



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK TAŞIMA KAPASİTESİNE SAHİP
BİR PARALEL ROBOTUN TASARIMI VE
KONTROLÜ

Muhammet Ali ÇINAR

YÜKSEK LİSANS

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet Ali ÇINAR tarafından hazırlanan “YÜKSEK TAŞIMA KAPASİTESİNE SAHİP BİR PARALEL ROBOTUN TASARIMI VE KONTROLÜ” adlı tez çalışması 03/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Ümit ÖNEN
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Mete KALYONCU
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi M. Arif ŞEN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Muhammet Ali ÇINAR

Tarih: 03.06.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

YÜKSEK TAŞIMA KAPASİTESİNE SAHİP BİR PARALEL ROBOTUN TASARIMI VE KONTROLÜ

Muhammet Ali ÇINAR

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2024, 105 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mete KALYONCU

Doç. Dr. Ümit Önen

Dr. Öğr. Üyesi M. Arif ŞEN

Bu çalışmada, döküm-dövme fabrikaları gibi tozlu ve sıcak ortamlarda çalışmak üzere tasarlanmış, yüksek taşıma kapasitesine sahip bir paralel robotun mekanik, kinematik ve hidrolik tasarımı incelenmiştir. Bu tür ortamlarda çalışanların sağlığını korumak amacıyla, robotun tasarımında paralel kol mekanizması kullanılmıştır. Robot, kızak üzerinde kayarak hareket kabiliyeti artırılmış ve 6 serbestlik derecesine sahip olacak şekilde geliştirilmiştir. Robotun kinematik analizi için Denavit-Hartenberg (D-H) parametre tablosu hazırlanmış ve paralel kol mekanizmasının avantajlarından yararlanılarak sistemin ileri ve ters kinematik modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca, belirlenen uç işlevci konumuna ulaşmak için gerekli yörünge ve hareket planlama yöntemleri sisteme entegre edilmiştir. Sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş ve MATLAB/Simulink ortamında fiziksel model kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Robotun hassas ve hızlı konum kontrolü sağlamak amacıyla eklem hareketlerini kontrol eden PID kontrolcü tasarlanmıştır. Bu kontrolcünün parametreleri, Arı Algoritması (AA) kullanılarak optimize edilmiştir. Simülasyon sonuçları, sistemin performansını değerlendirmek için maksimum aşma (M_p), kalıcı hata (e_{ss}), toplam yer değiştirme ve toplam hız değişimi kriterlerine göre analiz edilmiştir. M_p kriteri açısından en iyi performans artışı %57.84 ile dirsek ekleminde, e_{ss} açısından ise %4.93 ile taşıyıcı kızak ekleminde elde edilmiştir. Yer değiştirme açısından en iyi performans artışı %64.64 ile dirsek ekleminde görülürken, hız değişimi bakımından en iyi performans artışı %72.76 ile kule dönüş ekleminde elde edilmiştir. Ön tasarım ve optimal parametreler kullanılarak yapılan yörünge takibi simülasyonlarında, konum hatası %77.62 oranında azaltılmış ve en büyük hata 213.8 mm'den 47.83 mm'ye düşürülmüştür. Ortalama konum hatası ise %37.40 oranında iyileştirilerek 19.89 mm'den 12.45 mm'ye indirilmiştir. Optimize edilmiş kontrolcüler vasıtasıyla yapılan simülasyonlar sonucunda, sistemin gerekli tork-açısal hız ve kuvvet-doğrusal hız grafikleri elde edilmiş ve bu verilere dayanarak uygun hidromotor seçimleri ile silindir boyutlandırılması yapılmıştır. Ayrıca, sistemde kullanılacak hidrolik pompa, oransal yön kontrol valfi, hidrolik filtreleme bileşenleri ve hidrolik yağ tankı boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Sistem tasarımında kullanılan hidrolik bileşenlerin seçimleri ve tasarımı detaylandırılmıştır. Sistemin çalışma uzayı görselleştirilmiş ve tezde yer verilmiştir. Sonuç olarak, optimize edilmiş kontrolcü kullanılarak yüksek taşıma kapasitesine sahip paralel robotun yörüngeyi hassas bir şekilde izleyebildiği gösterilmiştir. Çalışmada elde edilen sayısal değerler grafik ve tablolar halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Arı Algoritması, hidrolik bileşen seçimi, optimizasyon, PID kontrolcü tasarımı, yörünge planlama, yüksek taşıma kapasiteli paralel robot

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN AND CONTROL OF A PARALLEL ROBOT WITH HIGH PAYLOAD CAPABILITY

Muhammet Ali ÇINAR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2024, 105 Pages

**Jury
Prof. Dr. Mete KALYONCU
Assoc. Prof. Dr. Ümit Önen
Asst. Prof. Dr. M. Arif ŞEN**

In this study examines the mechanical, kinematic, and hydraulic design of a parallel robot with high payload capacity, intended for operation in dusty and hot environments, such as foundries and forging factories. To protect the health of workers in such environments, a parallel arm mechanism was employed in the robot's design. The robot was developed with six degrees of freedom and enhanced mobility by sliding on a rail. A Denavit-Hartenberg (D-H) parameter table was prepared for the kinematic analysis of the robot, and both forward and inverse kinematic models of the system were developed, leveraging the advantages of the parallel arm mechanism. Additionally, the necessary trajectory and motion planning methods were integrated into the system to reach the designated end-effector positions. The mathematical model of the system was constructed, and simulations were conducted using the physical model in the MATLAB/Simulink environment. A PID controller was designed to ensure precise and rapid position control of the robot's joints. The parameters of this controller were optimized using the The Bee Algorithm (BA). Simulation results were analyzed to evaluate the system's performance based on criteria such as maximum overshoot (M_p), steady-state error (e_{ss}), total displacement, and total velocity change. The best performance improvement in terms of M_p was 57.84% in the elbow joint, while for e_{ss} , it was 4.93% in the carrier rail joint. In terms of displacement, the best performance improvement was 64.64% in the elbow joint, and for velocity change, it was 72.76% in the turret rotation joint. Trajectory tracking simulations conducted using the preliminary design and optimal parameters showed a 77.62% reduction in position error, decreasing the maximum error from 213.8 mm to 47.83 mm. The average position error was reduced by 37.40%, from 19.89 mm to 12.45 mm. Simulations using the optimized controllers provided torque-angular velocity and force-linear velocity graphs, which were used to select appropriate hydromotors and size the cylinders. Furthermore, hydraulic components such as the hydraulic pump, proportional directional control valve, hydraulic filtration components, and hydraulic oil tank were selected and sized. The selection and design of these hydraulic components were detailed. The workspace of the system was visualized and included in the thesis. In conclusion, the study demonstrated that the parallel robot with high payload capacity, using optimized controllers, could accurately follow the designated trajectory. The numerical values obtained from the study were presented in the form of graphs and tables.

Keywords: The Bees Algorithm, hydraulic component selection, optimization, PID controller design, trajectory planning, high payload capability parallel robot

ÖNSÖZ

Yüksek sıcaklık ve toz seviyeleri gibi insan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilecek ortamlarda, robotların kullanımı hayati önem arz etmektedir. Bu tür tehlikeli ortamlarda çalışan insanlar ciddi sağlık riskleriyle karşı karşıya kalabilmektedir. Robotlar, insanların yerine geçerek sağlık risklerini en aza indirebilir ve uzaktan kontrol edilebilir. Böylece insanların bu tehlikeli ortamlara girmesine gerek kalmadan görevler yerine getirilebilmektedir. Bu çalışmada, bu tür zorlu ortamlarda etkin bir şekilde işlev görebilecek yüksek taşıma kapasitesine sahip bir paralel robotun tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmam sürecinde bana her adımda rehberlik eden ve desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Mete KALYONCU 'ya en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Kendisinin bilgi birikimi ve deneyimi, bu çalışmanın her aşamasında benim için birer kılavuz oldu. Tezimin tamamlanmasında sağladığı değerli katkılar için minnettarım.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerini paylaşan ve çalışmamda büyük katkıları bulunan Dr. Abdullah ERDEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada verdikleri desteklerden dolayı MPG MAKİNE PRODÜKSİYON GRUBU A.Ş. Genel Müdürü Veysel ALVER'e ve tüm çalışma arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli babam, annem ve kardeşlerime sonsuz şükranlarımı iletmek isterim. Gösterdikleri sabır ve destek, benim için büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur. Her zaman yanımda oldukları için minnettarım.

Muhammet Ali ÇINAR
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	1
1.2. Tezin Önemi	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Elektrik Tahrikli Endüstriyel Robot Kol Sistemleri ve Özellikleri	3
2.2. Hidrolik Manipülatör Sistemleri ve Özellikleri	5
2.3. İlgili Çalışmalar	7
3. SİSTEM TASARIMI	20
3.1. Sistemin Teknik Özellikleri ve Tasarım Hedefleri	20
3.2. Mekanik Tasarım	21
3.3. Kinematik Model	22
3.3.1. Paralel Kol Mekanizması	22
3.3.2. Homojen Dönüşüm Matrisleri	22
3.3.3. İleri Kinematik ve Ters Kinematik	25
3.3.4. Yörünge ve Hareket Planlama	28
3.4. Dinamik Model	32
3.5. Fiziksel Model	32
4. KONTROLÇÜ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU	35
4.1. Otomatik Kontrol Altyapısı ve Amacı.....	35
4.2. PID Kontrolcü Tasarımı.....	36
4.3. Arı Algoritması	37
5. SAYISAL UYGULAMALAR.....	40
5.1. Optimizasyon Sonuçları.....	40
5.2. Hidromotor Seçimi	60
5.2.1. Taşıyıcı Kızak Hidromotoru İçin Gerekli Tork Hesabı	60
5.2.2. Döner Eklem Hidromotorları İçin Gerekli Tork Hesabı.....	65
5.3. Silindir Boyutlandırması.....	73
5.4. Enerji Tüketimi	75
5.5. Çalışma Uzayı.....	76
5.5. Hidrolik Bileşen Tasarımı.....	77
5.5.1. Pompa ve Elektrik Motoru Seçimi.....	77

5.5.2. Yön Kontrol Valfi Seçimi.....	79
5.5.3. Filtreleme Bileşenlerinin Seçimi	80
5.5.4. Hidrolik Akışkan Tankı Tasarımı	81
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
6.1 Sonuçlar	83
6.2 Öneriler	85
KAYNAKLAR	86
EKLER	90



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: İki eksen arası bağ uzunluğu
α	: Eksenler arası bağ açısı
$\alpha_{hareket}$	: Hareket ivmesi
d	: Üst üste çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı
d_1	: Sistemin kütle merkezinin arka tekerleğe olan yatay mesafesi
d_2	: Sistemin kütle merkezinin ön tekerleğe yatay mesafesi
e	: m_{AA} bölge içindeki elit bölge sayısı
e_{ss}	: Geçici durum cevabı kalıcı hata miktarı
F_{R1}	: Arka tekerlek üzerine gelen tepki kuvveti
F_{R2}	: Ön tekerlek üzerine gelen tepki kuvveti
g	: Yer çekimi ivmesi
h	: Sistemin kütle merkezinin tekerleklerle olan dikey mesafesi
itr	: İterasyon sayısı
$J_{amaç}$	: Optimizasyon amaç fonksiyonu
J_f	: Sistemin uç naoktasına ait Jakobiyen matrisi
L_{maks}	: Geçici durum cevabı tepe uzaklık değeri
m_{AA}	: Ziyaret edilen n noktadan seçilen en uygun bölge sayısı
M_p	: Geçici durum cevabı maksimum aşma miktarı
M_{pompa}	: Gerekli pompa giriş torku
m_{sistem}	: Sistemin kütlesi
n	: Kâşif arı sayısı
nep	: En iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı
ngh	: Komşuluk yarıçapı
n_m	: Elektrik motoru dönüş hızı
P	: Öteleme matrisi
P_{pompa}	: Gerekli pompa giriş gücü
Q_{pompa}	: Hidrolik pompa hacimsel debisi
R	: Dönme matrisi
$R_{tekerlek}$	: Tekerlek çapı
T	: Homojen dönüşüm matrisi
t_r	: Geçici durum cevabı yükselme zamanı
t_s	: Geçici durum cevabı oturma zamanı
V_d	: Hidrolik pompa deplasmanı
W	: Yerçekimi etkisi ile oluşan kuvvet
θ	: İki bağ arasında oluşan eklem açısı
θ_{maks}	: Geçici durum cevabı tepe açı değeri
Δ_b	: İstenen basınç farkı
η_h	: Hidrolik pompanın hacimsel verimi
η_{mh}	: Pompanın mekanik – hidrolik verimi
η_t	: Hacimsel verim η_h ve mekanik-hidrolik verimin η_{mh} çarpımı

Kısaltmalar

AA	: Arı Algoritması
D-H	: Denavit – Hartenberg
ETL	: Electronic Torque Limiting (Elektronik Tork Limitli)
BMK	: Bulanık mantık kontrolcü
PID	: Oransal – İntegral – Türevsel Kontrolcü



1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışma, paralel kol mekanizmasına sahip, yüksek kaldırma kapasiteli, hidrolik tahrikli bir paletleme robotunun tasarımı ve kontrolü üzerine odaklanmaktadır. Bu sistem, döküm ve dövme fabrikalarında görüldüğü üzere kirli ve sıcak ortamlarda dahi yüksek hassasiyetle çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Piyasada yaygın olarak kullanılan elektrik motorlu endüstriyel robotların kaldırma kapasiteleri genellikle sınırlıdır. Ayrıca bu sınıra yaklaşan robotik sistemlerin kurulum maliyetleri oldukça yüksektir. Bu çalışmanın tasarımı, elektrik tahrikli endüstriyel robot kollarının ulaşamadığı uzanma mesafesi ve kaldırma kapasitesi özelliklerine sahip olması hedeflenmiştir.

Sistemin, ileri kinematik, ters kinematik hesaplamaları ve yörünge planlama algoritmaları üzerine çalışılarak otomatik kontrol altyapısı oluşturulması hedeflenmiştir. Bu hesaplamalar kullanılarak, endüstriyel robotlara benzer şekilde programlanabilir bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu altyapı sayesinde, elektrik motorlu endüstriyel robotlarla senkronize olarak otomatik görevler gerçekleştirebilen bir hidrolik bir robot tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, eklem ve yörünge kontrolü için kullanılacak kontrolcü yöntemlerinden biri olan PID kontrolcü için gereken parametreler, Arı Algoritması (AA) kullanılarak optimal kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda hassas ve hızlı bir sistem oluşturmak üzere çalışılmıştır.

1.2. Tezin Önemi

Bu araştırma, belirli çalışma ortamlarının insan sağlığı için tehdit oluşturduğu koşullarda robotik sistemlerin kullanımının önemini vurgulamaktadır. Özellikle döküm ve dövme fabrikalarındaki sıcak ve tozlu ortamlar, insan sağlığı açısından uygun olmayan şartlardır. Bu tür riskli ortamlarda gerçekleştirilmesi gereken görevlerin otomatikleştirilmesi, çalışan insan sayısını azaltma ve güvenliği artırma açısından büyük bir gereklilik arz etmektedir.

