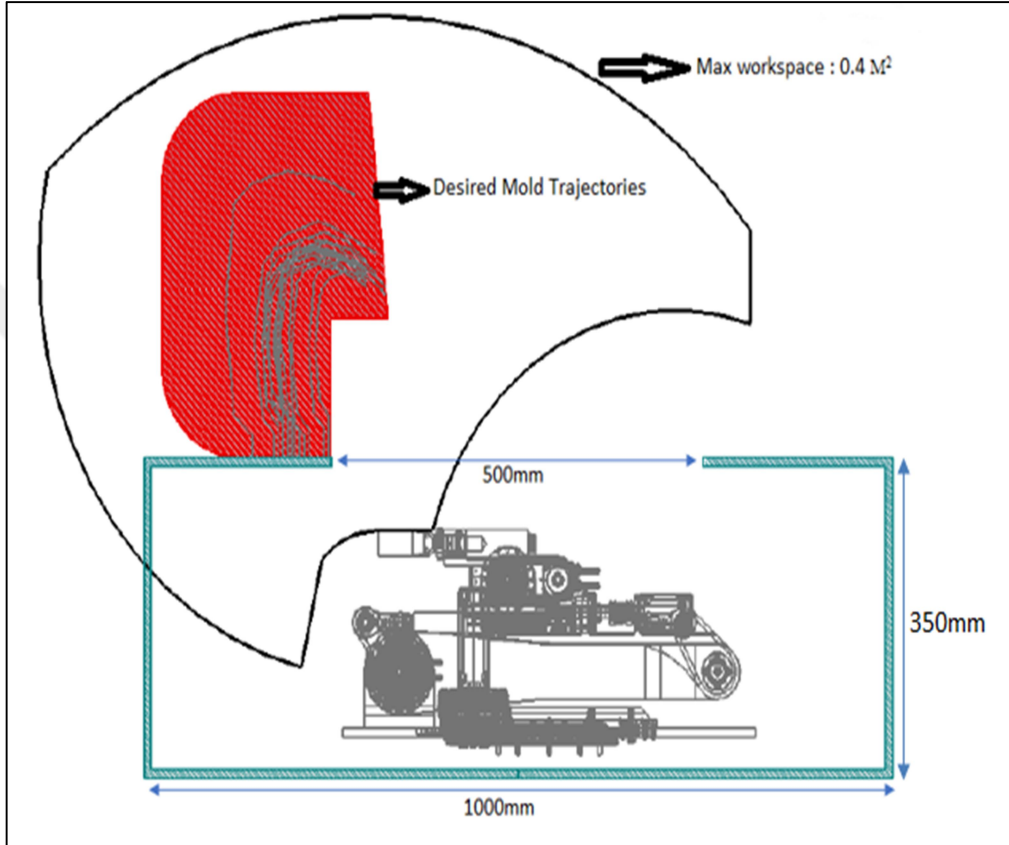
Tablo 3.2. Taşıyıcı platform teknik özellikleri

Yatay Strok (mm)	2028
Dikey Strok (mm)	2274
Toplam ağırlık (mm)	3150
Boyutlar (UxGxY)(mm)	3020x1000x2230
Tırmanma açısı °	3
Serbestlik derecesi	7

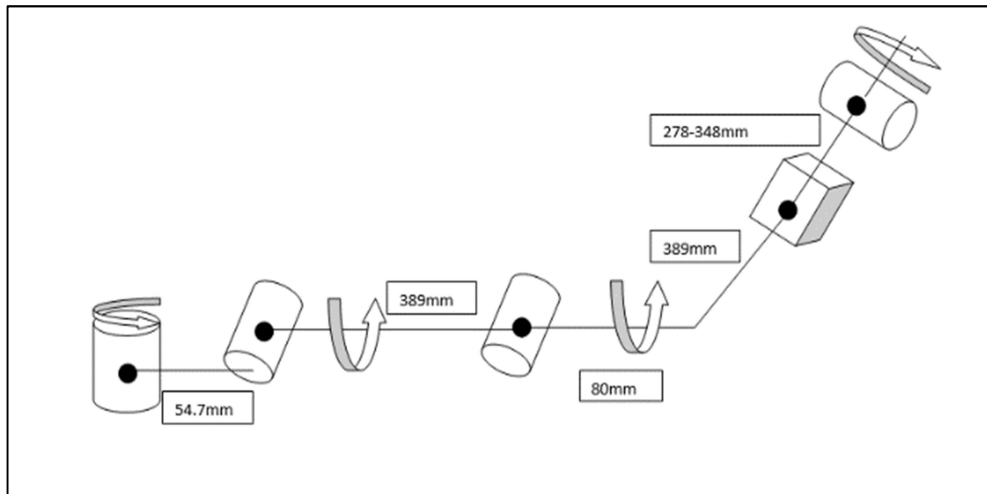
Tasarım çalışmaları tamamlandıktan sonra parçaların imalatı için 2 boyutlu imalata yönelik teknik çizimler Solidworks ortamında hazırlanmıştır. Ayrıca son detay tasarıma göre Solidworks ortamında çalışma uzayı tasarımı gerçekleştirilmiş ve robotun çalışma alanının son şekli oluşturulmuştur. Çalışma uzayı Şekil 3.18’de verilmiştir.

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi üç boyutlu katı model tasarımı tamamlanan robotun maksimum çalışma uzayı çizilmiştir. Çizilen çalışma uzayı değerlendirildiğinde giriş tasarım koşulu olan kalıp ölçülerinin robot çalışma uzayı içerisinde olduğu görülmektedir. Ulaşılan çalışma uzayı sayesinde robot yalnızca otomobil lastik kalıpları için değil, kamyon lastiği pişirme kalıplarının en büyük ölçüsü olan 24” e

kadar temizlik ve hareket kabiliyeti ortaya çıkmıştır. Robot eklemlerinde bulunan 2. 3. ve 5. eklem uzunları oto lastik kalıpları en büyük ölçüsüne ulaşabilmektedir. 4.Eklem lineer kolda 100 mm ye kadar açılma kamyon kalıplarında en büyük ölçüye ulaşmayı sağlamıştır. Eklemlerin birbirlerine göre bağ yapısı ve uzunlukları Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.18. Altı serbestlik dereceli robot çalışma uzayı



Şekil 3.19. Altı serbestlik dereceli robot bağ uzunlukları ve hareket yapısı

6 Eklemlili robot planar bir düzlemlde yörünge planlaması gerçekleştirecektir. Mekanik tasarım sonrası bağlar arasında hareket limitleri oluşturulmuştur. Bu limitler istenilen çalışma uzayı ve hızlar için mevcut incelenen Continental robotu proses zamanı olan 1 saat temizlik referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.3'te eklemlere ait hareket yapısı verilmiştir.

Tablo 3.3. Eklemlerin çalışma aralığı ve hızları

Ekleml	Çalışma Aralığı (derece (°))	Hız (rad/s)
1	0- 365	0,98
2	0-190	2,62
3	0-(-)180	2,62
4	0-75mm	0,02 m/s
5	-20 / +200	6,28
6	± 20	0,02

Tasarımı tamamlanan robotun toplam ağırlık limiti referans alınarak malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca malzeme seçiminde robotun çalışma esnasında oluşturacağı titreşimlerde göz önünde bulundurulmuştur. Çok hafif bir malzeme seçimi, robotun çalışması sırasında çok fazla titreşime sebebiyet verebilir. Ayrıca parçalar için çok ağır bir malzeme seçimide ağırlığı arttırarak seçilecek motorların ve redüktörlerin boyutunu arttırabilir. Boyutların büyümesi de istenilen çalışma uzayı içerisinde robotun konumlamasını zorlaştırmaktadır. Yapılan araştırma kapsamında en uygun malzeme ısı işlem görmüş Aliminyum 6061 olarak belirlenmiştir. Aliminyum 6061 özellikleri bakımından hafif ve uygulama için sağlam bir malzemedir. Aliminyum 6061 malzeme ve özellikleri Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Aliminyum 6061 teknik özellikleri

Elastikiyet Modülü	(N/m ²)	6,9e+010
Poisson Oranı		0,33
Yırtılma Modülü	(N/m ²)	2,6e+010
Kütle Yoğunluğu	(kg/m ³)	2700
Gerilme Mukavemeti	(N/m ²)	124084000
Akma Mukavemeti	(N/m ²)	55148500
Termal İletkenlik	(W/(m.K))	170
Özgöl Isı	(J/ (kg.K))	1300

3.2. Hareket Kontrol Tasarımı ve Ürün Seçimi

Hareket kontrol algoritmalarının gerçekleştirilebilmesi ve robotun hareketinin sağlanması için motor, reduktör, sürücü, kontrolör ve haberleşme yapısı seçimi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak motor seçimi gerçekleştirilmiştir. Beckhoff marka AM8111 ve AM8121 model servo motorlar robot eklemleri için seçilmiştir [6]. Bu motorlar boyutları bakımından ve içerdikleri OCT tek kablo teknolojisi açısından güçlü dinamik performansa sahip servo motorlardır [6]. Tek kablo geri besleme teknolojisi Beckhoff firması tarafından patenti alınan bir motor kablo teknolojisidir. Standart servo motorlar iki kabloyla sürülebilmektedirler bunlar güç ve veri kablosudur. Ancak Beckhoff firması ürettiği bu teknolojiyle her iki kablo işlevini tek kablo içerisinde gerçekleştirebilmektedir. Sepet içerisinde robota bağlı kablo sayısını minimize etmek amacıyla bu teknoloji tercih edilmiştir. Motor ve reduktör seçimleri için hız ve tork isterleri gereklidir. Bu tork isterleri moment hesabı yapılarak gerçekleştirilmiştir. Hız isterleri için incelenen Continental robotu motorlarının çıkış hızları referans alınmıştır. Robot eklem ağırlıkları ve uç işlevide istenen 12 kg taşıma yüküne göre moment hesabıyla güvenlik katsayısı yaklaşık 1,5 olarak Tork ve hız isterleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Robot tork ve hız isterleri

Eklem	Hız isteri (rad/s)	Tork (Nm)	İsteri	Redüktör çıkış hızı (rad/s)	Redüktör çıkış torku (Nominal)(Nm)
1	0,16	33		0,61	275
2	0,19	72		1,32	128
3	0,19	36		1,75	96
4	0,02 m/s	0,04		840	0,18
5	0,453	0,2		16,8	9
6	0,1	0,15		0,01	0,36

Bu kapsamda seçimi yapılan motorlardan ilki olan AM8111 teknik özellikleri Şekil 3.20'de verilmiştir. Şekilde verilen özelliklere göre seçimi yapılan motor 0,19 Nm nominal torka sahip 4000 devir 48 VDA servo motordur. Tek kablo ile sürülmektedir. Motor sürücüsü için EL7211 sürücü kullanılmıştır. Robot üzerinde 4.5. ve 6. eklem tahriği için kullanılmıştır.

Data for 50 V DC	AM8111-wFyz
Motor type	permanent magnet-excited three-phase synchronous motor
Standstill torque	0.20 Nm
Rated torque	0.19 Nm
Cooling	convection
Rated speed	4000 min ⁻¹
Rated power	0.08 kW
Peak torque	0.85 Nm
Standstill current	2.85 A
Peak current	18.0 A
Torque constant	0.07 Nm/A
Voltage constant	5 mV/min ⁻¹
Number of poles	6
Rotor moment of inertia	0.029 kgcm ²
Weight	0.6 kg
Holding torque brake (M _{br})	0.6 Nm
Power consumption (brake) at 24 V DC (P _{br})	10 W
Rotor moment of inertia incl. brake (J)	0.052 kgcm ²
Weight incl. brake (m)	0.8 kg
EtherCAT Terminal	EL7201-0010
EtherCAT plug-in module	EJ7211-0010
EtherCAT Box	EP7211-9034
Connection technology	itec® plug
One Cable Technology (OCT)	yes
Approvals	CE, UL in preparation

Şekil 3.20. Beckhoff AM8111 servo motor teknik özellikleri [6]

İkinci belirlenen motor olan Beckhoff marka AM8121 model servo motor, robotun ilk üç eklemi tahriği için kullanılmıştır. Tek kablo teknolojisi il sürülmekte ve sürücü olarak Beckhoff marka EL7211 sürücü kullanılmıştır. Teknik özellikleri Şekil 3.21’de verilmiştir.

Data for 50 V DC	AM8121-wFyz
Motor type	permanent magnet-excited three-phase synchronous motor
Standstill torque	0.50 Nm
Rated torque	0.50 Nm
Cooling	convection
Rated speed	3000 min ⁻¹
Rated power	0.16 kW
Peak torque	2 Nm
Standstill current	4.0 A
Peak current	17.0 A
Torque constant	0.13 Nm/A
Voltage constant	8 mV/min ⁻¹
Number of poles	6
Rotor moment of inertia	0.134 kgcm ²
Weight	1.0 kg
EtherCAT Terminal	EL7211-0010
EtherCAT plug-in module	EJ7211-0010
EtherCAT Box	EP7211-9034
Connection technology	itec® plug
One Cable Technology (OCT)	yes
Approvals	CE, UL

Şekil 3.21. Beckhoff AM8121 servo motor teknik özellikleri [6]

Şekil 3.21 incelendiğinde motor çıkış torku 0,5 Nm ve 3000 devirdedir. 48 VDA ile beslenmektedir.

EL7211 sürücülerden toplam 6 adet kullanılmıştır. Sürücüler arası haberleşme ve kontrolcü haberleşmesi için Ethercat haberleşme protokolü kullanılmıştır. Ethercat haberleşme protokolü Ethernet tabanlı bir haberleşme protokolü olup diğer protokollere göre çok daha hızlı veri transferi gerçekleştirebilmektedir. Ethercat haberleşmesi yine Beckhoff firmasının patentli haberleşme sistemidir [6]. EL7211 sürücü özellikleri Şekil 3.22’de verilmiştir.

Technical data	EL7211
Number of channels	1 servomotor, resolver, motor brake
Connection method	direct motor connection
Load type	permanent-magnet synchronous motors
Nominal voltage	8...50 V DC
Output current I _N	4.5 A (rms)
Performance increase	–
Peak current I _N	9.0 A (rms) for 1 s
Frequency range	0...599 Hz
PWM clock frequency	16 kHz
Current controller frequency	32 kHz
Rated speed controller frequency	16 kHz
Output voltage motor brake	24 V DC (+6 %/-10 %)
Output current motor brake	max. 0.5 A
Current consumption power contacts	typ. 50 mA + holding current motor brake
Current consumption E-bus	typ. 120 mA
Special features	compact and system-integrated
Weight	approx. 95 g
Operating/storage temperature	0...+55 °C/-25...+85 °C
Relative humidity	95 %, no condensation

Şekil 3.22. EL7211 sürücü [6]

Motor ve sürücülerin kontrol edilebilmesi ve hareket kontrol algoritmalarının işlenebilmesi için bilgisayar tabanlı kontrolcü seçilmiştir. Beckhoff marka CP2215 dokunmatik panel endüstriyel kontrolcü kullanılmıştır [6]. Teknik özellikleri Şekil 3.23’te verilmiştir.

Seçilen endüstriyel bilgisayar, windows tabanlı işletim sistemine sahiptir. Twincat 3 platformu ile sayısal kontrol interpolasyonu (NCI) ve noktadan noktaya hareket

kontrol modülleri bulunmaktadır. Gerçek zamanlı kontrol çalışmasında uygulama açısından kolaylık sağlamaktadır.

Features	
	processor Intel® Celeron® 2000E 2.2 GHz, 2 cores (TC3: 50)
	3½-inch motherboard for 4th Generation Intel® Core™ i3, Core™ i5, Core™ i7 or Celeron®
	1 Mini PCI slot free for cards installed ex factory
	2 GB DDR3L RAM, expandable to 16 GB
	graphic adapter integrated inside the Intel® processor, 1 DVI-D port occupied by the display in the front and 1 DVI connector free
	on-board dual Ethernet adapter with 2 x 100/1000BASE-T connector
	on-board SATA RAID 1 controller, Intel® Rapid Storage Technology
	hard disk, 2½-inch, 320 GB
	1 serial port RS232, 2 USB 3.0 ports and 2 USB 2.0 ports
	24 V DC power supply

Şekil 3.23. Beckhoff CP2215 endüstriyel kontrolcü teknik özellikleri [6]

Tork ve hız isterlerine göre güç aktarım sistemleri seçimi gerçekleştirilmiştir. Harmonic drive marka redüktörler dinamik performansları ve verimlilikleri açısından sisteme uygundur ve uzun ömürlü bakımsız redüktörlerdir. 1.Eklem, 2.eklem ve 3. Eklem için Harmonic Drive marka HFUS-160 modeli 160:1 oranlı redüktör kullanılmıştır. 4.Eklem için Gewinde marka kgr 14 tipi sonsuz dişli, 5.eklem için Spinea marka 1:63 oranlı redüktör ve 6.eklem için Apex Dynamics marka AD047 model redüktör kullanılmıştır. Redüktörlerin özellikleri tablo halinde Tablo 3.6’da verilmiştir.

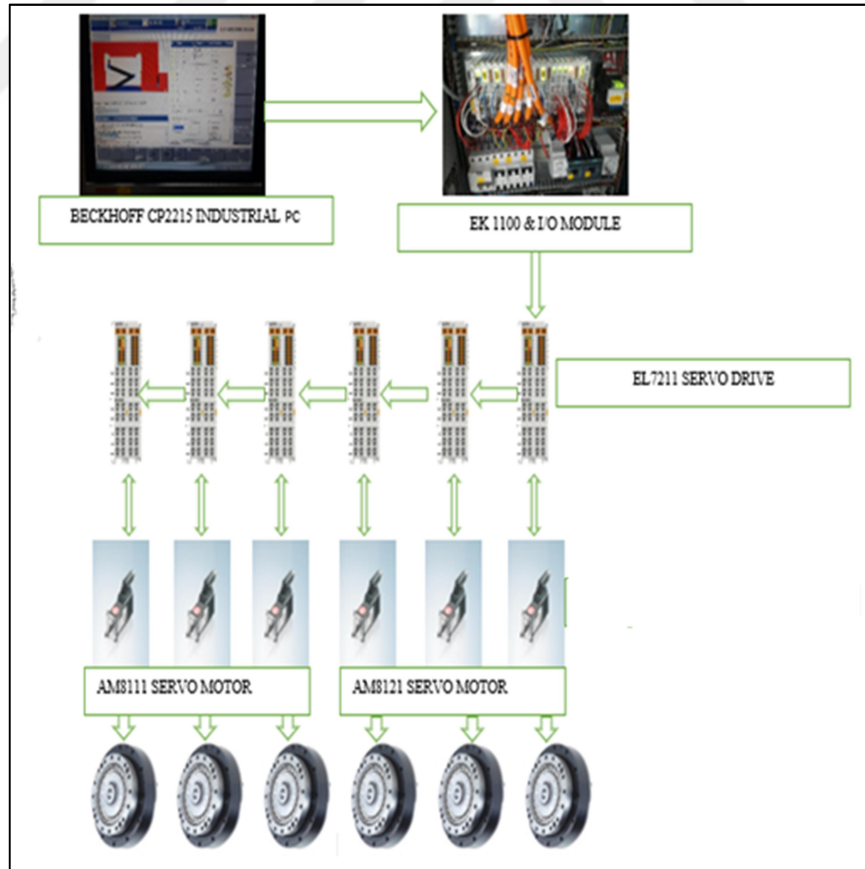
Tablo 3.6. Redüktörlerin teknik özellikleri

Spesifikasyon	Apex dynamics AD047	Spinea TS50-063	Gewinde kgt 14x2 FGR RH	Harmonic Drive CPU -20A-160M
Oran	20:1	63:1	50:1	160:1
Max Tork (NM)	57	36	54	92
Nominal Tork (NM)	19	18		49
Nominal hız (rpm)	5000	2000		3500-5600
Max giriş hızı(rpm)	10000	3000		10000
Kullanılan eklem	6	5	4	1-3

Hareket kontrol ekipmanlarının seçimi sonrası sistemin hareket kontrol şematik tasarımı Şekil 3.24'te verilmiştir. Motor eklem bilgisi ve özellik tablosu Tablo 3.7'de verilmiştir.

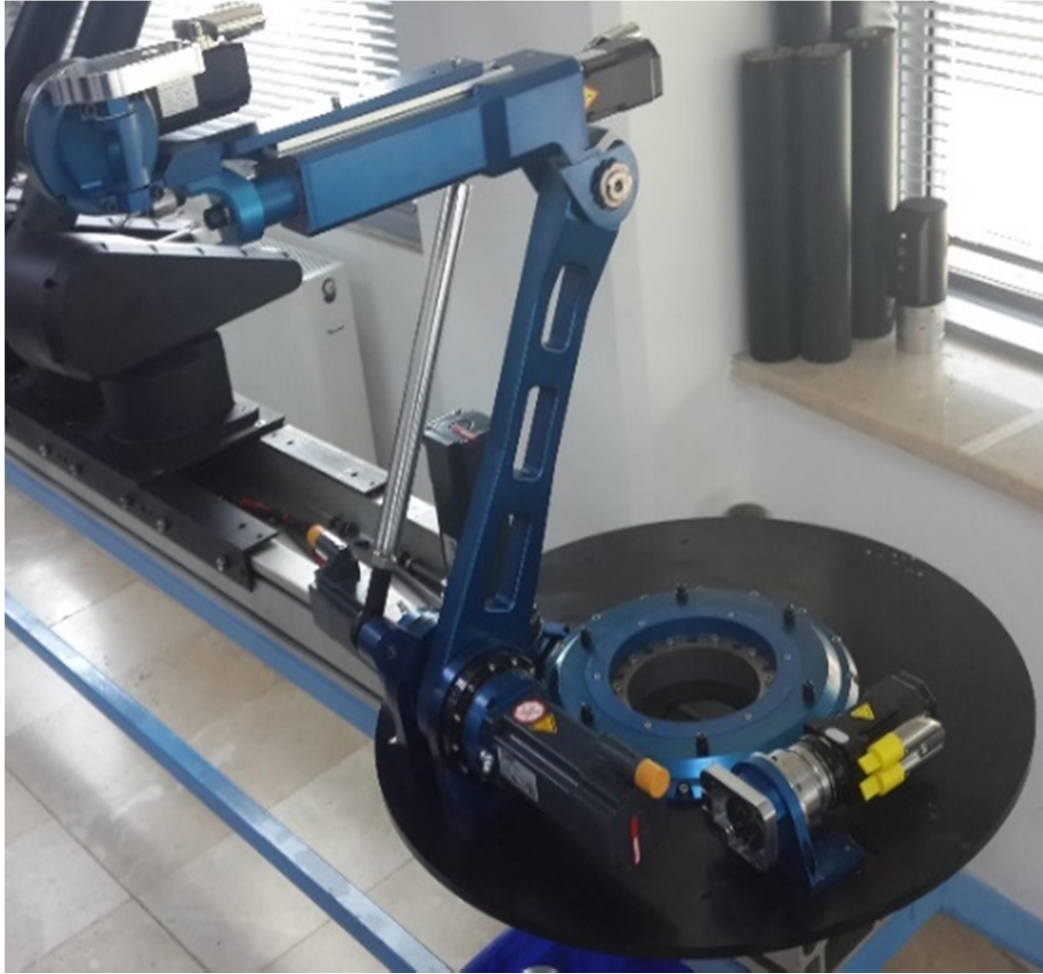
Tablo 3.7. Motor eklem teknik özellikleri

Teknik Özellik	AM8111 Beckhoff Servo Motor	AM8121 Beckhoff Servo Motor
Duraklama Tork (Nm)	0,20	0,50
Nominal Güç (kw)	0,08	0,16
Nominal Tork (Nm)	0,19	0,5
Nominal Hız (rpm)	4000	3000
Kullanılan Eklem	4-6	1-3



Şekil 3.24. Robot hareket kontrol yapısı

Hareket kontrol sistemi, motor ve redüktör seçimleri gerçekleştirildikten sonra sistemin prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Fiziksel model, Şekil 3.25'te verilmiştir. Prototip robot sepet içerisine montajı gerçekleştirilmeden önce motorlara enerji verilerek her bir eklemin hareket testleri yapılmıştır. Motor ve redüktörleri hareket testlerinde herhangi bir ısınma, mekanik problem veya fazla akım çekme gibi sorunlar tespit edilmemiştir. Bu sebeple prototi üzerinde seçilen motor ve redüktörlerin doğruluğu teyit edilmiştir. Prototip imalatı gerçekleştirilirken imalat aşamalarında parçalara uygulanan işlemler robotun çalışma şartları ve koruma sınıfı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Robot gerçek zamanda tozlu, nemli, sıcak ve soğuk ortamlarda çalışabilir özelliklerde olması gereklidir. Bu sebeple imalat süreçleride bu koşullara uygun şekilde yapılmıştır. Seçilen motor ve redüktörler, belirlenen çalışma şartlarında sorunsuz çalışabilir kabiliyettedir. Sepete montaj fiziksel model Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.25. Altı eklemlerli robot fiziksel prototipi



Şekil 3.26. Altı eklemlı robot ve temizlik sepeti fiziksel prototipi

Temizlik sepeti ve platformun tam montajlanmış prototip modeli Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. Temizlik sepeti ve platform fiziksel prototipi

Seçilen ürünler ve prototip imalatı sonrasında elde edilen makine genel konfigürasyonu Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Altı serbestlik dereceli robot teknik özellikleri

Payload	12 kgf
Toplam ağırlık	28,65 kg
Eklem sayısı	6
Takrarlanabilirlik (mm)	$\pm 0,25$
Kontrolcü platform	Beckhoff TwinCat 3
Çalışma uzayı(m ²)	0,4
Haberleşme	Ethercat
Kouma sınıfı	IP 64
Çalışma sıcaklığı:	-20° - +60° C
Elektrik besleme	48V DA

3.3. 6 Serbestlik Dereceli Robot Kinematik Analizi

Robotun gerçek zamanlı pozisyon kontrolü gerçekleştirilmesi için robotun kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Uygulama da robota gönderilen Kartezyen koordinatlara göre robotun noktaya pozisyonlama yapması gerekmektedir. Bu sebeple robotun ileri ve ters kinematik hesaplamaları teorik olarak gerçekleştirilmiştir.

3.4. Robot Kinematik Analizi Konusunda Literatür Özeti

Günümüze kadar robotların hareket kontrol yapılarının incelenmesi ve pozisyon kontrollerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla kinematik analiz konusunda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Robot ileri ve ters kinematiği konusunda birçok farklı tipte robotun analitik ve geometrik yaklaşımlarla ileri ve ters kinematik analizleri konusunda çalışmalar detaylı olarak Robot kinematiği kitabında yer almıştır [7]. Ayrıca yayınlanan bir bildiri de beş eklemlili bir seri robotun ileri ve ters kinematiği ve simülasyonu hakkında çalışmalar incelenmiştir [8]. Yine 2 eklemlili bir robot için ileri ve ters kinematik analizinin analitik olarak hesaplanması incelenmiştir [9]. Yine 3 eklemlili seri kinematik düzlemsel bir robot için ileri ve ters kinematik analizinin analitik olarak çözümlenmesi incelenmiştir [10]. Genellikle yapılan çalışmalarda kinematik analiz için DH (Denavit Harteberg) yöntemiyle eklemlerin Kartezyen koordinatları yerleştirilmesiyle eklem bağları arası koordinat eksenlerine göre değişken tablosu oluşturularak ileri ve ters kinematik analizler çözümlenmiştir. Yine

5 eklemlı bir eudobot robot için gerçekleştirilen ileri ve ters kinematik analizi çalışması incelenmiştir [11]. Tez çalışmasında tasarlanan robota yakın bağ yapısına sahip 6 eklemlı seri bir robotun Matlab Simmechanic ortamında modellenmesi ve kontrolü çalışması incelenmiştir [12]. Son olarak 6 eklemlı ABB marka seri kinematik bir endüstriyel robot için ters kinematik çözümü incelenmiştir [13].

3.5. İleri Kinematik Analizi

Geometrik yapıda bir sistemin farklı koşullar altında nasıl bi hareket yapısına sahip olduğunu gözlemek ve analiz edebilmek için sistemin dinamik yapısı hakkında veri toplamak gerekir [7]. Aynı şekilde bir kontrolör tasarımı gerçekleştirerek otomatik bir sistem haline dönüştürerek belirli koşullar altına sistemin çalışmasını sağlamak içinde yine kinematik çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. İleri kinematik denilince akla gelen hareketli bir sistemin hareket noktalarının birbiriyle olan hız, ivme ve konum ilişkileri gelmektedir [7-15]. Aslında konumları ve hızları bilinen her bir hareket noktası ile ileri kinematik hesaplama uygulandığında son noktadaki hareket noktasının ulaşacağı uzaydaki konum ve yönelimi belirlenebilir. Robotlar için ileri kinematik ele alındığında her iki komşu bağlar arasında önceden yerleştirilen koordinat sistemleri vasıtasıyla bağlar arasındaki ilişkiler dönüşüm matrisi ile matematiksel olarak modellenebilirler [7]. Bu dönüşüm matrisi ${}^i-1_iT$ olarak ifade edilir. Dönüşüm matrisi bir bağın konum ve oryantasyon bilgisini modeller. Tüm eklemlerde komşu bağlar arası elde edilen dönüşüm matrisleri yan yana matris çarpımı yapıldığında robotun uç ilevcisindeki konum ve oryantasyon için ileri kinematik özümü Denklem 3.1'de verildiği gibi elde edilebilir [7];

$${}^0_NT = {}^0_1T {}^1_2T \dots {}^{N-1}_NT \quad (3.1)$$

Bu işlem gerçekleştirilmeden önce her bir ekleme ait değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Eklem değişkenlerinin belirlenmesinde farklı methodlar kullanılabilir. Bu tez çalışmasında dünyada en çok tercih edilen yöntem olan DH kısaltmasıyla Denavit Hartenberg yöntemidir. Denavit Hartenberg yönteminde dört ana değişken sayesinde bağların kinematik analizi gerçekleştirilebilir [7-16].

Bu değişkenler;

- Bağlar arası uzunluk a_{i-1}

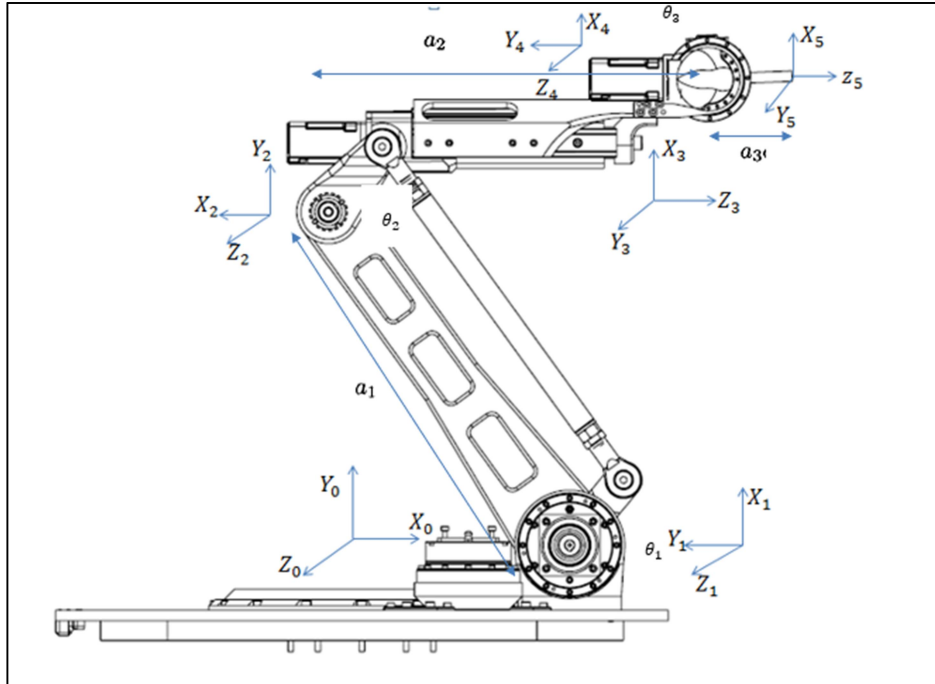
- Başlar arası açısı α_{i-1}
- Üst üste çakışan başlar arası eklem kaçıklığı d_i
- İki baş arasında oluşan eklem açısı θ_i

Bu eklem değişkenleri kullanılarak her ekleme ait dönüşüm matrisi Denklem 3.2'deki gibi bulunur;

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

Dönüşüm matrisleri genel değişkenlerin Denklem 3.2'de yerine yazılmasıyla her ekleme ait dönüşüm matrisi elde edilebilir.

Denklem 3.1'deki gibi dönüşüm matrisleri çarpıldığı takdirde uç işlevcinin konumu ve yönelimini içeren genel bir dönüşüm elde edilir. Bu dönüşümde 1. 2.3. sütunların ilk üç satırı elemanları yönelim matrisi son sütundaki ilk 3 satırda konum matrisi elde edilir. Bu bilgiler ışığında robotumuzun için ileri yön kinematik hesaplaması yapabilmek için öncelikle başlara koordinat sistemi yerleştirildi ve DH tablosu oluşturulmuştur. Robot koordinat sistemi yerleşimi Şekil 3.28'de gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Robot eklemlerinin kartezyen uzayda koordinat yerleşimi

Kartezyen uzayda koordinat sistemleri yerleştirilen robot için DH tablosu Tablo 3.9’da gösterilmiştir.

Tablo 3.9. DH tablosu

DH TABLOSU	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90	l_1	0	θ_2
3	0	l_2	0	θ_3
4	90	0	$d_3+d_x+d_4$	0
5	-90	l_5	0	θ_5
6	90	0	0	θ_6

6 Eklemlili seri robot için oluşturulan DH tablosundaki değişkenler ile her bir ekleme ait dönüşüm matrisleri elde edilmiştir. Denklemlerde verilen s kısaltması sinüs fonksiyonu, c cosinus fonksiyonu temsil etmektedir.

Tablo 3.9’da verilen her bir satır için bir adet dönüşüm matrisi elde edilmiştir. Denklem 3.3’te birinci eklem için elde edilen dönüşüm matrisi verilmiştir;

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c(\theta_1) & -s(\theta_1) & 0 & 0 \\ s(\theta_1) & c(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Denklem 3.4’te ikinci eklem için elde edilen dönüşüm matrisi verilmiştir;

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c(\theta_2) & -s(\theta_2) & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s(\theta_2) & -c(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Denklem 3.5’te üçüncü eklem için elde edilen dönüşüm matrisi verilmiştir;

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c(\theta_3) & -s(\theta_3) & 0 & l_2 \\ s(\theta_3) & c(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Denklem 3.6’te dördüncü eklem için elde edilen dönüşüm matrisi verilmiştir;

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3-d_x-d_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Denklem 3.7’de beşinci eklem için elde edilen dönüşüm matrisi verilmiştir;

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c(\theta_5) & -s(\theta_5) & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s(\theta_5) & -c(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Denklem 3.8’de altıncı eklem için elde edilen dönüşüm matrisi verilmiştir;

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c(\theta_6) & -s(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s(\theta_6) & -c(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Denklem 3.9’da ileri kinematik dönüşüm matrisi formülü verilmiştir;

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T \quad (3.9)$$

Denklem 3.9’da verilen çarpım işlemi uygulandığında 0_6T ileri kinematik matrisi denklem 3.10’da verildiği gibi elde edilir;

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da ileri yön dönüşüm matrisi kısaltmalar ile belirtilmiştir. Kısaltmaların karşılığı olan denklemler, denklem numarası 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 ve 3.21’de verilmiştir;

$$r_{11} = s(\theta_1)s(\theta_6)+c(\theta_1)c(\theta_6)c(\theta_2+\theta_3+\theta_5) \quad (3.11)$$

$$r_{12} = c(\theta_6)c(\theta_2+\theta_3+\theta_5)s(\theta_1) - c(\theta_1)s(\theta_6) \quad (3.12)$$

$$r_{13} = -c(\theta_6)s(\theta_2+\theta_3+\theta_5) \quad (3.12)$$

$$r_{21} = c(\theta_6)s(\theta_1) - c(\theta_1)c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)s(\theta_6) \quad (3.13)$$

$$r_{22} = -c(\theta_1)c(\theta_6) - c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)s(\theta_1)s(\theta_6) \quad (3.14)$$

$$r_{23} = -s(\theta_1)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \quad (3.15)$$

$$r_{31} = -c(\theta_1)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \quad (3.16)$$

$$r_{32} = s(\theta_6)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \quad (3.17)$$

$$r_{33} = -c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \quad (3.18)$$

$$p_x = c(\theta_1)(l_1 + d_4c(\theta_2 + \theta_3) + s(\theta_2 + \theta_3)(d_3 + d_x + d_4) + l_2c(\theta_2)) \quad (3.19)$$

$$p_y = s(\theta_1)(l_1 + d_4c(\theta_2 + \theta_3)) + s(\theta_2 + \theta_3)(d_3 + d_x + d_4) + l_2c(\theta_2) \quad (3.20)$$

$$p_z = c(\theta_2 + \theta_3)(d_3 + d_x + d_4) - d_4s(\theta_2 + \theta_3) - l_2s(\theta_2) \quad (3.21)$$

3.6. Ters Kinematik Analizi

Robotlarda ters kinematik çözümü gerçek zamanlı kontrol için çok önemlidir. Özellikle yörünge takibi veya belirlenen koordinatlarda robotun pozisyon kontrolü için ters kinematik robotun kontrolcüsünde hesaplanması gereklidir [7]. Robotların eklemlerinden kaynaklı tasarım süreçleri karmaşık ters kinematikler oluşturmaktadır. Bu sebeple çözüm için bazı basitleştirmeler kullanılmaktadır. Ters kinematik kısaca verilen uç işlevci konum ve yönelimine göre diğer eklemlerin değişkenlerinin hesaplanmasıdır. Eklem sayısı arttıkça ters kinematik çözümde zorlaşmaktadır. Ters kinematik analitik veya geometrik yaklaşımla çözülebilmektedir [7-9].

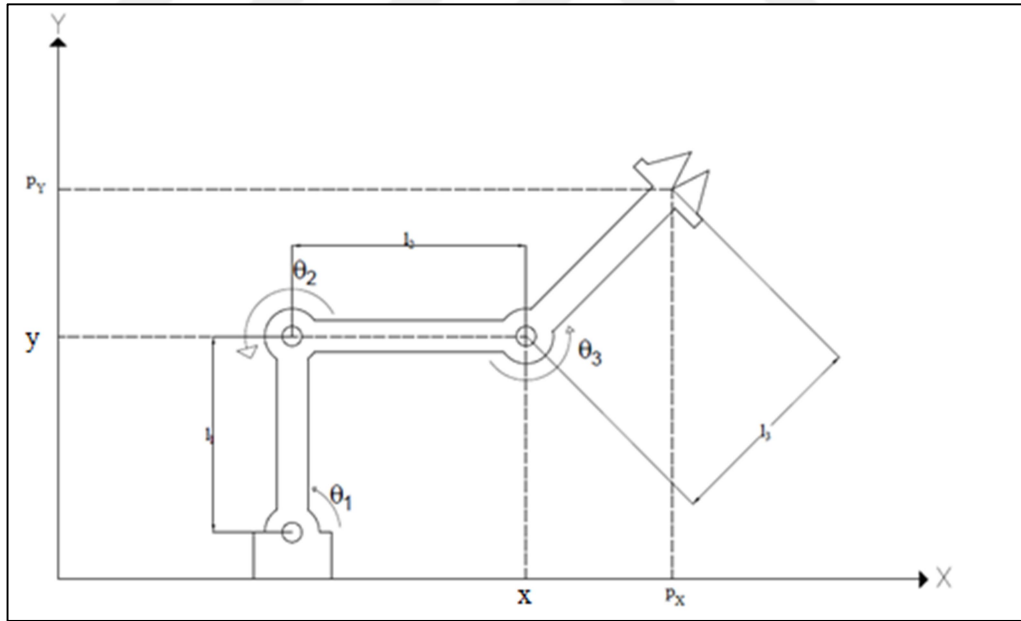
Ters kinematığın analitik olarak çözümü ileri kinematik hesabı için kullanılan matris çarpım işleminin tam tersinin uygulanmasıdır. Yani ileri yön dönüşüm matrisi yanına her bir dönüşüm matrisi tersi alınarak çarpım yapılır ve kalan çarpımlarla eşitlenerek açılımların fonksiyon eşitliklerine bakılarak çözüm aranır.

Bu tez çalışmasında pozisyon kontrolü ters kinematik çözümünüyle gerçekleştirilmiştir. 6 eklemi bulunan robot 2 boyutlu uzayda yörünge takibi 3 eklem RRR tipi planar robot kinemati çözümü pozisyonu elde etmek amacıyla yeterlidir.

Bu işlem çözümü kolaylaştırmı ve gerçek zamanlı pozisyon kontrolünü mümkün kılmıştır. Robotun ilk eklemi olan dönel tabla bilinen bir pozisyon olan 367° dir. Yazılımda sabit konum olarak belirlenmiştir. 4. Eklem prizmatik hareket ve 6. Eklem hareketi de opsiyonel ve noktadan noktaya hareket sağladığı için gerçek zamanda sürekli olarak değişken hesabına gerek kalmamıştır. Bu sadeleştirme ile 2. 3. ve 5. Eklem için R dönme eklemi olmak üzere 3 eklemide dönel eklem olan RRR bir robot ters kinematik problemi karşımıza çıkmaktadır. Bu problemin çözümü için robot 3 eklem dönme eklemi olarak düşünülüp tekrar ileri kinematiği çıkarılmıştır. İleri kinematik dönüşüm matrisi Denklem 3.22’de verilmiştir;

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 c(\theta_1) + l_2 c(\theta_1 + \theta_2) + l_3 c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_1 s(\theta_1) + l_2 s(\theta_1 + \theta_2) + l_3 s(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

3 Eklemlili planar seri kinematik robot için ters kinematik hesaplamaları geometrik yöntemle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.29. Üç serbestlik dereceli düzlemsel seri robot

Geometrik yaklaşımla ters kinematik hesaplamaları gerçekleştirildiğinde her bir ekleme ait açı değişkenleri çözümü aşağıdaki denklemlerde belirtilmiştir. Şekil 3.29’da 3 serbestlik dereceli seri robot gösterilmiştir. Şekilde denklemlerde kullanılan uzuv boyu, ekleme ait açı değişkeni ve geometrik çözüm için düzlemdeki

pozisyon değişkenleri belirtilmiştir. Ters kinematik çözümleri denklem numarası 3.23'ten 3.31 numaralı denklemlere kadar belirtilen denklemlerde verilmiştir;

$$x = p_x - l_3 c(\gamma) = l_1 c(\theta_1) + l_2 c(\theta_2 + \theta_1) \quad (3.23)$$

$$y = p_y - l_3 s(\gamma) = l_1 s(\theta_1) + l_2 s(\theta_2 + \theta_1) \quad (3.24)$$

$$c(\theta_2) = \frac{(x^2) - (y^2) - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (3.25)$$

$$s(\theta_2) = \mp \sqrt{1 - c^2(\theta_2)} \quad (3.26)$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}(s(\theta_2), c(\theta_2)) \quad (3.27)$$

$$\theta_1 = \text{Atan2}(s(\theta_1), c(\theta_1)) \quad (3.28)$$

$$s(\theta_1) = \frac{(p_y(l_1 + l_2 c(\theta_2))) - (p_x l_2 s(\theta_2))}{2l_1 l_2 c(\theta_2) + l_1^2 + l_2^2} \quad (3.29)$$

$$c(\theta_1) = \frac{(p_x(l_1 + l_2 c(\theta_2))) - (p_y l_2 s(\theta_2))}{2l_1 l_2 c(\theta_2) + l_1^2 + l_2^2} \quad (3.30)$$

$$\theta_3 = \gamma - \theta_2 - \theta_1 \quad (3.31)$$

Yukarıdaki denklemlerde 2. Eklem açısı θ_1 , 3. eklem açısı θ_2 ve 5. eklem θ_3 olarak belirtilmiştir. p_x ve p_y pozisyonları, γ uç işlevci yönelimi temsil etmektedir. Denklemler ışığında açılar hesaplanabilir. Bu hesaplamalar hareket kontrol yazılımı içerisinde yazılarak robotun ters kinematik pozisyon kontrolü gerçekleştirilmiştir.

6 Eklemlilik tasarımı gerçekleştirilen robotun ters kinematiği oluşturulan ileri yön dönüşüm matrisleri kullanılarak çözümleri analitik olarak gerçekleştirilmiştir [10-12]. Ters kinematik çözümleri için genel çözüm yöntemi kullanılmıştır. Genel çözüm yönteminde ileri yön dönüşüm matrisleri karşılıklı olarak matrislerin tersi alınarak eklem açılarının çözümleri analitik olarak ulaşılmıştır. İşlem adımları ve her bir ekleme ait açı değişkeni için çözüm denklemleri aşağıda verilen denklemlerde belirtilmiştir.

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Denklem 3.32’de verildiği gibi oluşturulan 0_6T ileri kinematik dönüşüm matrisi ile her bir ekleme ait dönüşüm matrislerinin sırayla tersleri alınarak matris çarpım işlemleri gerçekleştirilmiştir [7,12]. Bu işlemler Denklem 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 ve 3.37’de belirtilmiştir;

$${}^1_6T = {}^0_1T^{-1} {}^0_6T \quad (3.33)$$

$${}^2_6T = [{}^0_1T {}^1_2T]^{-1} {}^0_6T \quad (3.34)$$

$${}^3_6T = [{}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T]^{-1} {}^0_6T \quad (3.35)$$

$${}^4_6T = [{}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T]^{-1} {}^0_6T \quad (3.36)$$

$${}^5_6T = [{}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T]^{-1} {}^0_6T \quad (3.37)$$

Yukarıdaki matris çarpım ve ters alma işlemleri gerçekleştirilerek elde edilen eşitlikler sonucunda her bir ekleme ait açıların çözümü elde edilmiştir. Birinci eklem açı değişkeni için çözüm Denklem 3.38, 3.39 ve 3.40’ta belirtilmiştir.

$$p_y c(\theta_1) - p_x s(\theta_1) = 0 \quad (3.38)$$

$$\theta_1 = \text{Atan2}(-p_y; -p_x) \quad (3.39)$$

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y; p_x) \quad (3.40)$$

Olmak üzere birinci ekleme ait açı değişkeni olan θ_1 için iki farklı çözüm elde edilir;

$$(r_{13}c(\theta_1) + r_{23}s(\theta_1))c(\theta_2) - r_{33}s(\theta_2) = 0 \quad (3.41)$$

Denklem (3.41)’de verilen eşitlik sonucunda θ_2 için çözüm Denklem (3.42) ve Denklem (3.43)’te verildiği gibi 2 farklı çözüm elde edilir;

$$\theta_2 = \text{Atan2}(-(r_{13}c(\theta_1) + r_{23}s(\theta_1)); -r_{33}) \quad (3.42)$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}((r_{13}c(\theta_1) + r_{23}s(\theta_1)); r_{33}) \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} &(-p_x c(\theta_1)s(\theta_2) - p_y s(\theta_1)s(\theta_2) + l_1 s(\theta_2) - p_z c(\theta_2))s(\theta_3) + (-l_1 c(\theta_2) - \\ &p_z s(\theta_2) - l_2 + p_x c(\theta_1)c(\theta_2) + p_y c(\theta_2)s(\theta_1))c(\theta_3) = d_4 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Denklem 3.44'te verilen eşitlik sonucunda üçüncü eklem için çözüm Denklem 3.45, 3.46, 3.47 ve 3.48'de verildiği şekilde elde edilmiştir;

$$\theta_3 = \text{Atan2}(A, b) + \text{Atan2}\left(\pm \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}\right) \quad (3.45)$$

$$A = (-p_x c(\theta_1)s(\theta_2) - p_y s(\theta_1)s(\theta_2) + l_1 s(\theta_2) - p_z c(\theta_2)) \quad (3.46)$$

$$B = (-l_1 c(\theta_2) - p_z s(\theta_2) - l_2 + p_x c(\theta_1)c(\theta_2) + p_x c(\theta_2)s(\theta_1)) \quad (3.47)$$

$$C = d_4 \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} d_x = &d_3 + d_4 - (l_2 s(\theta_3) - p_z c(\theta_2)c(\theta_3) + l_1 c(\theta_2)s(\theta_3) + l_1 c(\theta_3)s(\theta_2) + p_z s(\theta_2)s(\theta_3) - \\ &p_x c(\theta_1))c(\theta_2)s(\theta_3) - p_x c(\theta_1))c(\theta_3)s(\theta_2) - p_y c(\theta_2)s(\theta_1))s(\theta_3) - p_y c(\theta_3))s(\theta_1))s(\theta_2) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Denklem 3.49'da verilen eşitlik ile dördüncü eklem için çözüm verilmiştir;

$$\begin{aligned} c(\theta_5) = &r_{11}c(\theta_1)c(\theta_2)c(\theta_3) - r_{31}c(\theta_3)s(\theta_2) - r_{31}c(\theta_2)s(\theta_3) + r_{21}c(\theta_2)c(\theta_3)s(\theta_1) - \\ &r_{11}c(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) - r_{21}s(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) \end{aligned} \quad (3.50)$$

Denklem 3.50 ve 3.51'de verilen eşitlik sonucunda Denklem 3.52'de 5. eklem için açı değişkeni çözümü elde edilmiştir;

$$\begin{aligned} a = &r_{11}c(\theta_1)c(\theta_2)c(\theta_3) - r_{31}c(\theta_3)s(\theta_2) - r_{31}c(\theta_2)s(\theta_3) + r_{21}c(\theta_2)c(\theta_3)s(\theta_1) - \\ &r_{11}c(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) - r_{21}s(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\theta_5 = \text{Atan2}\left(\pm \sqrt{1 - a^2}, a\right) \quad (3.52)$$

Denklem 3.53 ve 3.54'te verilen eşitlikler sonucunda Denklem 3.55'te verildiği üzere altıncı eklem için açı değişkeni çözümü elde edilmiştir;

$$s(\theta_6) = -r_{21}c(\theta_1) + r_{11}s(\theta_1) \quad (3.53)$$

$$b = -r_{21}c(\theta_1) + r_{11}s(\theta_1) \quad (3.54)$$

$$\theta_6 = \text{Atan2}(b; +\sqrt{(1 - b^2)}) \quad (3.55)$$

3.7. Jakobiyen Analizi

Bir robot manipulatorun uç işlevcisinin üç boyutlu uzayda hareket etmesinden kaynaklı olarak gerçekleşen açısal ve doğrusal hızlar ve buna bağlı ivmelenme oluşur. Bu açısal ve doğrusal hızlar jakobiyen analizi ile incelenebilmektedir. [7]

Kati bir cismin hareketi konum vektörü yer değiştirmesi ve açısal ve doğrusal hız olarak tanımlanır. Doğrusal hız bir noktanın niteliğini belirler, ancak açısal hız koordinat sisteminin niteliğini inceler. Her bir ekleme ait açısal ve doğrusal hızlar bulunarak uç işlevci ile eklem hızlarının ilişkisi jakobiyen matrisi hesaplanarak elde edilmiştir. ω Açısal hız, i eklem numarası, $i+1_{Z_{i+1}}$ dönme eksenini Z eksenini olarak ifade edildiğinden, her bir ekleme ait rotasyon matrisi ${}^{i+1}_iR$ ve θ_i ekleme ait dönme açısı olmak üzere her bir ekleme ait açısal ve doğrusal hızlar Denklem 3.56, 3.57 ve 3.58'de verilmiştir [7];

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_iR \dot{\omega}_i + \dot{\theta}_i {}^{i+1}_{Z_{i+1}} \quad (3.56)$$

$${}^i_{Z_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_iR(\dot{v}_i + \dot{\omega}_i p_i) \quad (3.58)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_i \\ \dot{v}_i \end{bmatrix} = J(Q) \dot{Q} \quad (3.59)$$

Jakobiyen matrisi ileri dönüşüm matrisinin konum vektörünün zamana göre türevi alınarak elde edilebilmektedir [13]. 6 Eklemlili bir robot için jakobiyen elde edildiğinde 6x6 jakobiyen matrisi elde edilir. Jakobiyen matrisinin doğrudan türev alınma yöntemiyle elde edilmesi denklem 3.60'ta ifade edilmiştir. p_x, p_y, p_z konum değişkenlerini $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ eklem değişkenlerini ifade etmektedir;

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dp_x}{dq_1} & \frac{dp_x}{dq_2} & \frac{dp_x}{dq_3} & \frac{dp_x}{dq_4} & \frac{dp_x}{dq_5} & \frac{dp_x}{dq_6} \\ \frac{dp_y}{dq_1} & \frac{dp_y}{dq_2} & \frac{dp_y}{dq_3} & \frac{dp_y}{dq_4} & \frac{dp_y}{dq_5} & \frac{dp_y}{dq_6} \\ \frac{dp_z}{dq_1} & \frac{dp_z}{dq_2} & \frac{dp_z}{dq_3} & \frac{dp_z}{dq_4} & \frac{dp_z}{dq_5} & \frac{dp_z}{dq_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Matlab yardımıyla 6 eklem RRRPRR robotu tasarımı jakobiyen analizi gerçekleştirilmiştir. Robotta bulunan her bir ekleme ait açısasal hızların hesaplanabilmesi için jakobiyen matrisleri elde edilerek 6 eklem için jakobiyen matrisi analitik olarak elde edilmiştir. Jakobiyen matrisi J parametrik olarak Denklem 3.61’de verilmiştir;

$$J = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} & j_{14} & 0 & 0 \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & j_{24} & 0 & 0 \\ 0 & j_{32} & j_{33} & 0 & 0 & 0 \\ j_{41} & j_{42} & j_{43} & 0 & j_{45} & 0 \\ j_{51} & j_{52} & j_{53} & 0 & j_{55} & 0 \\ j_{61} & j_{62} & j_{63} & 0 & j_{65} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Denklem 3.61’de verilen jakobiyen matrisine ait her bir eleman için karşılıkları aşağıdaki Denklem 3.62’den itibaren Denklem 3.83’e kadar belirtilmiştir;

$$j_{11} = -s(\theta_1)(l_1 + s(\theta_2 + \theta_3)(d_3 + d_4 + d_x) + l_2c(\theta_2)) \quad (3.62)$$

$$j_{12} = c(\theta_1)c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)(c(\theta_6)(d_3 + d_4 + d_x + l_2s(\theta_3)) + l_2c(\theta_3)s(\theta_6)) + c(\theta_1)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)(s(\theta_6)(d_3 + d_4 + d_x + l_2s(\theta_3)) - l_2c(\theta_3)c(\theta_6)) \quad (3.63)$$

$$j_{13} = c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)c(\theta_1)(d_3 + d_4 + d_x) \quad (3.64)$$

$$j_{14} = -s(\theta_1) \quad (3.65)$$

$$j_{21} = c(\theta_1)(l_1 + s(\theta_2 + \theta_3)(d_3 + d_4 + d_x) + l_2c(\theta_2)) \quad (3.66)$$

$$j_{22} = c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)s(\theta_1)(c(\theta_6)(d_3 + d_4 + d_x + l_2s(\theta_3)) + l_2c(\theta_3)s(\theta_6)) + s(\theta_1)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)(s(\theta_6)(d_3 + d_4 + d_x + l_2s(\theta_3)) - l_2c(\theta_3)c(\theta_6)) \quad (3.67)$$

$$j_{23} = c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)s(\theta_1)(d_3 + d_4 + d_x) \quad (3.68)$$

$$\dot{j}_{24} = c(\theta_1) \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} \dot{j}_{32} = & -l_3s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6) - l_4s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6) - d_x s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6) \\ & - l_2c(\theta_2 + \theta_5 - \theta_6) \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\dot{j}_{33} = -s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)(d_3 + d_4 + d_x) \quad (3.71)$$

$$\begin{aligned} \dot{j}_{41} = & c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)s(\theta_1) - c(\theta_6)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)(c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5)/2 + \\ & c(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5)/2) - s(\theta_6)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)(s(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5)/2 + \\ & s(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5)/2) \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$\dot{j}_{42} = s(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 + s(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 \quad (3.73)$$

$$\dot{j}_{43} = s(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 + s(\theta_2 + \theta_1 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 \quad (3.74)$$

$$\dot{j}_{45} = s(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 - s(\theta_1) + s(\theta_2 + \theta_1 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} \dot{j}_{51} = & s(\theta_6)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)(c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5)/2 - \\ & c(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5)/2) - c(\theta_1)c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - \\ & c(\theta_6)s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)(s(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5)/2 - s(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5)/2) \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$\dot{j}_{21} = c(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 - c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 \quad (3.77)$$

$$\dot{j}_{33} = c(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 - c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 \quad (3.78)$$

$$\dot{j}_{55} = c(\theta_2 - \theta_1 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 + c(\theta_1) - c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6)/2 \quad (3.79)$$

$$\dot{j}_{61} = c(\theta_6)/2 - c(2\theta_2 + 2\theta_3 + 2\theta_5 - \theta_6)/2 \quad (3.80)$$

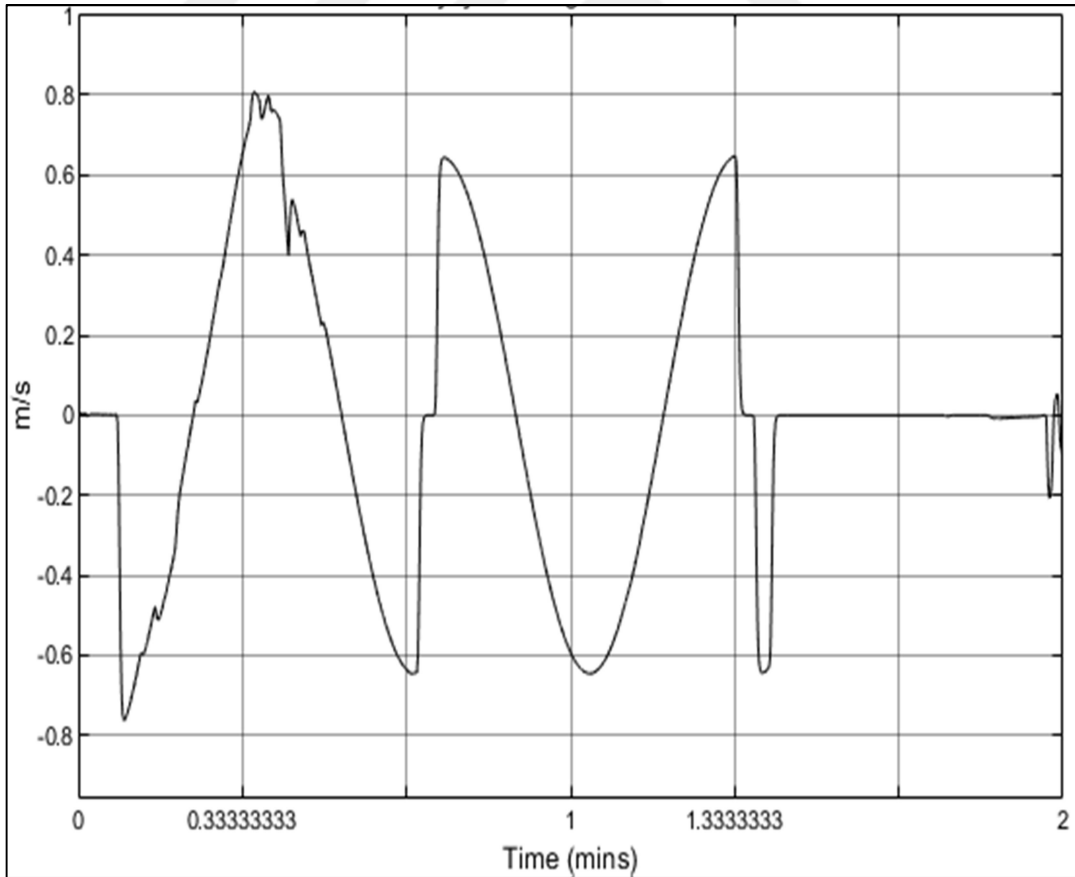
$$\dot{j}_{62} = c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6) \quad (3.81)$$

$$\dot{j}_{63} = c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6) \quad (3.82)$$

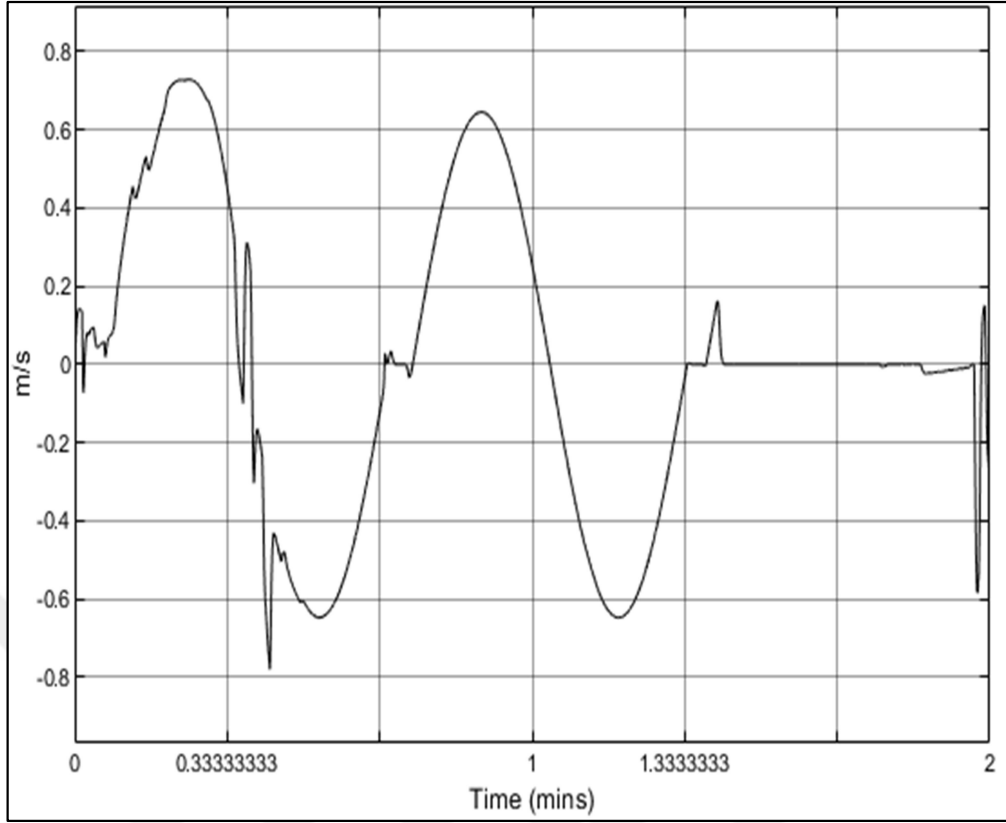
$$\dot{j}_{65} = c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 - \theta_6) \quad (3.83)$$

Hesaplanan jakobiyen matrisi Denklem 3.59'da verilen işlemle Matlab yardımıyla her bir ekleme ait anlık konum değerleri jakobiyen matrisinde değişken olarak kullanılarak ve her bir ekleme ait anlık hızlar jakobiyen matrisi ile çarpıldığında uç

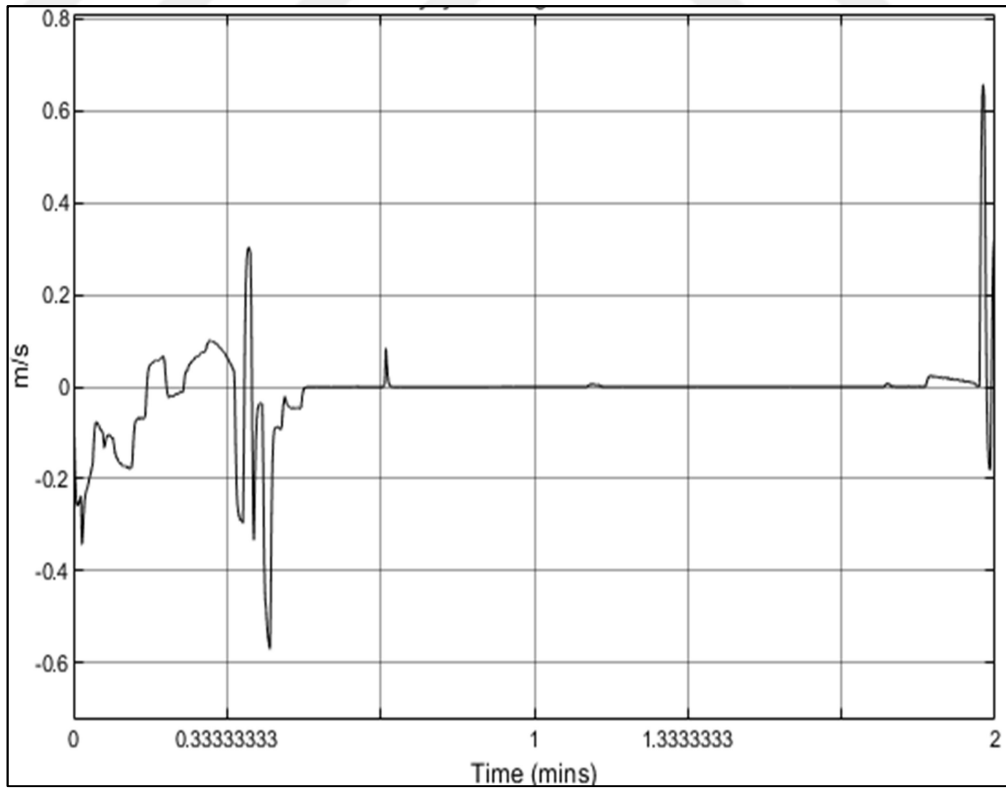
işlevcisinde oluşan anlık doğrusal ve açısal hesaplanmaktadır. Bu çalışmada her bir ekleme ait gerçek zamanda robot eklemlerinden elde edilen konum yörünge sinyal verileri 2 ms(milisaniye) örnekleme zamanına göre jakobiyen matrisi içinde yerine koyulmuştur. Aynı zamanda her bir eklem için gerçek zamanda robottan elde edilen hız değerleri de jakobiyen matrisi ile çarpılarak uç işlevcisinde oluşan anlık doğrusal ve açısal hızla elde edilmiştir [14-17]. Bu işlem Matlab yardımıyla tüm değerlere uygulandığında 2 dakikalık elde edilen gerçek zamanlı konum ve hız sinyallerinin verileri ile uç işlevcisinde oluşan doğrusal ve açısal hızlar elde edilmiştir. Uç işlevcisinde elde edilen doğrusal ve açısal hızlara ait sinyaller Kartezyen uzayda x, y ve z uzayında oluşmaktadır. Doğrusal hızlar kartezyen uzayda x ekseninde v_x , y ekseninde v_y ve z ekseninde v_z ile ifade edilmektedir. Kartezyen uzayda uç işlevcide oluşan açısal hızlar x eksenini için ω_x , y eksenini için ω_y , z eksenini için ω_z olarak ifade edilmektedir [7]. Altı eklemlili robot için elde edilen doğrusal ve açısal hızlar Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 2.34, Şekil 3.35’da verilmiştir.