Genellikle piyasada kullanılan elektrik tahrikli endüstriyel robotlar, döküm ve dövme fabrikalarındaki ağır ve sıcak parçaların taşınması gibi zorlu koşullara uygun değildir. Bu durum, hidrolik manipülatörlerin özel olarak üretildiği ortamları ortaya çıkarmıştır. Ancak, Türkiye merkezli bir firma tarafından bu tip hidrolik manipülatörlerin

üretimi gerçekleştirilmemektedir. Bu bağlamda, bu çalışma, pazardaki manipülatör ihtiyacını belirleyerek bu alanda yeni tasarımların geliştirilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır.

Mevcut hidrolik manipülatörlerin genellikle otomatik kontrol sistemlerine sahip olmaması, operasyonların tamamen manuel bir şekilde gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Bu durum, operasyonların sürekli bir operatör gözetimine ihtiyaç duyduğu ortamlarda insan sağlığı için potansiyel riskler oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında, ileri kinematik, ters kinematik ve yörünge planlama hesaplamaları yapılarak bir otomatik kontrol sistemi geliştirilmiştir. Kontrol ve programlama algoritmaları sisteme entegre edilerek tam otomatik çalışma yeteneği kazandırılmıştır. Ayrıca, otomatik kontrol kabiliyeti kullanılarak, elektrik tahrikli endüstriyel hidrolik robot kolları ile senkronize şekilde çalışabilen hidrolik tahrikli bir robot kol tasarımı üzerinde çalışılmıştır.

Hidrolik robotun karakteristik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, sistemdeki çalışma yörüngeden sapma, tekrarlanabilirlik hatası gibi unsurların azaltılması için sezgisel yöntemlere dayanan optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmaların yardımıyla, sistemde gerçekleştirilen iyileştirmeler etkili bir şekilde uygulanmış ve optimize edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Elektrik Tahrikli Endüstriyel Robot Kol Sistemleri ve Özellikleri

Üretim tesislerinde yaygın olarak kullanılan endüstriyel robot sistemleri, genellikle elektrik tahrikli robot kollarını içermektedir. Bu robotlar, belirlenen görevleri üst düzey hassasiyetle gerçekleştirebilecek bir kapasiteye sahiptir. Ancak, bu tür robotlar, özellikle bazı üretim tesislerinde uzak mesafelerden ağır yükleri kaldırma konusunda yeterli performansı sergileyemeyebilirler. Farklı markaların ürettiği yüksek kapasiteli robot kolların özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir (ABB, 2024; KUKA, 2024; YASKAWA, 2024).

Çizelge 2.1. Yüksek kapasiteli robot kolların özellik tablosu

Marka	Model	Uzanma Mesafesi [mm]		Maksimum Kaldırma Kapasitesi [kg]	Tekrarlılık [mm]	Toplam Ağırlık [kg]
		Dikey	Yatay			
KUKA	KR 1300	3644	3202	1300	± 0.1	4690
YASKAWA	MH900	6209	4683	900	± 0.5	10000
ABB	IRB 8700	4093	3487	800	± 0.05	4525
FANUC	M-2300-iA	4147	3734	2300	± 0.18	11000

Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere en ağır kaldırma kapasitesine sahip robot kol örneklerinden biri FANUC firmasının ürettiği M-2300-iA modelidir. 2300 kg kaldırma kapasitesine ve dikeyde 4147 mm, yatayda 3734 mm uzanma mesafesine sahiptir. 2300 kg üzerinde kaldırma kapasitesine sahip robot kol sayısı oldukça sınırlıdır (FANUC, 2024).

Bazı üretim tesislerinde 2300 kg ağırlığını aşan yükler ile karşılaşmaktadır. Özellikle dövme ve döküm fabrikalarında fırından çıkan ve dövülmek üzere preslere konumlandırılması gereken ağır ve sıcak yük şartları görülmektedir. Ayrıca bu tip tesisler oldukça sıcak ve tozlu ortamlardır.

Ağır yük kaldırma amacıyla geliştirilen çeşitli robot kol sistemlerinde, paralel kol mekanizması sıkça kullanılan bir sistemdir. Bu mekanizma kullanılarak tasarlanmış

önemli bir kinematik mekanizmadır ve özellikle paralel hareketin kritik olduğu durumlarda tercih edilmektedir.

Endüstriyel robot kol üreticileri, yüksek kaldırma kapasitesine sahip robot kollarında paralel kol mekanizmasını tercih ettiği görülmektedir. YASKAWA tarafından üretilen MH900 model robot kolu, 900 kg kaldırma kapasitesine sahiptir ve paralel kol mekanizması ile donatılmıştır (Şekil 2.1). IRB8700 model, 800 kg kapasiteye sahip bir endüstriyel robot kol sistemi ABB firmasını temsil etmektedir (Şekil 2.2). Ayrıca, FANUC markasının M-2300-iA modeli, 2300 kg kaldırma kapasitesine sahiptir (Şekil 2.3).



Şekil 2.1. YASKAWA MH900 (YASKAWA, 2024)



Şekil 2.2. ABB IRB8700 (ABB, 2024)



Şekil 2.3. FANUC M-2300-iA (FANUC, 2024)

2.2. Hidrolik Manipölatör Sistemleri ve Özellikleri

Endüstriyel uygulamalarda, ağır yüklerin kaldırılması ve taşınması amacıyla özel olarak tasarlanmış hidrolik sistemler bulunmaktadır. Bu sistemler arasında yer alan hidrolik tahrikli manipölatör ve vinç sistemleri, uzun mesafelerde dahi büyük ağırlıkları kolaylıkla kaldırabilme yeteneğine sahiptir. Ancak, hidrolik sistemlerin kontrolünde karşılaşılan temel zorluk, hidrolik sistemlerin hassas bir şekilde kontrolünün, elektrik motorlarının kontrolüne kıyasla daha zor olmasıdır. Hidrolik akışkan kontrolün başarılı bir biçimde gerçekleştirilmesi, büyük ağırlıkların uzak mesafelerden hassas bir şekilde taşınabilmesini mümkün kılmaktadır.

Hidrolik tahrikli manipölatör konusunda çalışan dünyada öncü iki firma bulunmaktadır. Bunlardan biri Henschel Industrietechnik GmbH Andromat diğeri ise Clansman Dynamics firmasıdır.

Andromat firması, özellikle döküm ve dövme fabrikalarında kullanılmak üzere hidrolik manipölatör, taşıyıcı, pozisyoner gibi sistemler üreten Almanya merkezli bir hidrolik firmasıdır. 1975'ten beri dökümhanelerde kullanılan hidrolik tahrikli manipölatör üretmektedir (Andromat, 2023).

Andromat'ın farklı kaldırma kapasitesi ve farklı uzanma mesafesine sahip hidrolik manipölatör modelleri bulunmaktadır. AMX serisi olarak piyasaya sunduğu bu modellerden ihtiyaca göre seçim yapılabilmektedir. 170 kg kaldırma kapasitesine sahip AMX 20 modelinden 5000 kg kaldırma kapasiteli AMX 80 modeline doğru artan modelleri bulunmaktadır. Andromat AMX serisi hidrolik manipölatörlerinin kaldırma kapasiteleri ve uzanma mesafeleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Andromat AMX 40 modelinin sahadan bir görüntüsü Şekil 2.4'te verilmiştir (Meta-Mak Metalurji Makina Mümessillik, 2023).

Çizelge 2.2. Andromat AMX serisi kaldırma kapasitesi ve uzanma mesafesi tablosu

Model	Uzanma Mesafesi [mm]		Maksimum Kaldırma Kapasitesi [kg]
	Dikey (V)	Yatay (H)	
AMX 20	1814-3410	2895-4311	220
AMX 40	1670-2890	3310-4870	850
AMX 60	3627-4897	1827-3433	2000
AMX 80	4352-5707	2536-4388	5000



Şekil 2.4. Andromat AMX 40 saha görüntüsü

Hidrolik manipülatör üreten diğer firma ise Clansman Dynamics firmasıdır. Clansman Dynamics, genellikle döküm ve dövme fabrikalarında çalışmak üzere geliştirilmiş hidrolik tahrikli manipülatör üreten İngiltere merkezli bir firmadır. Firma, hidrolik manipülatörler, taşıyıcı kızaklar, pozisyonerler, taşlama sistemleri, koçbaşı ekipmanları gibi döküm ve dövme endüstrisi odaklı ürünler geliştirmektedir. Clansman Dynamics firmasının da Andromat firmasında görüldüğü gibi farklı kaldırma kapasiteleri ve uzanma mesafelerine sahip modelleri bulunmaktadır (Clansman Dynamics, 2022). Firmanın C serisi manipülatörlerinin kaldırma kapasitesi tablo halinde Çizelge 2.3'te verilmiştir. Firmanın C620 model hidrolik manipülatörü Şekil 2.5'te verilmiştir (Cerps, 2022).

Çizelge 2.3. C serisi manipülatörlerin kaldırma kapasitesi tablosu

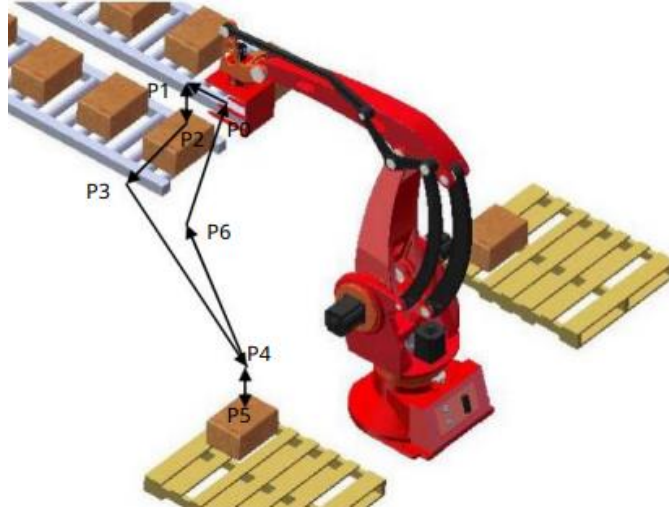
Model	Maksimum Kaldırma Kapasitesi [kg]
C320	150
C620	500
C1210	1000
C2010	1800
C4010	3600
C5010	7500
C20020	20000



Şekil 2.5. Clansman Dynamics C620 model manipulatörün saha görüntüsü

2.3. İlgili Çalışmalar

Zhang ve diğ. (2008) çalışmalarında bir üretim tesisinde konumlandırılmış olan 4 serbestlik dereceli paletleme robotunun yörünge planlamasını, enerji tüketimini en aza indirecek şekilde gerçekleştirmeyi hedeflemiştir. Sistemin kinematik modeli, Denavit-Hartenberg yöntemi ve homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak detaylı bir biçimde oluşturulmuştur. Ayrıca, eklemlerin hareket sınırları göz önüne alınarak, uç işlevcinin hareket edebileceği uzayın boyutları belirlenmiştir. Paletleme uygulaması için robotun çalışma uzayı dikkate alınarak, optimal çalışma alanları belirlenmiştir. Paletleme görevinin enerji sarfiyatını en aza indirmek amacıyla bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Sistemin karakteristiği dikkate alınarak bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Yapılan çalışmanın performansını değerlendirmek için, paletleme robotu tesise kurulmuş ve yeni yörünge planlama sisteminin veriminde gözle görülür bir artış tespit edilmiştir. Şekil 2.6'de kullanılan yörünge planlama sisteminin veriminde gözle görülür bir artış tespit edilmiştir. Şekil 2.6'de kullanılan yörünge planlama sisteminin veriminde gözle görülür bir artış tespit edilmiştir. Şekil 2.7'de ise tesise monte edilmiş paletleme robotu görselleştirilmiştir. Bu çalışma, paletleme süreçlerinde enerji etkinliğini maksimize etmeye yönelik bir yaklaşım sunmaktadır.



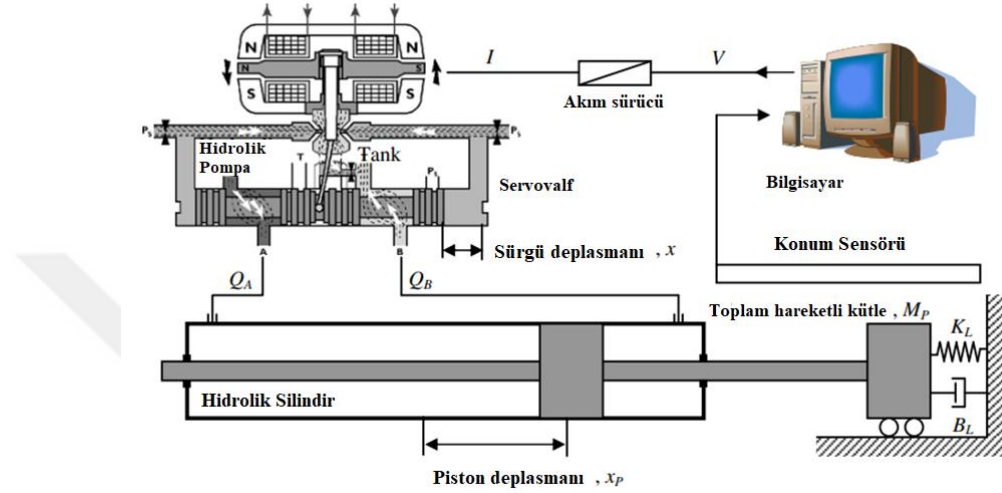
Şekil 2.6. Paletleme robotu yörünge şeması (Zhang ve diğ., 2008)



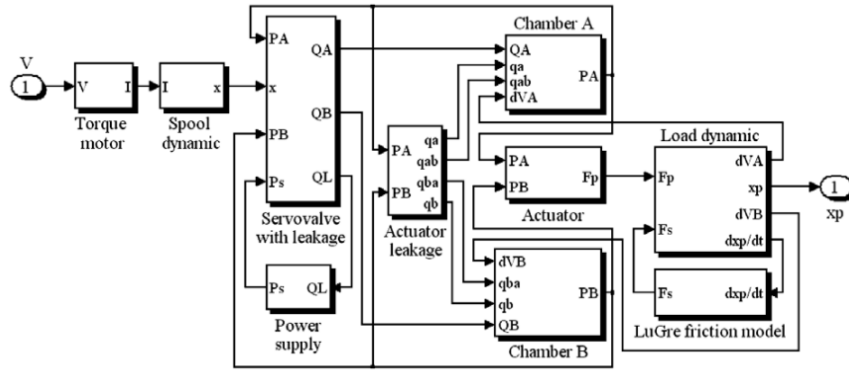
Şekil 2.7. Tesise kurulan robot sistemi (Zhang ve diğ., 2008)

Kalyoncu ve Haydim (2009) çalışmalarında bir elektrohidrolik servo sisteminin konum kontrolünü bulanık mantık kontrolcü (BMK) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, bir elektrohidrolik servo sistemin matematik modeli, diğer çalışmalarda genellikle ihmal edilen iç kaçaklar, akışkanının sıkıştırılabilirliği, sürtünme, atalet etkisi dikkate alınarak hazırlanmıştır. Sistemin matematik modeli, MATLAB/Simulink ortamında blok diyagramı halinde modellenmiştir. Sistemi kontrol eden BMK için, üyelik fonksiyonları ve kural tabanı oluşturulmuştur. Sistemi oluşturan elemanların özelliklerini içeren bilgiler tablo halinde verilmiştir. Servo valfin iç kaçağı, miktarına göre 0-4 arasında değişen 5 sınıfa ayrılmıştır. Bu tasarım devamında sistemin, farklı giriş fonksiyonlarına ve farklı iç kaçak miktarına bağlı olarak cevabı incelenmiş ve grafikler

halinde verilmiştir. Ayrıca sistemin kontrolü BMK dışında, PID, PD ve P kontrolcüler ile kontrol edilmiştir. Kontrolcü parametrelerinin ayarlanması için optimizasyon yapılmıştır. Sistemin geçici durum cevabına bağlı olarak amaç fonksiyonu oluşturulmuş ve Genetik Algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 2.8’de elektrohidrolik servo sisteminin fiziksel modeli, Şekil 2.9’da iç kaçakların ve diğer etkenlerinde içinde bulunduğu matematik modelin Simulink modeli verilmiştir.



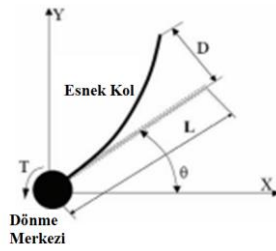
Şekil 2.8. Elektrohidrolik servo sistemin fiziksel modeli (Kalyoncu ve Haydim, 2009)



Şekil 2.9. Sistemin Simulink modeli (Kalyoncu ve Haydim, 2009)

Pham ve Kalyoncu (2009) çalışmalarında bir eklemlili esnek yapıdaki bir robot kolun konum kontrolünü Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. BMK için gerekli üyelik fonksiyonları, arıların kaynak arama davranışları incelenerek geliştirilen Arı Algoritması (AA) kullanılarak optimize edilmiştir. Öncelikle sistemin dinamik modeli hazırlanmıştır. BMK'nın, üyelik fonksiyonları ve kural tabanı oluşturularak ön tasarımı yapılmıştır. AA tasarımı için

gerekli olan arı parametreleri belirlenmiş ve geçici durum cevabı esas alınarak amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Sistemin modeli ve optimizasyon yazılımı MATLAB/Simulink kullanılarak hazırlanmıştır. Sistemin test edilebilmesi ve optimizasyonun yapılabilmesi için bir test düzeneği kurulmuş ve bilgisayar ile haberleşme altyapısı hazırlanmıştır. AA optimizasyonu sonucunda, esnek uzvun ucunun minimum titreşim ile konumlandırılması için gerekli optimal üyelik fonksiyonları elde edilmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Sonuç olarak, sistemin performansında iyileşme kaydedilmiştir. Şekil 2.10.a'da esnek robotun şematik gösterimi, Şekil 2.10.b'de test düzeneğinin görüntüsü verilmiştir.



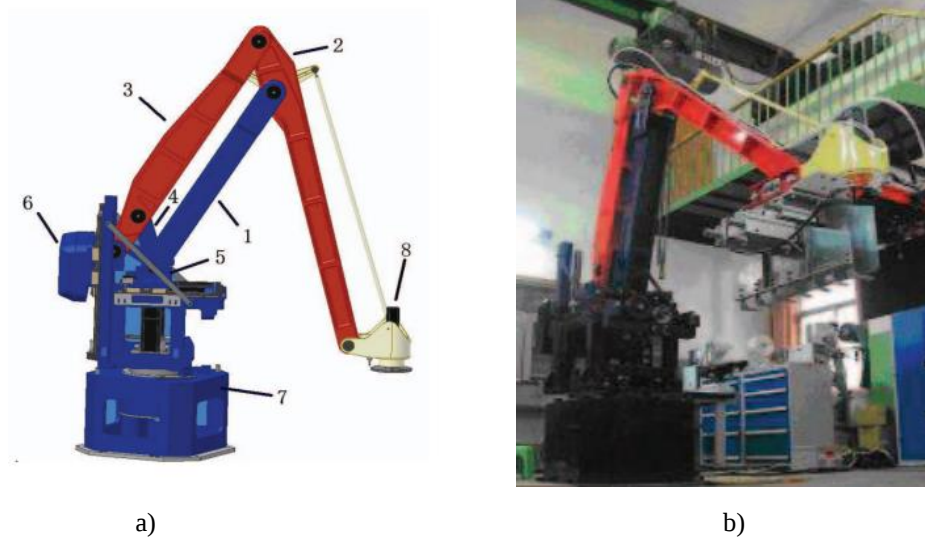
a)



b)

Şekil 2.10. Esnek robotun, a) şematik gösterimi, b) test düzeneği görüntüsü (Pham ve Kalyoncu, 2009)

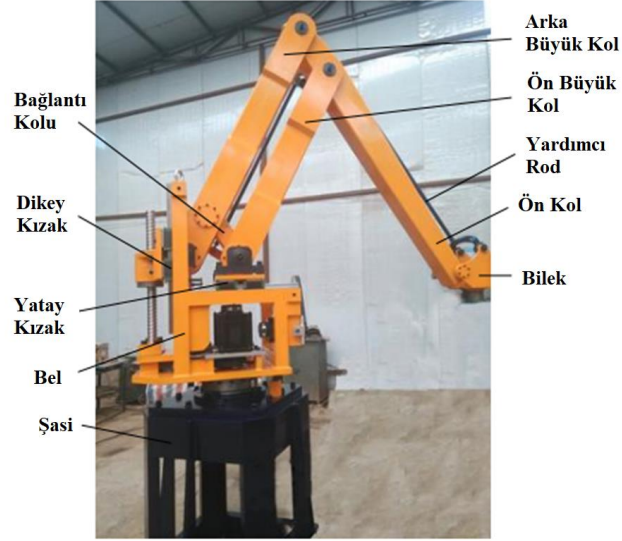
Xiaoqing ve Jidong (2011) çalışmalarında, yüksek kapasiteli bir paralel kol mekanizmasına sahip manipülatörün, geometri ve trigonometri temelinde kinematik analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen kinematik model kullanılarak çalışma uzayı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar MATLAB yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Gerçek sistem üzerinde deneysel doğrulama yapılmış ve elde edilen sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur. Şekil 2.11.a'da sistemin mekanik tasarımı, Şekil 2.11.b'de deneysel doğrulamanın gerçekleştirildiği kurulu sistem gösterilmiştir.



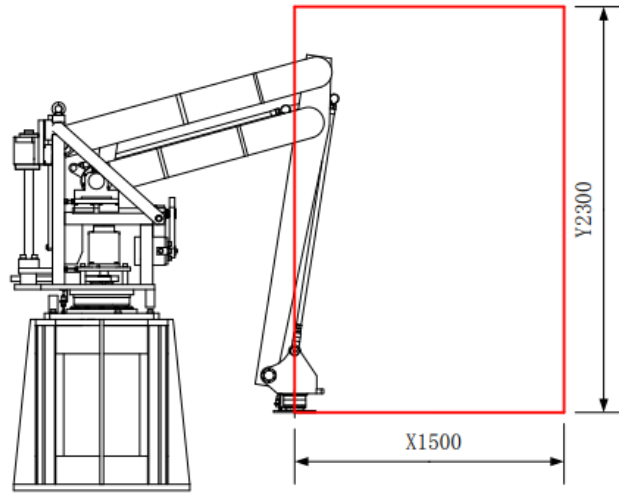
Şekil 2.11. Sistemin, a) mekanik tasarımı, b) testteki gerçek sistem (Xiaoqing ve Jidong, 2011)

Xiao ve diğ. (2013) çalışmalarında yüksek kapasiteli bir paletleme robotu için karşı denge (counter-balancing) metodunun analizi ve optimizasyonunu yapmışlardır. Sistem 200 kg kaldırma kapasitesine sahip 4 serbestlik dereceli bir paletleme robotudur. Yay-damper sistemi kullanılarak sisteme bir karşı denge sistemi kurulmuştur. Sistemin statik analizini hesaplayarak gerekli yay ve sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Sonuç olarak sistemin elektrik motorlarının harcadığı tork azaltılmıştır.

Chen ve diğ. (2014) çalışmalarında hibrit paletleme robotunun matematik modellemesi ve simülasyonu konusunda bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, paletleme robotunun paralel kol mekanizmasının matematik modeli oluşturulmuş ve kinematik çözümünü geometrik bir yaklaşım ile hesaplamıştır. Tasarlanan sistem, çubuk modeli halinde ADAMS analiz programında detaylı bir şekilde modellenmiş ve simülasyona tabi tutulmuştur. Sistemin farklı konumlara yönlendirilmesi sırasında elde edilen pozisyon, hız ve ivme verileri grafiklerle sunulmuştur. Ayrıca, eklemlerin hareket kabiliyeti göz önüne alınarak, dikey düzlemde çalışma uzayı belirlenmiştir. Şekil 2.12’de sistemin yapısal elemanları ve tanımları, Şekil 2.13’te ise sistemin dikey düzlemde ulaşabileceği çalışma uzayı detaylı bir şekilde görselleştirilmiştir.



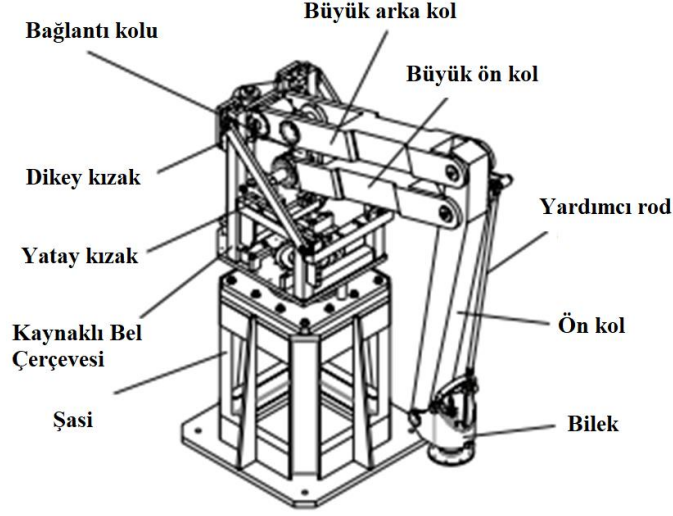
Şekil 2.12. Yapısal elemanların tanıtımı (Chen ve diğ., 2014)



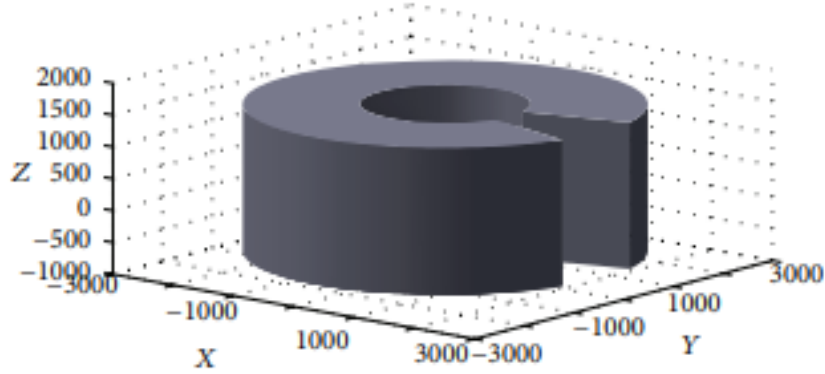
Şekil 2.13. Dikey düzlemdeki çalışma uzayı (Chen ve diğ., 2014)

Tao ve diğ. (2014) araştırmalarında dört serbestlik dereceli bir paletleme robotunun kinematik ve çalışma uzayı analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Paletleme robotunun mekanik yapısı detaylı bir şekilde açıklanmış ve robotun uzuvları ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır. Sistemin kinematik modeli, geometrik yöntemler kullanılarak titizlikle oluşturulmuştur. Dinamik davranışların detaylı bir şekilde incelenebilmesi amacıyla, sistemle ilgili konum, hız ve ivme eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler, MATLAB kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilmiştir. Yapılan simülasyonlar neticesinde, paletleme robotunun maksimum çalışma uzayı belirlenmiştir. Sistemin mekanik yapısının ayrıntılı bir şekilde tanıtıldığı Şekil 2.14'te sistemi oluşturan

mekanik parçalar gösterilmiştir. Ayrıca, Şekil 2.15'te ise paletleme robotunun çalışma uzayı grafik halinde sunulmuştur. Bu analizler, paletleme robotunun kinematik özellikleri ve işlevselliği hakkında kapsamlı bir anlayış sağlamaktadır.



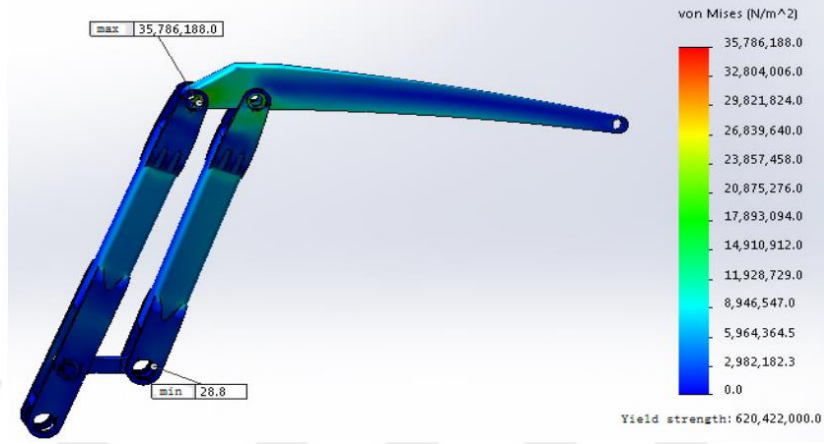
Şekil 2.14. Sistemi oluşturan mekanik parçaların tanıtımı (Tao ve diğ., 2014)



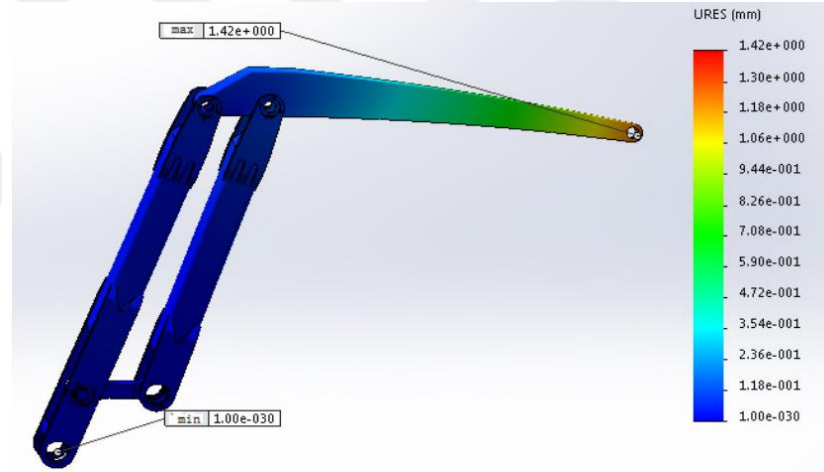
Şekil 2.15. Sistemin çalışma uzayı (Tao ve diğ., 2014)

Xu ve diğ. (2016) çalışmalarında üretim hattında kaplama ürünlerinin paletlenmesinde kullanılmak üzere tasarlanan bir paletleme robotunun tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemin yataklama ve tahrik sistemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Servo motorunun seçimi için gerekli olan ataletsel hesaplamalar yapılarak, uygun motorun seçimi titizlikle gerçekleştirilmiştir. Sistemin mekanik yapısının analizi, SolidWorks Simulation kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre, sistem bu şartlarda yüksek gerilme ve sehimlere maruz kalmamaktadır. Ancak, hafifletme çalışmalarının yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Yapı üzerindeki gerilme dağılımı Şekil 2.16'da gösterilmiş olup, Şekil 2.17'de ise yer

değiştirme dağılımı grafikler halinde sunulmuştur. Bu analizler, tasarlanan paletleme robotunun mukavemet ve dayanıklılık açısından sağlam bir yapıya sahip olduğunu ve potansiyel iyileştirmeler için belirli alanlarda hafifletme çalışmalarının düşünülebileceğini göstermektedir.