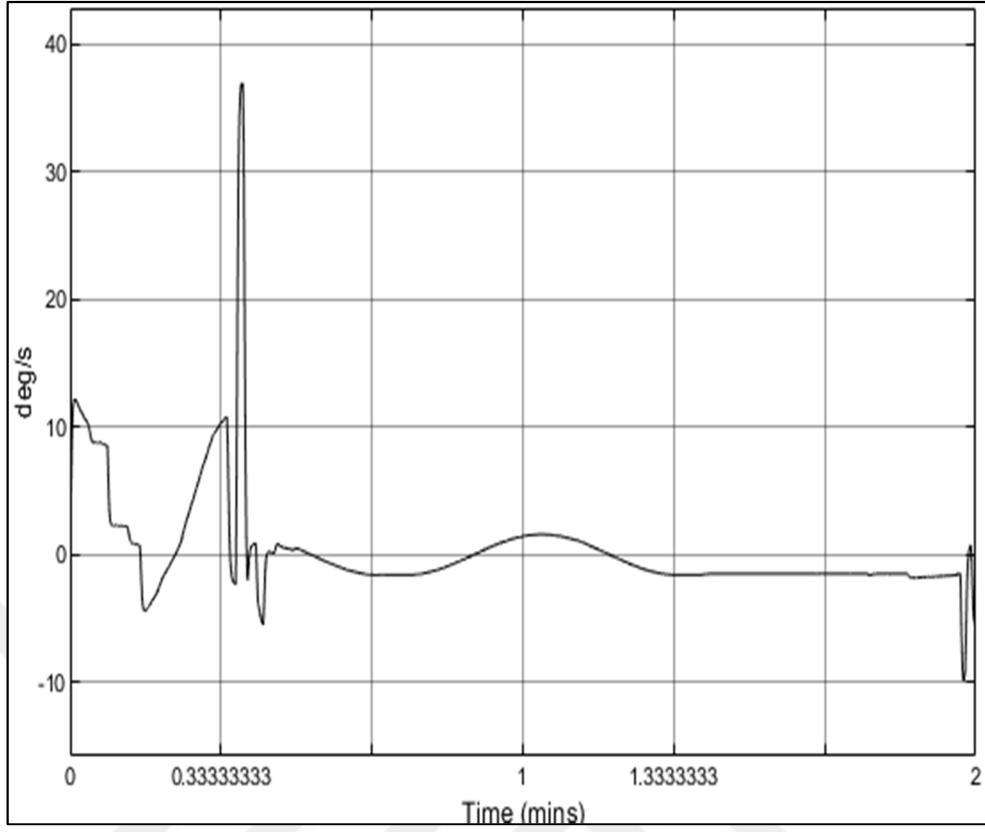
Şekil 3.30. Uç işlevci x ekseninde doğrusal hızı



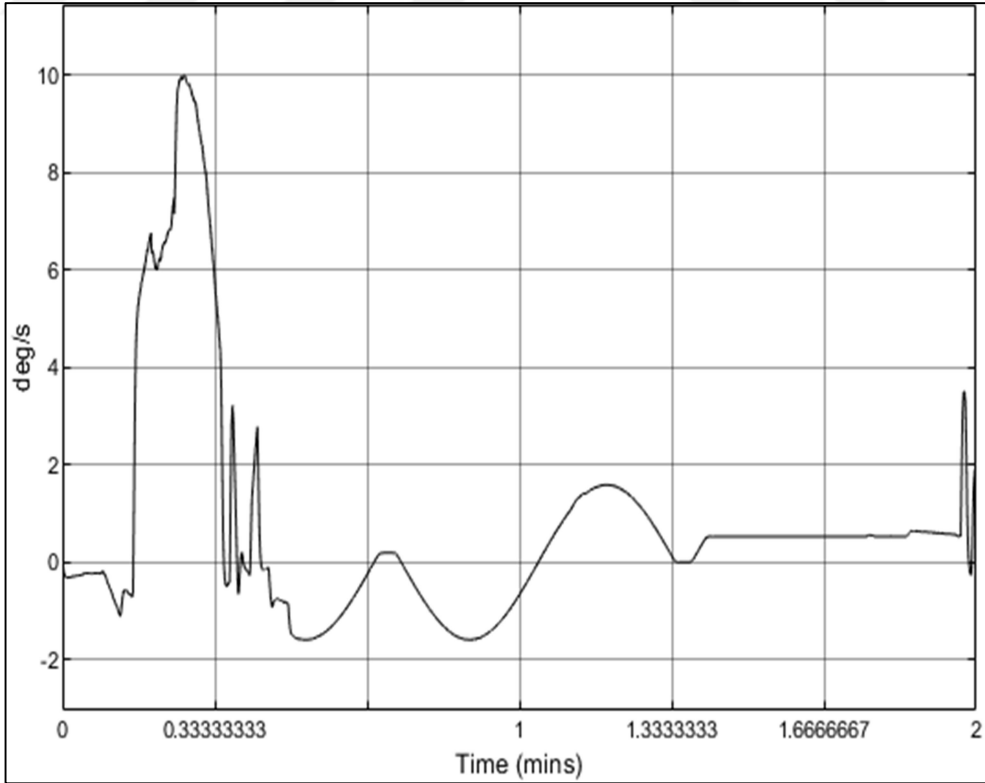
Şekil 3.31. Uç işlevci y ekseninde doğrusal hızı



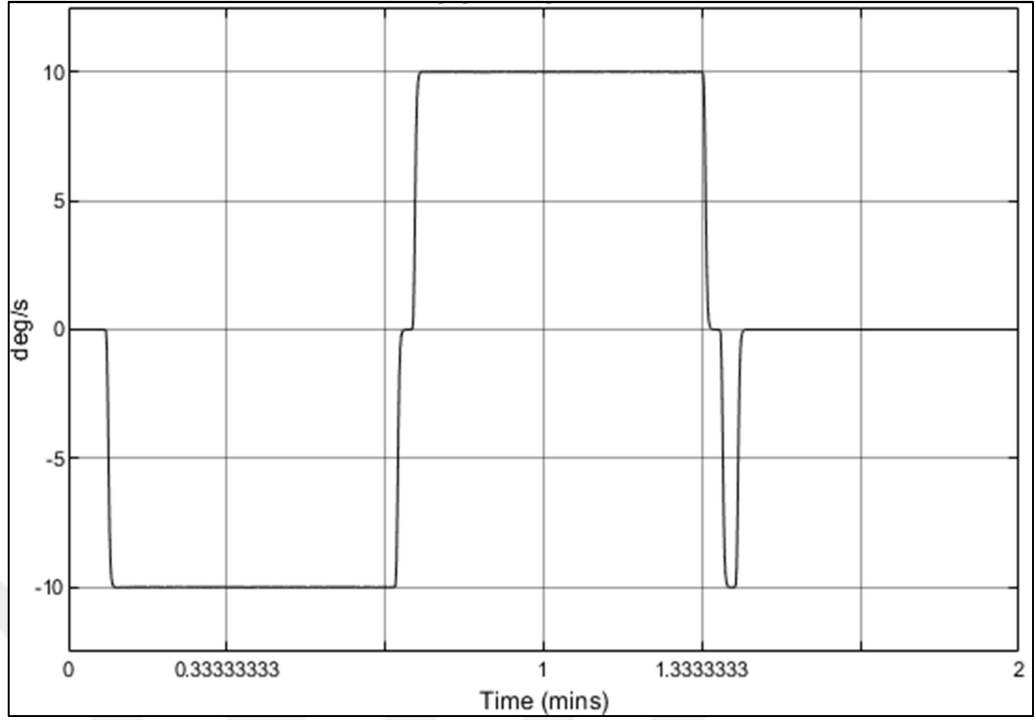
Şekil 3.32. Uç işlevci z ekseninde doğrusal hızı



Şekil 3.33. Uç işlevci x ekseninde açısai hızı

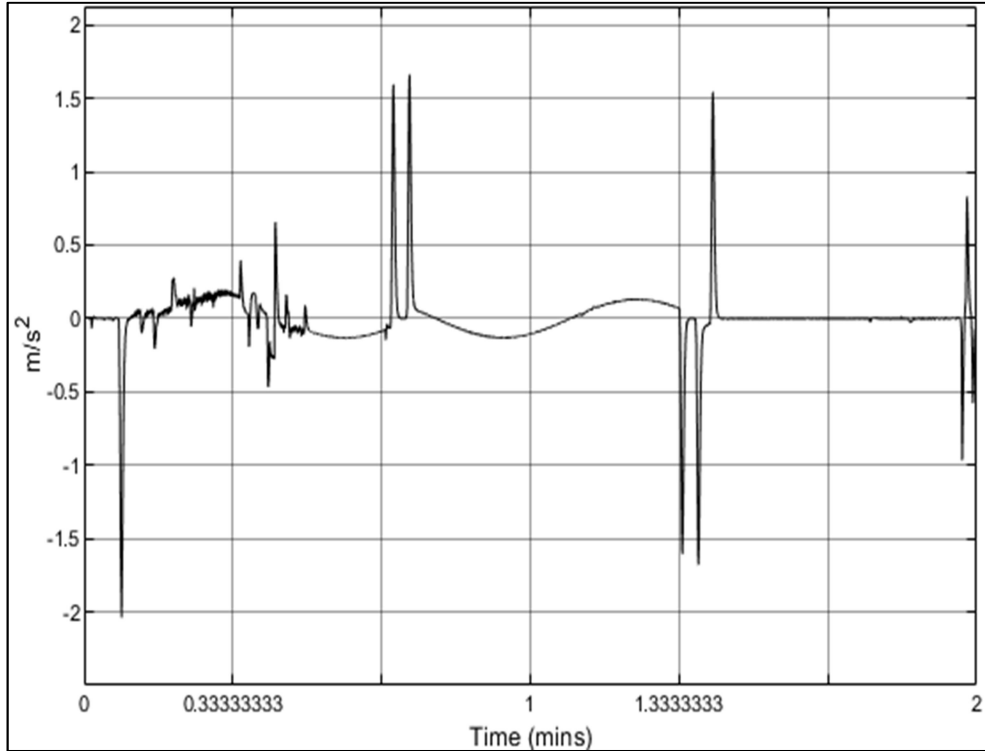


Şekil 3.34. Uç işlevci y ekseninde açısai hızı

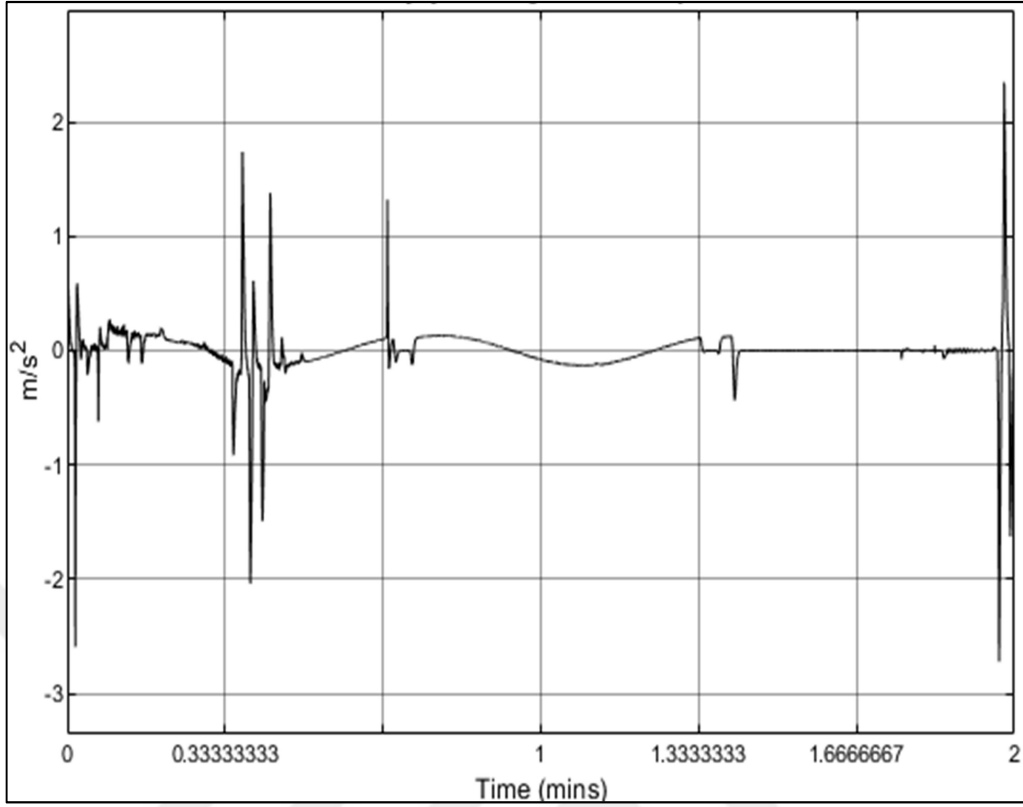


Şekil 3.35. Uç işlevci z ekseninde açısal hızı

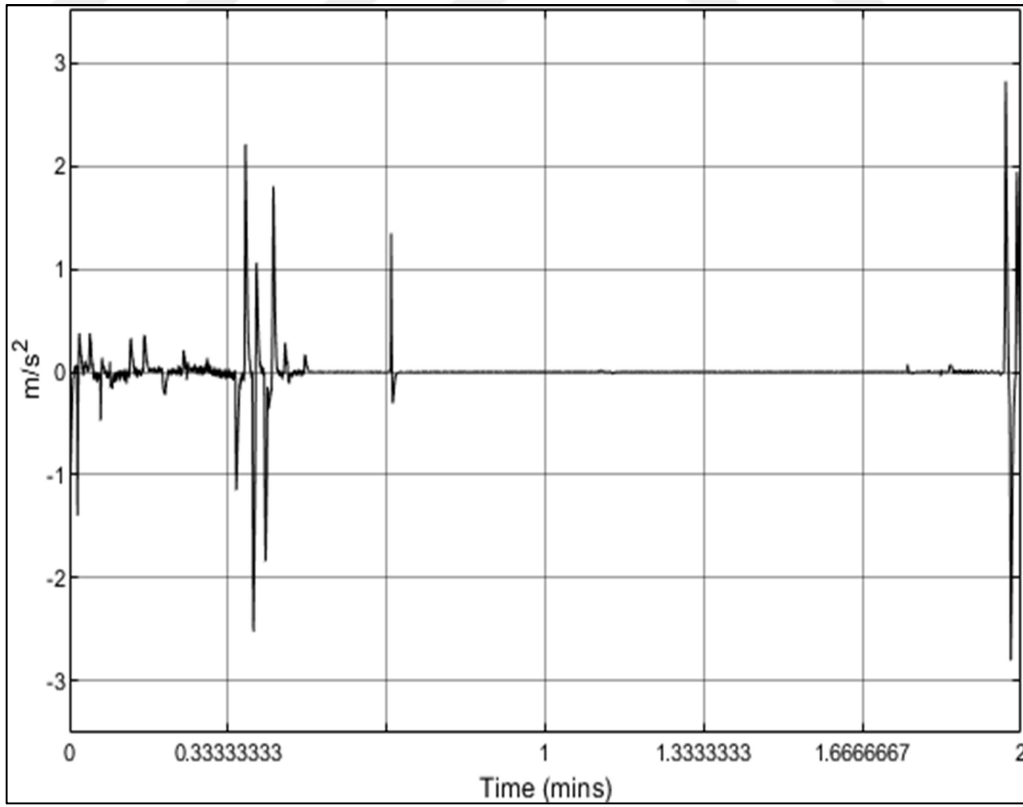
Elde edilen doğrusal ve açısal hızlar ayırık zamanda türevleri alındığında doğrusal ve açısal ivmeler elde edilmiştir. Elde edilen doğrusal ve açısal ivmeler Şekil 3.36, Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39, Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de verilmiştir.



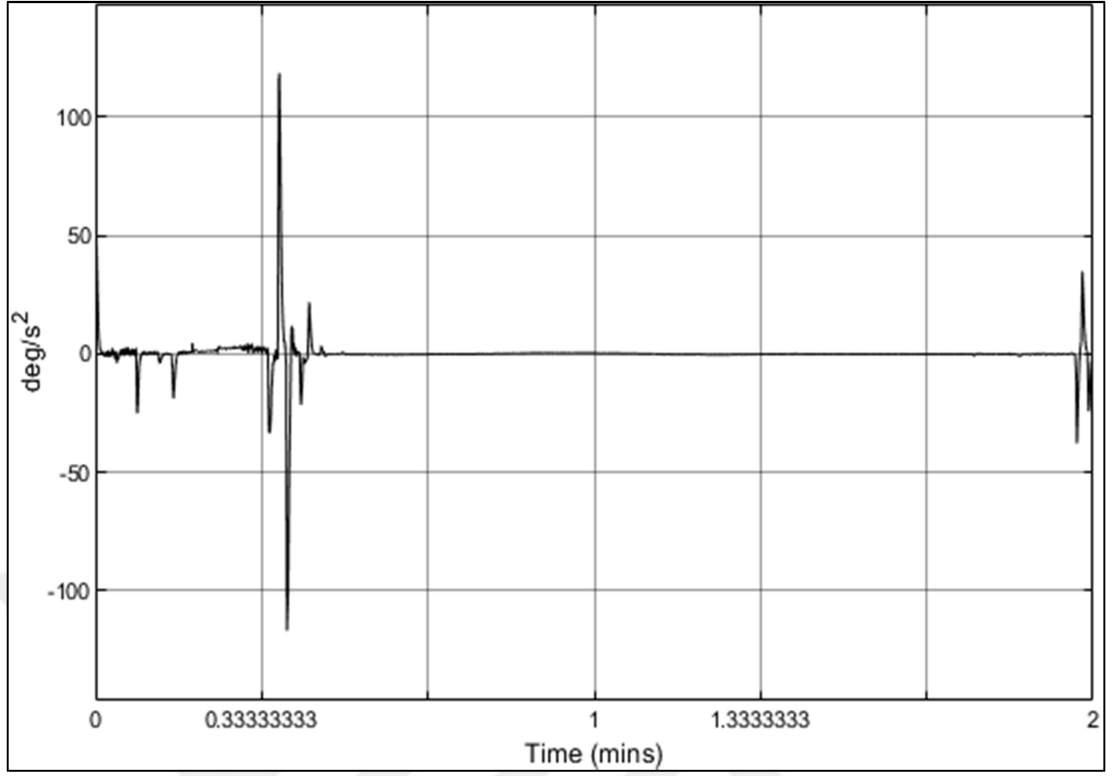
Şekil 3.36. Uç işlevcinin x ekseninde doğrusal ivmesi



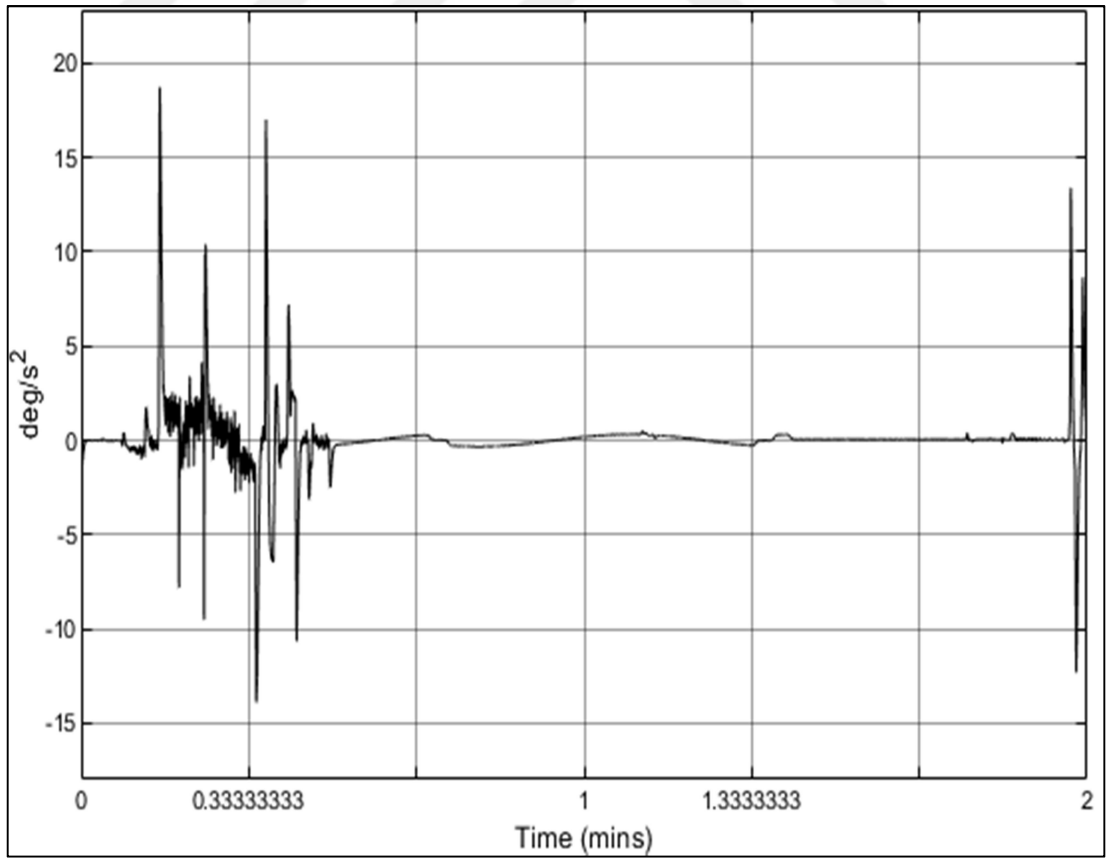
Şekil 3.37. Uç işlevcinin y ekseninde doğrusal ivmesi



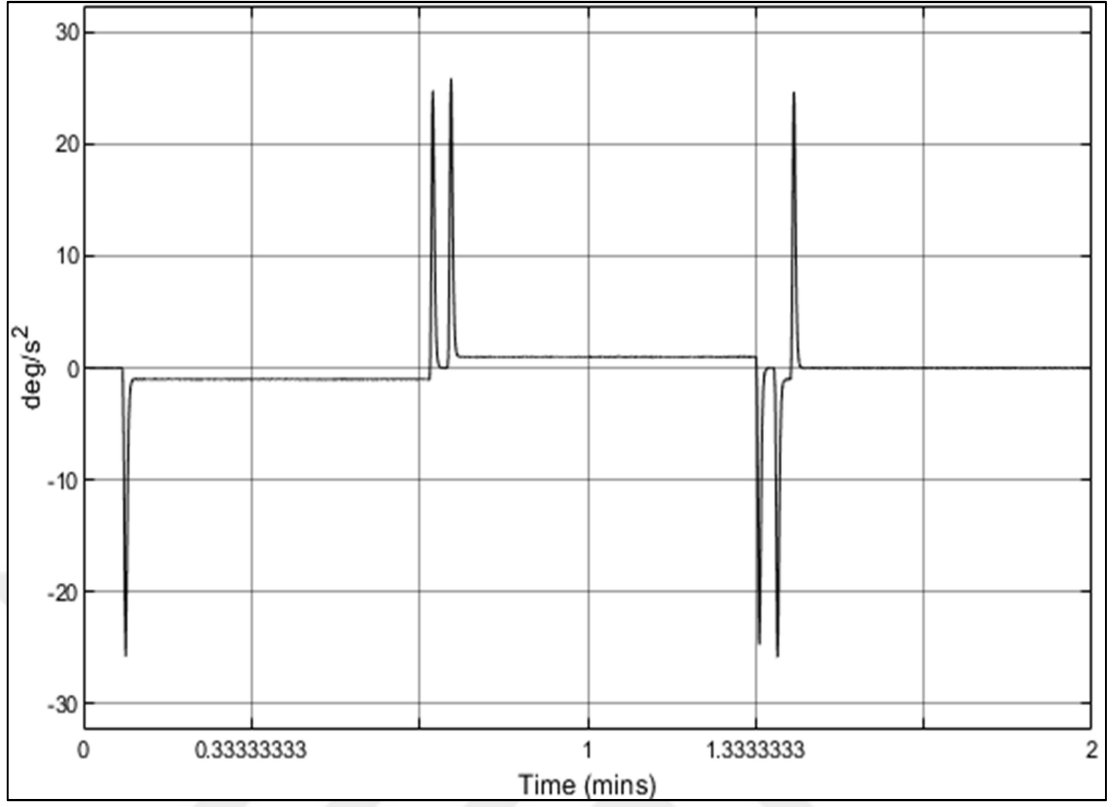
Şekil 3.38. Uç işlevcinin z ekseninde doğrusal ivmesi



Şekil 3.39. Uç işlevcinin x ekseninde açısai ivmesi



Şekil 3.40. Uç işlevcinin y ekseninde açısai ivmesi



Şekil 3.41. Uç işlevcinin z ekseninde açısal ivmesi

4. 6 EKLEMLİ KALIP TEMİZLEME ROBOTU DİNAMİK ANALİZİ

Tasarımı gerçekleştirilen kalıp temizleme robotu hareket kontrolü için gerekli aktuatör seçimlerinin ve sistemin çalışma esnasında dinamik karakteristiğinin doğrulanması amacıyla sistemin dinamik analizinin gerçekleştirilmesi gereklidir. 3 Boyutlu tasarımın tamamlanması ve malzeme seçimi ile birlikte robot bağlarının kütlelerinden kaynaklı hareket kabiliyeti, eklemlerde oluşacak tork ve kuvvetlerin eklemlerin birlikte çalışması esnasında eklemler arası etkileşimde değerlendirilerek incelenmesi gereklidir. Ayrıca kontrollü tork girişlerinin eklemlere uygulandığında eklemlerde oluşacak hız, ivme ve konum kabiliyetlerinde incelenmesi tasarımın gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Bu sebeple 3 boyutlu katı modeli oluşturulan robotun parçalarına malzeme tanımlamaları da yapılarak dinamik analizi Matlab ortamında simülasyon çalışmasıyla analiz edilmiştir.

4.1. Dinamik Analiz İçin Literatür Özeti

6 Eklemlili seri robot tasarımı gerçekleştirilen kalıp temizleme robotunun eklemlere ait dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Dinamik analiz için bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir. Dinamik analiz çalışmasının amaçlarından birisi robotun eklemlerinin belirli hareket şartlarında eklemlere verilen konum yörüngesi, hız ve ivme girdilerine göre eklemlerde oluşan torklar incelenerek eklemlerde kullanılacak aktuatörlerin seçimi gerçekleştirilmesidir. Bu çalışmada robotun ters dinamik analizi yapılarak belirlenen hareket koşullarında eklemlerde oluşan torkları ve kuvvetleri incelenmiştir. Ayrıca robotun her bir eklemine kontrollü tork girişi yapıldığında eklemlerde oluşan hız, ivme ve pozisyon çıkışları da ileri dinamik analizi yapılarak incelenmiştir. Robot dinamik analizi robot dinamiği kitabında ve makalelerde gerçekleştirilen teorik çalışmalar incelenmiştir [18-20]. Eklemlere ait dinamik hesaplamalar incelenerek sistemin modelinin nasıl oluşturulacağı hakkında bilgiler verilmektedir. Yine endüstriyel tip bir robotun Solidworks tasarımının atlab simmechanics modellemesi yapılarak ileri dinamik analizi çalışması gerçekleştirilmiştir [21].

Yayınlanan makalede Solidworks tasarımı bulunan bir Scara tip robotun Matlab ikinci jenerasyon Simscape modeli oluşturularak ileri dinamik analizi çalışması incelenmiştir. İncelenen çalışmada dönme eklemine tork girişi tanımlanarak eklem çıkışında oluşan açısız hızlar incelenmiştir [22]. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaya en yakın dinamik analiz çalışması 6 eklemlı endüstriyel tip bir robot için gerçekleştirilen çalışmadır [23,24].

4.2. Robot Ters Dinamik Analizi

Robot eklemlerinde oluşan torqları analiz edebilmek amacıyla ters dinamik analizi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada solidworks ortamında 3 boyutlu katı tasarım modeli matlab simscape modellemeye uygun şekilde dışarı aktarılarak matlab 2. Jenerasyon simscape modelleme ortamında otomatik olarak modellenerek ters dinamik analizi yapılmıştır. Matlab simscape ortamında her bir eklem için eklem yapısına göre matlab simscape platformu tarafından otomatik olarak solidworks montajındaki hareket yapısına göre bağ ataması yapılmaktadır. Eklem yapısı dönel bir eklem ise dönel eklem, prizmatik bir eklem bağına sahip ise prizmatik bağ ataması otomatik olarak yapılmaktadır. Matlab simscape 2. jenerasyonda otomatik olarak atanan eklem bağları kendi içerisinde aktuatörlü sistem olup ters dinamik analizi için hareket sinyalleri yeterlidir. Ters dinamik analizinde pozisyon yörüngesi ve hız eklem bağı için giriş aktuatör torqları çıkış sinyali olarak analiz edilmektedir.

Teorik olarak q eklem hareket yörüngesi ve w açısız hız olmak üzere giriş olarak uygulandığında çıkış aktuatör torqu τ Nm olarak Simscape tarafından otomatik hesaplanmaktadır. Teorik denklem Denklem (4.1) 'de belirtilmiştir. [24]

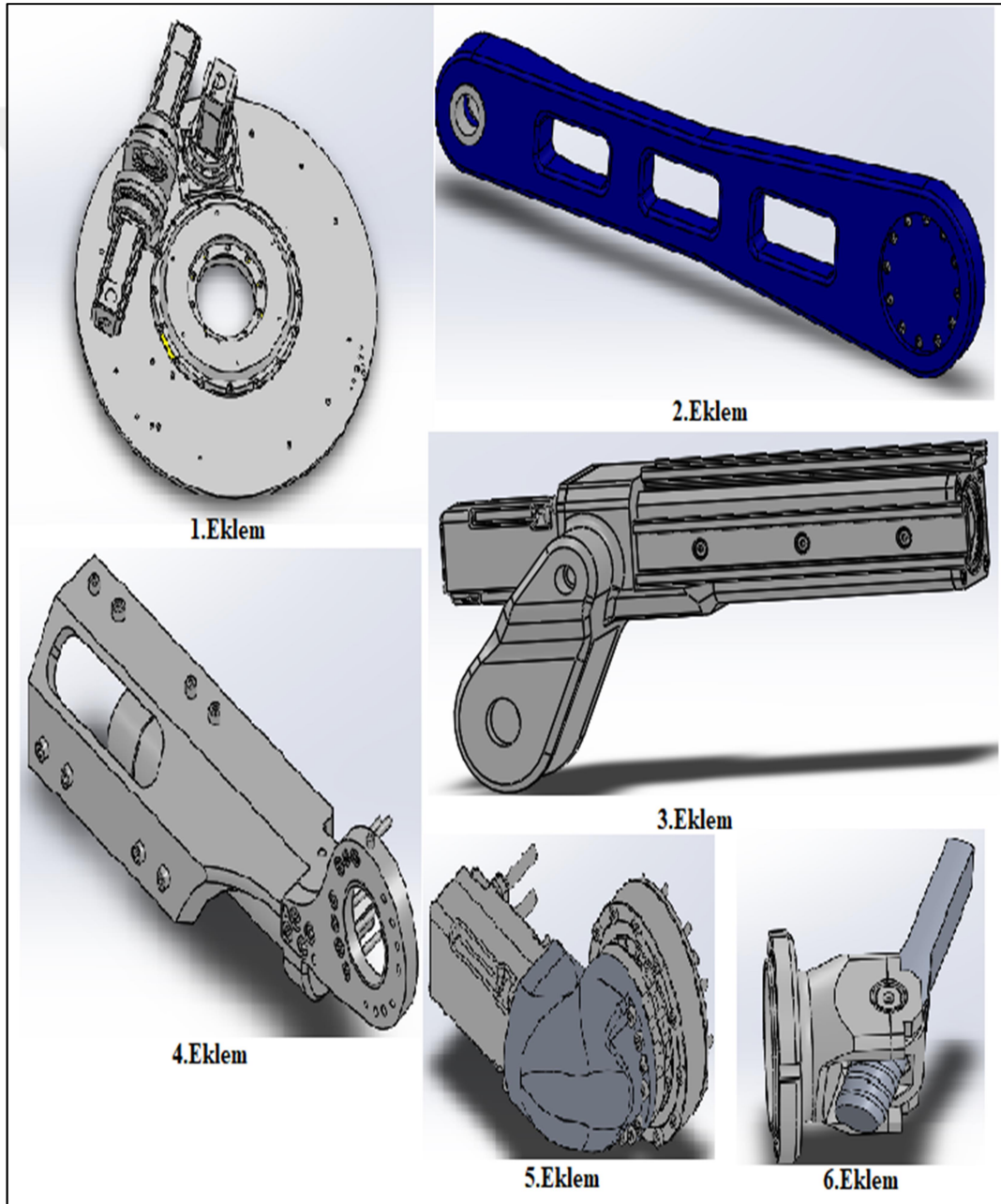
M, C ve g matrisleri daha önceden elde edilmiştir. q_r Her bir ekleme ait açısız yörüngeyi ifade etmektedir. Açısız yörünge'nin birinci dereceden türevi hızı yani \dot{q}_r , ikinci dereceden türevi ivmeyi ifade etmektedir. İvme \ddot{q}_r olarak denklemde belirtilmiştir [24];

$$\tau = M(q_r)\ddot{q}_r + C(q_r, \dot{q}_r)\dot{q}_r + g(q_r) \quad (4.1)$$

Solidworks ortamında tasarımı gerçekleştirilen robotun Matlab simscape ortamına aktarılan tasarım modeli Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'de verilen tasarım modeli,

Solidworks'te tasarımı tamamlanmış gerçek zamanda üretimi gerçekleştirilmiş robot üç boyutlu katı modelidir. Gerçekleştirilen simülasyon modelinin doğrulaması gerçek zamanda elde edilen yörünge sinyalleri ile hesaplanan tork değerlerinin kontrollü şekilde eklemlere uygulanmasıyla elde edilen simülasyon çıkış yörünge sinyallerinin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Verilen modelde, her bir eklem için q hareket girişi yani q_r ve τ tork çıkış pini ataması yapılarak tüm sistemin ters dinamik modellemesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Robotun eklemlerinin 3 boyutlu katı modeli

Her bir ekleme ait kütle bilgisi Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Robotun kütle tablosu

Eklem	Kütle (kg)
1.Eklem	14,9
2.Eklem	1,86
3.Eklem	1,94
4.Eklem	0,71
5.Eklem	0,77
6.Eklem	0,3

Her bir ekleme ait çıktı koordinat sisteminden alınmış atalet momenti matrisleri 1.eklem için I_1 matrisi ile Denklem (4.2)’de verilmiştir. Diğer eklemler sırasıyla 2. 3.4.5. ve 6.eklemler için I_2, I_3, I_4, I_5 ve I_6 atalet matrisleri kgm^2 cinsinden Denklem (4.3), Denklem (4.4), Denklem (4.5), Denklem (4.6) ve Denklem (4.7)’de verilmiştir;

$$I_1 = \begin{bmatrix} 2,75 & 0,54 & -4,95 \\ 0,54 & 13,4 & -0,21 \\ -4,95 & -0,21 & 10,7 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 0,29 & 0,1 & -0,56 \\ 0,1 & 1,44 & -0,05 \\ -0,56 & -0,05 & 1,18 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 0,35 & 0,16 & -0,47 \\ 0,16 & 1,02 & -0,1 \\ -0,47 & -0,1 & 0,75 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$I_4 = \begin{bmatrix} 0,13 & 0,08 & -0,2 \\ 0,08 & 0,49 & -0,04 \\ -0,2 & -0,04 & 0,4 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$I_5 = \begin{bmatrix} 0,16 & 0,14 & -0,26 \\ 0,14 & 0,69 & -0,07 \\ -0,26 & -0,07 & 0,6 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$I_6 = \begin{bmatrix} 0,03 & 0 & 0 \\ 0 & 0,01 & -0,01 \\ 0 & -0,01 & 0,02 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

3 Boyutlu katı model için kütle merkezi matrisleri metre cinsinden Denklem (4.8), Denklem (4.9), Denklem (4.10), Denklem (4.11), Denklem (4.12) ve Denklem (4.13)'te verilmiştir. Kütle merkezi matrisleri eklem sırasına göre c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 ve c_6 matrisleri ile ifade edilmiştir;

$$c_1 = \begin{bmatrix} 0,83 \\ 0,04 \\ -0,4 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$c_2 = \begin{bmatrix} 0,78 \\ 0,08 \\ -0,39 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

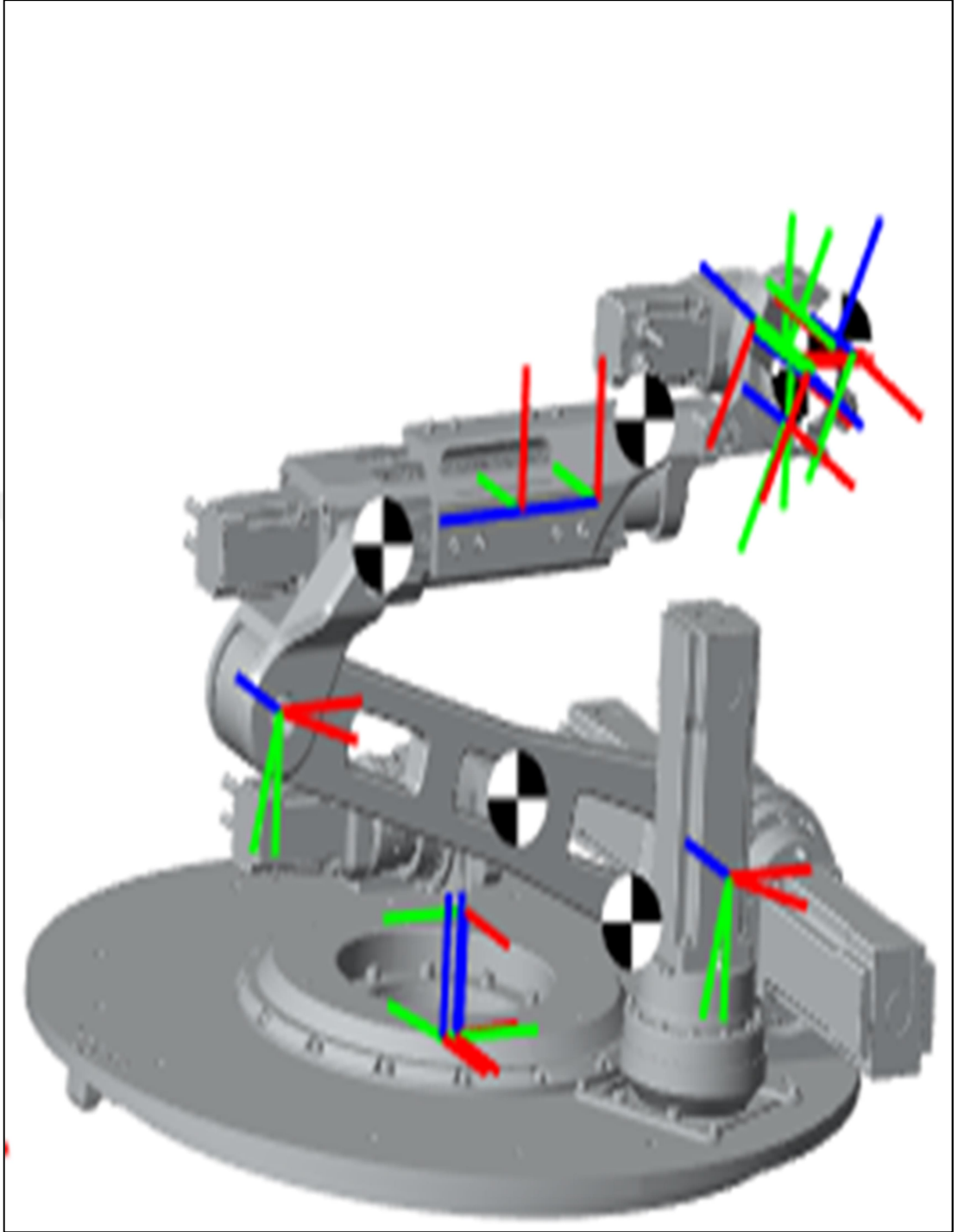
$$c_3 = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,14 \\ -0,4 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$c_4 = \begin{bmatrix} 0,73 \\ 0,16 \\ -0,39 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$c_5 = \begin{bmatrix} 0,85 \\ 0,22 \\ -0,4 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

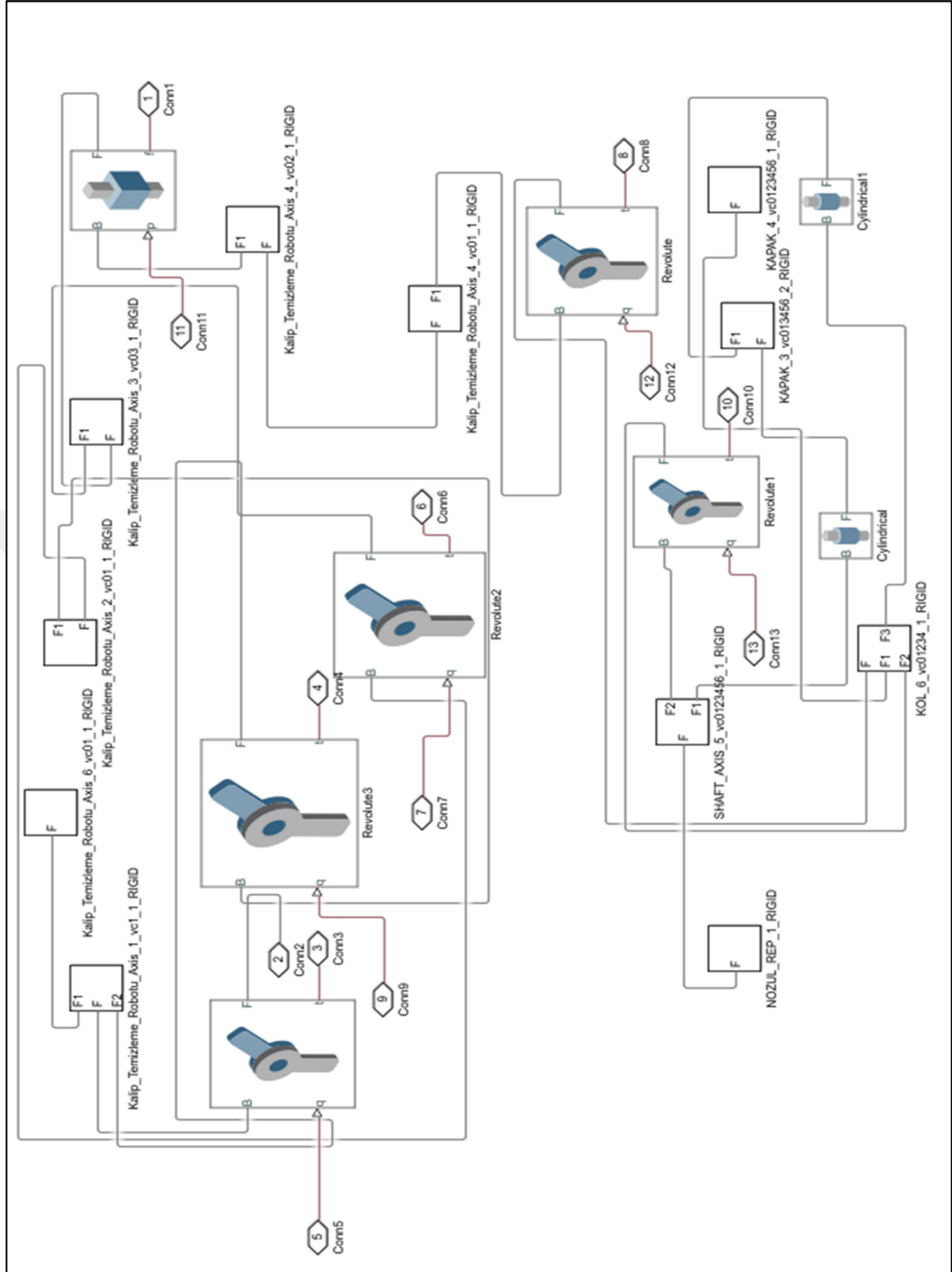
$$c_6 = \begin{bmatrix} -0,04 \\ 0,27 \\ -0,18 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Her bir ekleme ait kütleler, atalet matrisleri ve yerçekimi matrisleri fiziksel modelde elde edilen değerlerdir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında gerçeğe en yakın tork değerlerini elde edebilmek amacıyla simülasyona aktarılan tasarım modelinin gerçek fiziksel modele en yakın modelde olması gereklidir. Bu sebeple imalata hazır tasarımı tamamlanmış katı montaj modeli kütle özellikleri ve eklem katı modelleri simülasyonda kullanılmıştır.