Şekil 2.16. Sonlu elemanlar analizi gerilme dağılımı sonucu (Xu ve diğ., 2016)

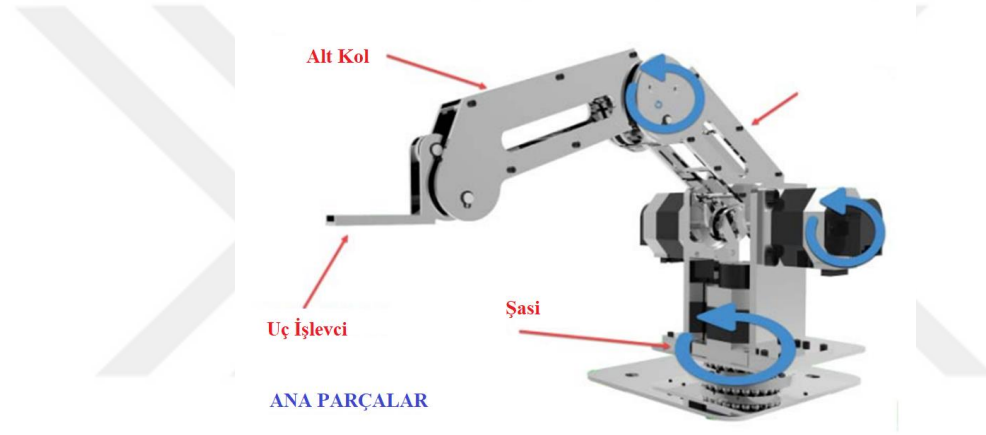


Şekil 2.17. Sonlu elemanlar analizi yer değiştirme dağılımı (Xu ve diğ., 2016)

Zhao ve diğ. (2016) çalışmalarında 2 serbestlik dereceli düzlemsel bir robot kolunun yörünge kontrolünü Genetik Algoritma kullanarak optimize edilmiş Bulanık Mantık PID kontrolcü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sistemin matematik modeli oluşturulmuştur. Bulanık mantık kontrolcü için üyelik fonksiyonları ve kural tabanı elde oluşturulmuştur. Optimizasyon için bir amaç fonksiyonu oluşturulmuş ve optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol sistemi kullanılarak, stabilite artırılmış, değişken kapasitelere daha hızlı uyum sağlayabilen bir sistem geliştirilmiştir.

Issa ve diğ. (2017) çalışmalarında bir paletleme manipülatörünün tasarımı ve kontrolü, Arduino ve MATLAB kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma, açık-kapalı

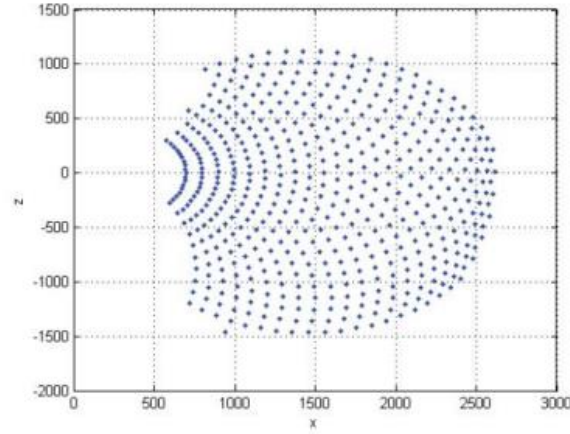
zincir robot kinematikleri ile Seri-Paralel robotlar arasındaki temel farklara odaklanmıştır. Paralel robot mekanizmasındaki tahrikli ve pasif eklem yapıları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sistemin Denavit-Hartenberg (D-H) tablosu oluşturulmuş ve homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak sistemin ileri ve ters kinematik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem, Dobot marka bir robot kolunda deneysel olarak doğrulanmıştır. İleri ve ters kinematik hesaplamalar, MATLAB ortamında çözülmüş ve Arduino üzerinden motor kontrolü sağlanmıştır. Sistemin performansını değerlendirmek amacıyla farklı konumlar belirlenmiş ve tekrarlanabilirlik değerlerini elde etmek için iterasyonlarla konumlar robot üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar, düşük tekrarlanabilirlik hatası ile başarılı konumlama gerçekleştirildiğini göstermiştir. Şekil 2.18'de robotun mekanik tasarımı ve uzuvların tanıtımı gösterilmiştir.



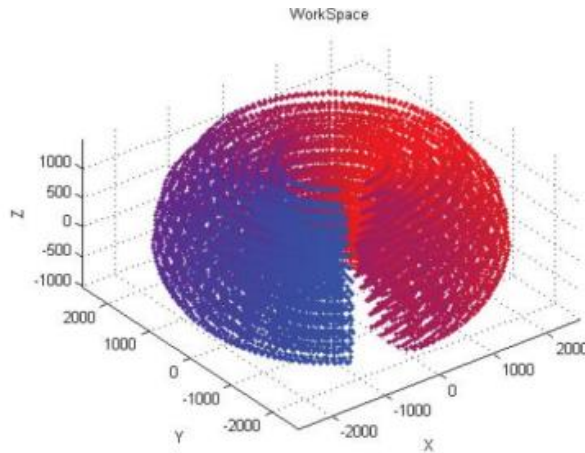
Şekil 2.18. Robotun mekanik tasarımı ve uzuvları (Issa ve diğ., 2017)

Ye ve diğ. (2017) çalışmalarında kepçe görevi gören iş makinesinin kovanının, doğrusal olmayan hidrolik sisteminin pozisyon kontrolünü PID kontrolcü kullanarak gerçekleştirmiştir. PID katsayılarının optimizasyonu Geliştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu (IPSO) yöntemi ile yapılmıştır. Öncelikle sistemin devre şeması ve matematik modeli oluşturulmuştur. Sistem ASMESim yazılımında modellenmiş ve simüle edilebilir hale getirilmiştir. Modelin deneysel doğrulaması için gerçek bir kepçe kullanılarak veri toplanmış ve simülasyon verileri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel doğrulaması gerçekleştirilen sistem ASMESim yazılımı ve MATLAB/Simulink kullanılarak eş simülasyona tabi tutulmuş ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda optimal kontrolcü kullanılarak pozisyon kontrolünün daha düşük hata miktarı ile gerçekleştirildiği görülmüştür.

He (2018) çalışmasında, bir paletleme robotunun kinematik analizi ve çalışma uzayının tespiti üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Kinematik analiz sonucu belirlenen çalışma uzayının, tanımlanan görev için uygunluğu detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sistemin gerçekleştireceği görev tanımlanmış, taşınacak paket boyutları ile bunların istifleneceği paletin boyutları göz önüne alınarak sistem için gerekli minimum çalışma uzayı belirlenmiştir. Ardından, sistem kinematik hesapları Denavit-Hartenberg yöntemi ve homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sistemin maksimum çalışma uzayı belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, paletleme robotunun çalışma uzayının verilen görevi başarıyla tamamlamak için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.19'da X-Z düzleminde kesit alınmış çalışma uzayı, Şekil 2.20'de ise üç boyutlu ortamdaki çalışma uzayı detaylı bir şekilde görselleştirilmiştir.



Şekil 2.19. X-Z düzlemindeki çalışma uzayı (He, 2018)



Şekil 2.20. Üç boyutlu uzayda çalışma uzayı (He, 2018)

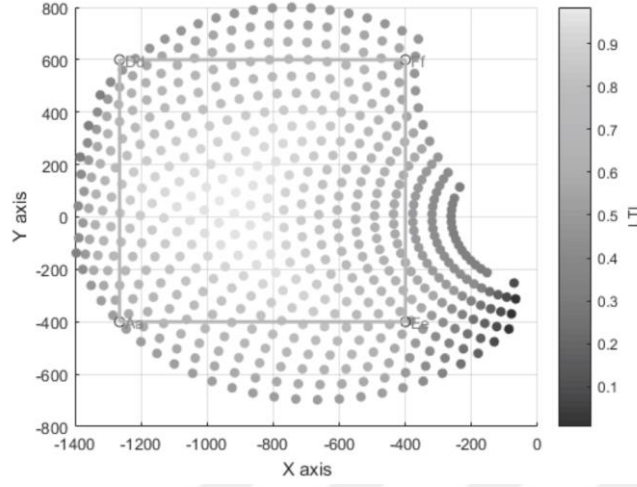
Kelly ve diğ. (2019) çalışmalarında, Seri Kinematik Manipülatör (SKM) ve Paralel Kinematik Manipülatörler (PKM) kavramları tanımlanmış ve bu iki sistem temel alınarak oluşturulan hibrit kinematik yapının Quasi-Serial (Yarı Seri) Kinematik Manipülatör olarak adlandırılması yapılmıştır. Ters kinematik geometrik ve trigonometrik yaklaşımlar kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla, SolidWorks programı aracılığıyla elde edilen eklem açılarına karşılık gelen uç işlevcinin konumu analitik bir çözümle karşılaştırılmış ve yüzde hata oranları tablo halinde sunulmuştur. Bulgular, trigonometrik hesaplamalar sonucu elde edilen kinematik model kullanılarak yapılan çözümlerin %0.02 maksimum hata oranıyla doğru olduğunu göstermektedir. Deneysel bir yaklaşım olarak, mekanizmanın test edilmesi için eklemeli imalat yöntemi kullanılarak 3D yazıcı ile bir robot kol üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu, teorik hesaplamaların pratik uygulama ile karşılaştırılması için önemli bir adım olmuştur.

Fu ve diğ. (2019) çalışmalarında, paletleme robotlarının görevlerini daha az enerji sarfiyatıyla gerçekleştirmek amacıyla yapılan bir araştırmada, ABB firması tarafından üretilen IRB 460 paletleme robotunun enerji tüketimini azaltmak üzere stratejiler geliştirilmiş ve bu stratejilerin doğrulanması için yine ABB üretimi RobotStudio yazılımı kullanılmıştır. Enerji sarfiyatını düşürmek amacıyla uygulanabilecek yöntemler arasında, en az enerji sarfiyatına sahip yörüngenin planlanması, servo motor ivmelenmelerinin düzenlenmesi ve eklem hızlarının kontrol edilmesi bulunmaktadır. Araştırmacılar, yörüngenin düzenlenerek daha düşük enerji sarfiyatının mümkün olduğunu ve doğru ivmelenme kontrolü ile enerji tüketiminin azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Hua ve Yan (2020) çalışmalarında bir paletleme robotunun yapısal elemanlarının karşıladığı yükler incelenmiş ve yapıyı tehlikeye sokmayacak şekilde hafifletme çalışmaları yapılmıştır. Bir CAD programında tasarlanan sistemin sonlu elemanlar analizi ANSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, sistemin ağırlığı toplamda 10.3 MPa gerilme artışı karşısında %23.37 daha hafif bir tasarım yapılmıştır.

Wei ve diğ. (2020) çalışmalarında, çift paralelogram mekanizması kullanılarak geliştirilen bir robotun bilek duruşunu koruyarak, robotun çalışma alanının geometrik tanımını yapmışlardır. Araştırmacılar, robotun performansını değerlendirmek için robot kol uzunluğunu ve mekanizma açısı boyutlarını incelemişlerdir. Yapılan mühendislik tasarımı incelendiğinde, robot başarılı bir şekilde paletleme görevini yerine getirirken hem gereken kuvvet iletim performansını sağlamakta hem de çalışma alanının

gereksinimlerini karşılamaktadır. Sistemin çalışma uzayı ve görev tanımı Şekil 2.21’de verilmiştir.

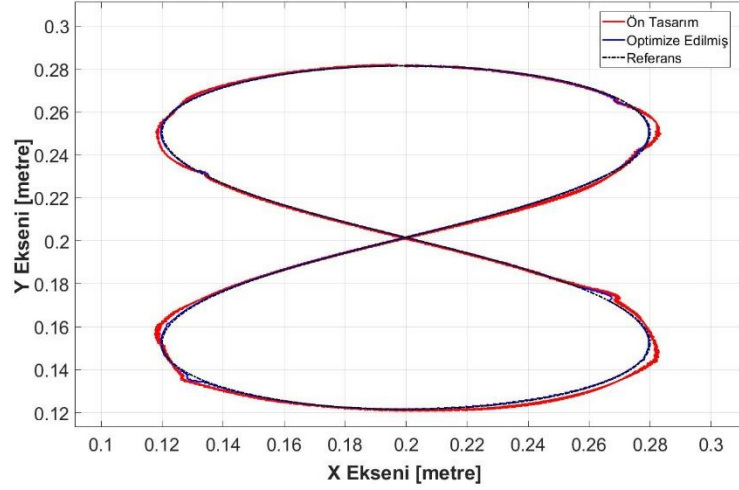


Şekil 2.21. Robotun çalışma uzayı ve görev tanımı (Wei ve diğ., 2020)

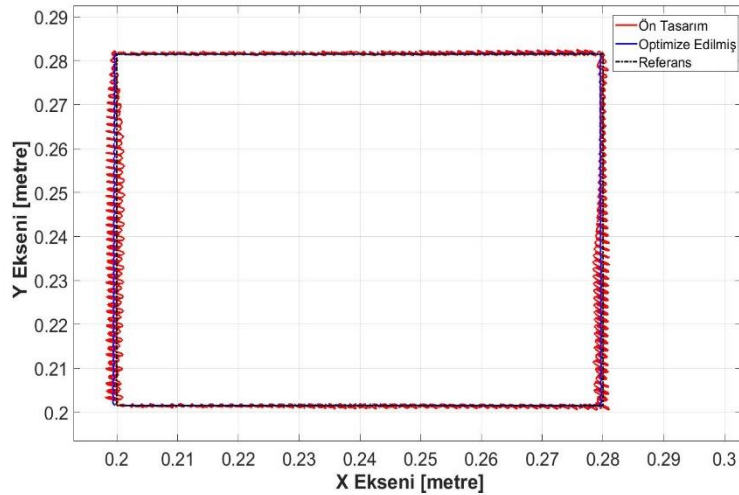
Zhuo ve Cheng (2022) çalışmalarında, geleneksel paletleme robotlarının taşıma görevlerini optimize etmeyi amaçlamışlardır. Özellikle, yol düzgünlüğünü artırmak ve bu sayede mekanik zorlanmayı ve eklem aşınmasını azaltmak için beşinci dereceden polinom interpolasyonuna dayalı bir yol düzgünlüğü optimizasyon yöntemi tasarlamışlardır. Bu yöntemin etkinliğini göstermek için IRB 460 MBS modeli kullanılarak dinamik simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Bu süreçte, eklem uzayındaki geçiş yol noktalarının açısal hız ve ivme değerleri hesaplanarak, segmentli yolların polinom katsayıları belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu yöntemle üretilen yolların geleneksel yöntemlere göre daha düzgün olduğu ve bu sayede kontrol sisteminin yol izleme performansının iyileştirildiği kanıtlanmıştır.

Zhuo ve diğ. (2023) çalışmalarında, geleneksel paletleme robotlarının kinematik planlama ve hareket kontrolü sorunlarını çözmek amacıyla yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, hibrid bir 4 eksenli çok eklemli paletleme robot sistemi modelleme yöntemi üzerine odaklanmaktadır. Araştırmacılar, ABB IRB460 paletleme robotunu temel alarak MATLAB/Simulink/Simscape platformunda bir Multibody modeli oluşturmuş, hareket yollarını planlamış ve dinamik simülasyonlar kullanarak sistem modelinin doğruluğunu doğrulamışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar, bu yeni sistem modelinin geleneksel yöntemlere göre daha iyi performans gösterdiğini ve paletleme robotları için tasarım ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi için uygun olduğunu öngörmüşlerdir.

Çınar ve diğ. (2023) çalışmalarında, üç serbestlik dereceli (RRR) düzlemsel bir çizim robotunun uç işlevcinin konum kontrolü için bir kontrolcü tasarımı ve arıların kaynak arama davranışı incelenerek geliştirilmiş olan Arı Algoritması (AA) ile optimizasyonu incelenmiştir. Matematiksel modelleme, kinematik hesaplamalar ve PID kontrolcü tasarımı MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Arı Algoritması kullanılarak kontrolcü kazançları belirlenmiş ve optimize edilmiş PID parametreleriyle 8 (sekiz) ve kare çizimleri yapılmıştır. Bu çizimler, referans çizimlerle karşılaştırılarak 11 farklı hata kriteriyle değerlendirilmiştir. Optimizasyon sonrası, çizimlerin doğruluk oranlarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, sistem simülasyonu ve optimizasyon çalışmalarıyla birlikte sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Sekiz çizimi Şekil 2.22’de, kare çizimi ise Şekil 2.23’te verilmiştir.



Şekil 2.22. Sekiz Çizimi (Çınar ve diğ., 2023)



Şekil 2.23. Kare Çizimi (Çınar ve diğ., 2023)

3. SİSTEM TASARIMI

3.1. Sistemin Teknik Özellikleri ve Tasarım Hedefleri

Çalışmanın amacı, döküm-dövme fabrikaları ve benzeri zorlu ortamlarda kullanılmak üzere bir sistem geliştirmektir. Bu doğrultuda, sistemin bileşenleri seçilirken ve tasarlanırken bu zorlu çalışma koşulları dikkate alınmıştır.

Sistemin yapısal mekanizması olarak, paletleme robotlarında sıkça tercih edilen bir yapı olan paralel kol mekanizması tercih edilmiştir. Bu mekanizma, özellikle uç işlevcisinin taşıdığı yükün zeminle her zaman paralel kalmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Elektrik ve hidrolik tahrikli yüksek kapasiteli robot kollarında, paralel kol mekanizması yaygın olarak tercih edilmektedir.

Sistem, 6 serbestlik derecesine sahip bir robot kol olarak tasarlanmıştır ve uç işlevci olarak kısıkaç kullanılmıştır. Özellikle, uç işlevcisinin bağlantı noktası değiştirilebilir bir yapıda tasarlanmıştır ve farklı uç işlevci tiplerinin kullanılabilmesi için özelleştirilebilir alt yapı oluşturulmuştur. Ayrıca, sistem 6 metre uzunluğunda bir kızak üzerinde hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır.

Sistemin uzanma mesafesi yatayda 7 metre ve dikeyde 6 metre aralıklarında belirlenmiştir ve kaldırma kapasitesi 4 metrede 650 kg olacak şekilde tasarlanmıştır.

Sistemin tahrik elemanları, hidrolik silindirler ve hidromotorlardan oluşmaktadır. Bu elemanların boyutlandırması ve seçimi, farklı çalışma pozisyonlarında, çeşitli hareket hızları ve ivmelenme koşullarında incelenerek belirlenmiştir.

Sistem, dikeyde ve yataydaki hareketi sırasında uç işlevcinin 1 m/s lineer hızla hareket etmesi hedeflenmiştir. Ancak çoklu eklem hareketlerini içeren 3 boyutlu hareketlerde uç işlevci hareketi 0.4 m/s hız ile sınırlandırılması uygun görülmüştür. Ayrıca, dönüş eklemlerindeki hareketinin de 60 °/s hıza ulaşabilmesi amaçlanmıştır. Bu hız ve ivmelenme şartını sağlamak üzere yapılan analizler sonucunda, gerekli olan silindir boyutlandırması, hidromotor seçimi, pompa seçimi ve yön valfi seçimleri titizlikle gerçekleştirilmiştir.

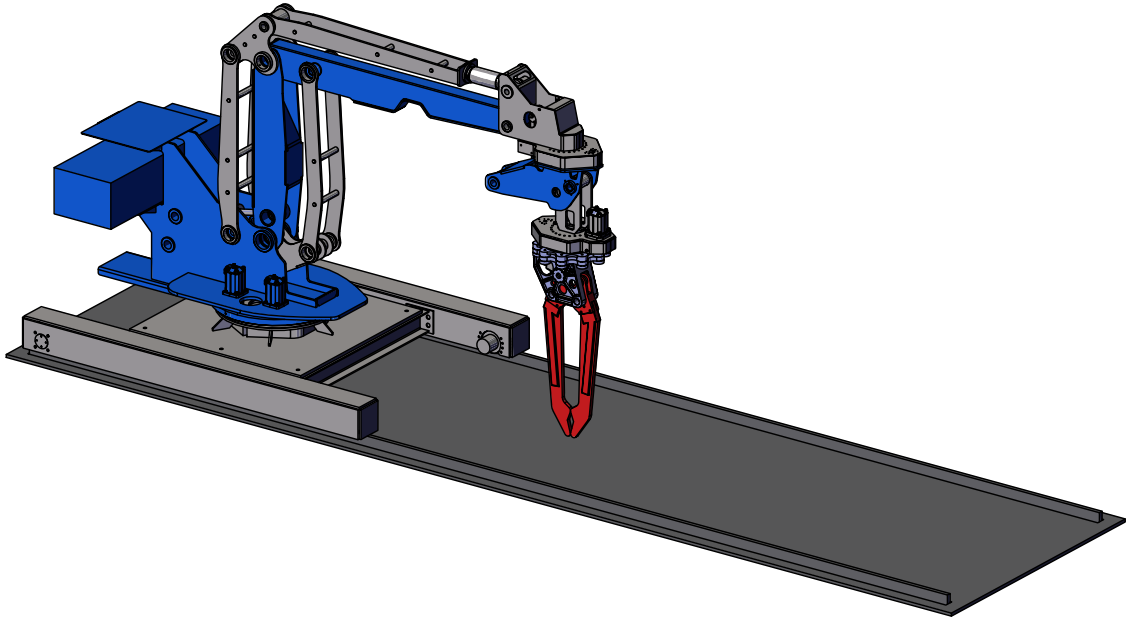
Sistemin temelde iki farklı kontrol yöntemi bulunmaktadır. Birincisi, operatör kabininden manuel kontrol sağlayarak operatör aracılığıyla alma ve bırakma görevlerini gerçekleştirmektir. İkincisi ise, bir kontrol kumandası aracılığıyla eklem veya kartezyen tabanlı yönlendirme sağlayarak programlanabilir bir yapıya sahiptir. Bu yöntemle öğretilmiş konumlara otomatik olarak gidecek fonksiyona sahi olacak şekilde tasarlanmıştır.

3.2. Mekanik Tasarım

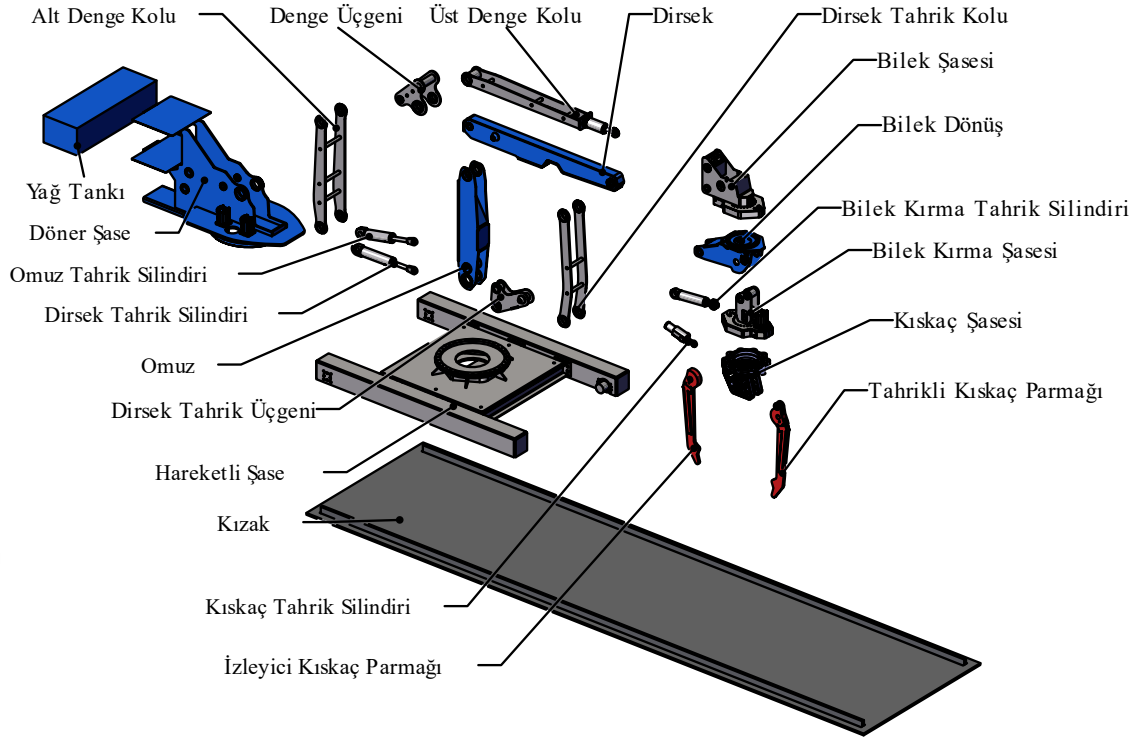
Sistem, 6 serbestlik dereceli ve paralel kol mekanizmasına sahip robot kol olarak tasarlanmıştır. Ayrıca harici eklem kullanılarak bir kızak üzerinde doğrusal olarak hareket ederek hareket esnekliği kazandırılmıştır.

Paralel kol mekanizması, yüksek kaldırma kapasitesine sahip paletleme robotlarında yaygın bir şekilde kullanılan bir mekanizma türüdür. Bu mekanizmanın sunduğu avantajlardan biri, uç işlevciyi her pozisyonda yere paralel konumlandırabilmesi yeteneğidir. Bu özellik, yüksek hassasiyet ve hızlı konumlandırma operasyonlarında fayda sağlamaktadır. Ayrıca, paralel kol mekanizmaları genellikle yüksek taşıma kapasitesine sahip sistemlerde tercih edildiği gibi, yüksek kaldırma kapasitesi gerektiren robotik sistemlerde de avantajlıdır. Bu mekanizma aynı zamanda yüksek dayanıklılık ve stabilite sağlar, bu da endüstriyel ortamlarda uzun ömürlü kullanımı öngörülmektedir. Ancak bu tip bir robotik sistemin mekanik ve kinematik tasarımı, aynı serbestlik derecesine sahip düz seri bağlı bir sisteme göre daha zor olabilmektedir.

Sistemin katı model tasarımı Solid Works ortamında tasarlanmıştır. Sistemin katı model tasarımı Şekil 3.1’de, temel bileşenlerim tanımlandığı patlatılmış görüntüsü Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sistemin katı model tasarımı



Şekil 3.2. Sistemin patlatılmış görüntüsü

3.3. Kinematik Model

3.3.1. Paralel Kol Mekanizması

Sistem, paralel kol mekanizması temel olarak geliştirilmiştir. Paralel kol mekanizması, endüstriyel alanda sıklıkla tercih edilen bir kinematik yapı modelidir. Bu mekanizma, endüstriyel paletleme robotları gibi uygulamalarda kullanıldığında, işlevciyi yere paralel olarak yerleştirme olanağı sağlar. Böylece, robot paletleme sürecinde yüksek düzeyde stabilite ve hassasiyet sunar. Ayrıca, bu mekanizma yüksek kaldırma kapasitesine sahip sistemlerde yükün dengeli bir biçimde taşınmasını ve dağıtılmasını sağlar.