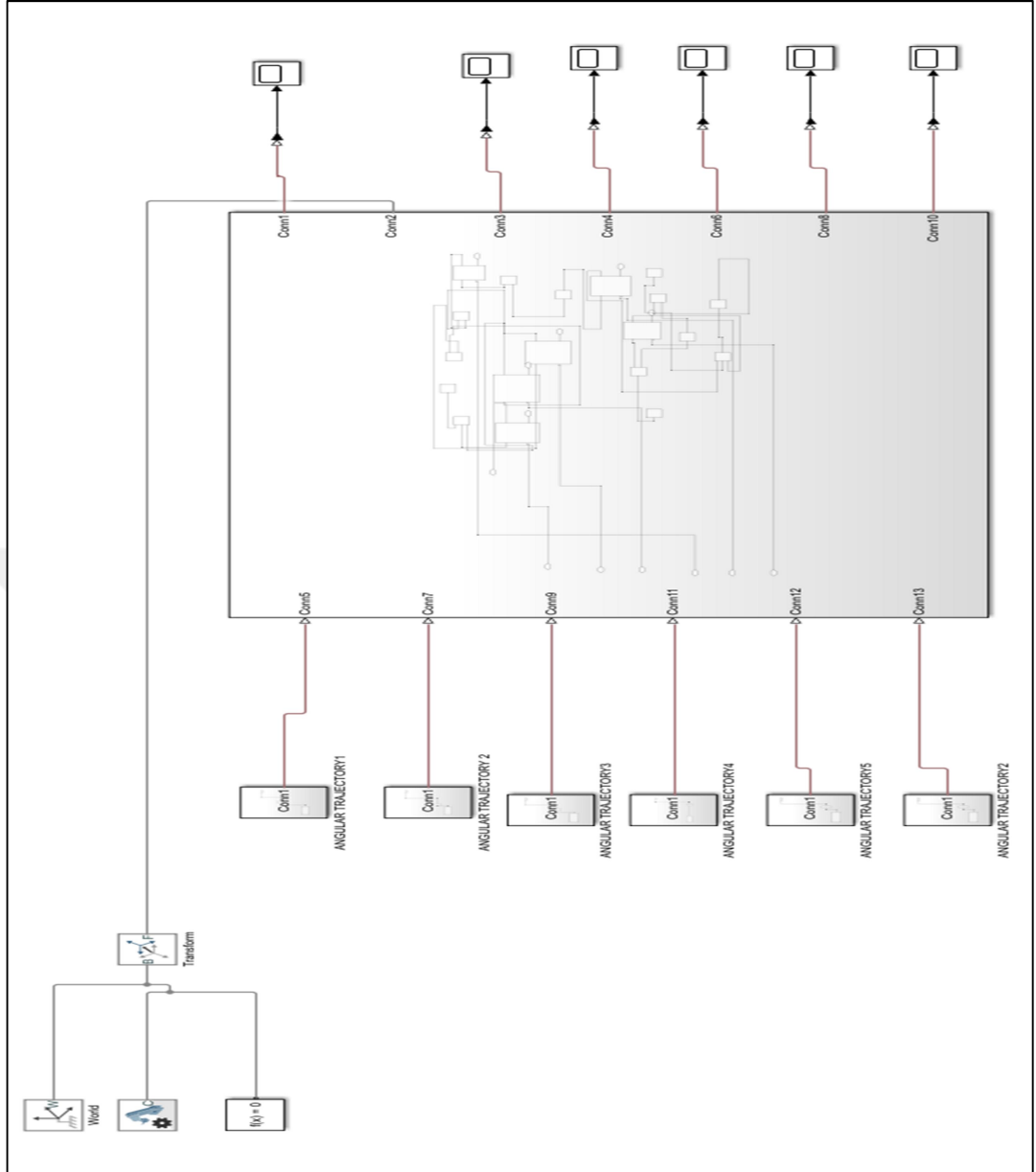
Şekil 4.2. Robot 3 boyutlu tasarım Matlab modeli

Şekil 4.2’de verilen robot 3 boyutlu matlab ortamına aktarılmış modelinde her bir ekleme koordinat yerleşimi ve ağırlık merkezleri belirtilmiştir. Eklemler simscape ortamına aktarılmadan önce her bir ekleme gerçek zamanda fiziksel model üretimi için seçilen alüminyum 6061 malzeme ataması yapılarak bire bir ağırlık modeli oluşturulmuştur.



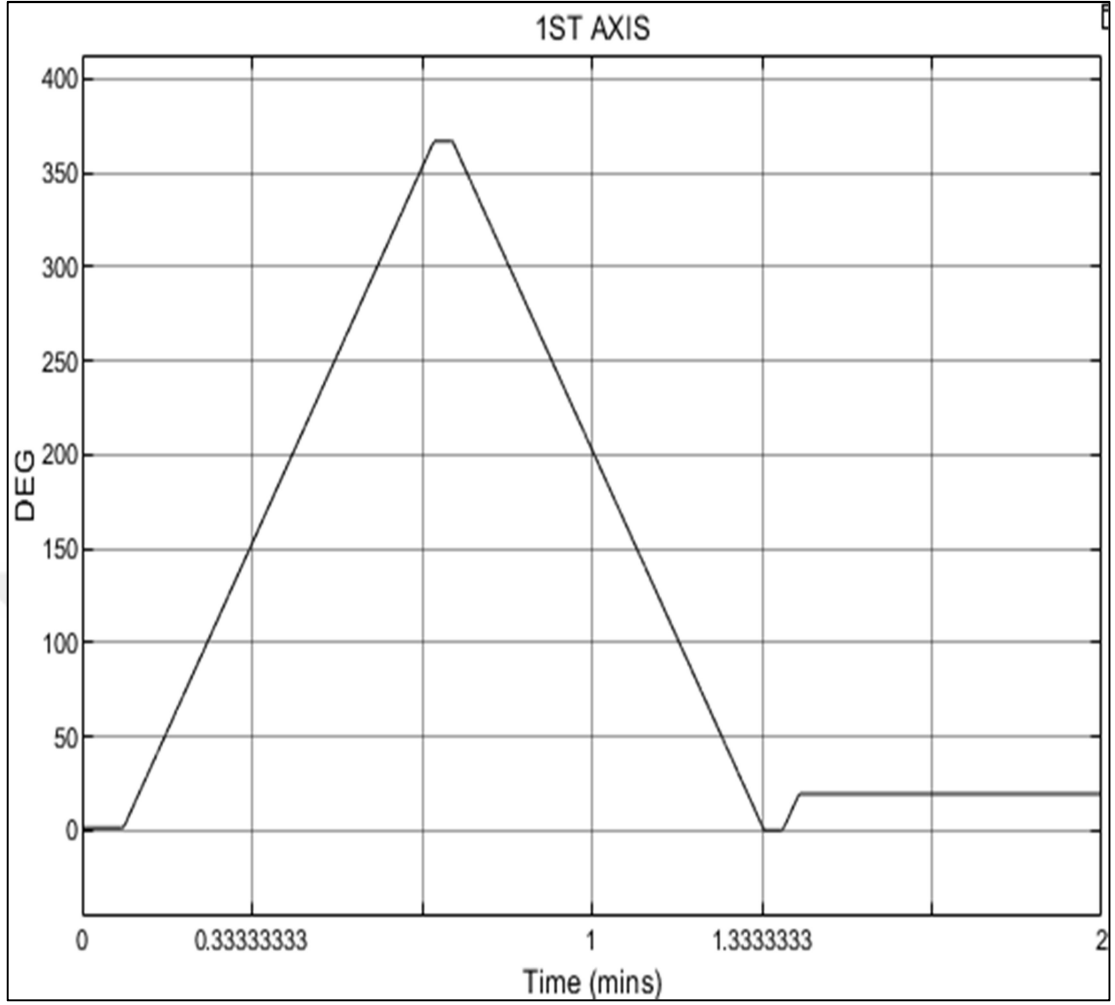
Şekil 4.3. Robot matlab simscape modeli

Şekil 4.3'te verilen modelde görüldüğü üzere 5 adet dönel eklem ataması 1 adet prizmatik eklem ataması sistem tarafından oluşturulmuştur. Oluşturulan robot modeli bir alt sistem haline dönüştürülerek eklem girişlerine gerçek zamanda üretilen robottan elde edilen açısal yörünge sinyalleri verilmiştir. Tüm sistemin ters dinamik modeli Şekil 4.4'te verilmiştir.



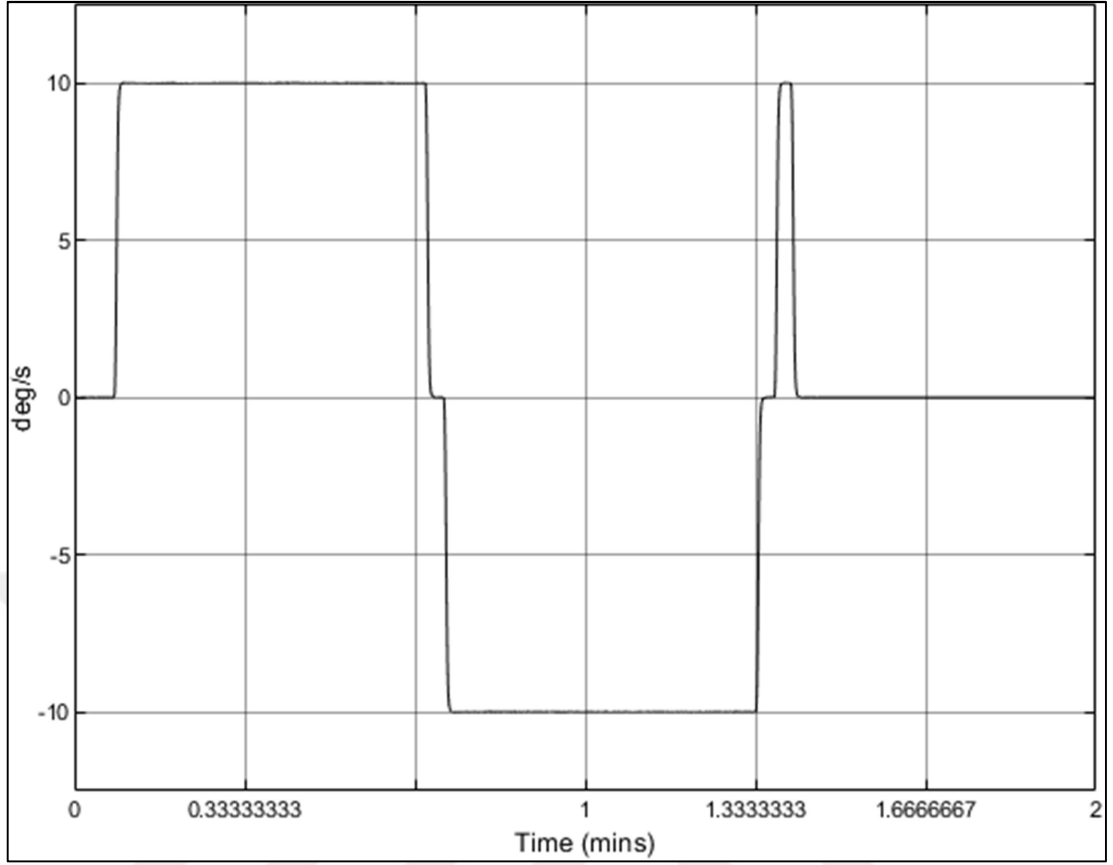
Şekil 4.4. Robot ters dinamik simulink modeli

Şekil 4.4'te verilen modelde ana alt sisteme giriş olarak her bir ekleme için ayrı ayrı derece (deg) birim çıkışlı gerçek zamanda robot eklemlerinden elde edilen açısız yörünge sinyalleri verilmiştir. Her bir ekleme verilen giriş sinyalleri gerçek zamanlı kontrol edilen robot fiziksel modelindeki aktuatörlerin konum, hız ve ivme yörünge sinyalleridir. Motorlardan toplanan pozisyon, hız ve ivme sinyalleri veri seti haline dönüştürülerek Matlab Simscape ortamına aktarılmıştır. Veriler eklemlere giriş sinyali olarak uygulanarak gerçek zamanda elde edilen yörünge için her bir ekleme ait gerçek yörünge sinyallerinin elde edilebilmesi için gerekli olan ekleme torkları elde edilmiştir.

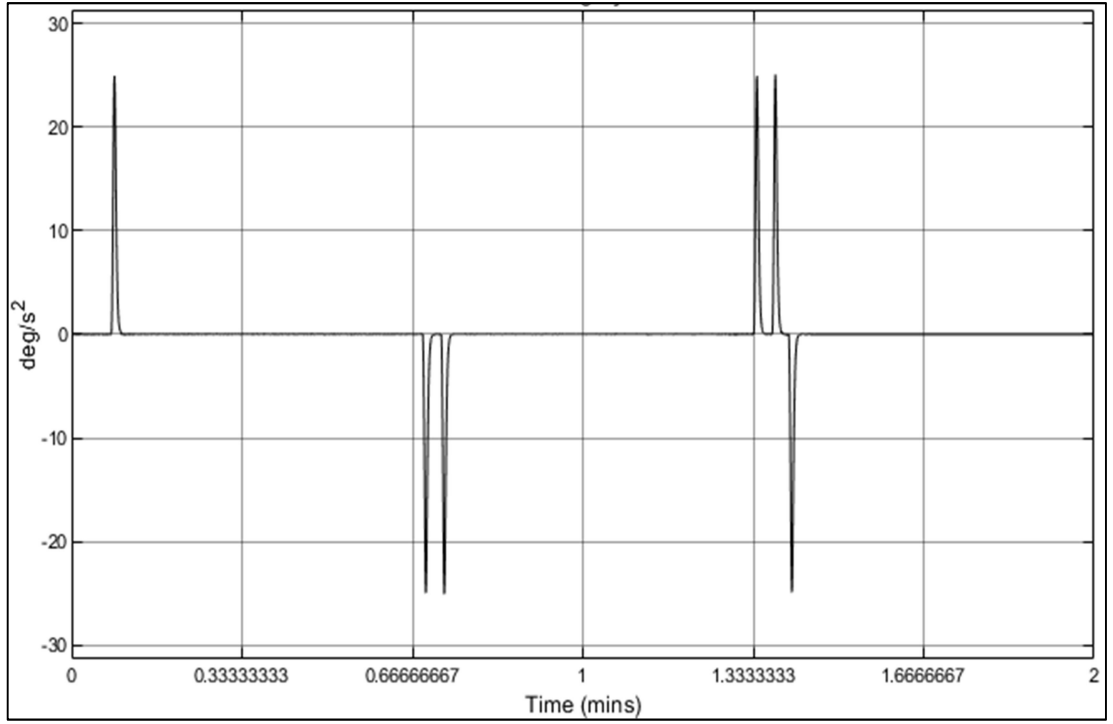


Şekil 4.5. Birinci eklemin giriş gerçek konum sinyali

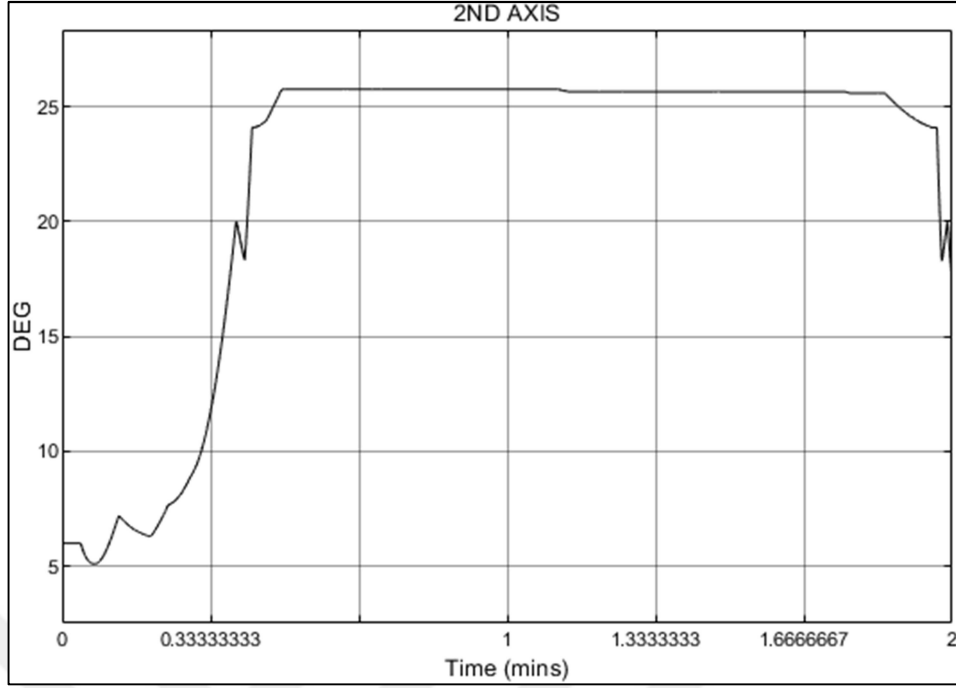
Şekil 4.5'te verilen sinyalde 1. eklem dönel hareketi için 367 derece maksimum yörünge noktasına başlangıç pozisyonu 0 derece olmak üzere gerçek zamanda çalışan robot 1. Ekleminde elde edilen yörünge sinyali veri seti olarak Matlab ortamına aktarılarak 1. ekleme hareket giriş sinyali olarak derece cinsinden simülasyonda verilmiştir. Yörünge senaryosu gerçek zamanda robottan alınan 2 dakikalık senaryo olup karşılaştırmanın doğru yapılabilmesi amacıyla aynı şekilde simülasyona aktarılmıştır. Aktarılan gerçek zamanlı konum sinyali matlab ortamında ayrık zamanlı filtrelenmiş türev alma işlemi uygulanarak hız giriş sinyali elde edilmiştir. Aynı zamanda elde edilen hız giriş sinyalinde ayrık zamanlı filtrelenmiş türev alma işlemiyle ivme sinyali elde edilmiştir. Ters dinamik uygulamasında eklemlere ait torkların elde edilebilmesi için eklem için konum, hız ve ivme giriş olarak uygulanması gereklidir [19-25]. Birinci eklem için giriş hız ve ivme sinyalleri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.6.Birinci eklemin giriş gerçek hız sinyali

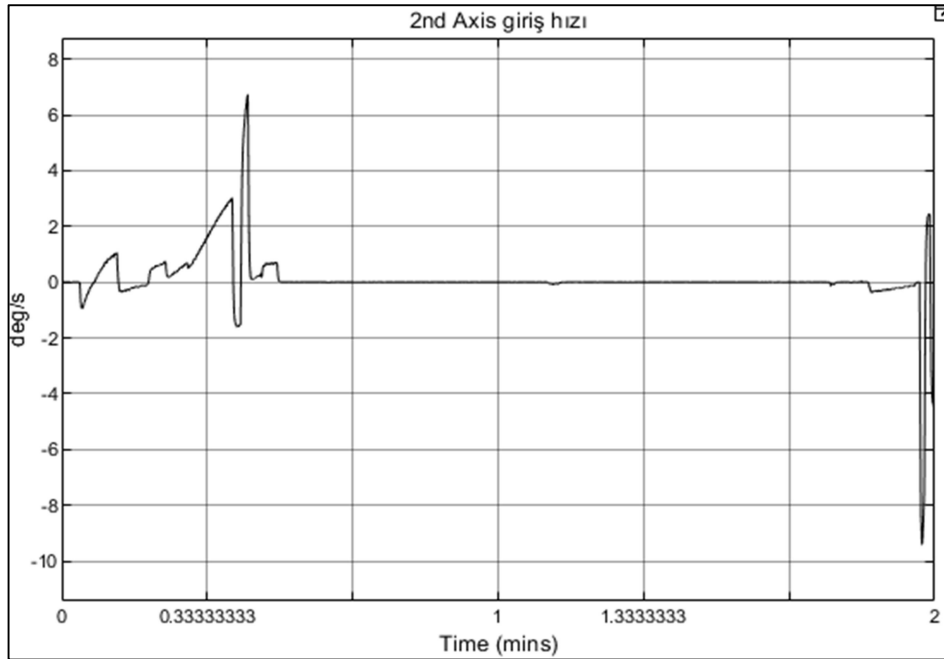


Şekil 4.7.Birinci eklemin giriş gerçek ivme sinyali

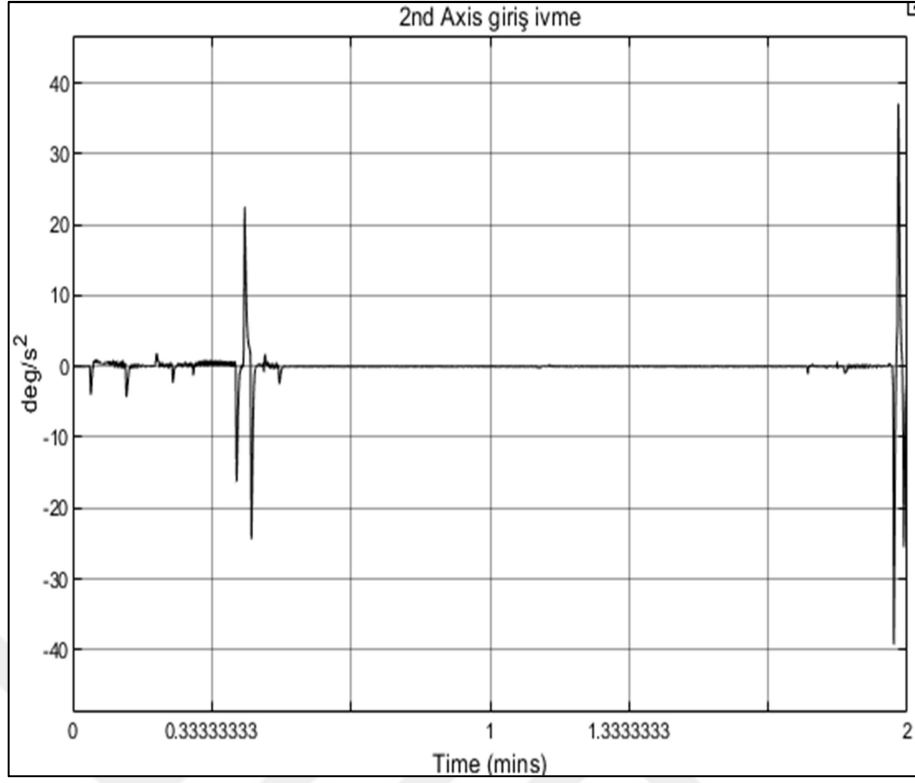


Şekil 4.8. İkinci eklemin giriş gerçek konum sinyali

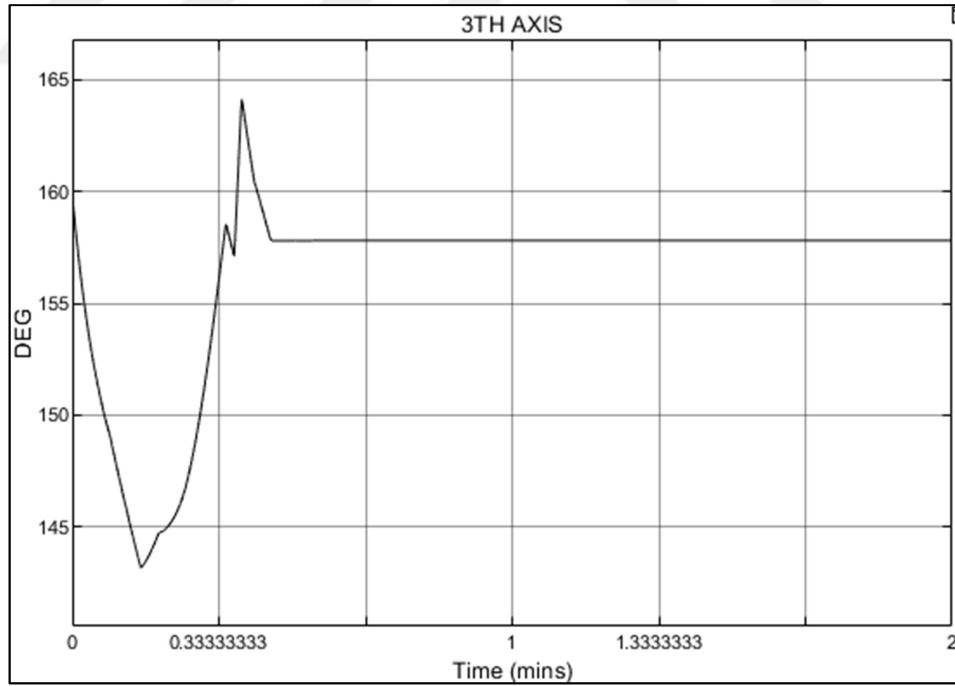
Şekil 4.8’de verilen yörünge sinyali 2. eklem dönel bağ için gerçek zamanda elde edilen 2.eklem motor çıkış konum yörünge sinyalidir. 2 dakikalık hareket senaryosu gerçek zamanda 2.eklem motorundan elde edilerek veri seti olarak Matlab ortamına aktarılmıştır. Konum veri setinin birinci derece türevi ve ikinci dereceden türevleri alınarak elde edilen hız ve ivme sinyalleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.9. İkinci eklemin giriş gerçek hız sinyali



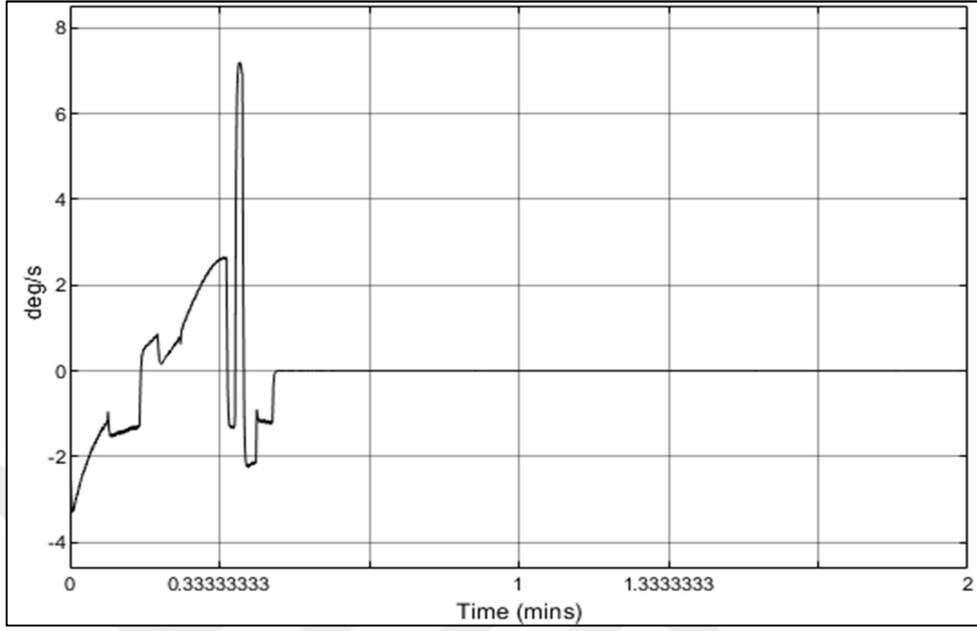
Şekil 4.10. İkinci eklemin giriş gerçek ivme sinyali



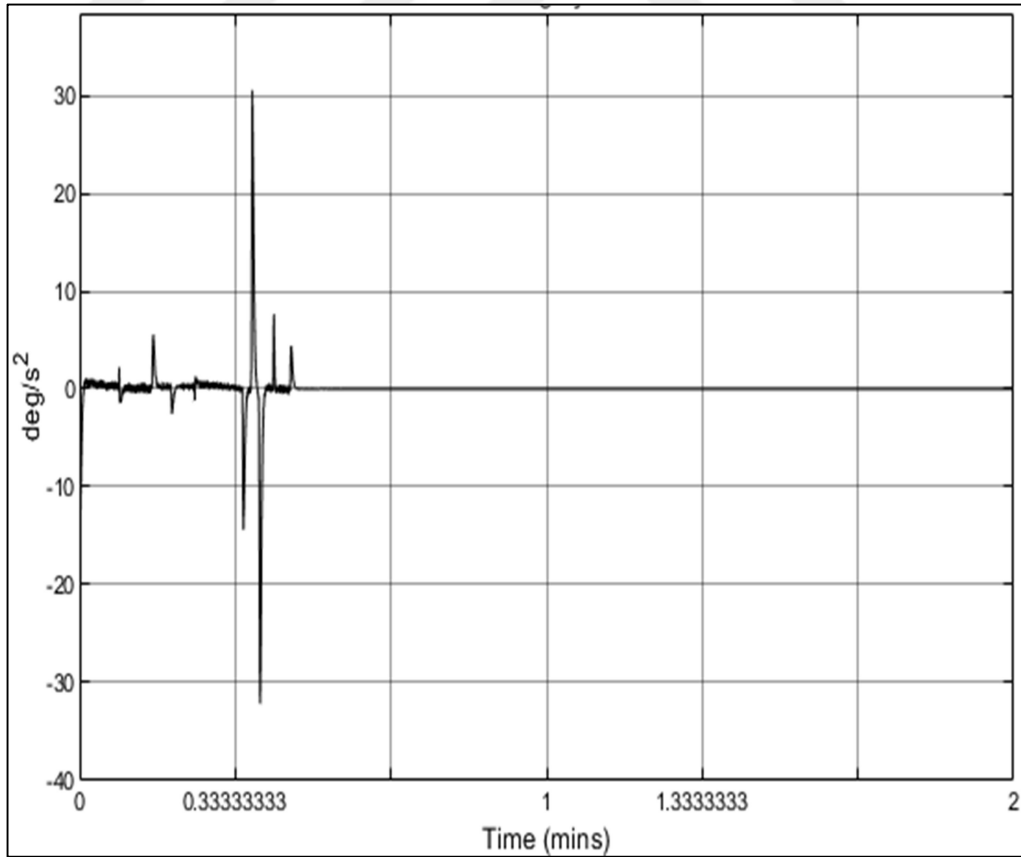
Şekil 4.11. Üçüncü eklemin giriş gerçek konum sinyali

Şekil 4.11’de verilen sinyal 3.eklem dönel hareketi için gerçek zamanda çalışan robot 3.ekleminden elde edilen 2 dakikalık konum yörünge sinyalidir. Elde edilen gerçek veri Matlab ortamına aktarılarak Simscape modelde 3. Ekleme giriş olarak

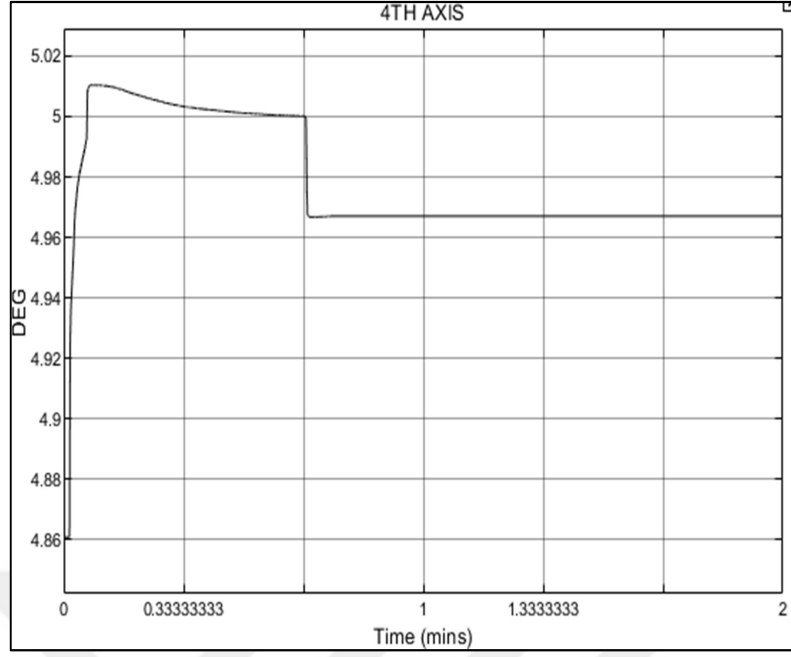
uygulanmıştır. Üçüncü eklemin giriş gerçek hız ve ivme sinyalleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.12. Üçüncü eklemin giriş gerçek hız sinyali