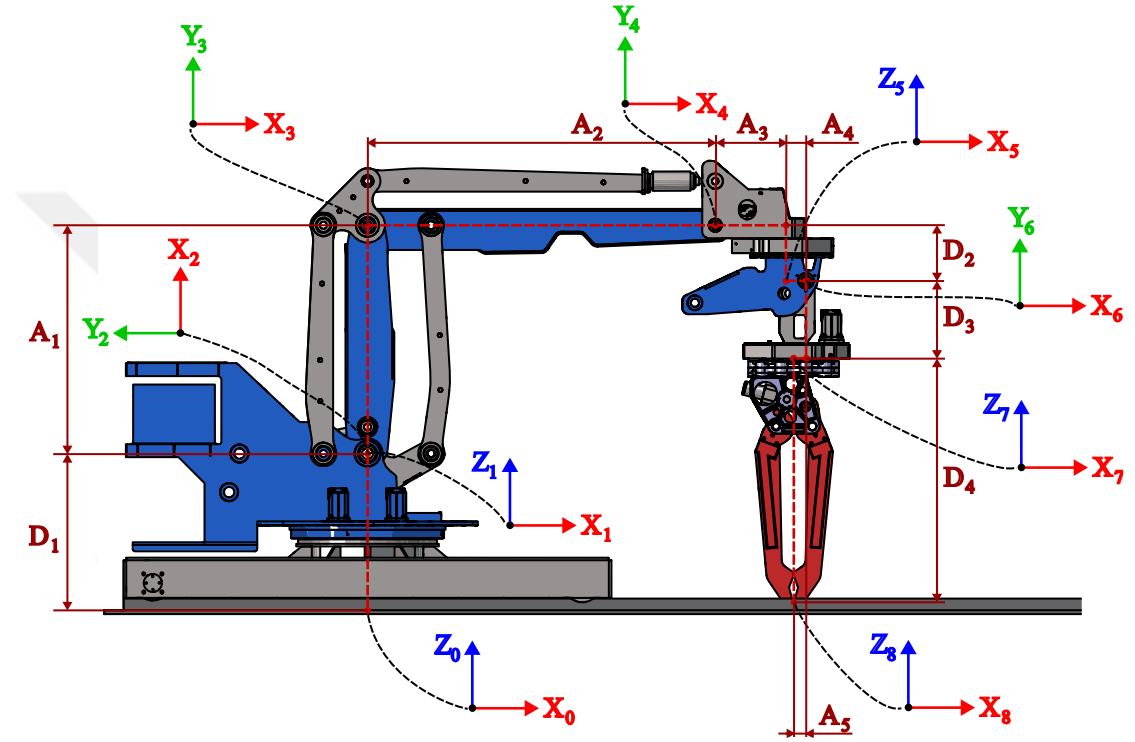
Ancak, paralel dört çubuk mekanizmasının bazı kısıtları bulunmaktadır. Özellikle, tasarım ve imalat süreçlerinin karmaşıklığı maliyeti artırabilir. Ayrıca, bazı durumlarda mekanizmanın boyutları ve hareket aralığı sınırlı olabilir, bu durum bazı uygulamalarda kullanımını kısıtlayabilir.

3.3.2. Homojen Dönüşüm Matrisleri

Bir robotun uç işlevcisinin, belirli bir referans koordinat sistemi içindeki konumunu ve oryantasyonunu, eklem açılarına bağlı olarak hesaplamak ileri kinematik hesabı yöntemi ile mümkündür. Ayrıca, uç işlevci oryantasyonu ve konumu belirli bir

referans konumuna göre belli ise ters kinematik metodu ile eklem açıları hesaplanabilmektedir.

Bu hesaplama yöntemlerinin sistematik bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için Denavit ve Hartenberg (1955) tarafından bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem esas alınarak, sistemin D-H tablosu hazırlanmış ve Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ayrıca sistemin eklemlerine yerleştirilmiş koordinat sistemleri ve uzuv uzunlularını temsil eden semboller Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Koordinat sistemi yerleşimi

Çizelge 3.1. D-H parametre tablosu

i	α_{i-1} [°]	a_{i-1} [mm]	d_i [mm]	θ_i [°]	θ_i	Parametreler
1	0	0	D_1	θ_1	θ_1	$A_1 = 1760$ mm $A_2 = 2680$ mm $A_3 = 539,05$ mm $A_4 = 160$ mm $A_5 = 95$ mm $D_1 = 1232,85$ mm $D_2 = 428$ mm $D_3 = 578$ mm $D_4 = 1945$ mm
2	90	0	0	θ_2 (90)	θ_2	
3	0	A_1	0	θ_3 (-90)	θ_3	
4	0	A_2	0	θ_4	θ_4	
5	-90	A_3	(-) D_2	θ_5	θ_5	
6	90	A_4	0	θ_6	θ_6	
7	-90	(-) A_5	(-) D_3	θ_7	θ_7	
8	0	0	(-) D_4	0	0	

Eklem homojen dönüşüm matrisleri, bu tablolar esas alınarak türetilmektedir. Her bir eklem için, birbirlerine göre oluşturulmuş homojen dönüşüm matrisleri, ileri ve ters kinematik hesaplamalarında kullanılmıştır. Genel homojen dönüşüm matrisi, Denklem 3.1'de verilmiş ve yedi eklem ve uç işlevci için homojen dönüşüm matrisleri elde edilmiştir. Ayrıca, dördüncü eklem tahrikli değildir ancak mekanizmanın bir parçası olarak serbestçe hareket edebilmektedir. Dolayısıyla kinematik hesabına dahil edilmektedir.

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Sisteminde bulunan yedi eklem ve uç işlevci için oluşturulmuş homojen dönüşüm matrisleri Denklem 3.2 – 3.9’da verilmiştir.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & A_1 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & A_2 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & A_3 \\ 0 & 0 & 1 & -D_2 \\ -\sin \theta_5 & -\cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & A_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^6_7T = \begin{bmatrix} \cos \theta_7 & -\sin \theta_7 & 0 & -A_5 \\ 0 & 0 & 1 & -D_3 \\ -\sin \theta_7 & -\cos \theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$${}^7_8T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -D_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.3.3. İleri Kinematik ve Ters Kinematik

Elde edilen homojen dönüşüm matrisleri sırasıyla çarpıldığında, elde edilen nihai homojen dönüşüm matrisi, sistemin ileri kinematik modelini ifade etmektedir. Bu matris incelendiğinde, uç işlevci konum ve oryantasyon bilgisi elde edilebilmektedir. İleri kinematik hesabı Denklem 3.10'da verilmiştir.

$${}^0_8T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T {}^6_7T {}^7_8T \quad (3.10)$$

Çarpım sonucu elde edilen 0_8T matrisi Denklem 3.11'de ve açılımı EK-1'de verilmiştir.

$${}^0_8T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Sistemin yapısını oluşturan paralel kol mekanizması, kinematik olarak uç işlevcisini sürekli olarak yere paralel tutabilme avantajına sahiptir. Bu avantajdan yararlanılarak, sistemin ters kinematik hesabı, birbirine eklenmiş iki farklı robota dayalı olarak çözülebilmektedir.

Bilek eklemlerinden oluşan beşinci, altıncı, yedinci eklemler ve uç işlevcinin matrisleri, çözüm sürecinde öncelikli olarak ele alınabilir. Bu çözümü

gerçekleştirebilmek için, sistemdeki matrisler en uç noktadan başlayarak geriye doğru işlenerek, her bir matrisin tersi alınır.

$[{}^5T_6{}^6T_7{}^7T_8]$ matrisinin tersi alınarak her iki taraf ile çarpılır. Eşitlik Denklem 3.12’de verilmiştir.

$${}^0T[{}^5T_6{}^6T_7{}^7T_8]^{-1} = {}^0T_1{}^1T_2{}^2T_3{}^3T_4{}^4T_5 \quad (3.12)$$

Denklem 3.12’de yapılan işlem sonucunda elde edilen matrisin (3,1) ve (3,3) indisindeki değerler kullanılarak altıncı eklemin açısı, aynı matrisin (1,4) ve (2,4) indislerini kullanarak birinci eklem açısı ve aynı matrisin (1,1) ve (2,1) indisleri kullanılarak beşinci ekleminin açısı bulunabilmektedir. Altıncı eklem açısı Denklem 3.13’te, beşinci eklem açısı Denklem 3.14’te, birinci eklem açısı Denklem 3.15’te verilmiştir.

$$\theta_6 = \text{Atan2}({}^0T_{31}, {}^0T_{33}) \quad (3.13)$$

$$\theta_5 = \text{Atan2}({}^0T_{14}, {}^0T_{24}) \quad (3.14)$$

$$\theta_1 = \text{Atan2}({}^0T_{11}, {}^0T_{21}) \quad (3.15)$$

Yedinci eklemin açısı kullanıcı tarafından yönelim tanımlanacaktır.

Çözümün ikinci aşamasında 0T_4 matrisi kullanılarak ters kinematik çözümü yapılacaktır. Bu aşamada uç işlevci olarak dördüncü eklem seçilir. Referans koordinat sisteminden dördüncü ekleme kadar olan homojen dönüşüm matrisi Denklem 3.16’da verilmiştir. Bu matris esas alınarak yapılacak çözüm ile geriye kalan θ_2 ve θ_3 eklem açıları hesaplanabilmektedir.

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} c(\theta_{23})c(\theta_1) & -s\theta_{23}c\theta_1c\theta_1 & s\theta_1 & P_x + c\theta_1A_3 \\ c(\theta_{23})s(\theta_1) & -s\theta_{23}c\theta_1s\theta_1 & -c\theta_1 & P_y + s\theta_1A_3 \\ s(\theta_{23}) & c\theta_{23} & 0 & P_z - D_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Sonuç olarak uç işlevci yerine 4. eklemin ters kinematik kullanarak çözülmesi ile tüm kinematik problemi çözülmüş olacaktır.

0_1T Matrisinin tersi alınarak 0_4T ile soldan çarpılır. Bu çarpım Denklem 3.17’de görülmektedir. Ayrıca bu eşitlik çözülerek Denklem 3.18 elde edilir.

$$[{}^0_1T]^{-1}{}^0_4T = {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & P_x c\theta_1 + P_y s\theta_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & P_y c\theta_1 - P_x s\theta_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & P_z - D_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & A_2 c\theta_{23} + A_1 c\theta_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & A_2 s\theta_{23} + A_1 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18’de verilen matris kullanılarak Denklem 3.19 ve Denklem 3.20’de verilen denklemler elde edilmiştir.

$$P_x c\theta_1 + P_y s\theta_1 = A_2 c\theta_{23} + A_1 c\theta_2 \quad (3.19)$$

$$P_z - D_1 = A_2 s\theta_{23} + A_1 s\theta_2 \quad (3.20)$$

Denklem 3.19 ve Denklem 3.20’nin karelerinin taraf tarafa toplamaları yapılarak Denklem 3.21 elde edilir.

$$(P_x c\theta_1 + P_y s\theta_1)^2 + (P_z - D_1)^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_2 A_3 c\theta_3 \quad (3.21)$$

Denklem 3.21 denkleminde $c\theta_3$ yalnız bırakılır. Denklem 3.22 de gösterilmiştir.

$$c\theta_3 = \frac{(P_x c\theta_1 + P_y s\theta_1)^2 + (P_z - D_1)^2 - A_1^2 - A_2^2}{2A_2 A_3} \quad (3.22)$$

$c\theta_3$ ve trigonometrik eşitlikler kullanılarak, Denklem 3.23 trigonometrik denklemini kullanılarak Denklem 3.24 de verilen eşitlik oluşturularak θ_3 hesaplanır.

$$\theta_3 = \text{Atan2}(\pm\sqrt{1 - c\theta_3^2}, c\theta_3) \quad (3.23)$$

$$\theta_3 = \text{Atan2} \left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{(P_x c \theta_1 + P_y s \theta_1)^2 + (P_z - D_1)^2 - A_1^2 - A_2^2}{2A_2 A_3} \right)^2}, \frac{(P_x c \theta_1 + P_y s \theta_1)^2 + (P_z - D_1)^2 - A_1^2 - A_2^2}{2A_2 A_3} \right) \quad (3.24)$$

Denklem 3.23'te hesaplanan θ_3 Denklem 3.20'de yerine konulmuştur. Denklem 3.20'deki trigonometrik ifadeler, toplam-fark formülleri kullanılarak açılmıştır. Bu açılımının sadeleştirilmiş hali Denklem 3.25'te gösterilmiştir.

$$P_z - D_1 = (A_2 c \theta_3 + A_2) c \theta_2 + A_2 s \theta_3 c \theta_2 \quad (3.25)$$

Denklem 3.25 kullanılarak, Denklem 3.26'da verilmiş olan trigonometrik denklemi kullanarak, eşitlik denklemi oluşturulur. Bu eşitlik kullanılarak θ_2 hesaplanmış olur. Denklem 3.27'de gösterilmiştir.

$$\theta_2 = \text{Atan2}(a, b) + \text{Atan2}(\pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (3.26)$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}(A_2 c \theta_3 + A_2, A_2 s \theta_3) + \text{Atan2}(\pm \sqrt{(A_2 c \theta_3 + A_2)^2 + (A_2 s \theta_3)^2 - (P_z - D_1)^2}, (P_z - D_1)) \quad (3.27)$$

Sonuç olarak iki aşamalı olarak gerçekleştirilen bu ters kinematik çözümde, birinci aşamada θ_1 , θ_5 ve θ_6 hesaplanırken; ikinci aşamada ise θ_2 ve θ_3 hesaplanmıştır. θ_7 açısı ise yönelim açısı olmak üzere kullanıcı tarafından tanımlanması gerekmektedir.

3.3.4. Yörünge ve Hareket Planlama

Sistem, iki nokta arasındaki hareketi doğrusal bir yörünge boyunca gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Bu tasarım, sistemin anlık olarak algıladığı uç işlevcisinin durumu ile hedeflenen konum arasındaki homojen dönüşüm matrislerinin kullanımına dayanmaktadır. Sistemin anlık olarak algıladığı uç işlevci homojen dönüşüm matrisi Denklem 3.28'de, hedef konumun homojen dönüşüm matrisi ise Denklem 3.29'da

ifade edilmiştir. Ayrıca, yedinci eklem oryantasyon seçimi, başlangıç konumu için θ_{7_1} olarak, hedef konum için ise θ_{7_2} olarak tanımlanmıştır.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} r_{11_1} & r_{12_1} & r_{13_1} & P_{x_1} \\ r_{21_1} & r_{22_1} & r_{23_1} & P_{y_1} \\ r_{31_1} & r_{32_1} & r_{33_1} & P_{z_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} r_{11_2} & r_{12_2} & r_{13_2} & P_{x_2} \\ r_{21_2} & r_{22_2} & r_{23_2} & P_{y_2} \\ r_{31_2} & r_{32_2} & r_{33_2} & P_{z_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

İki nokta arasındaki farkın belirlenmesiyle, oryantasyon ve kartezyen hareket miktarı belirlenir. Bu amaçla, hedef konumun homojen dönüşüm matrisinden başlangıç konumunun homojen dönüşüm matrisi çıkarılarak fark hesaplanır. Elde edilen homojen dönüşüm matrisi sonucu, Denklem 3.30'da ifade edilmiştir. Ayrıca, başlangıç ve hedef konumlarındaki yedinci eklem yönelim açısı arasındaki fark da hesaplanır. Bu hesaplama işlemi Denklem 3.31'de sunulmuştur.

$${}^0T_{2-1} = \begin{bmatrix} r_{11_2} - r_{11_1} & r_{12_2} - r_{12_1} & r_{13_2} - r_{13_1} & P_{x_2} - P_{x_1} \\ r_{21_2} - r_{21_1} & r_{22_2} - r_{22_1} & r_{23_2} - r_{23_1} & P_{y_2} - P_{y_1} \\ r_{31_2} - r_{31_1} & r_{32_2} - r_{32_1} & r_{33_2} - r_{33_1} & P_{z_2} - P_{z_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\theta_{7_{2-1}} = \theta_{7_2} - \theta_{7_1} \quad (3.31)$$

Başlangıç konumu ile hedef konumu arasındaki doğrusal yörünge, ara duraklar eklenerek parçalanmıştır. Bu ara duraklar için hesaplanmış matrislerin her biri, ters kinematik hesabına tabi tutularak, istenen doğrusal hareketi izleyecek eklem açıları hesaplanır. Yörünge planlama sırasında kaç durak kullanılacağını sayısı n_{durak} olarak ifade edilmektedir.