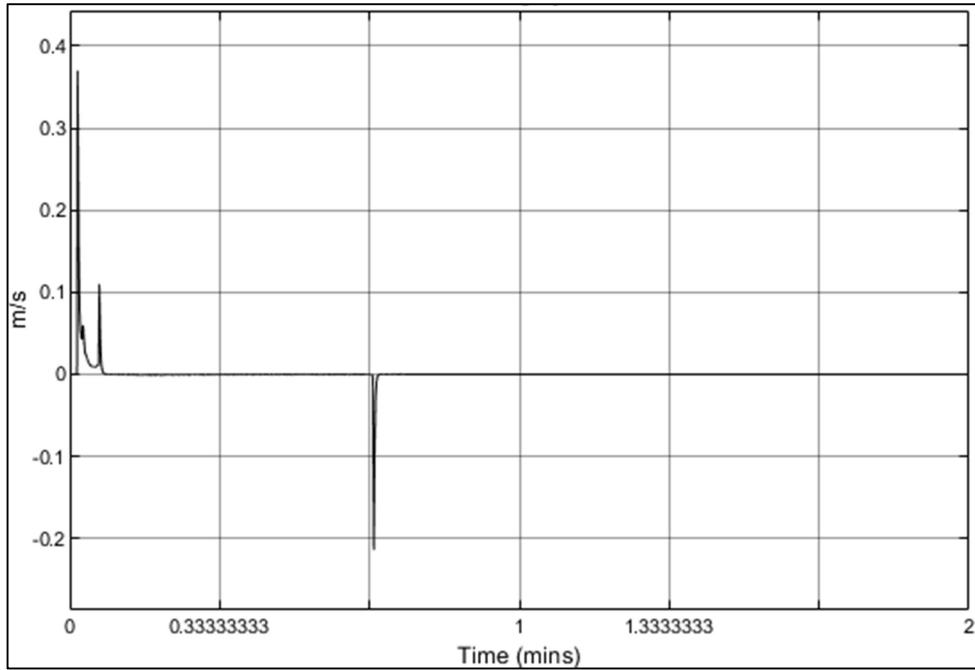


Şekil 4.13. Üçüncü eklemin giriş gerçek ivme sinyali

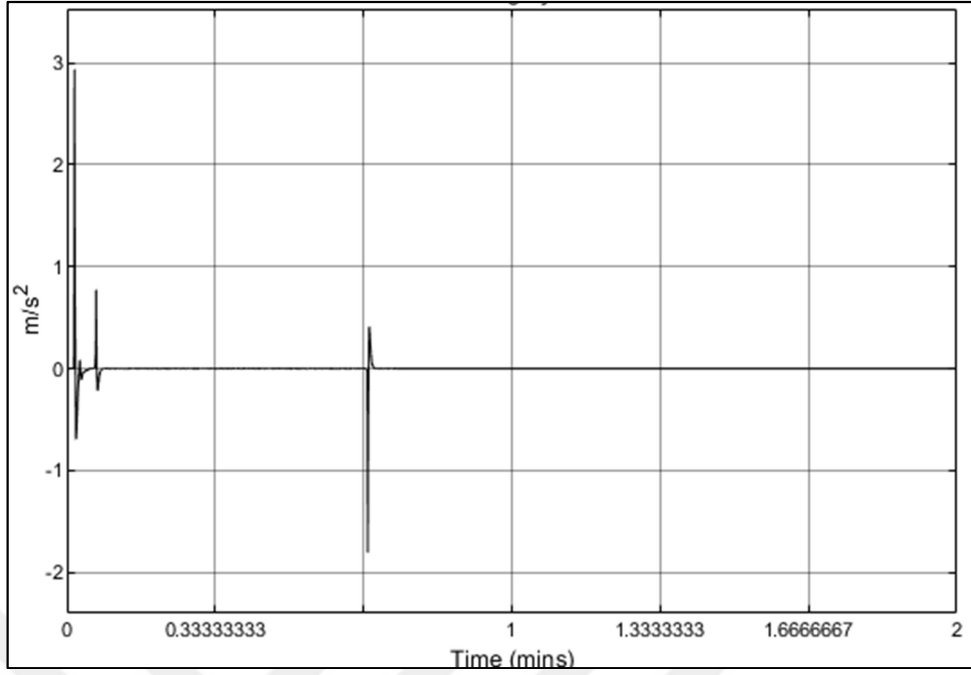


Şekil 4.14. Dördüncü eklem için giriş gerçek konum sinyali

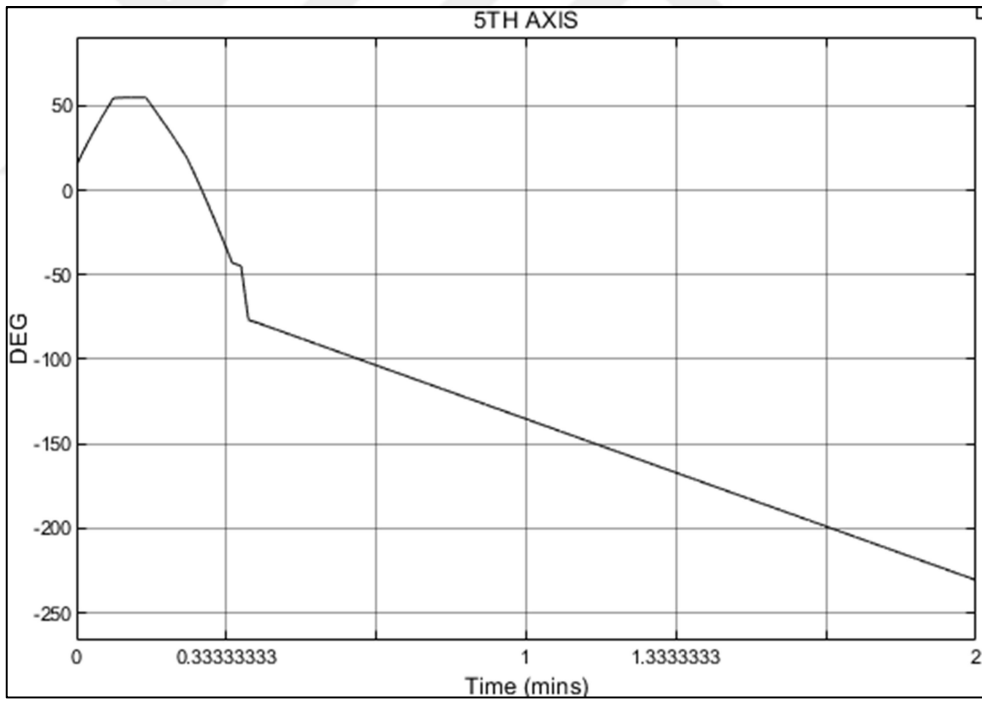
Şekil 4.14'te dördüncü eklem için gerçek zamanda robot fiziksel modelinden elde edilen dördüncü eklem için gerçek konum sinyali gösterilmektedir. Gerçek konum sinyali, Matlab ortamına aktarılarak dördüncü eklem için hareket girişine verilmiştir. Dördüncü eklem için konum sinyalinin birinci ve ikinci derece türevlerinin alınmasıyla elde edilen hız ve ivme sinyalleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.15. Dördüncü eklem için giriş gerçek hız sinyali

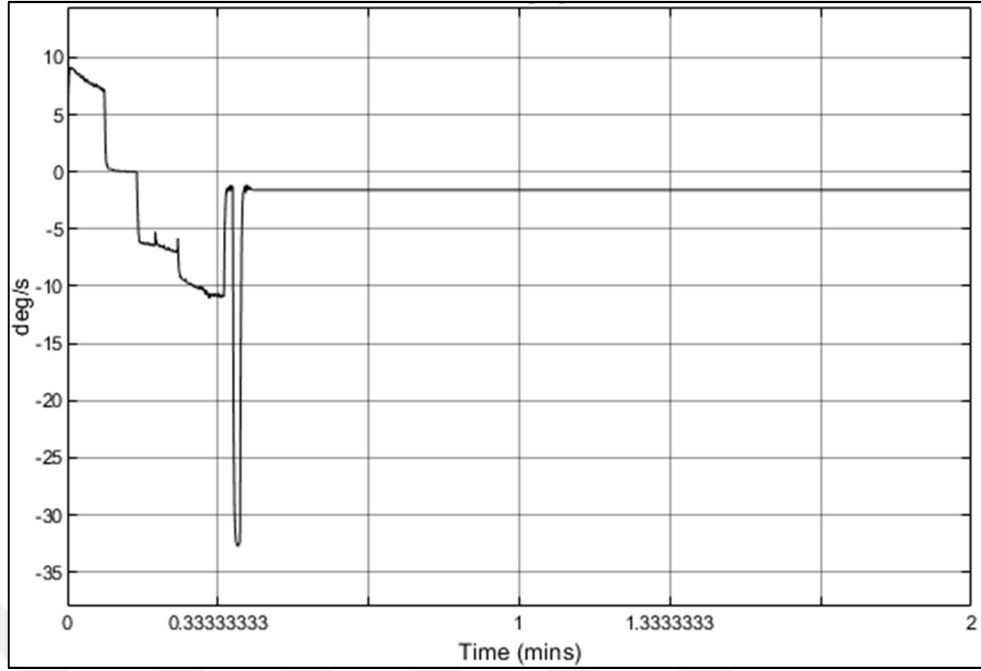


Şekil 4.16. Dörüncü eklemin giriş gerçek ivme sinyali

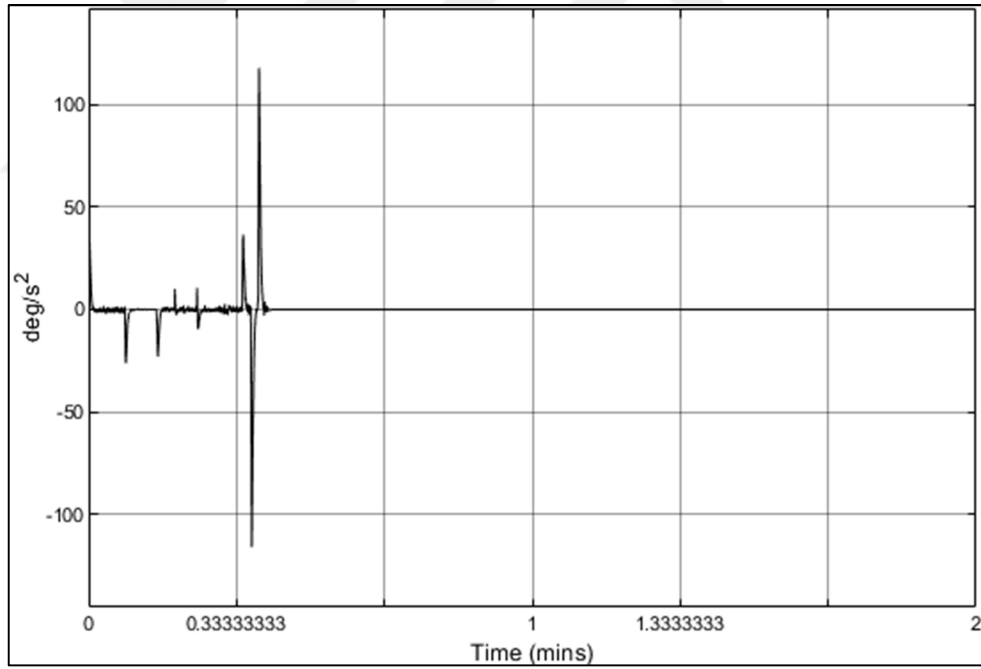


Şekil 4.17. Beşinci eklemin giriş gerçek konum sinyali

Şekil 4.17’de verilen konum sinyali beşinci eklemin gerçek zamanda çalışan robot fiziksel modelinden elde edilen 2 dakikalık gerçek konum yörünge sinyalidir. Elde edilen konum sinyalinin birinci ve ikinci dereceden türevleri alınarak elde edilen hız ve ivme sinyalleri Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir.



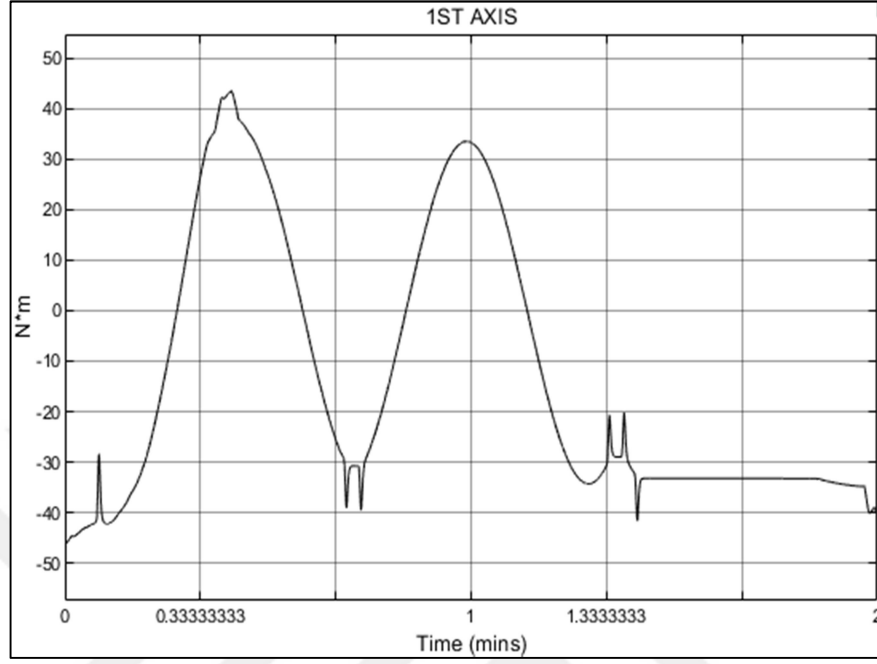
Şekil 4.18. Beşinci eklemin giriş gerçek hız sinyali



Şekil 4.19. Beşinci eklemin giriş gerçek ivme sinyali

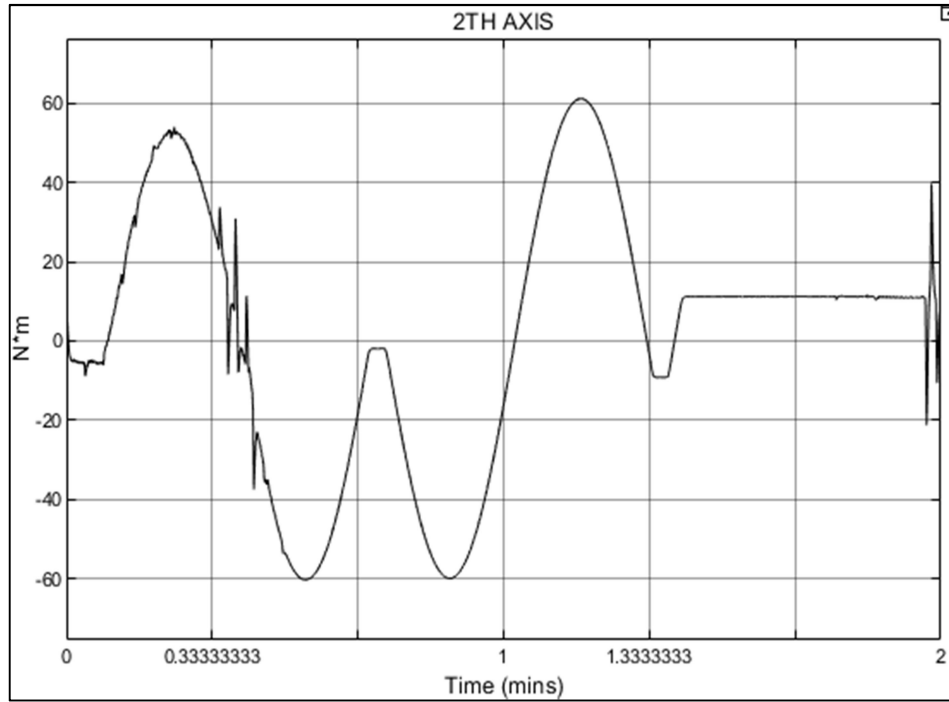
Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te her bir ekleme ait girilen gerçek konum, hız ve ivme sinyalleri ile hesaplanan tork çıkış sinyalleri verilmektedir. Hesaplanan tork değerlerinin doğrulanabilmesi için hesaplanan tork sinyallerinin kontrollü bir şekilde eklemlerde oluşturduğu açısal yörünge, hız ve ivmelerin gerçek verilerle karşılaştırılarak farklılıkların bulunması gerekmektedir.

İleri dinamik analizinde hesaplanan tork değerlerinin eklemlerde oluşturduğu konum ve hız sinyalleri istenilen gerçek konum ve hız sinyalleri karşılaştırılmıştır.

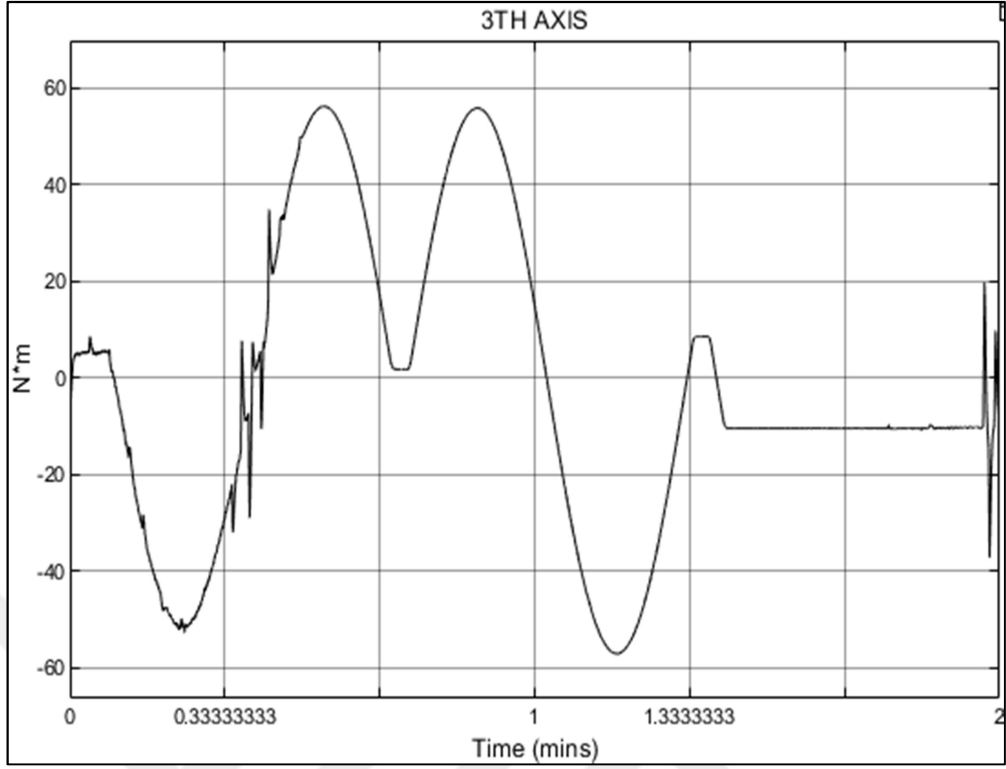


Şekil 4.20. Birinci eklemin hesaplanan tork sinyali

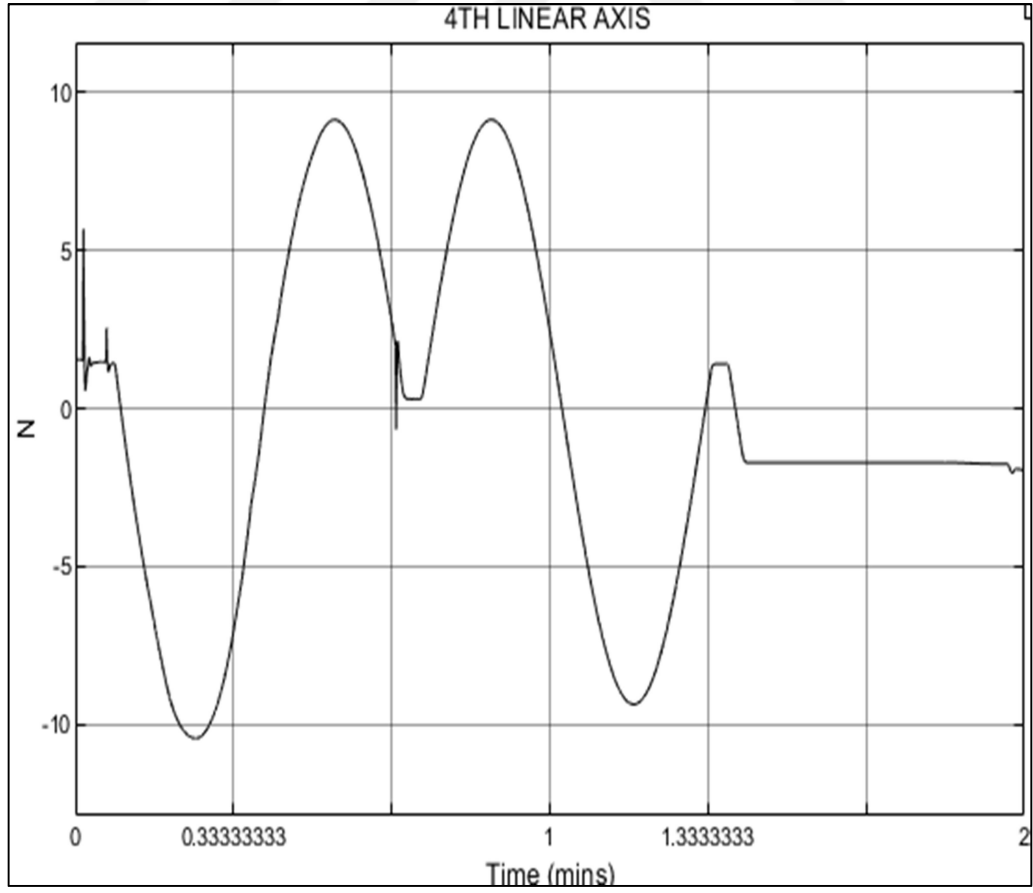
Şekil 4.20 incelendiğinde 1.eklemin için verilen gerçek açısal yörünge sinyali hareketi için hesaplanan tork değerlerinin 40 Nm değerlerine ulaştığı görülmektedir.



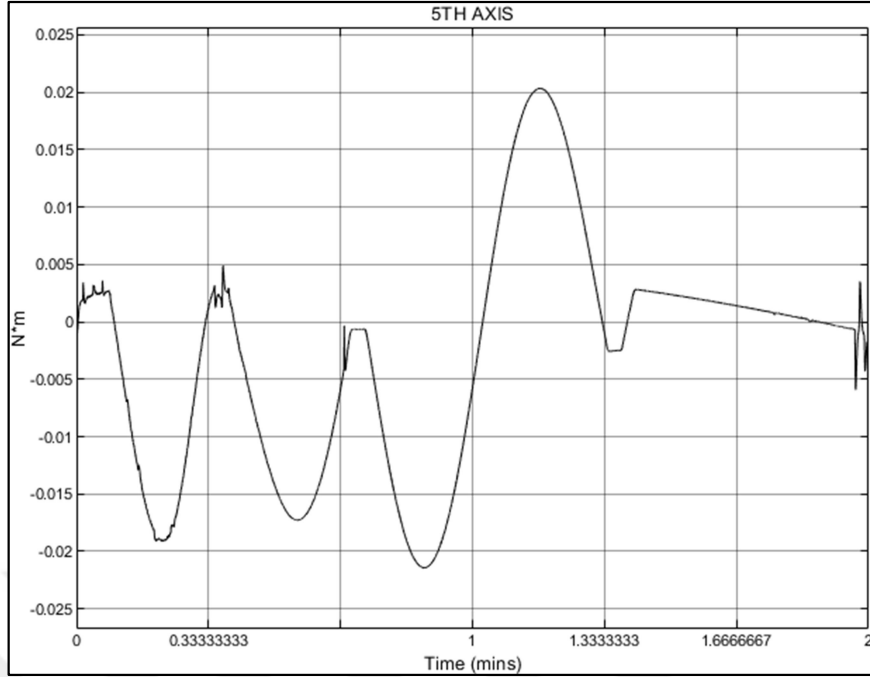
Şekil 4.21. İkinci eklemin hesaplanan tork sinyali



Şekil 4.22. Üçüncü eklemin hesaplanan tork sinyali



Şekil 4.23. Dördüncü eklemin hesaplanan tork sinyali



Şekil 4.24. Beşinci eklemin hesaplanan tork sinyali

Altıncı eklem gerçek zamanda çalışan fiziksel modelde sıfır derecede konumlandığı için altıncı eklem gerçek konum, hız ve ivme sinyalleri simülasyonda kullanılmamıştır.

4.3. Robot İleri Dinamik Analizi

Bir mekanizmada bulunan hareketli bağlar, istenilen hareketi gerçekleştirebilmek için güce ihtiyaç duyar. Mekanizmalarda bu güc girişi dönel sistemler için tork, prizmatik sistemleri için kuvvet olarak tanımlanır. Hareketli bir dönel ekleme tork girişi sağlandığında eklem hareket gerçekleştirir ve girilen torka göre hız, konum ve ivme üretir [26]. Bu çalışmada 6 eklemlilik kalıp temizleme robotunda bulunan hareketli eklemlere kontrollü tork girişi sağlandığında eklemlerde oluşan hız, konum ve ivme değerlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma Solidworks ortamında 3 boyutlu tasarımı tamamlanan robotun matlab simscape platformuna aktararak modellenmesi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. İleri dinamik modelleme için hesaplanan torkların PD kontrolü kullanılarak sistem modellenmiştir. Teorik olarak Denklem (4.14)'te gösterildiği gibi ileri dinamik ifade edilebilir [22,27-29];

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_d \dot{e} + K_p e) + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (4.14)$$

Denklemden belirtilen q çıkış konum yörüngesi, q_d istenilen referans konum yörüngesi yani çalışmada gerçek robottan elde edilen açısal konum yörünge sinyalleri olup kontrol simülasyonunda simülasyon çıkış konum sinyali ile gerçek istenilen yörünge pozisyon sinyalleri karşılaştırılarak yörünge takip hata sinyalleri hesaplanmıştır [28-30]. Bu hata Denklem (4.15)'te verilmiştir. Eklemlerin hızlarında oluşan hata Denklem (4.16)'da verilmiştir;

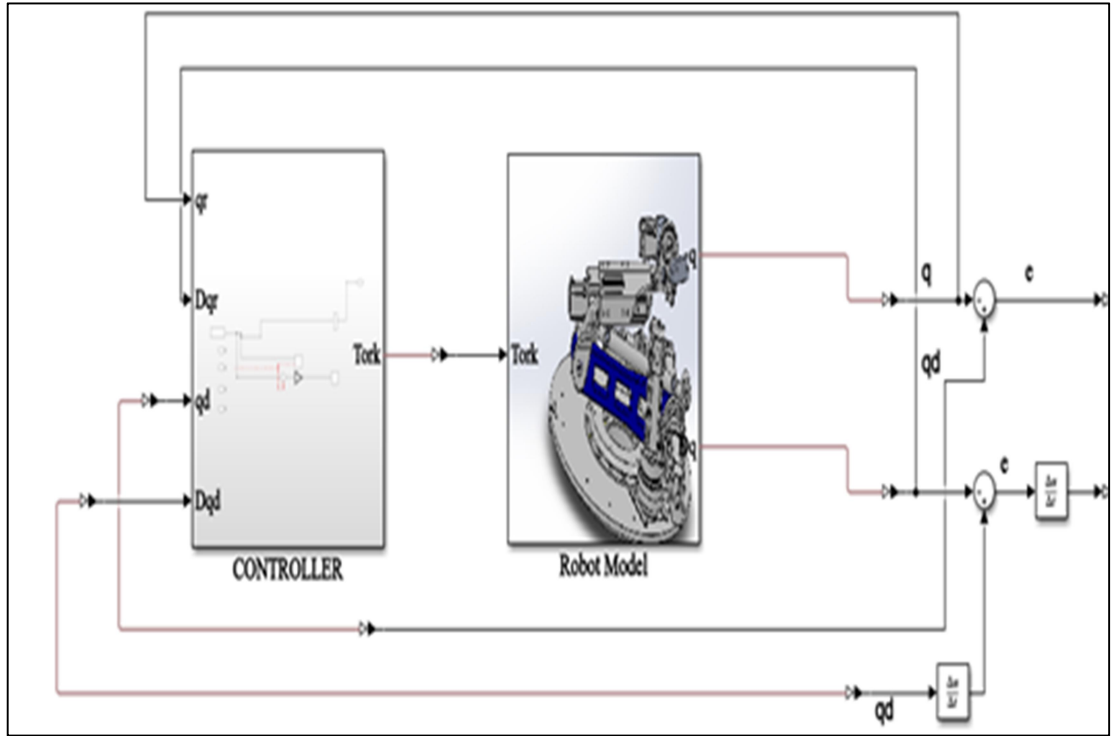
$$e = q_d - q \quad (4.15)$$

$$\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q} \quad (4.16)$$

K_d ve K_p kontrolcü kazanç katsayıları olarak ifade edilmiştir. Konum geri beslemeli kontrol için K_p , hız geri beslemeli kontrol için K_d katsayısı kullanılmıştır [20,22]. Dinamik kontrol Denklem (4.17)'de verilmiştir;

$$\ddot{e} = -K_d \dot{e} - K_p e \quad (4.17)$$

Matlab Simscape ortamında otomatik olarak oluşturulan robot modelinin ileri dinamik analizi için düzenlenmiş modeli Şekil 4.25'te verilmiştir.

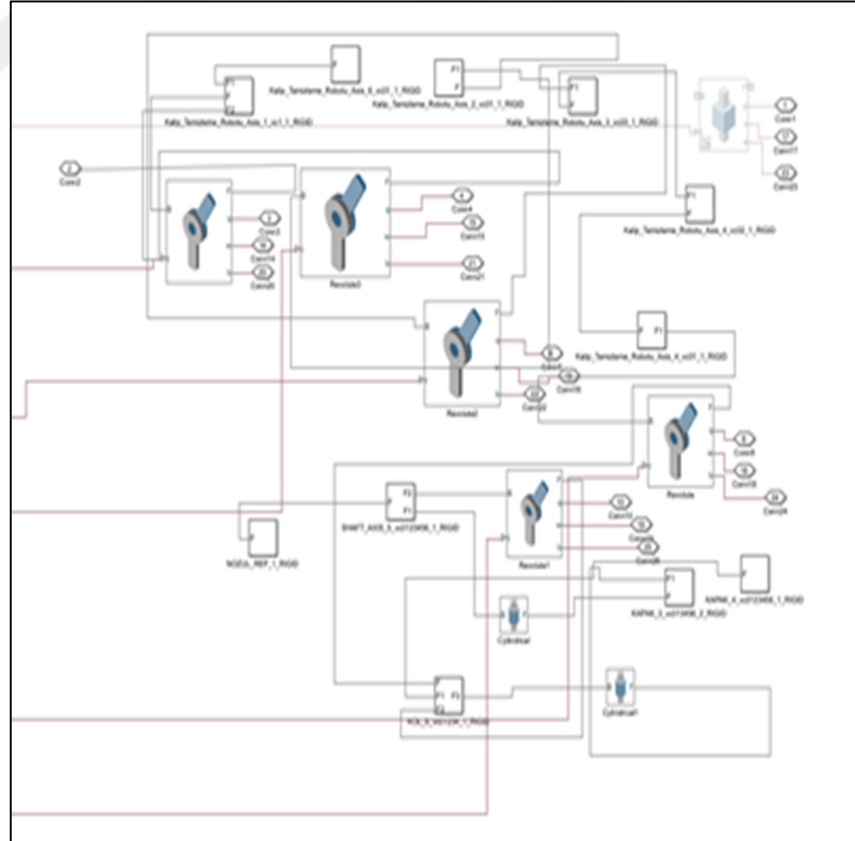


Şekil 4.25. Robotun ileri dinamik kontrol modeli

Şekil 4.25'te PD kontrolcü ile tasarlanan hesaplanan tork kontrol modeli gösterilmektedir. Doğal frekans w_n diagonal matrisleri olmak üzere $K_p = w_n^{-2}$ ve $K_d = 2w_n$ belirlenmiştir [22]. Kontrol parametreleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

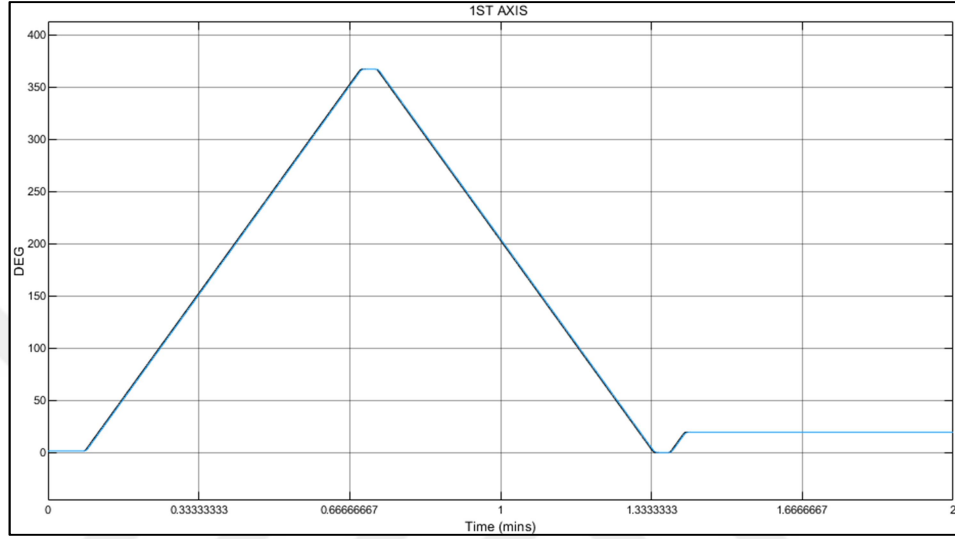
Tablo 4.2. Kontrol parametreleri tablosu

Ekleme	K_p	K_d
1.Ekleme	0,0022	0,00166
2.Ekleme	0,0022	0,00166
3.Ekleme	0,0022	0,00166
4.Ekleme	0,000065	0,0089
5.Ekleme	0,000065	0,0089



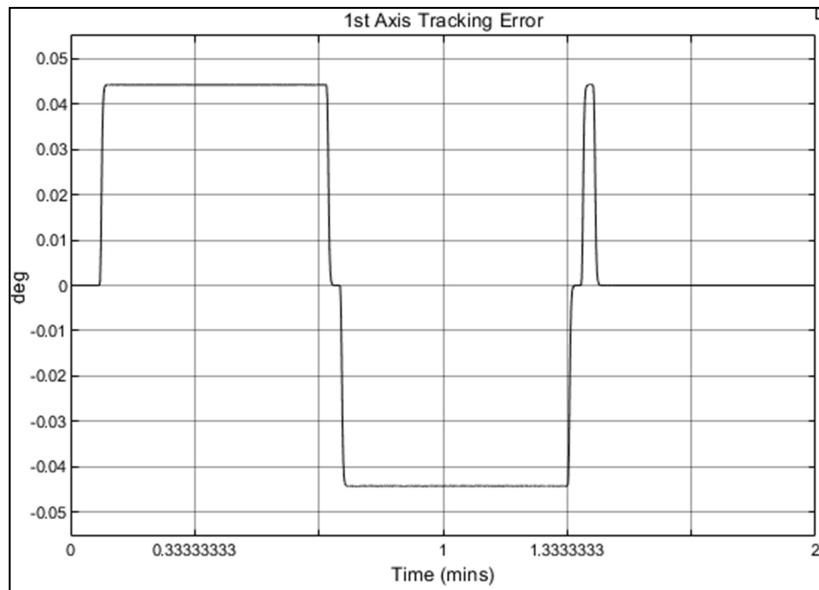
Şekil 4.26. Robotun ileri dinamik alt sistem modeli

Şekil 4.26’da robotun ileri dinamik alt sistem modeli verilmiştir. Düzenlenen simscape modeli bir alt sistem oluşturularak hız ve konum geri beslemeli sistem modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan ileri dinamik sistem model sonucunda istenilen pozisyon sinyali yani robottan edinilen gerçek konum sinyalleri ile çıkış konum sinyalleri üst üste çizdirelerek karşılaştırılmıştır.

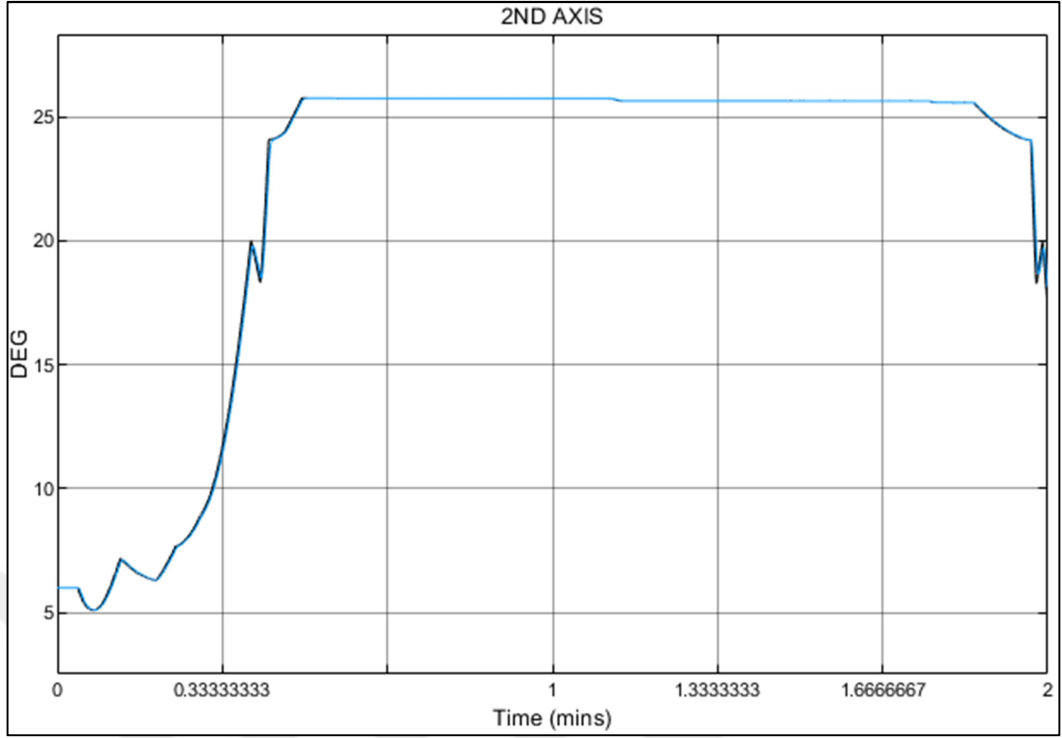


Şekil 4.27. Birinci eklem konum karşılaştırma sinyali

Şekil 4.27’de iki adet sinyal verilmektedir. Mavi renkli çizilen sinyal simülasyon çıkış pozisyonunu ve siyah renkli sinyal gerçek sinyali ifade etmektedir. Birinci eklemin konum hata sinyali Şekil 4.28’de verilmiştir.

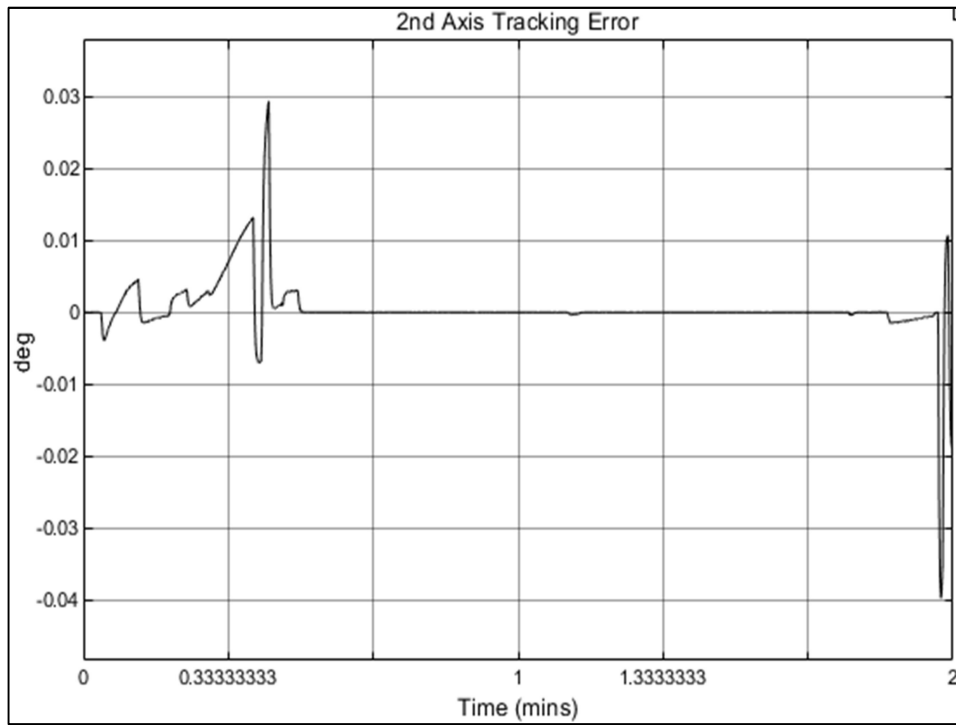


Şekil 4.28. Birinci eklemin konum hata sinyali

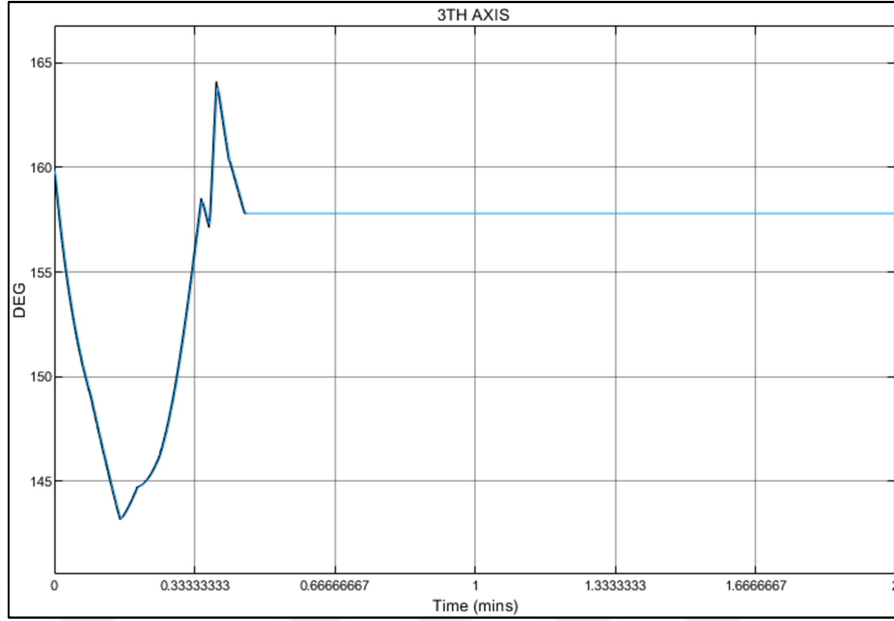


Şekil 4.29. İkinci eklemin konum karşılaştırma sinyali

Şekil 4.29’da ikinci eklemin konum karşılaştırma sinyali verilmektedir. Simülasyon sonucunda istenilen konuma yakın bir konum takibi gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Konum hata sinyali Şekil 4.30’da verilmiştir.

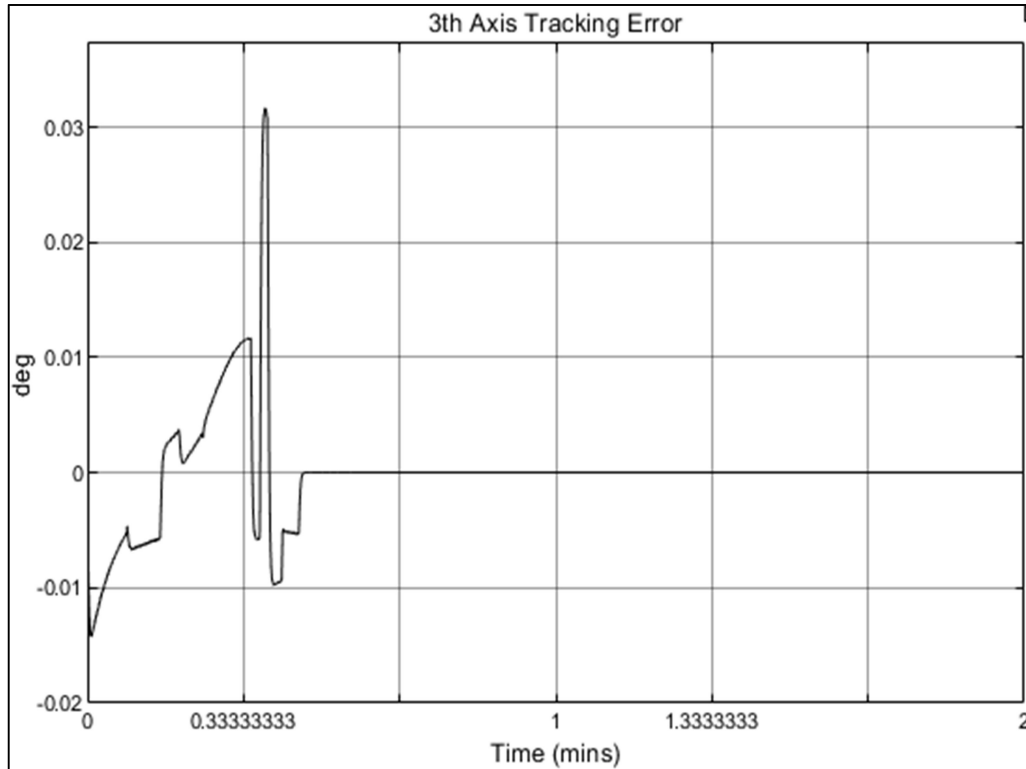


Şekil 4.30. İkinci eklemin konum hata sinyali

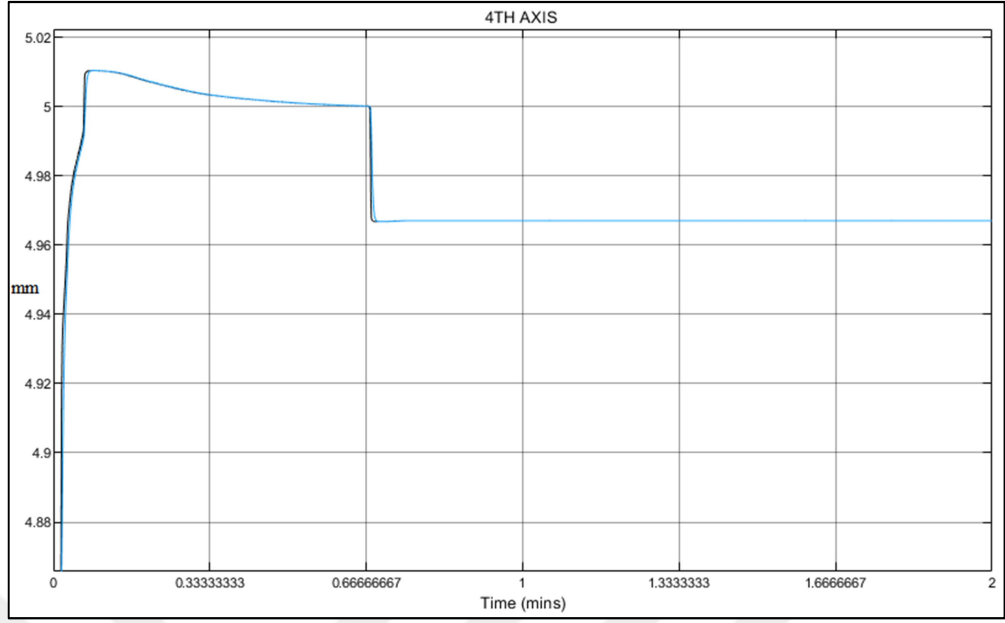


Şekil 4.31.Üçüncü eklem konum karşılaştırma sinyali

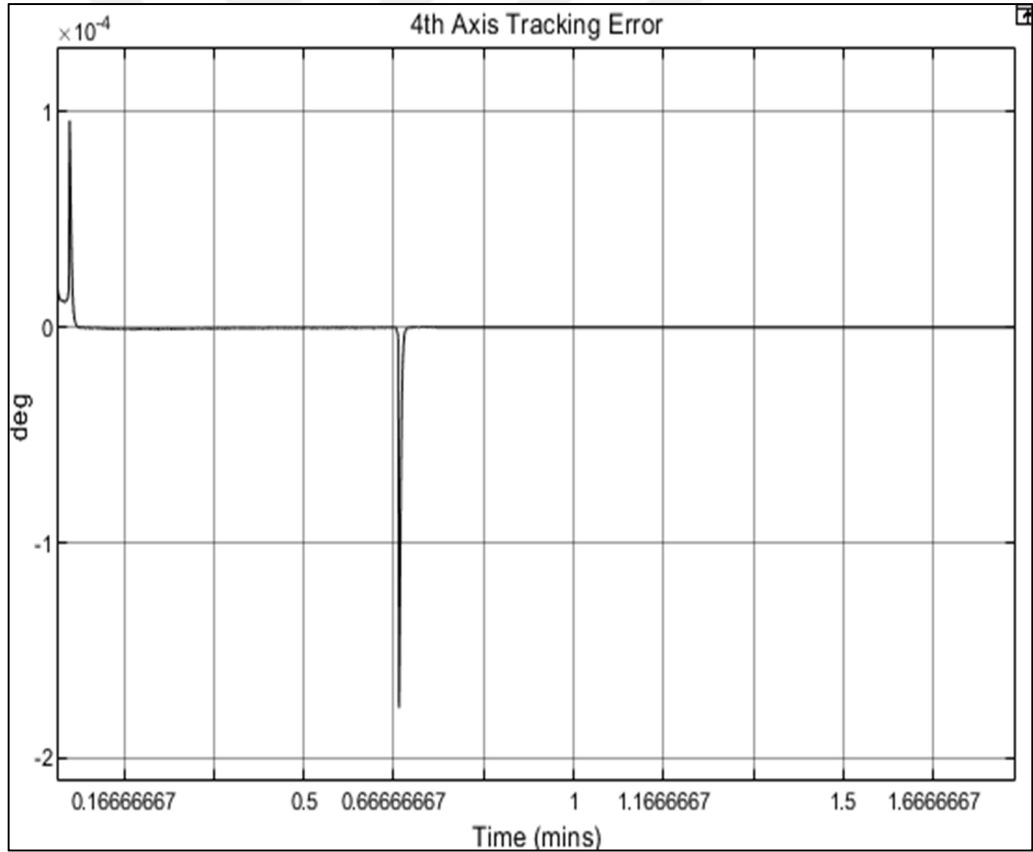
Şekil 4.31’de üçüncü eklem konum karşılaştırma sinyali verilmiştir. İstenilen pozisyon sinyaline çok yakın bir takip sinyali çıkışta gözlemlenmiştir. Karşılaştırma, robottan elde edilen gerçek konum sinyali ile simülasyon sinyali arasında yapılmıştır. Üçüncü eklem konum hata sinyali Şekil 4.32’de belirtilmiştir.



Şekil 4.32. Üçüncü eklem konum hata sinyali

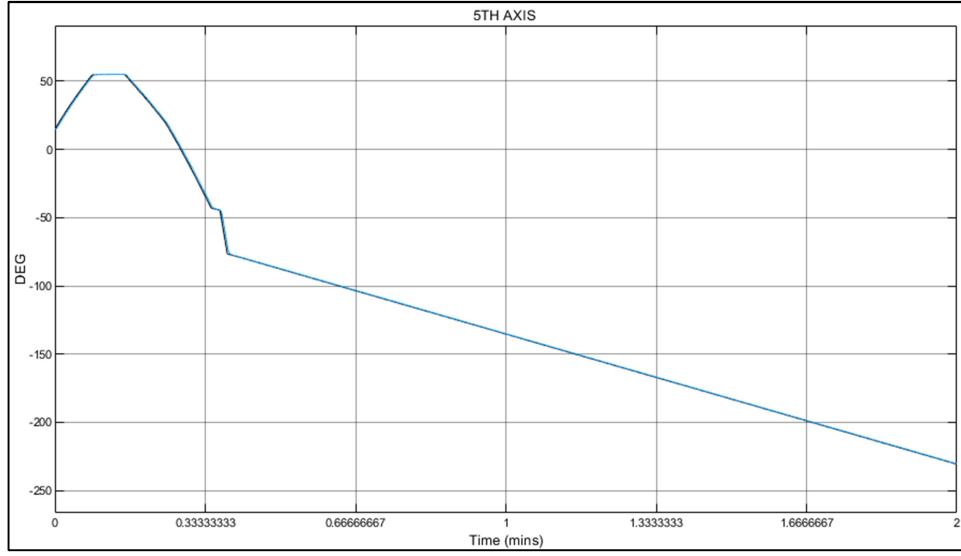


Şekil 4.33. Dördüncü eklemin konum karşılaştırma sinyali

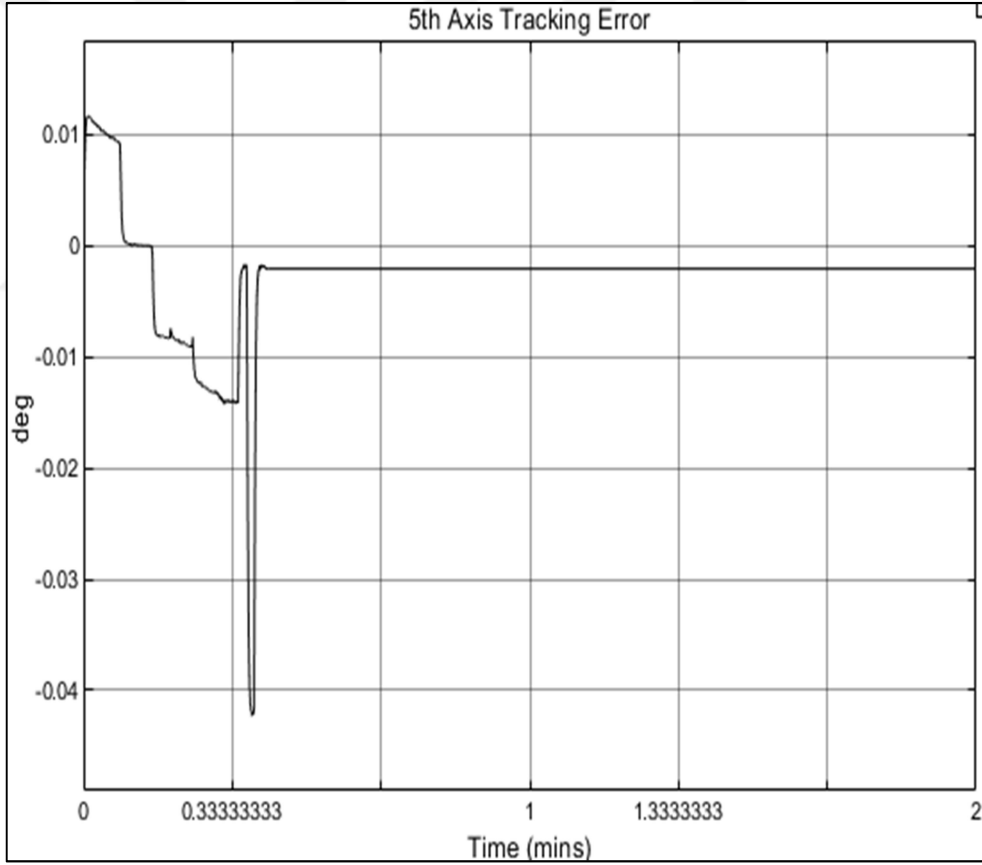


Şekil 4.34. Dördüncü eklemin konum hata sinyali

Şekil 4.34'te dördüncü eklemin konum karşılaştırma sinyali verilmiştir. Karşılaştırma, robottan elde edilen gerçek konum sinyali ile simülasyon sinyali arasında yapılmıştır. Dördüncü eklemin konum hata sinyali Şekil 4.34'te verilmiştir.

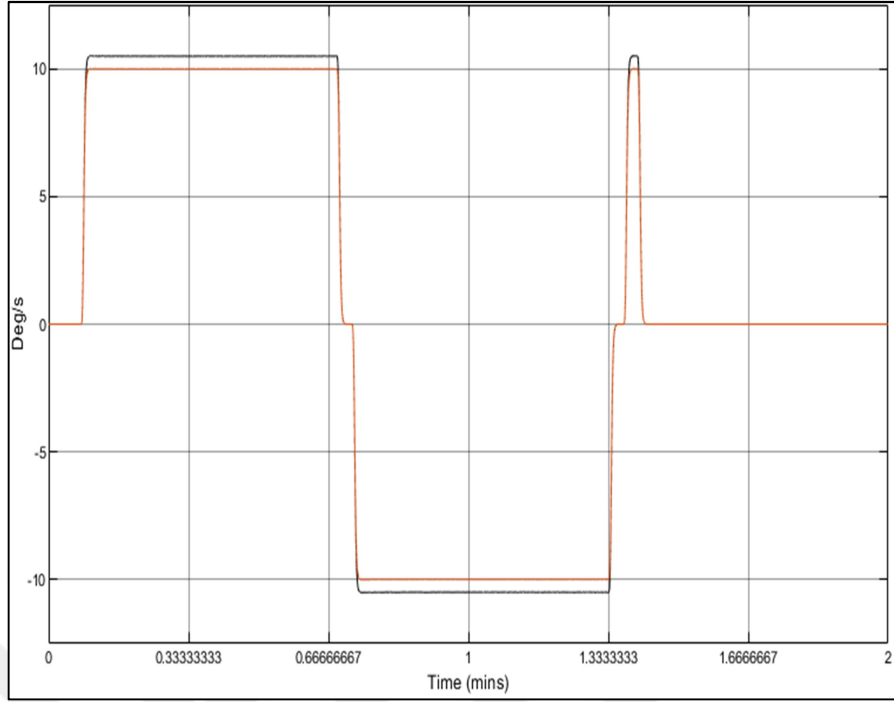


Şekil 4.35. Beşinci eklemin konum karşılaştırma sinyali

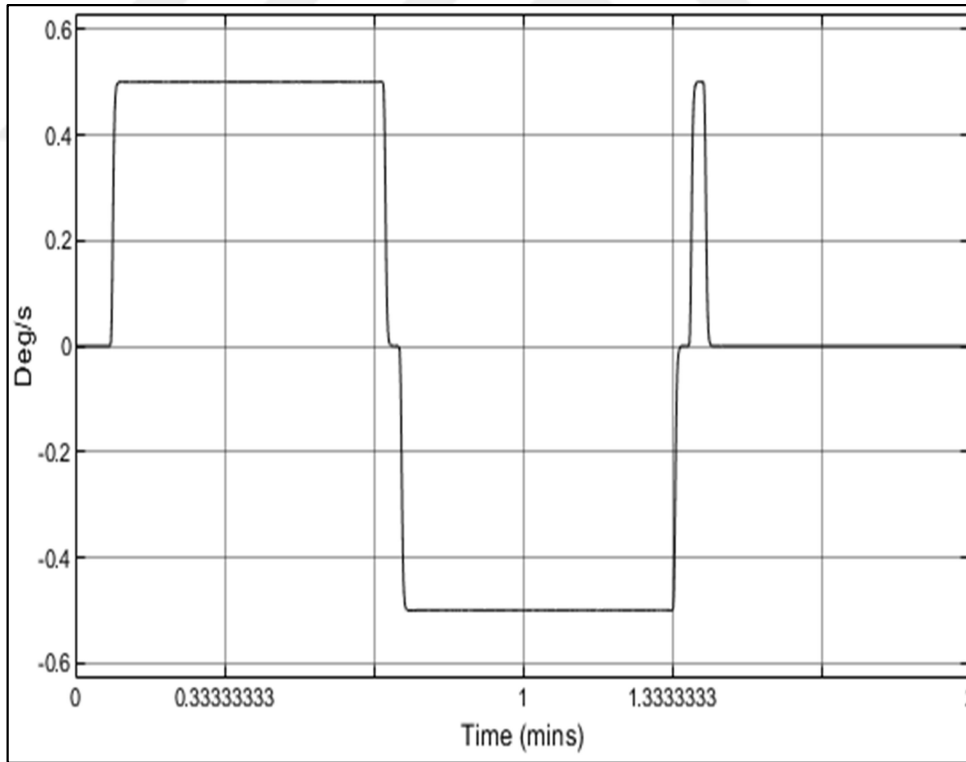


Şekil 4.36. Beşinci eklemin konum hata sinyali

Şekil 4.35'te beşinci eklemin konum karşılaştırma sinyali verilmiştir. Mavi renkli sinyal simülasyondan elde edilmiştir. Siyah renkli sinyal gerçek konum giriş sinyalini takip etmektedir. Beşinci eklemin konum hata sinyali Şekil 4.36'da verilmiştir.

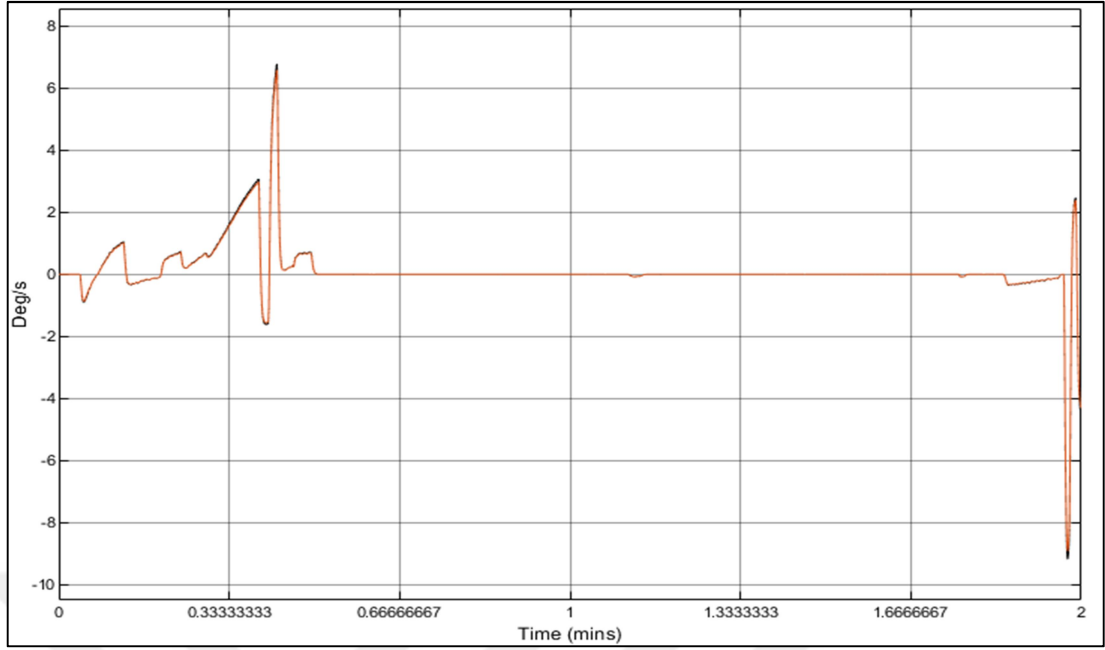


Şekil 4.37. Birinci eklemin hız karşılaştırma sinyali

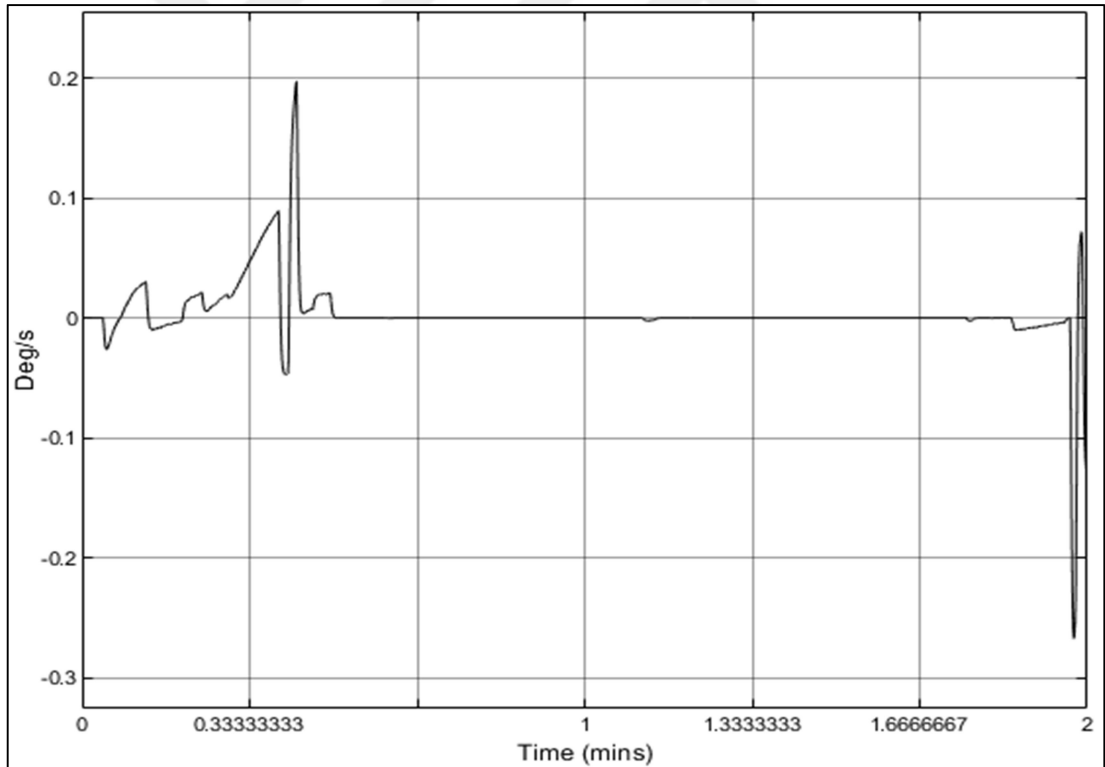


Şekil 4.38. Birinci eklemin hız hata sinyali

Şekil 4.37’de gerçek zamanlı kontrol edilen robot birinci ekleminden elde edilmiş hız sinyali ile simülasyonda elde edilen hız sinyalinin karşılaştırması verilmiştir. Şekil 4.38’de hız birinci eklemin hız hata sinyali verilmiştir.

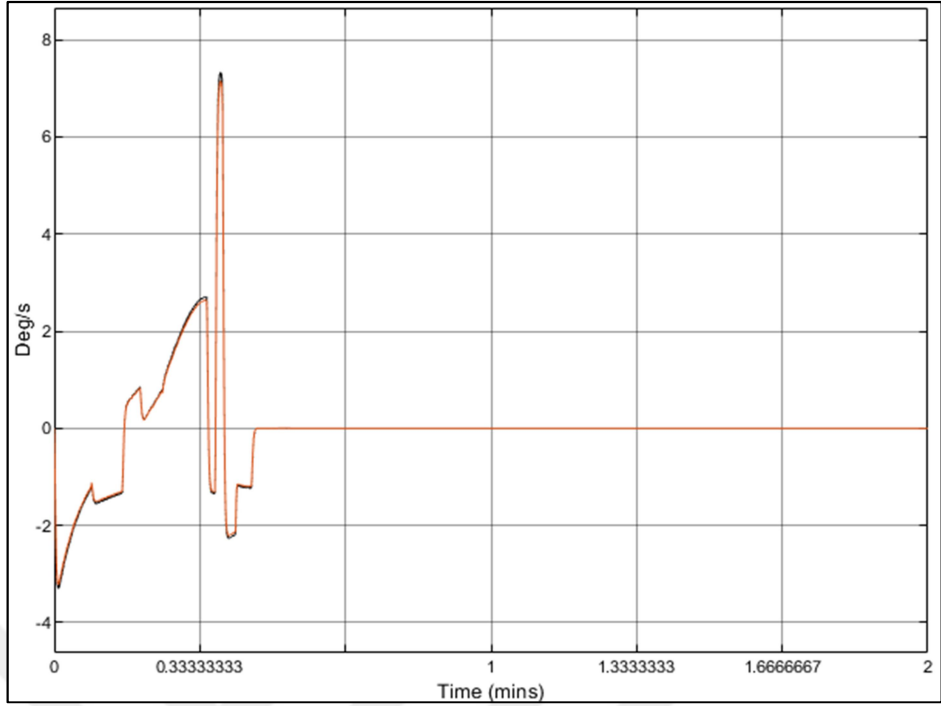


Şekil 4.39. İkinci eklem hız karşılaştırma sinyali

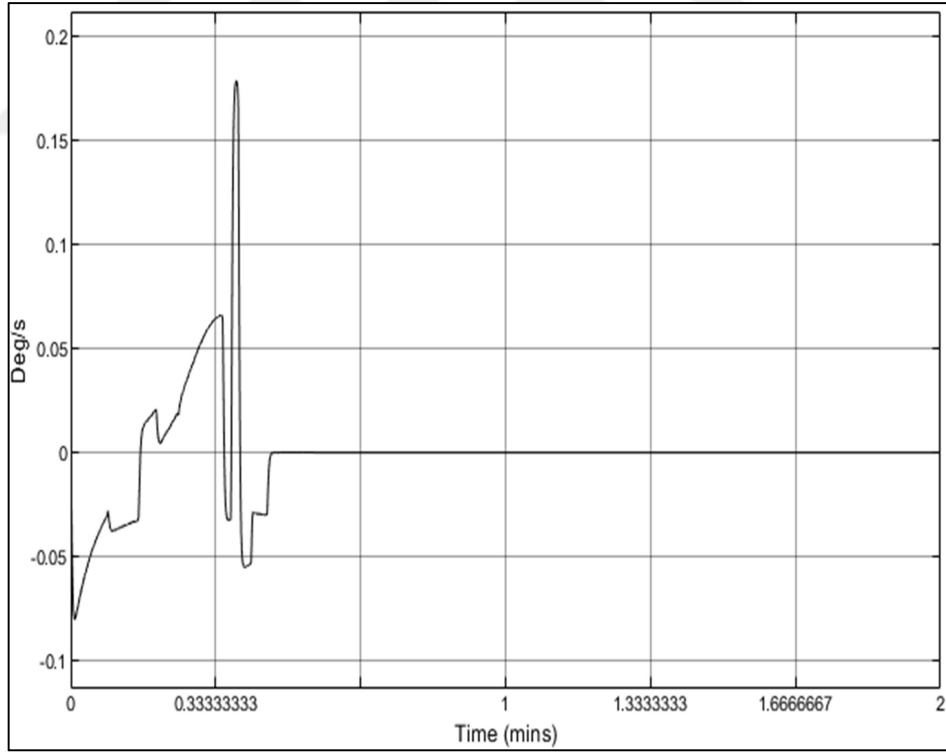


Şekil 4.40. İkinci eklem hız hata sinyali

Şekil 4.39'da ikinci eklem hız karşılaştırma sinyali verimiştir. Karşılaştırma gerçek zamanlı kontrol edilen robot ikinci ekleminden elde edilen hız sinyali ile simülasyondan elde edilen hız sinyali aynı konum senaryosu için karşılaştırılmıştır. İkinci eklem hız hata sinyali Şekil 4.40'da verilmiştir.