Denklem 3.30'da verilen iki konum arası homojen dönüşüm matrisi farkı ve Denklem 3.31'de verilen yedinci eklem farkları, durak sayısına bölünerek her bir durak için başlangıç konumundan itibaren hedef konuma kadar her adımda eklenmesi gereken miktar hesaplanır. Birim adım için homojen dönüşüm matrisi Denklem 3.32'de

verilirken, her bir adımda eklenmesi gereken yedinci eklem açısı miktarı Denklem 3.33'te verilmiştir.

$${}^0T_{8\text{durak}} = \begin{bmatrix} \frac{r_{112-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{r_{122-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{r_{132-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{P_{x2-1}}{n_{\text{durak}}} \\ \frac{r_{212-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{r_{222-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{r_{232-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{P_{y2-1}}{n_{\text{durak}}} \\ \frac{r_{312-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{r_{322-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{r_{332-1}}{n_{\text{durak}}} & \frac{P_{z2-1}}{n_{\text{durak}}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\theta_{7\text{durak}} = \frac{\theta_{72-1}}{n_{\text{durak}}} \quad (3.33)$$

Her bir durak için elde edilen homojen dönüşüm matrisi ve yedinci eklem yönelim açısı, ayrı ayrı ters kinematik hesabına tabi tutulur. Bu işlem sonucunda, başlangıç noktasından hedef konuma kadar her bir duraktan geçebilmek için gerekli eklem açıları dizileri halinde hesaplanır.

Sistemin zamana bağlı hareket planı, çeşitli hesaplama yöntemlerini kullanarak elde edilmektedir. Öncelikle iki nokta arasındaki kartezyen mesafe Öklid Mesafesi metodu kullanılarak hesaplanmaktadır.

Başlangıç konumu homojen dönüşüm matrisi olarak Denklem 3.28, hedef nokta homojen dönüşüm matrisi olarak ise Denklem 3.29 esas alınır, iki konum arasındaki kartezyen uzaklık Denklem 3.34 kullanılarak hesaplanabilir.

$$d_{\text{kartezyen}} = \sqrt{(P_{x2} - P_{x1})^2 + (P_{y2} - P_{y1})^2 + (P_{z2} - P_{z1})^2} \quad (3.34)$$

İki nokta arası kartezyen mesafe, kullanıcı tarafından belirlenmiş uç işlevci hızına ($\vartheta_{uç}$) bölünerek hareketin tamamlanması için gerekli süre ($t_{hareket}$) hesaplanır. Yapılan hesaplama Denklem 3.35'te verilmiştir.

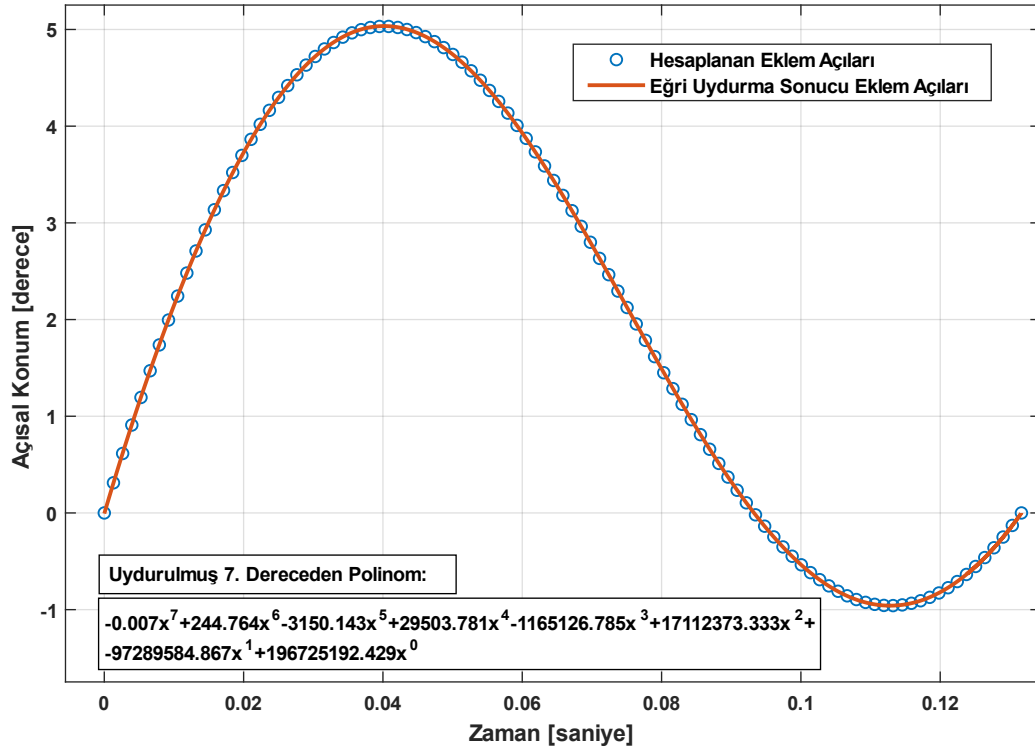
$$t_{hareket} = \frac{d_{\text{kartezyen}}}{\vartheta_{uç}} \quad (3.35)$$

Zamana bağlı hareket planlaması, hesaplama sonucunda elde edilen hareket süresi ve yörünge planlaması sırasında elde edilen eklem açılarının değişim tabloları kullanılarak icra edilebilir. Ancak, hareket planlama sürecinde temel bir zorluk, yörünge

planlama aşamasında hesaplanan eklem açılarının bir denklemle dönüştürülmesi ve istenen zaman aralığında tamamlanmasının sağlanmasıdır. Bu adım, sistemdeki hareketin doğru bir şekilde zamanlandırılmasını ve istenen hedefe ulaşılmasını temin etmek için dikkatle ele alınması gereken kritik bir aşamadır.

Eklem açısı değişim grafiklerini analiz etmek ve bir denklem oluşturmak için eğri uydurma metodu kullanılmıştır. Bu yöntem, hesaplanan eklem açısı değişim verilerini en uygun şekilde temsil etmek amacıyla uygun bir eğriyi belirlemeyi hedefler. Özellikle, bu süreçte, tüm noktalardan geçen bir eğri denklemi oluşturmak için yedinci dereceden bir polinomun katsayıları ayarlanır. Oluşturulan bu denklem, veri setindeki noktaların genel eğilimini yansıtan ve istenen eklem açısı değişimini zamana bağlı olarak ifade eden bir matematiksel ifadedir. Bu yöntem, sistemdeki hareketin doğru bir şekilde modellenmesini ve zamanlama planlamasını geliştirmek için kullanılır.

Şekil 3.4'te sunulan grafik, eğri uydurma yönteminin bir örneği olarak hazırlanmıştır. Bu grafikte, hesaplanmış olan bir yörüngenin eklem açısı değişimi, eğri uydurma sonucunda elde edilen denklem ve zamana bağlı değişim görülmektedir.



Şekil 3.4. Eğri uydurma yöntemi örneği

Tüm eklemlerin zamana bağlı hareket planı bu şekilde hesaplanarak kontrol edilmektedir.

3.4. Dinamik Model

Sistemin uç noktasına ait konum ve oryantasyon bilgisini içeren ve Denklem 3.11’de verilmiş olan 0_8T homojen dönüşüm matrisi kullanılarak, sistem uç noktasına ait Jakobiyen matrisi J_f elde edilmektedir. J_f matrisi Denklem 3.36’da ve açılımı EK-2’de verilmiştir.

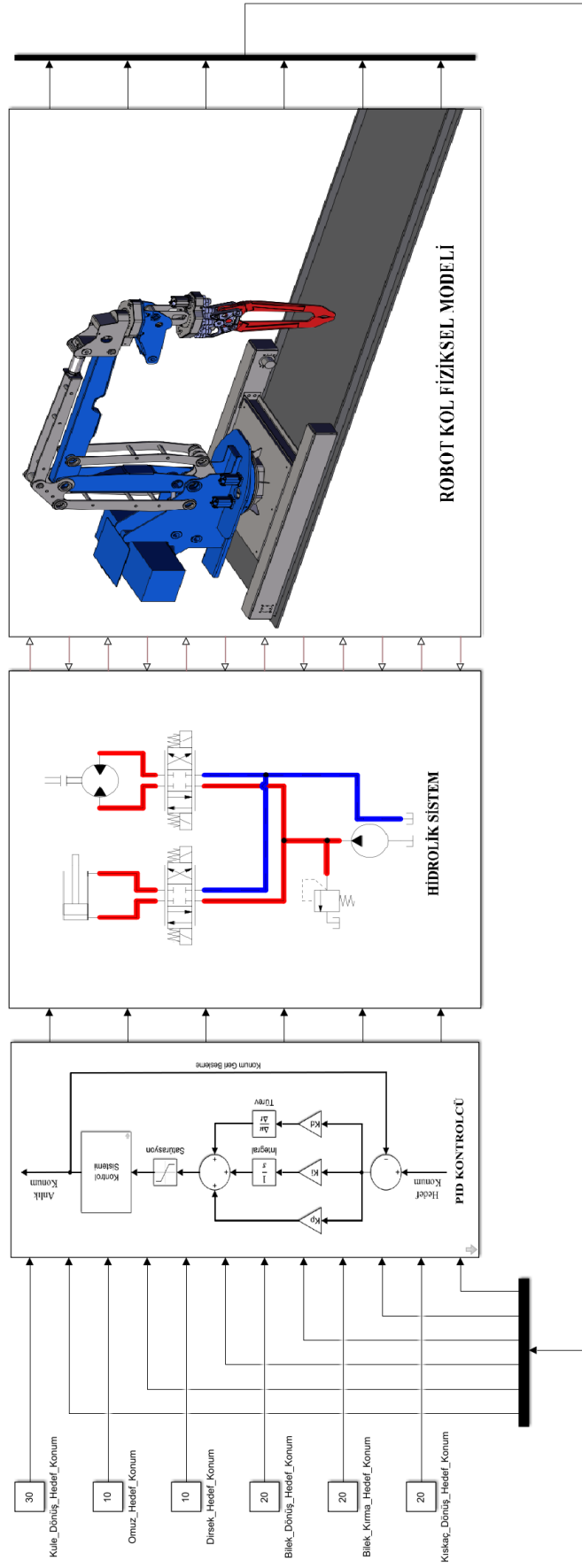
$$J_f = \begin{bmatrix} \frac{dP_x}{d\theta_1} & \frac{dP_x}{d\theta_2} & \frac{dP_x}{d\theta_3} & \frac{dP_x}{d\theta_4} & \frac{dP_x}{d\theta_5} & \frac{dP_x}{d\theta_6} \\ \frac{dP_y}{d\theta_1} & \frac{dP_y}{d\theta_2} & \frac{dP_y}{d\theta_3} & \frac{dP_y}{d\theta_4} & \frac{dP_y}{d\theta_5} & \frac{dP_y}{d\theta_6} \\ \frac{dP_z}{d\theta_1} & \frac{dP_z}{d\theta_2} & \frac{dP_z}{d\theta_3} & \frac{dP_z}{d\theta_4} & \frac{dP_z}{d\theta_5} & \frac{dP_z}{d\theta_6} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

3.5. Fiziksel Model

Sistemin fiziksel modeli MATLAB/Simulink/Simscape kullanarak oluşturulmuştur. Sistemin hareketi bu ortamda simüle edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. SolidWorks ortamında detaylı bir şekilde tasarlanmış olan katı model MATLAB/Simulink ortamına kütle, kütle merkezi, atalet, hacim verileri ile beraber aktararak gerçeğe yakın bir sistem oluşturulmuştur (Sen ve diğ., 2017).

Sistemin MATLAB/Simulink ortamında hazırlanmış genel kontrol blok diyagramı Şekil 3.5’te verilmiştir. Ayrıca robot kolun fiziksel modeli Şekil 3.6’da, silindirler için geliştirilmiş olan basınç – kuvvet dönüşüm modeli Şekil 3.7’de, hidromotorlar için basınç – tork dönüşüm modeli ise Şekil 3.8’de verilmiştir. Ayrıca sistemin eklemlerinin pozisyon kontrolünü sağlayan PID kontrolcü modeli ise Şekil 4.1’de verilmiştir.

Sistemin robot kol kısmında toplamda 3 adet hidromotor bulunmaktadır. Her bir ekleme için bu dönüşüm ayrı ayrı kendi parametrelerinde yapılmaktadır. Ayrıca sistemde bulunan 3 silindir için de hidrolik dönüşüm kendi parametreleri esas alınarak yapılmaktadır. Sistemin PID kontrolcü modeli ise her bir ekleme için ayrı ayrı bulunmaktadır.



Konum Geri Besleme

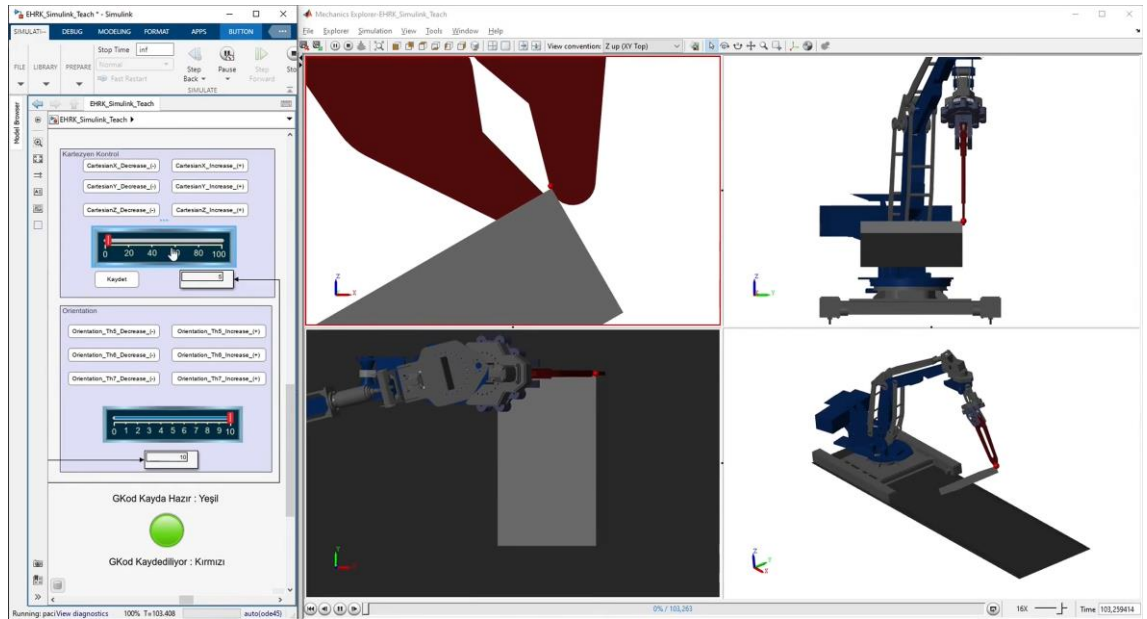
Şekil 3.5. Sistemin genel kontrol blok diyagramı

4. KONTROLCÜ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

4.1. Otomatik Kontrol Altyapısı ve Amacı

Proje kapsamında geliştirilen endüstriyel hidrolik robot kol sistemi, otomatik kontrol yeteneğine sahiptir. Bu hedef doğrultusunda, sistem kontrol yazılımına planlanmış görevlerin tekrar edilebilmesini sağlayan G-Kod sistemi entegre edilmiştir. Bu sistem aracılığıyla, manuel olarak kontrol edilebilen robot kol programlanarak tekrarlı görevleri otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir.