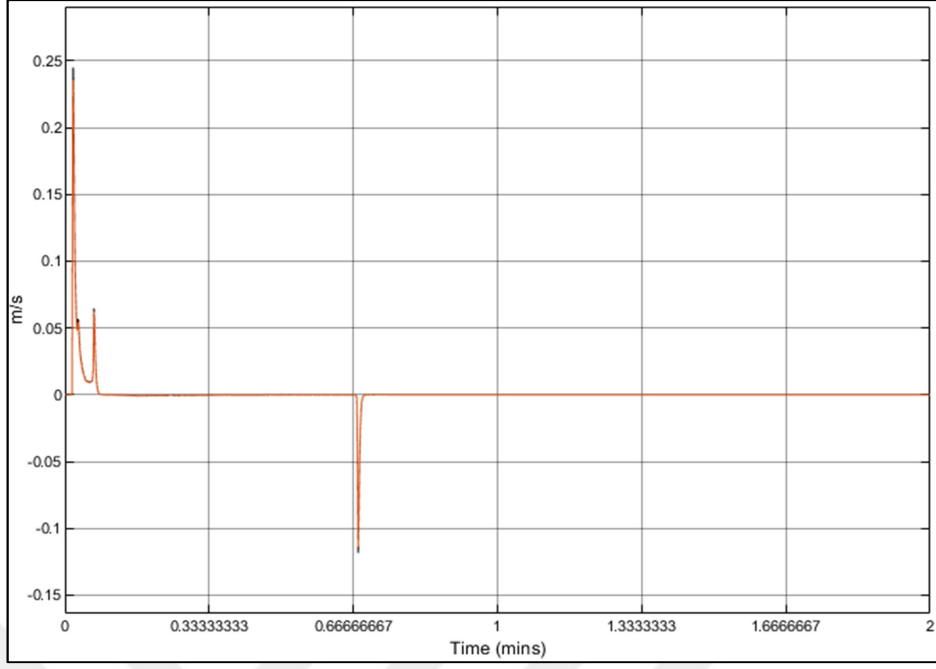


Şekil 4.41. Üçüncü eklem hız karşılaştırma sinyali

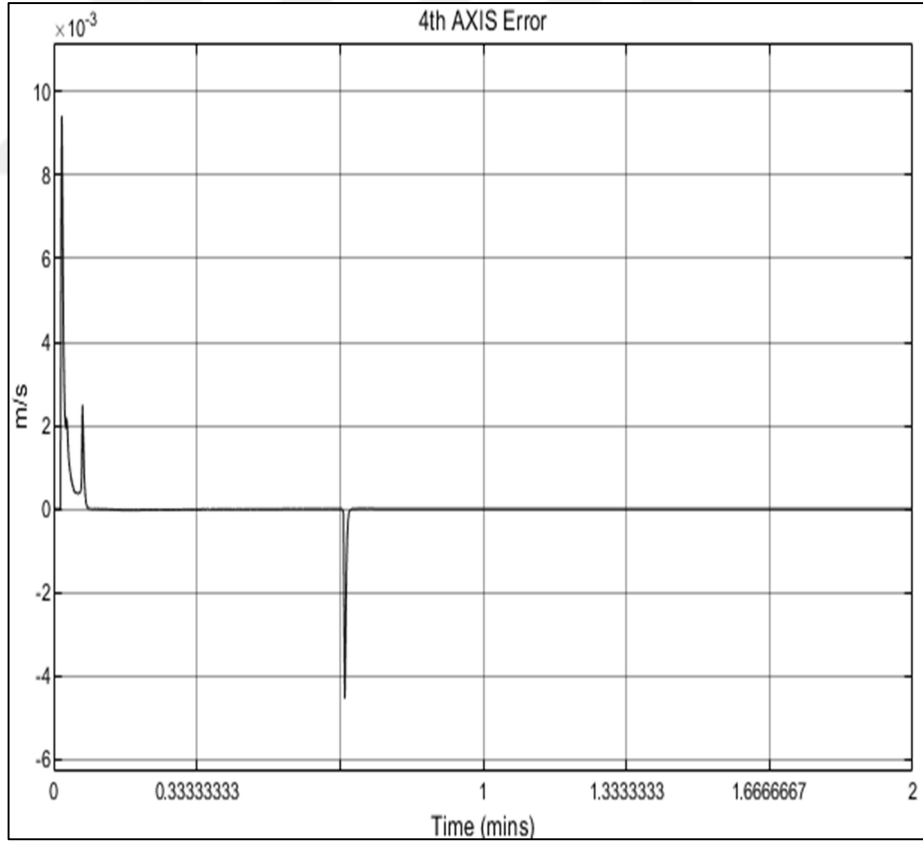


Şekil 4.42. Üçüncü eklem hız hata sinyali

Şekil 4.41'de gerçek zamanda kontrol edilen robot üçüncü ekleminden elde edilen hız sinyali ile simülasyondan elde edilen hız sinyali karşılaştırılması verilmiştir. Üçüncü eklem hız hata sinyali Şekil 4.42'de verilmiştir.



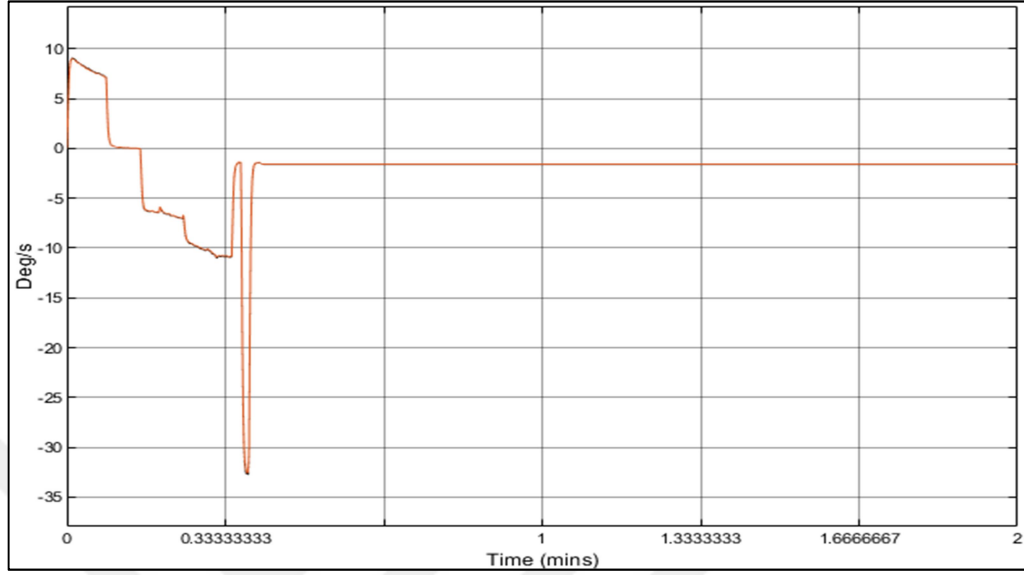
Şekil 4.43. Dördüncü eklemin hız karşılaştırma sinyali



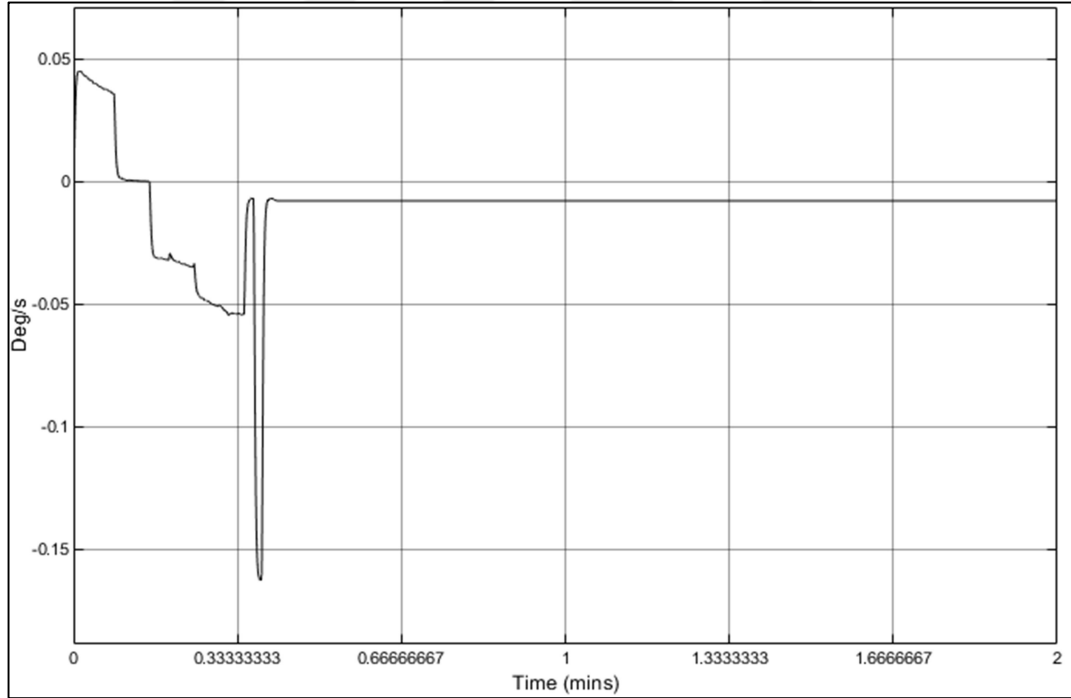
Şekil 4.44. Dördüncü eklemin hız hata sinyali

Şekil 4.43'te dördüncü eklemin hız karşılaştırma sinyali verilmiştir. Gerçek zamanda çalışan robot dördüncü ekleminden elde edilen hız sinyali ile simülasyondan elde

edilen hız sinyali karşılaştırılmıştır. Şekil 4.44'te dördüncü eklemin hızhata sinyali verilmiştir.

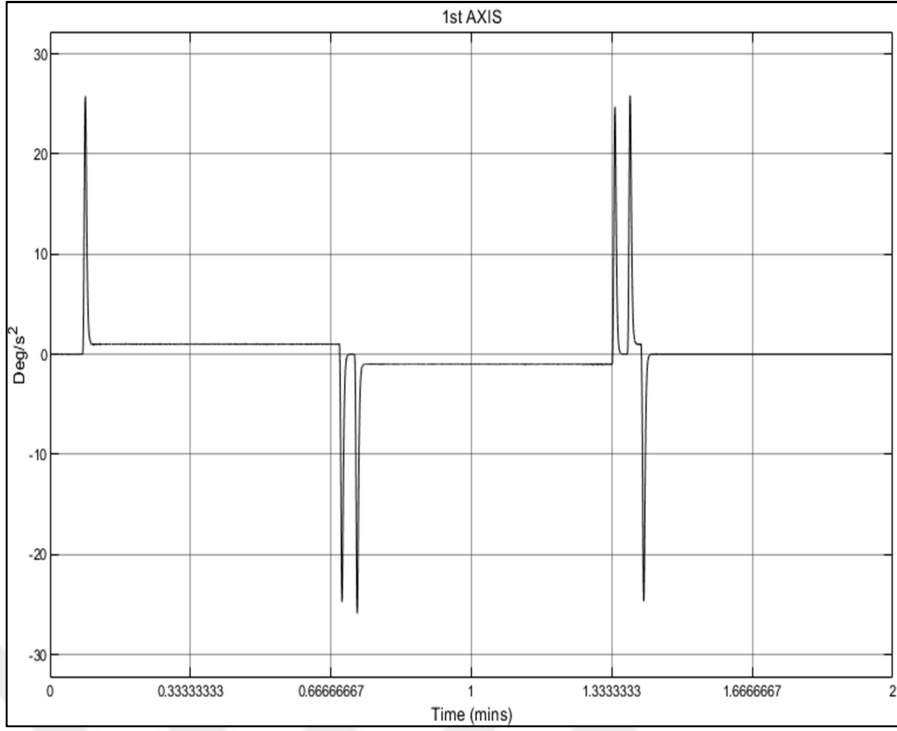


Şekil 4.45. Beşinci eklemin hız karşılaştırma sinyali

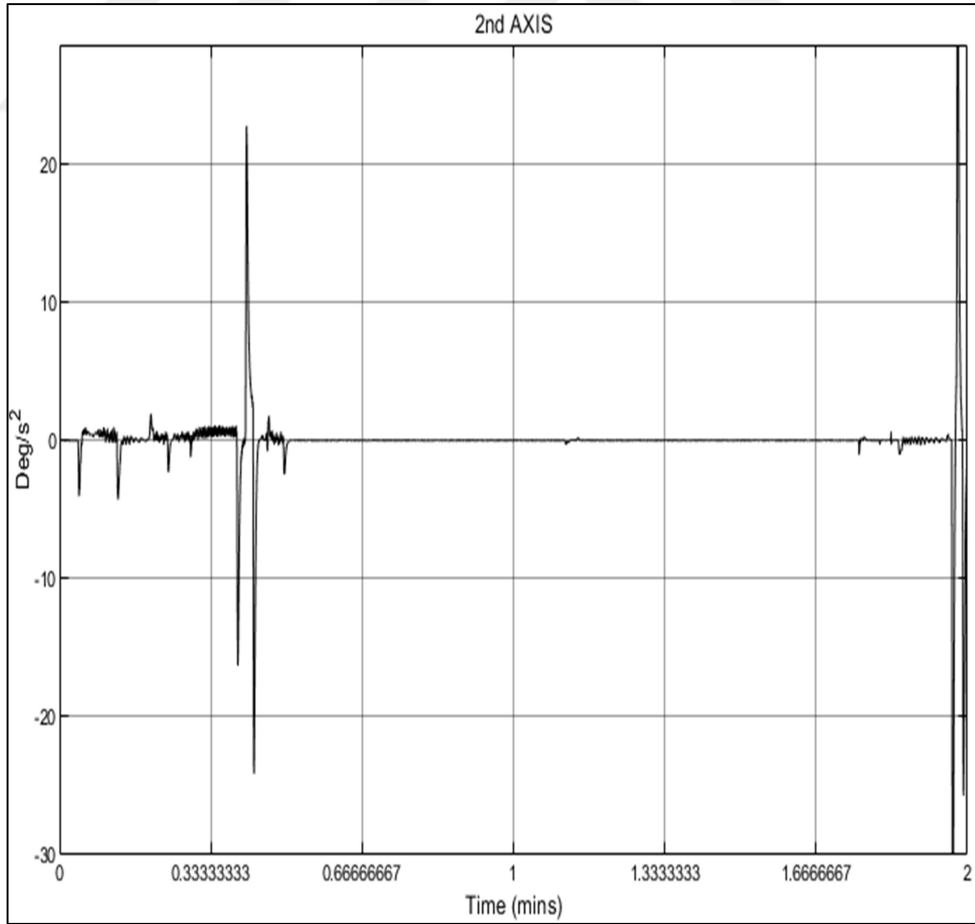


Şekil 4.46. Beşinci eklemin hız hata sinyali

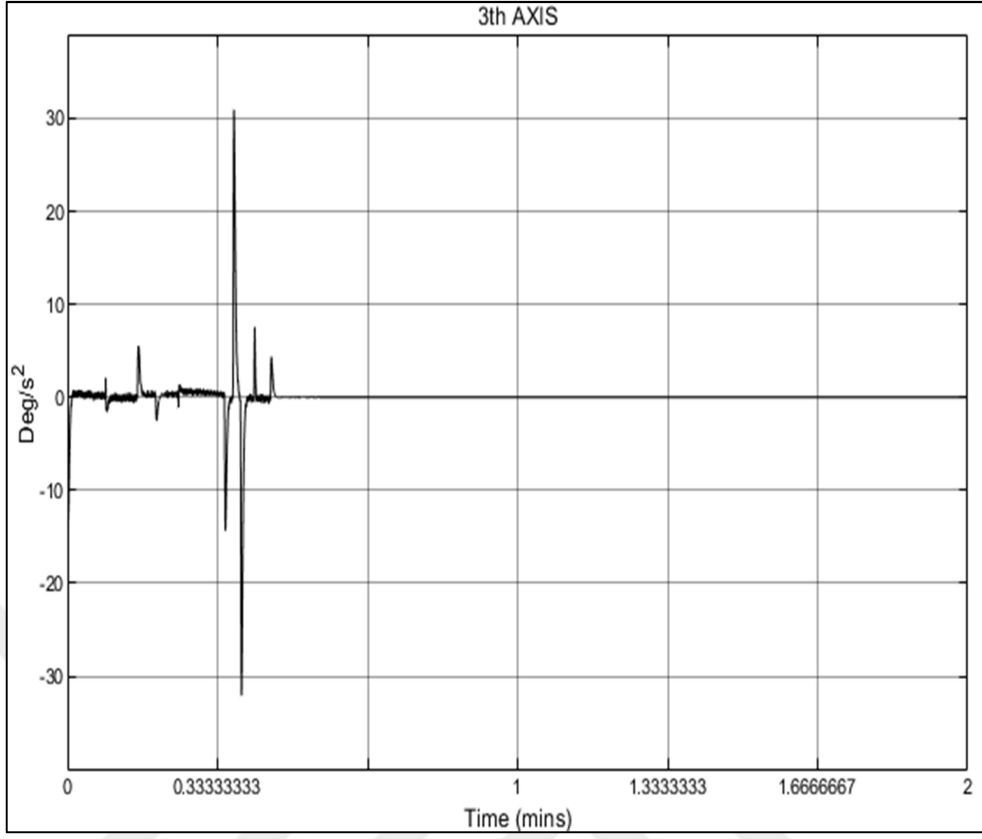
Şekil 4.45'te beşinci eklemin hız karşılaştırma sinyali verilmiştir. Gerçek zamanda kontrol edilen robotun beşinci ekleminde elde edilen gerçek hız sinyali ile simülasyonda elde edilen beşinci eklemin hız sinyali karşılaştırılmıştır. Hız hata sinyali Şekil 4.46'da verilmiştir.



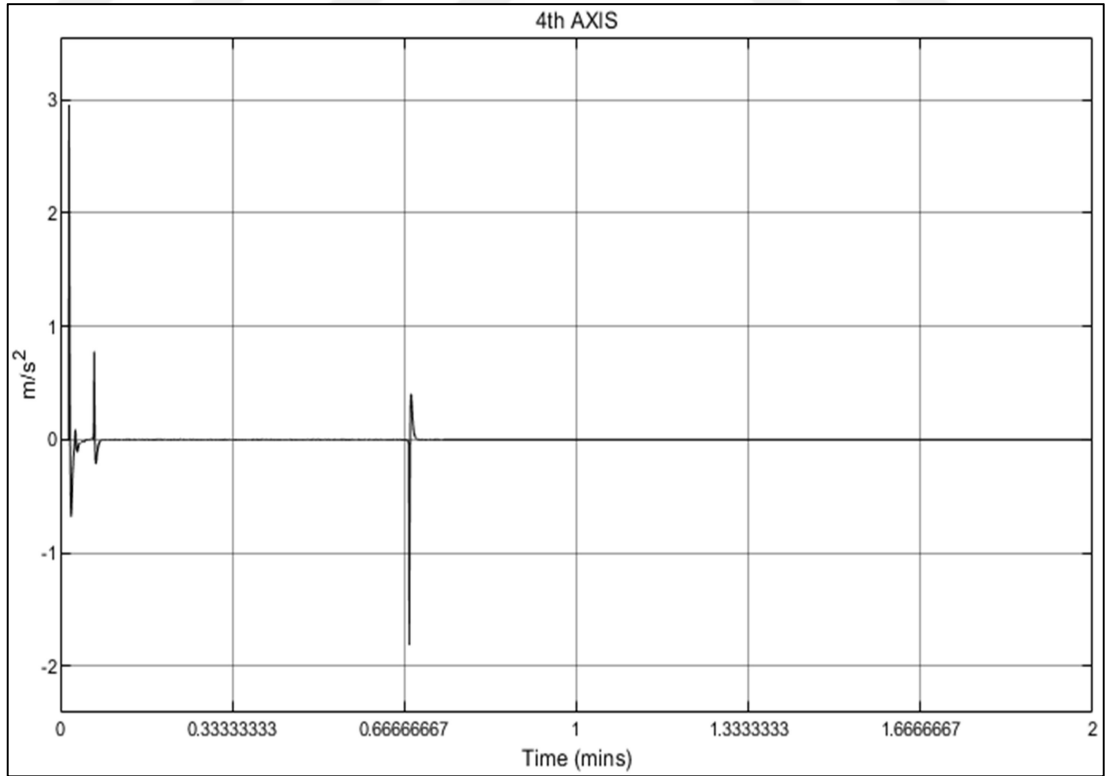
Şekil 4.47. Birinci eklemin ivme sinyali



Şekil 4.48. İkinci eklemin ivme sinyali

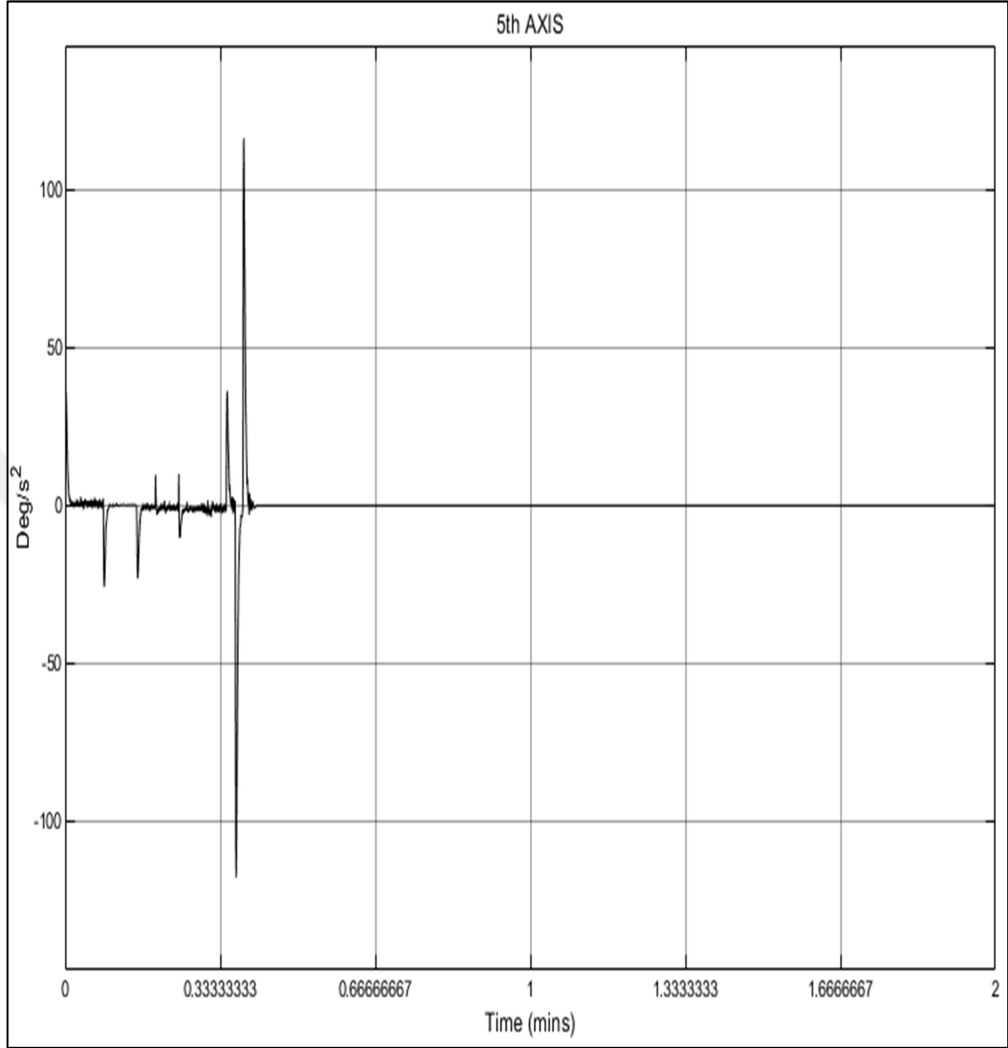


Şekil 4.49. Üçüncü eklemin ivme sinyali



Şekil 4.50. Dördüncü eklemin ivme sinyali

Şekil 4.50’de simülasyondan elde edilen dördüncü ekleme ait ivme sinyali verilmiştir.



Şekil 4.51. Beşinci eklemin ivme sinyali

Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49, Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de eklemlere ait simülasyondan elde edilen ivme sinyalleri verilmiştir.

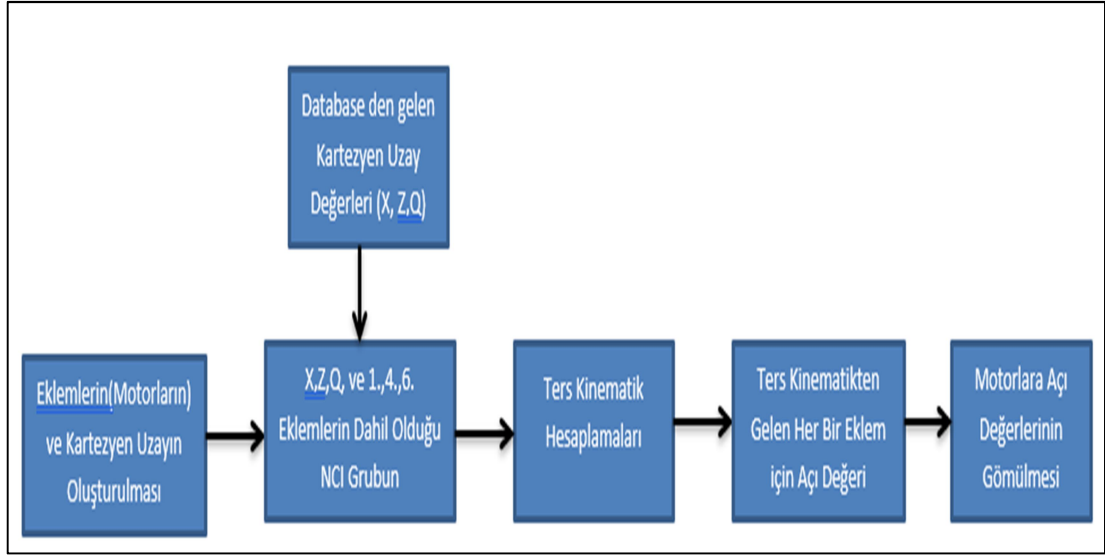
5. ROBOT GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ

Eklemlili robotun gerçek zamanlı pozisyon kontrolü için twincat 3 platformunda hareket kontrol algoritması yazılımı gerçekleştirilmiştir. Robot gerçek zamanlı pozisyon kontrolü ters kinematik hesaplamalarıyla 2. 3. ve 5. Eklemlerinin açılarının hesaplanması ve diğer kalan bilinen pozisyon eklemlerinin pozisyonlarının motorlara referans pozisyon olarak iletilmesiyle motorlarda gerçekleştirilen i içe oluşturulmuş PID kontrolcü ile hesaplanan tork kontrol yöntemiyle gerçekleştirilmiştir [19-25].

Ters kinematik pozisyon kontrolünde 3 eklemlili düzlemsel bir seri robotun ters kinematik geometrik çözümlü eklemlere ait istenilen referans pozisyonların hesaplanması için bir fonksiyon oluşturularak yazılımda uygulanmıştır. Twincat 3 platformu NCI adı verilen numeric kontrol interpolasyonu alt yapısına sahiptir. Bu platform sayesinde çok eklemlili sistemler senkronize bir şekilde hareket ettirilebilmekte ve içerisinde bulunan G Code editörü vasıtasıyla ters kinematikle çözümlü üretilen pozisyonlarda yörünge takibi yapılabilmektedir. Servo motorların pozisyon kontrolü için sürücü bünyesinde bulunan PID tabanlı gerçek zamanlı kontrolörler motorların kontrolünü gerçekleştirmektedir. Ayrıca operatörlerin kullanımını için kullanıcı arayüzü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı robot kontrolünde yazılımsal olarak tasarımılanan çalışmalar ve metodları;

- Motorların ters kinematik çözümlüyle kontrol edildiği kontrolcü yazılımı
- C# tabanlı kullanıcı ara yüz
- Kullanıcı ara yüzde gösterilen gerçek zamanlı robot simülasyonu
- Kalıp konum yörünge planlama reçete veri tabanı sistemi
- Programlar arası veri haberleşmesi oluşturulmuştur
- Uygulama sırasında gözlem amaçlı makinada gerçekleşen olay mesaj tablosu oluşturulması

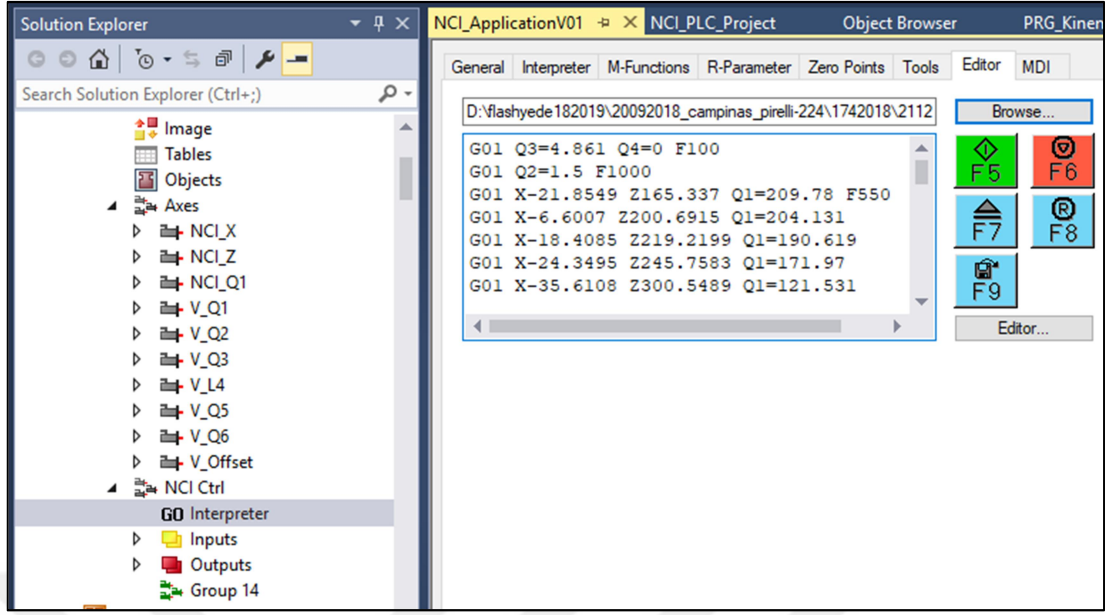
Hareket kontrol algoritmalarının oluşturulması için şematik olarak akış oluşturulmuştur. Bu akış şekil 6.1'da gösterilmiştir.



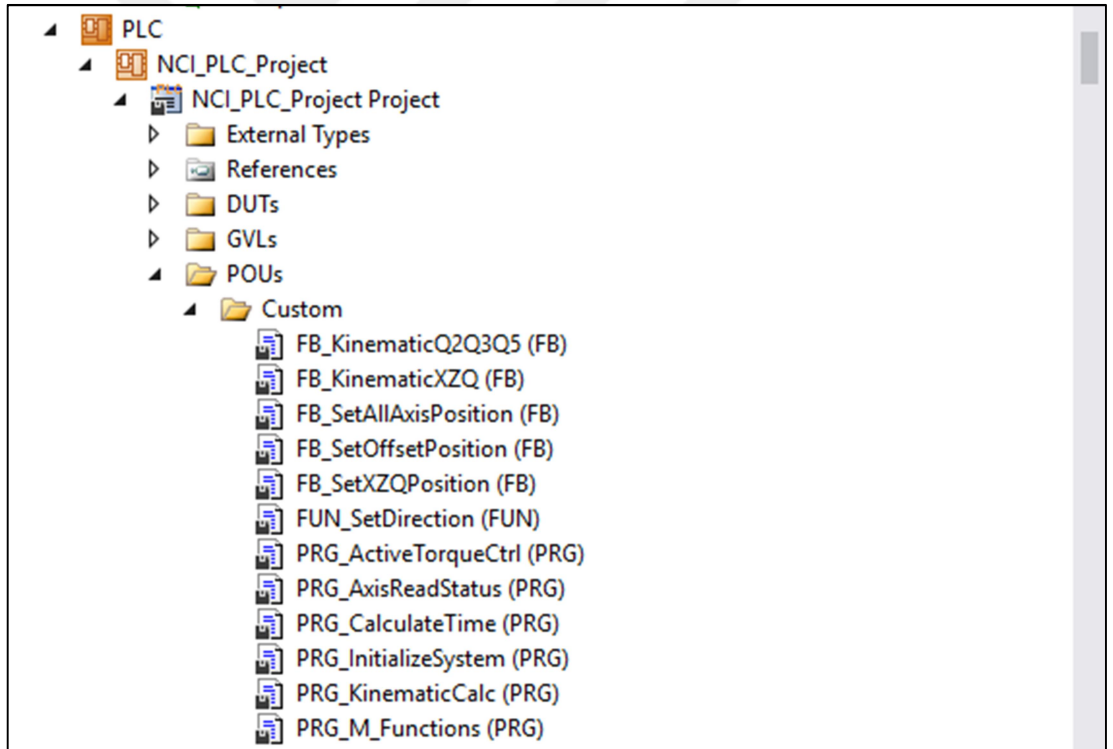
Şekil 5.1. Hareket kontrolü için akış şeması

Şekil 5.1’de verilen akış şemasına göre bir önceki bölümde incelenen kinematik analizdeki hesaplamalar kontrolcü programında fonksiyon olarak yazılarak ters kinematik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikle robot için kartezyen uzayın oluşturulması oluşturulan kartezyen uzay reçete sisteminden gelen verilerle birleştirilerek ikinci kartezyen uzay uç işlevci konum ve yönelim verileri oluşturulmuştur. Bu ikinci kartezyen uzay verileri ters kinematik fonksiyonuna girerek 2. 3. ve 5. eklem açı değişkenleri hesaplanır.

Hesaplanan açılar ve bilinen açılar (1.4. ve 6.Eklem) kontrolcü yazılımında NCI grup oluşturur ve motorların birlikte hareketi sağlar. Motorların ters kinematik kontrolle uç işlevci konum ve yönelim yörünge planlaması G01 lineer interpolasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanıcı ara yüzünde oluşturulan reçete ile kartezyen uzayda oluşturulan değerler her bir nokta için tanımlanır ve tanımlanan değerler otomatik olarak G kodu yörünge haritasına dönüştürülerek kontrolcü programın sayısal kontrol interpolasyonu derleyicisine aktarılmıştır. Aktarılan son uç işlevci konum ve yönelim değerleri ters kinematik hesabına tekrar girerek motorlar için istenilen konum değerleri elde edilir ve motorların pozisyon kontrolcüsüne iletilerek daha önceden yine reçeten alınan hız bilgileri ile birlikte istenilen hızda kontrolcüye iletilerek motor kontrolcüsü motorları kontrol etmektedir. Twincat 3 platformunda gerçekleştirilen hareket kontrol yazılımı ve G kodu editörü Şekil 5.2.’de belirtilmiştir.



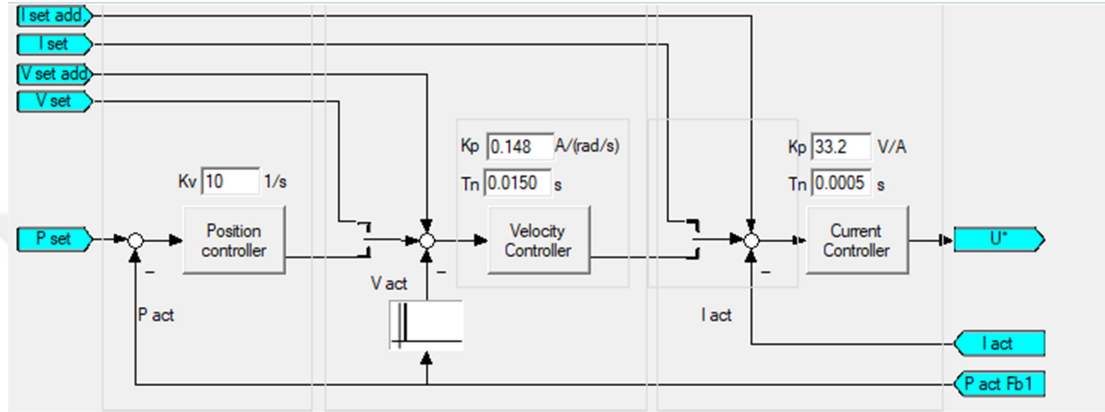
Şekil 5.2. Twincat 3 tabanlı robot kontrol yazılımı ve G kod editörü



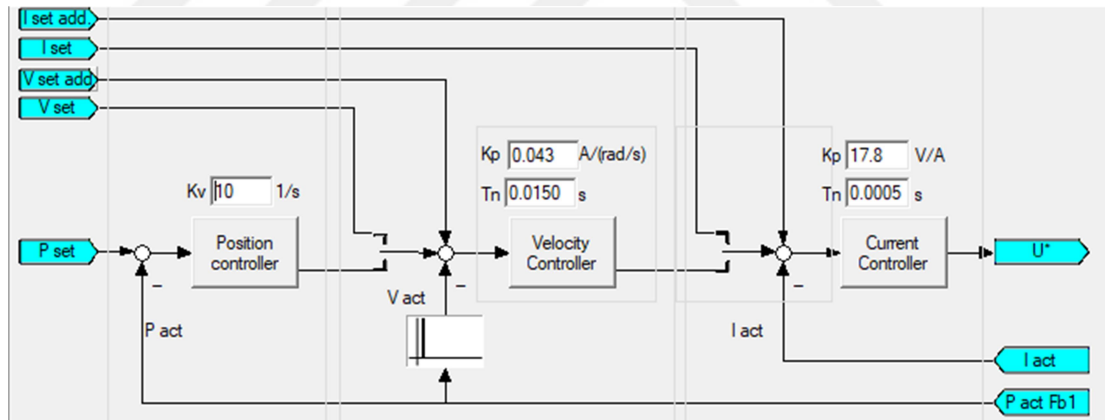
Şekil 5.3. Hareket kontrol fonksiyon yazılımı

Şekil 5.3'te görüldüğü üzere ters kinematik hesaplamaları fonksiyon olarak yazılmış ve gerek zamanlı koşturulmuştur. Ayrıca kontrol yazılımında sayısal kontrol interpolasyonu için eklem grubu oluşturulmuş, EtherCAT haberleşmesi ile sürücüyeye bağlı motor otomatik olarak sürücü tarafından yazılıma aktarılmıştır.

Eklenen motorlar üzerinde kontrol şekli ve geribesleme sistemi hız, konum ve akım kontrolü için PID parametreleri gerçek zamanlı motor kontrolcüsü üzerinde optimize edilmiştir. İlk üç eklem motorlarında kullanılan motorlar aynı olup kontrolcü parametreleri ve gerçek zamanlı motor kontrolcüsü Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Dördüncü, beşinci ve altıncı ekleme ait gerçek zamanlı motor kontrolcüsü Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.4. 1-3. Eklem gerçek zamanlı hareket kontrolcüsü



Şekil 5.5. 4-6. Eklem gerçek zamanlı hareket kontrolcüsü

PID kontrol yöntemi kısaltma olarak oransal, integral ve türev olarak üç kısımdan oluşan bir doğrusal kontrol yöntemidir. Bu yöntem uygulamamızda motorun verilen konum, hız ve akım değerlerine, iç içe tasarlanmış PID kontrolcüsü ile hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Kullanıcı için kullanıcı ara yüzü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ara yüz reçeteden gelen verileri işleyerek G kod konum ve yönelim yörünge planı oluşturur ve oluşturulan G kod yörünge planı twincat yazılımı içerisinde bulunan NCI editöre gönderilir. NCI

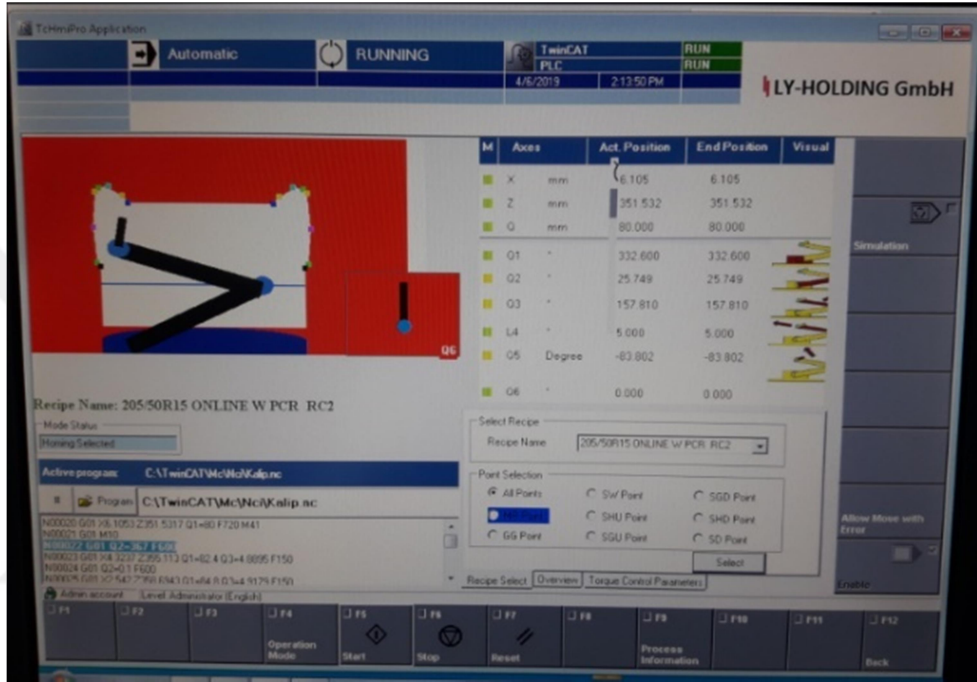
editör yörünge planı olarak algılayıp robot ters kinematik kontrolü koşturur. Kullanıcı ara yüzü temelde reçete sayfasını, gerçek zamanlı kinematik simülasyonu ve kullanım seçeneklerini içermektedir. Kullanıcı ara yüzde bulunan gerçek zamanlı simülasyon tasarımı reçeteden gelen kalıp kesitlerinin boyutlarının ölçeklenmesi ve robot uzuv boylarının ölçeklenerek ters kinematik kontrolüne görsel olarak bağlanmasıyla elde edilmiştir. Her bir ekleme o ekleme bağlanmış motorun anlık hareketinin verileri alınarak simülasyon için fonksiyona aktarılmıştır. Oluşturulan her bir kalıp reçetesi için toplam çalışma zamanı robotun birinci ekleminin dönme hızına göre hesaplanarak reçeteler için temizlik çalışma zamanı oluşturulmuştur. Kullanım seçenekleri elle eklem eklem kontrolü, robot başlangıç konumu ve otomatik konumdur. Şekil 5.6’da kullanıcı ara yüzü akış şeması verilmiştir.



Şekil 5.6. Temel kullanıcı ara yüzü akış şeması

Eklem elle kontrol seçeneğinde robotun her bir eklemi elle kontrol edilebilmektedir. Otomatik konum seçeneğinde ise ters kinematik kontrol ve sayısal kontrol

interpolasyonu devreye girerek otomatik konum kontrolü gerçekleştirilmektedir. Kullanıcı motorlara enerji verebilmesi ve robotu çalışmaya hazır hale getirebilmesi için bir buton ekrana koyulmuştur. Kullanıcı butona bastığında motorlara enerjinin verildiğinin anlaşılması için ekrandaki her eklem yanına renk değişimi koyulmuştur. Olası arıza durumunda renkler kırmızıya dönüşerek görsel olarak arıza durumu kullanıcıya iletilmiştir. Kullanıcı ara yüzü Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7. Kullanıcı ara yüzü

Şekil 5.7’de verilen kullanıcı ara yüzünde robotun kartezyen uzaydaki konumu ve yönelimi, gerçek zamanlı robot hareket simülasyonu, kalıbın kesit resmi ve yörünge planlamasında kullanılan G kodlar görülmektedir. Ara yüzde birinci eklemün dönme hareketi olmadan sadece kesitin yörünge planlamasının düzlemsel uzayda testleri için simülasyon seçeneği oluşturulmuştur. Bu sayede her kalıp için robotun uzuvlarının çarpma risklerine karşı oluşturulan kalıp yörüngeleri hızlı bir şekilde takip edilebilmektedir.

5.1. Reçete Sistemi Oluşturulması

Her bir kalıp kesit ölçüsünün temizlik işleminin gerçekleştirilebilmesi için arayüz programında reçete veri sistemi oluşturulmuştur. Parametreler kalıba göre ayarlanarak temizlik işleminin en yüksek kalitede gerçekleştirilmesi için robota

konum yörünge planı hazırlanmıştır. Reçete veri tabosu Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

li	Tire_Description	MR Radius	MR Height	MR Angle	GG Radius	GG Height	GG Angle	SW Radius
1	175/65R14 ONLINE W PCR RC1 YAPILDI	177	205	78	197	217	95	232
2	215/45R18 ONLINE S PCR RC3 YAPILDI	228	259	78	247	268	95	266
3	155/65R14 ONLINE W PCR RC1 YAPILDI	177	196	78	197	205	95	226
4	185/55R14 ONLINE W PCR RC1 YAPILDI	177	211	78	197	223	95	227
5	255/40R18 ONLINE W PCR RC4 YAPILDI	228	306	78	247	318	95	274
6	255/45R18 ONLINE W PCR RC4 YAPILDI	228	306	78	247	321	95	277
7	195/65R14 ONLINE W PCR RC2 YAPILDI	177	229	78	197	238	95	233
8	255/45R18 ONLINE W PCR RC5 YAPILDI	228	289	78	247	304	95	277
9	205/50R15 ONLINE W PCR RC2 YAPILDI	190	216	78	206	234	95	243
10	195/65R15 ONLINE W PCR RC2 YAPILDI	190	219	78	211	238	95	245
11	175/55R15 ONLINE W PCR RC1 yapildi	190	199	78	206	214	95	236
12	195/70R15 ONLINE W PCR RC2 yapildi	190	229	78	211	241	95	250
13	215/70R15 ONLINE W PCR RC3 yapildi	190	241	78	211	256	95	259
14	185/55R15 ONLINE W PCR RC2 yapildi	190	223	78	206	232	95	239
15	195/55R15 ONLINE W PCR RC2 yapildi	190	223	78	206	238	95	242
16	195/50R15 ONLINE W PCR RC2 yapildi	190	226	78	206	238	95	241
17	195/50R15 ONLINE W PCR RC1 yapildi	190	214	78	211	227	95	241
18	185/65R15 ONLINE W PCR RC2 yapildi	190	217	78	211	232	95	249
19	175/65R15 ONLINE W PCR RC2 yapildi	190	211	78	211	226	95	240
20	215/55R16 ONLINE S PCR RC3 yapildi	203	250	78	219	262	95	254
21	205/65R16 ONLINE W PCR RC2 YAPILDI	203	225	78	223	241	95	262
22	225/65R16 ONLINE S PCR RC3 YAPILDI	203	250	78	219	265	95	257

Şekil 5.8. Kalıp reçetelerinin veri tablosu

Kalıp reçete veri sayfasında bulunan sütunlarda tanımlanan parametreler sütun numaraları ile yazılımda içeriğindeki değerler okunarak yörünge verilerinin oluşturulması için hesap fonksiyonu içine yazılır. Kalıp reçetesi 7 farklı bölgeye ayrılmaktadır. Bu bölgeler kalıbın yanak kısmında 3, segment kısmında 4 adettir. Bu bölge başlangıç kesişim noktalarının yatay ve düşey koordinat konum bilgileri kesit resimde bölgeye karşılık gelen noktadan ölçülerek veri sayfasına girilir. Ayrıca robotun püskürtme nozulunun çalışma yüzeyine yaklaşma mesafesi de girilerek ikincil pozisyonlar oluşturulur. Eğer dördüncü eklem uzama miktarı veri sayfasına mm cinsinden girildi ise uzama miktarı uzuv boyu değişimine neden olacağı için ikinci konum hesabına tekrar dahil edilir. İkinci konumlar ve yönelimler yeni kartezyen uzayına karşılık gelmektedir.

- Kalıp kesitine göre belirlenen koordinatların yükseklik ve genişlik değerleri
- Noktaya göre manual robotun hareket ettirilerek oluşturulmuş yönelim açıları
- Hız
- Püskürtme mesafesi
- 4. Eklem uzama miktarı
- 1. Eklem dönme turu sayısı
- 6.eklem kullanım seçeneği
- Bölgeler arası konum ve yönelim değişim mesafesi parametrelerinden oluşmaktadır.

Parametrelerin en uygun değerlerinin bulunması deneysel yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Her bir bölge başlangıç noktası kendisinin bitiş noktası ile arasında doğru oluşturmaktadır[28-32]. Doğru boyunca belirlenen adım aralığı kadar ara noktalar otomatik olarak oluşturularak robotun doğru boyunca iki ana nokta arası yönelim açısı farkının aradaki toplam nokta sayısına bölünmesiyle elde edilen açı farkıyla her bir noktaya yönelimi takip eder. Belirlenen ara nokta sayısı kadar konum değişimi ve doğru boyunca robot uç işlevcisi nozul yaklaşma mesafesini koruyarak konum yörünge takibini gerçekleştirmektedir. Bu sayede kalıbın şekline yakın bir yörünge kesiti elde edilmektedir. Ara noktaların oluşturulması ve yörünge boyunca takibin gerçekleşebilmesi için gerçekleştirilen hesaplama x_d ana noktalar arası fark x_2 ve x_1 doğru üzerindeki başlangıç ve bitiş x eksenindeki konumu temsil eder. y_d Y ekseninde doğru üzerindeki y eksenindeki konuların farkını, y_2 ve y_1 doğru üzerindeki y eksenindeki konuları ifade etmektedir. θ_d oluşan doğrunun başlangıç ve bitiş noktası yönelimlerinin farkını ve θ_{da} ara noktalardaki açı farkını temsil etmektedir. Yörünge ara nokta hesaplaması Denklem 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7'de verilmiştir.

$$x_d = x_2 - x_1 \quad (5.1)$$

$$y_d = y_2 - y_1 \quad (5.2)$$

$$\theta_d = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (5.3)$$

$$\theta_{id} = \tan^{-1}\left(\frac{y_d}{x_d}\right) \quad (5.4)$$

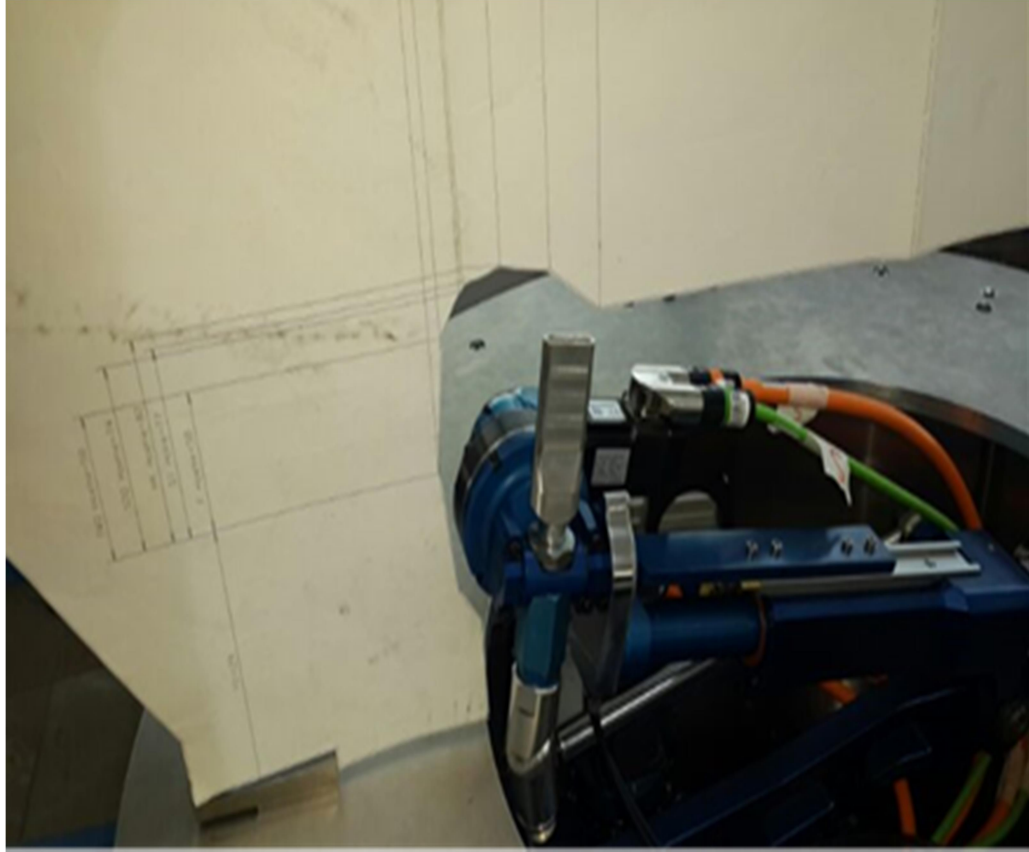
$$l = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (5.5)$$

$$\text{adım sayısı} = \frac{l}{\text{adım mesafesi}} \quad (5.6)$$

$$\theta_{da} = \frac{\theta_d}{\text{adım sayısı}} \quad (5.7)$$

6. SİSTEMİN TEST EDİLMESİ

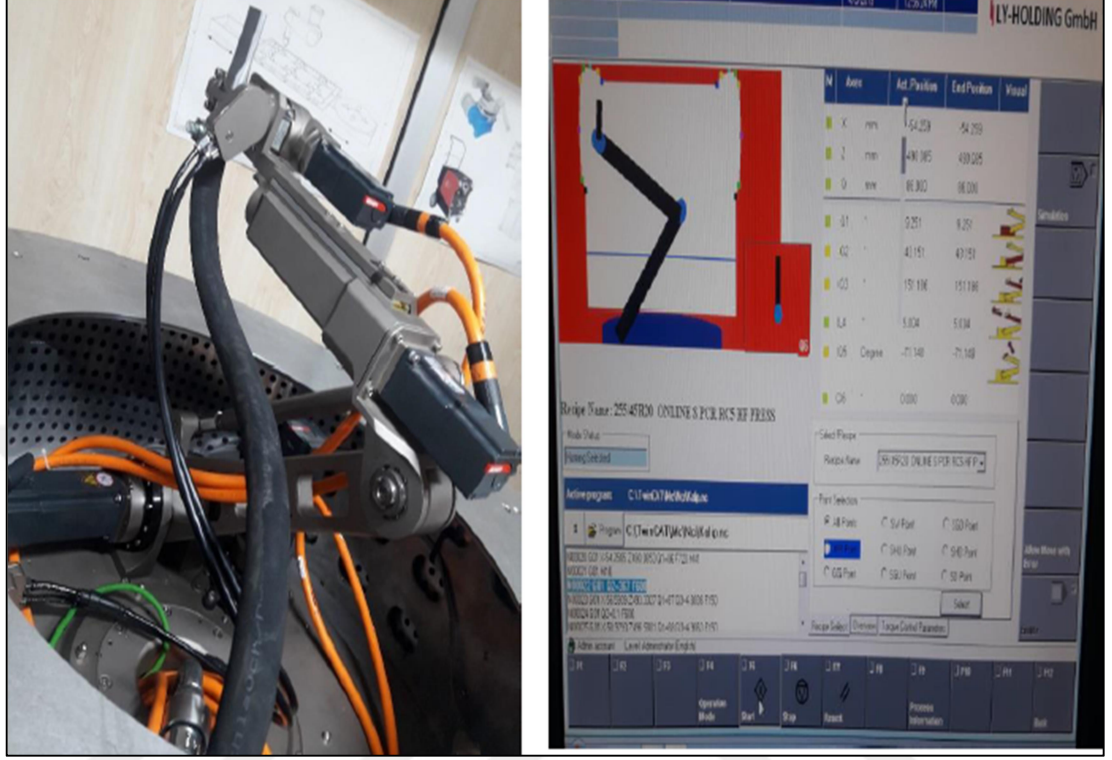
Tasarımı, imalatı ve kontrol yazılımı tamamlanan robotun işlevsel ve saha testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda konumlama testleri, birim testleri, kalıp şablon testleri ve kalıp temizleme testleri gerçekleştirilmiştir. Prototip imalatıyla birlikte kontrol yazılımı gerçek zamanlı tasarlanarak her bir eklem için konum kontrol testleri yapılmıştır. Test sırasında robot uç işlevcisi başlangıç ve bitiş noktaları belirlenmiş ve konum yörüngesine hareket esnasında robot kontrolcüsünden konum ve hız sinyalleri toplanmıştır. Test resmi Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kalıp kesiti şablonunda konum kontrol testi

Gerçekleştirilen test çalışmasına göre robot sorunsuz bir şekilde verilen konum yörüngeye ulaşmıştır. Test sırasında elde edilen her bir ekleme ait konum ve hız yörünge sinyalleri Matlab ortamına akatarılarak dinamik analiz çalışmasında giriş sinyalleri olarak kullanılarak oluşturulan simülasyon modelinde elde edilen konum

ve hız sinyalleri ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen karşılaştırma sonucunda robotun simülasyon modelinin doğruluğu gözlemlenmiştir.

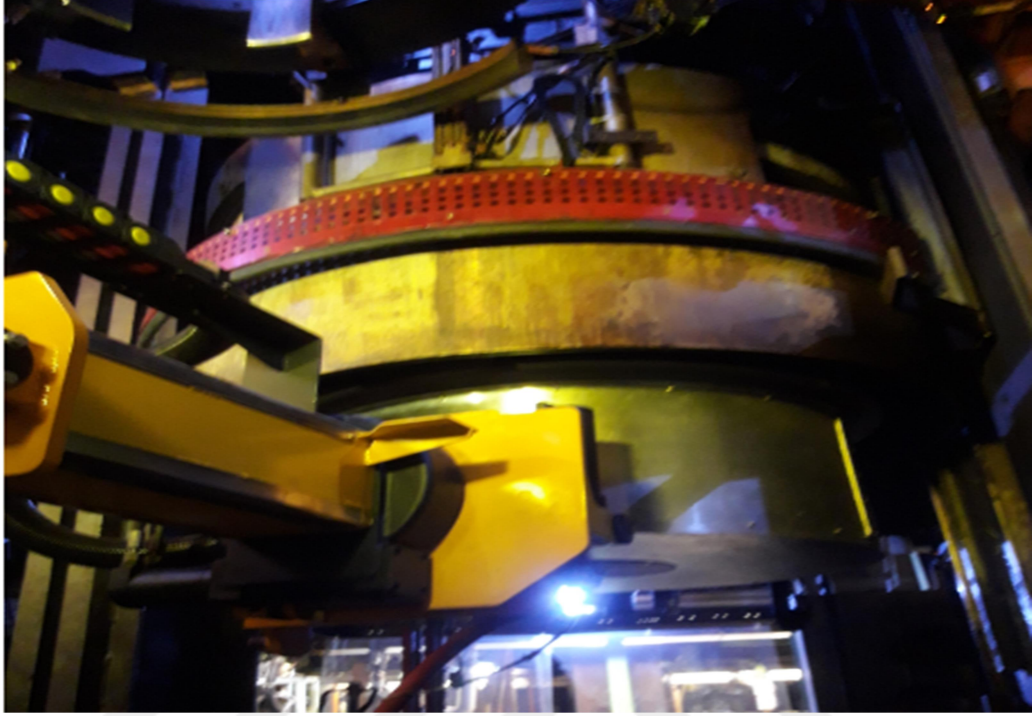


Şekil 6.2. Robot gerçek zamanlı simülasyon testi

Şekil 6.2’de verildiği gibi gerçek zamanda robotun uç işlevsinin ulaştığı konum ve kullanıcı ara yüzünde oluşturulan gerçek zamanlı simulyonda oluşan konum verilmiştir. Gerçek zamanlı simülasyonda robot uç işlevcisinin ulaştığı konum ve yönelim gerçek robotla karşılaştığında simülasyonun doğru çalıştığı tespit edilmiştir. Ayrıca robot manipulator tekrarlanabilir doğruluk testi gerçekleştirilmiş ve motorlarda aynı başlangıç ve bitiş noktası için gerçekleştirilen 50 farklı test sonucunda eklemelerde ve uç işlevcisinde konum sapması tespit edilmemiştir.

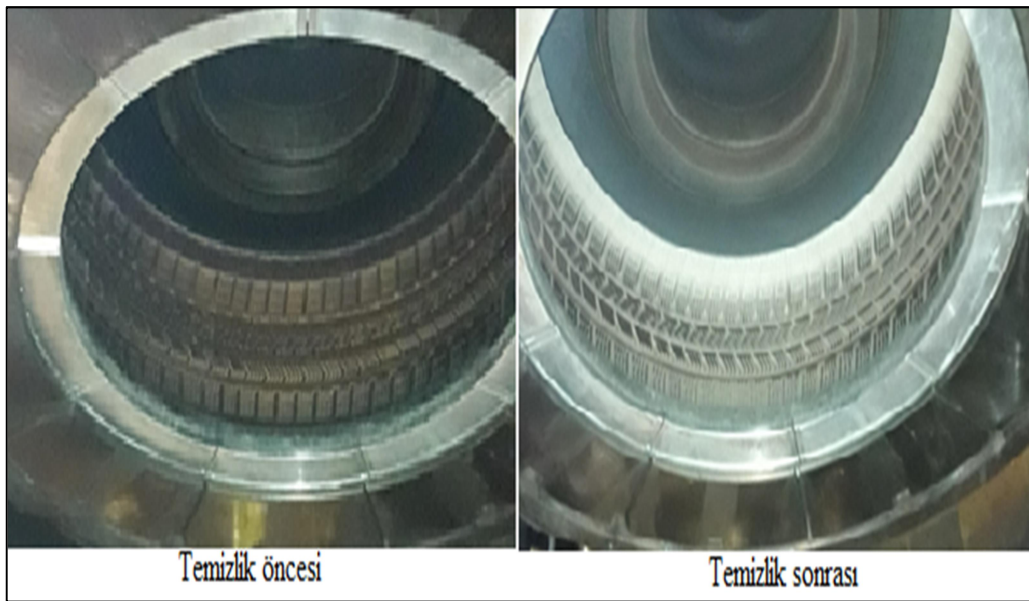
Robot sahada oto lastik pişirme kalıbında test edilerek kalıp temizlik testi gerçekleştirilmiştir. Hidrolik tip bir pres üzerinde bağlı oto lastik kalıbına temizlik sepeti kalıba uygun merkezleme halkasıyla merkezlenerek robotun çalışması için sabitlenmiştir. Temizleme testi sırasında kalıbın yüzey sıcaklığı 160°C ve 26 dakikalık çalışma zamanı ile oluşturulan reçete uygulanmıştır. Gerçekleştirilen test çalışması sonrasında temizlik kalitesinin hedeflenen kaliteye uygun olduğu tespit edilmiştir. Hedeflenen kalite temizlik sonrasında yapılan ilk lastik üretiminin kalite

süreçlerinden başarıyla geçmesidir. Test çalışması sonrasında üretilen ilk oto lastiği kalite testlerinden başarıyla geçmiş ve üretim süreci tamamlanmıştır.



Şekil 6.3. Robotun sahada test edilmesi

Robotun sahada gerçekleştirilen kalıp temizleme çalışması Şekil 6.3'te verilmiştir. Gerçekleştirilen temizlik testinde kalıbın temizlik öncesi ve sonrası Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Temizlik testinde kalıbın test öncesi ve sonrası

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında oto lastik imalatında kullanılan pişirme kalıplarının kuru buz kullanılarak tam otomatik bir şekilde temizlenmesini gerçekleştirecek 6 eklemlili seri kinematik bir robot tasarımı gerçekleştirilmiştir. Robotun konumlama kontrolü bilgisayar tabanlı kontrolcü ile EtherCat haberleşmesiyle sağlanmış ve pozisyon kontrolünde ters kinematik hesaplamalar kullanılmıştır. Tezin ilk başında belirtilen tasarım girdileri başarıyla sonuçlandığı gerçekleştirilen testlerle gözlemlenmiştir. Robotun çalışma uzayına ulaşabilirliği gerçek zamanda kalıp içerisinde yapılan temizlik testiyle gözlemlenmiştir. Yapılan pozisyonlama testleri sonucunda motorların sürücüler tarafından PID kontrolünün otomatik olarak uygun parametrelerle ayarlandığı ve sorunsuz pozisyonlama gerçekleştiği tespit edilmiştir. Operatör kullanıcı ara yüzü tasarımı gerçekleştirilmiş ve fonksiyonları test edilmiştir. Test sonucunda gerçek zamanlı simülasyon ve birimlerin istelere uygun çalıştığı görülmüştür.

Robotun Matlab ortamında dinamik analizi gerçekleştirilerek sistem tasarım modelinin doğruluğu incelenmiştir. Yapılan çalışma sonuçlarıyla elde edilen veriler ışığında oluşturulan konum ve hız kontrol modelinin ve tasarım modelinin doğruluğu gerçek zamanda elde edilen konum ve hız verileri ile karşılaştırılarak doğruluğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen reçete sistemi kalıp temizliği ile test edilerek doğru bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Geleceğe yönelik robot üzerinde tork geribeslemeli kontrol tasarımı ve daha farklı kontrol yöntemleri kullanılarak pozisyon kontrolü üzerinde çalışmak mümkündür. Öneri olarak farklı tip ve karakterde materyallerden yapılan lastiklerin kirliliklerine göre kalıp temizlik testlerinin uzun bir test sürecinde gerçekleştirilmesi ve parametrelerin en uygun sonucu elde edecek şekilde ayarlanması ile standartlaştırılması gerekmektedir. Sistem ileriye dönük tekrar ele alındığında uç işlevci konum ve yönelimlerinin sensör taramalı ya da görüntü işleme tabanlı otomatik Kartezyen uzay konum ve yönelim değerlerinin oluşturulması ile reçete verilerini elde etmeye yönelik tam otomatik pozisyon kontrolü üzerinde araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] URL-1: <https://www.lyindustrial.com/content/>,(Ziyaret Tarihi:06.05.2019).
- [2] URL-2: <https://www.coldjet.com/en/industries/>, (Ziyaret Tarihi:05.05.2019).
- [3] URL- 3: https://www.saykar.net/kumlama_kabini/, (Ziyaret Tarihi: 06.05.2019).
- [4] ULR-4: <https://www.photonics.com/>, (Ziyaret Tarihi: 04.05.2019).
- [5] Yuzer I, Yuceel M. H., Denizli O., Al G. A., Orbay L., A Cleaning Robot For Tire Curing Mold, 2019, *U.S. Patent No. 10,377,100*, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [6] URL-5: <https://infosys.beckhoff.com/content/>, (Ziyaret Tarihi:06.12.2018).
- [7] Bingül Z., Küçük S., Robot Kinematığı, 4, Birsen Yayın Evi, İstanbul, 2009.
- [8] Roshanianfard A., Noguchi N., Kinematics Analysis and Simulation of A 5DOF Articulated Robotic Arm Applied to Heavy Products Harvestings, *Journal of Agricultural Sciences, Tarım Bilimleri Dergisi*, 2018, **24**(2018),91-104.
- [9] Ortatepe Z., Parlaktuna O., Two DOF Robot Control with Fuzzy Based Neural Networks, *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, 2017, DOI: 10.18038/aubtda.34000.
- [10] Tonbul T., Sarıtaş M., Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar ve Yörünge Planlamasi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2003,**18**(1), 145-147.
- [11] John M. S., Thomas, N., Sivakumar V. P. R., Design and Development of Cable Driven Upper Limb Exoskeleton for Arm Rehabilitation, *Int. J. Sci. Eng. Res*, 2016, **7**(3), 1432-1440.
- [12] Gaber A. E., Rezeka S. F., Design and Position Control of Arm Manipulator; Experimentally and in MATLAB SimMechanics, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2016, **5**(8),352-359.
- [13] Kunt E. D., Naskali A. T., Asif Sabanovic, Miniaturized Modular Manipulator Design for High Precision Assembly and Manipulation Tasks, *The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, March 25-27 2012.

- [14] Wang C., Lin C. Y. , Tomizuka M., Design of Kinematic Controller for Real-time Vision Guided Robot, *IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, Hong Kong, China, May 31- June 7, 2014.
- [15] Zatopek J., Urednicek Z., Machado J., Sousa J., Dynamic Simulation of the CAD Model in SimMechanics with Multiple Uses, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2018, **26**(3),1278-1290.
- [16] Tuntivivat S., Prempraneerach P., Design and Construction and Motion Control of 6-Axis Robot Manipulator for Industrial Applications, In *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Krabi, Thailand, October 19-21, 2011.
- [17] Bingül Z., Küçük S., Robot Dinamiği ve Kontrolü, 4, Birsen Yayın Evi, İstanbul, 2009.
- [18] Almaged M., Forward and Inverse Kinematic Analysis and Validation of the ABB IRB 140 Industrial Robot, *International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering (IJEMME)*, 2017, **7**(2), 1383-1401.
- [19] Truc L. N., Lam N. T., Quasi-Physical Modeling of Robot IRB 120 Using Simscape Multibody for Dynamic and Control Simulation, *Turk J Elec Eng & Comp Science TUBITAK*, DOI:10.3906/elk-.
- [20] Sun L., Liang F., Fang L., Design and Performance Analysis of an Industrial Robot Arm for Robotic Drilling Process, *the International Journal of Robotics Research and Application*, 2019, **46**(1), 7-16.
- [21] Gasparetto A., Scalera L., From the Unimate to the Delta Robot, *the Early Decades of Industrial Robotics*, DOI:10.1007/978-3-030-03538-9_23.
- [22] Gupta V., Saha S. K., Chaudhary H., Optimum Design of Serial Robots, *Journal of Mechanical Design*, 2019, **141**(8), 082303-1.
- [23] Piltan F., Yarmahmoudi M. H., Shamsodini M., Mazlomian E., Hosainpour A., PUMA-560 Robot Manipulator Position Computed Torque Control Methods Using Matlab/Simulink and Their Integration Into Graduate Nonlinear Control and Matlab Courses, *International Journal of Robotics and Automation*, 2012, **3**(3), 167-191.
- [24] Slotine J. J. E., Li, W., On the Adaptive Control of Robot Manipulators, *The international journal of robotics research*, 1987, **6**(3), 49-59.
- [25] Zeng G., Hemami A., An Overview of Robot Force Control, *Robotica*, 1997, **15**(5), 473-482.
- [26] Tomei P., Adaptive PD Controller for Robot Manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, **7**(4), 565-570.

- [27] Shin K., McKay N., Minimum-Time Control of Robotic Manipulators with Geometric Path Constraints, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1985, **30**(6), 531-541.
- [28] Bondi P., Casalino G., Gambardella L., On the Iterative Learning Control Theory for Robotic Manipulators, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1988, **4**(1), 14-22.
- [29] Wen J. T., Kreutz-Delgado K., Motion and Force Control of Multiple Robotic Manipulators, *Automatica*, 1992, **28**(4), 729-743.
- [30] Tinós R., Terra M. H., Ishihara J. Y., Motion and Force Control of Cooperative Robotic Manipulators with Passive Joints. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, **14**(4), 725-734.
- [31] Sadegh H., Zarabadipour H., Modeling, Simulation and Position Control of 3DOF Articulated Manipulator, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, 2014, **2**, 132-140.
- [32] Adar N. G., Kozan R., Comparison Between Real Time PID and 2-DOF PID Controller for 6-DOF Robot Arm, *Acta Physica Polonica A*, 2016, **130**(1), 269-271.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Yuzer I, Yuceel M. H., Denizli O., Al G. A.ve **Orbay L.**, A Cleaning Robot For Tire Curing Mold, 2019, *U.S. Patent No. 10,377,100*, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [2] **Orbay L.**, Bingul Z., Design and Real Time Position Control of 6 DOF Tire Curing Mold Cleaning Robot, *International Conference On Civil, Mechanical, Production and Industrial Engineering*, İstanbul, Turkey, 20-21 june 2019.



ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Edremit’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Çanakkale’de tamamladı. 2009 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nden 2013 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.2013 yılından beri Başiskelede bulunan Lang Yüzer Otomotiv A.Ş şirketinde araştırma ve geliştirme mühendisi olarak çalışmaktadır.