Bilgisayar ortamında programlanabilir bir sistemin oluşturulması amacıyla MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak kapsamlı bir programlama ortamı geliştirilmiştir. Bu sistem, çeşitli hareket kontrol fonksiyonlarını içeren ileri kinematik, ters kinematik, kartezyen koordinat sistemine dayalı hareket kontrolü ve oryantasyon bazında hareket kontrolü gibi özellikler sunmaktadır. Ayrıca, eklem hareket sınırlarının kontrolü ve G-Kod kayıt sistemi gibi ek işlevleri de bulunmaktadır. Sistemin bu özellikleri sayesinde, robotun gerçekleştirmesi istenen hareketler kaydedilmekte ve bu işlemin sonucu olarak bir G-Kod üretilmektedir. Üretilen bu G-Kod, gerektiğinde tekrar çağrılarak robotun daha önce kaydedilmiş hareketleri yeniden gerçekleştirmesi sağlanabilmektedir. Şekil 3.9’da bu sistemin oluşturulmuş hali görsel olarak sunulmuştur. Ayrıca, gerçekleştirilen bir simülasyon sonucunda elde edilen bir G-Kod örneği de Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



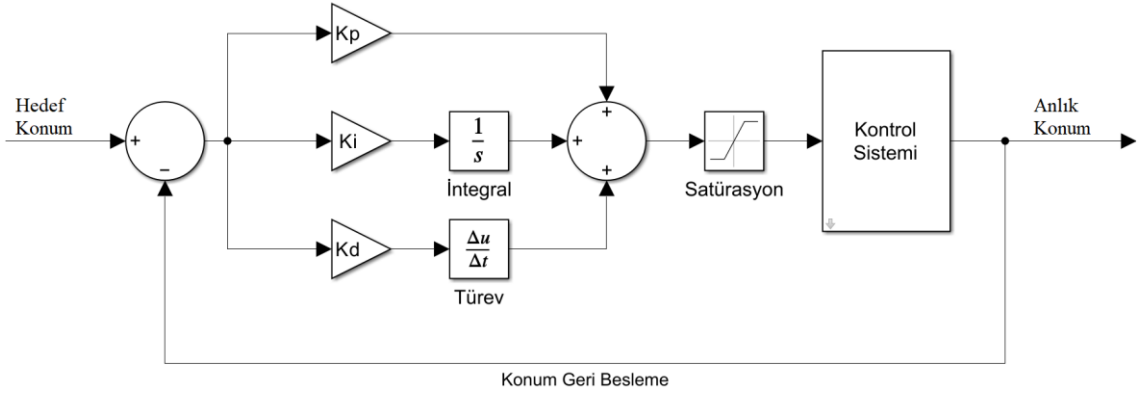
Şekil 3.9. Robot programlama simülasyon sistemi

N0 ; Date: 11-Feb-2024 20:13:28
 N1 G1 J1:41.000 J2:-17.000 J3:22.000 J4:-16.000 J5:56.000 J6:-25.000 E1:0.000 F:237.000
 N2 G1 J1:-30.000 J2:8.000 J3:-2.000 J4:-9.000 J5:50.000 J6:18.000 E1:0.000 F:485.000
 N3 G1 J1:50.000 J2:-15.000 J3:18.000 J4:15.000 J5:23.000 J6:15.000 E1:0.000 F:153.000
 N4 G1 J1:-54.000 J2:2.000 J3:20.000 J4:26.000 J5:7.000 J6:15.000 E1:0.000 F:429.000
 N5 G1 J1:-59.000 J2:-12.000 J3:-24.000 J4:18.000 J5:18.000 J6:8.000 E1:0.000 F:216.000
 N6 G1 J1:12.000 J2:-17.000 J3:11.000 J4:12.000 J5:45.000 J6:-7.000 E1:0.000 F:158.000
 N7 G1 J1:-33.000 J2:29.000 J3:-25.000 J4:20.000 J5:32.000 J6:95.000 E1:0.000 F:154.000
 N8 G1 J1:-7.000 J2:-28.000 J3:33.000 J4:-30.000 J5:47.000 J6:62.000 E1:0.000 F:708.000
 N9 G1 J1:-50.000 J2:-7.000 J3:-17.000 J4:18.000 J5:26.000 J6:79.000 E1:0.000 F:227.000
 N10 G1 J1:-29.000 J2:-25.000 J3:-26.000 J4:23.000 J5:35.000 J6:12.000 E1:0.000 F:201.000

Şekil 3.10. Simülasyon sonucu üretilmiş olan bir G-Kod parçası

4.2. PID Kontrolcü Tasarımı

PID kontrolcü, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir ve sistemin istenen çıkış değişkenini belirlenen referans girişe hızlı ve hassas bir şekilde yönlendirmek için kullanılır. Bu kontrolcü, sistemin mevcut çıkış değişkeni ile referans girişi arasındaki hata miktarını sürekli olarak ölçer ve bu hatayı geri besleme mekanizması aracılığıyla kullanarak sistemin davranışını düzeltir. Ang ve diğ. (2005), PID kontrolcü katsayılarının sisteme etkisini ve farklı katsayı ayarlama metotları üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sistemin her bir eklemine kontrol etmek üzere görevlendirilmiş PID kontrolcü blokları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Sistemin PID kontrolcü modeli

PID kontrolcü, genellikle üç ana kazanç parametresi olan Oransal (K_p), integral (K_i) ve türevsel (K_d) terimlerinden oluşur. Bu üç parametrenin, sistemin kontrolünde farklı etkileri bulunmaktadır.

K_p katsayısı, mevcut hatayı algılar ve çıkışa doğrudan orantılı bir cevap sağlar. Bu, hızlı yanıt gerektiren durumlarda kullanışlıdır, ancak yalnızca hatanın büyüklüğüne bağlı olarak çalışır. Çok yüksek bir K_p katsayısı, aşırı tepkimeye ve aşmaya sebep

olurken; çok düşük ayarlanmış bir K_p katsayısı, yavaş ve yetersiz bir tepki vermesine neden olabilir.

K_i katsayısı, zamanla birikmiş hatayı algılar ve bunu telafi etmek için çıkışa bir kümülatif etki uygular. Bu, uzun vadeli stabilite ve hassasiyet sağlamak için kullanışlıdır, çünkü sistemdeki küçük kalıcı hataları düzeltir. Ancak çok yüksek ayarlanmış K_i değeri, hatayı çok hızlı ve yüksek miktarda biriktirir ve sönümlenmemiş osilasyonlara sebep olabilir. Çok düşük ayarlanmış K_i değeri ise kalıcı hataların düzeltilmesinde yetersiz kalabilir.

K_d katsayısı, hızı kontrol eder ve hızda ani değişikliklerin olmasını engeller. Bu, sistemin aşırı hızlı tepki vermesini veya titreşimlere neden olmasını önler. Çok yüksek ayarlanması halinde gürültü ve dalgalanmalara çok duyarlı hale gelirken, düşük olması halinde sistemin hızlı değişikliklere uyum sağlaması zorlaşır.

Bu çalışmada, her bir eklem için ayrı ayrı bir PID kontrolcüsü kullanılmıştır. Bu bağlamda, sistemdeki her bir eklem için üç tane olmak üzere toplamda 21 ayrı kazanç parametresi belirlenmesi gerekmektedir. Bu kazanç parametreleri, sistemin dinamik özelliklerine ve istenen performans kriterlerine göre ayarlanmıştır.

4.3. Arı Algoritması

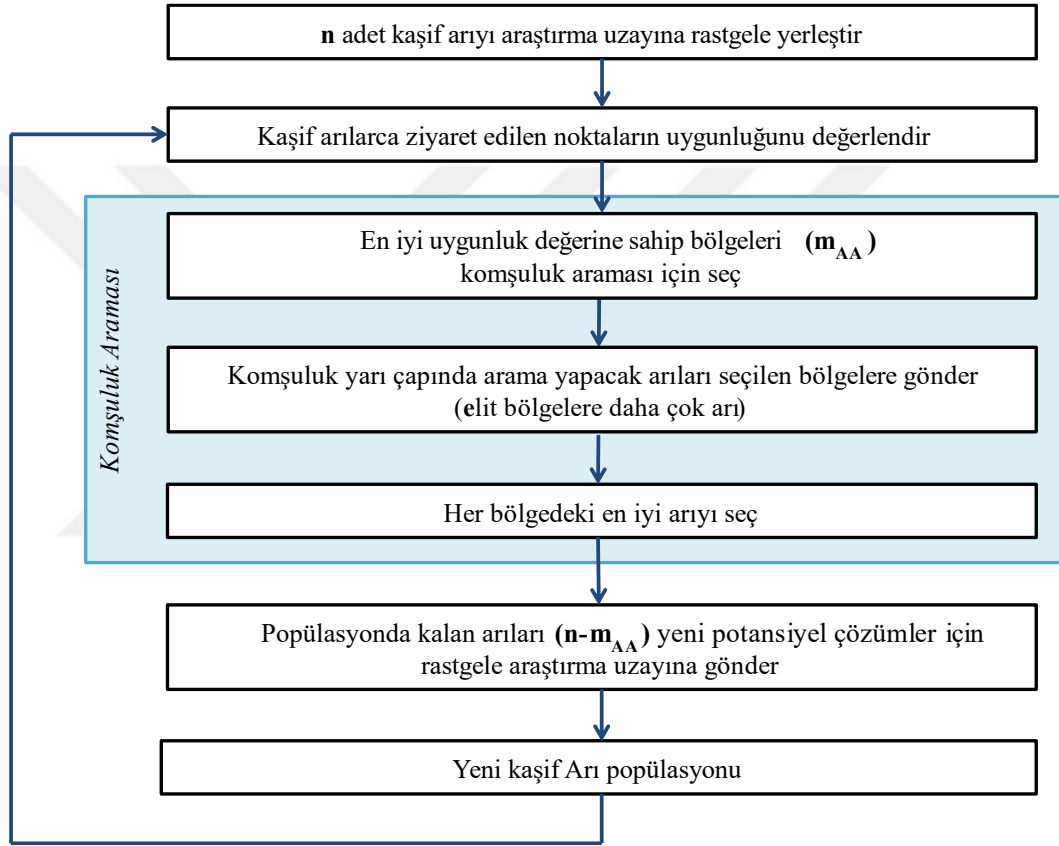
Arı Algoritması (AA), ilk olarak 2006 yılında Pham ve diğ. (2006) tarafından tanıtılmıştır. Bu metot, arıların kaynak arama davranışlarının incelenmesine dayanmaktadır ve sürü zekasıyla birlikte öğrenme, hatırlama ve bireyler arasındaki iletişim özelliklerini dikkate alarak sezgisel bir yaklaşım geliştirilmiştir (Pham ve diğ., 2005). İlk AA kullanılarak yapılan çalışmalar, Pham ve Kalyoncu (2009) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, bir serbestlik dereceli esnek uzuvlu bir robot kolunun pozisyon kontrolü, Bulanık Mantık Kontrolcüsü (BMK) ve PID kontrolcü yöntemleriyle sağlanmıştır. BMK yönteminde üyelik fonksiyonları, PID kontrolcüde ise kazanç parametreleri AA kullanılarak optimize edilmiştir (Pham ve diğ., 2008).

AA kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmalarına başlamadan önce, belirli AA parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler arasında kâşif arı sayısı (n), ziyaret edilen n noktadan seçilen en uygun bölge sayısı (m_{AA}), seçilen m_{AA} bölge içindeki elit bölge sayısı (e), en iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı (n_{ep}), kalan ($m_{AA} - e$) bölgeye gönderilen arı sayısı (n_{sp}), komşuluk yarıçapı (n_{gh}) ve durdurma kriteri veya iterasyon (itr) sayısı bulunmaktadır. Bu parametreler, AA'nın verimli çalışması için önemlidir ve optimizasyon sürecinin başarılı bir şekilde yürütülmesini sağlar (Pham ve

diğ., 2006). AA akış şeması Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu çalışma için belirlenmiş olan AA parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AA Parametreleri

n	m_{AA}	e	nep	nsp	ngh	itr
30	15	10	16	13	0.005	300



Sistemin optimizasyon çalışmasının temelini oluşturan amaç fonksiyonu, sistemdeki geçici durum cevabı üzerine odaklanarak türetilmiştir. Her bir bileşenin geçici durum cevabı değişkenlerine, yani yükselme zamanı (t_r), oturma zamanı (t_s), maksimum aşma miktarı (M_p), tepe açısı değeri (θ_{maks}), tepe uzaklık değeri (L_{maks}) ve kalıcı durum hatası (e_{ss}) gibi belirlenmiş katsayılarla çarpılarak ifade edilmiştir. Bu değişkenlerin toplamını en aza indirmek üzere amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu, Denklem 4.1 eşitliğinde sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
J_{amaç} = & (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_1} + (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_2} \\
& + (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_3} + (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_4} \\
& + (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_5} + (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_6} \\
& + (t_r + t_s + 10M_p + L_{maks} + 10e_{ss})_{L_{kızak}} \quad (4.1)
\end{aligned}$$

Bu amaç fonksiyonunu oluşturan değişkenleri için arama aralığı Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Optimizasyon değişkenleri tarama aralığı

Eklemler	K_p Minimum	K_p Maksimum	K_i Minimum	K_i Maksimum	K_d Minimum	K_d Maksimum
L _{kızak}	20	350	0	50	2	20
θ ₁	150	600	0	50	2	80
θ ₂	320	600	0	50	2	80
θ ₃	800	2500	0	50	2	110
θ ₄	300	1200	0	50	2	45
θ ₅	130	600	0	50	2	30
θ ₆	60	500	0	50	2	10

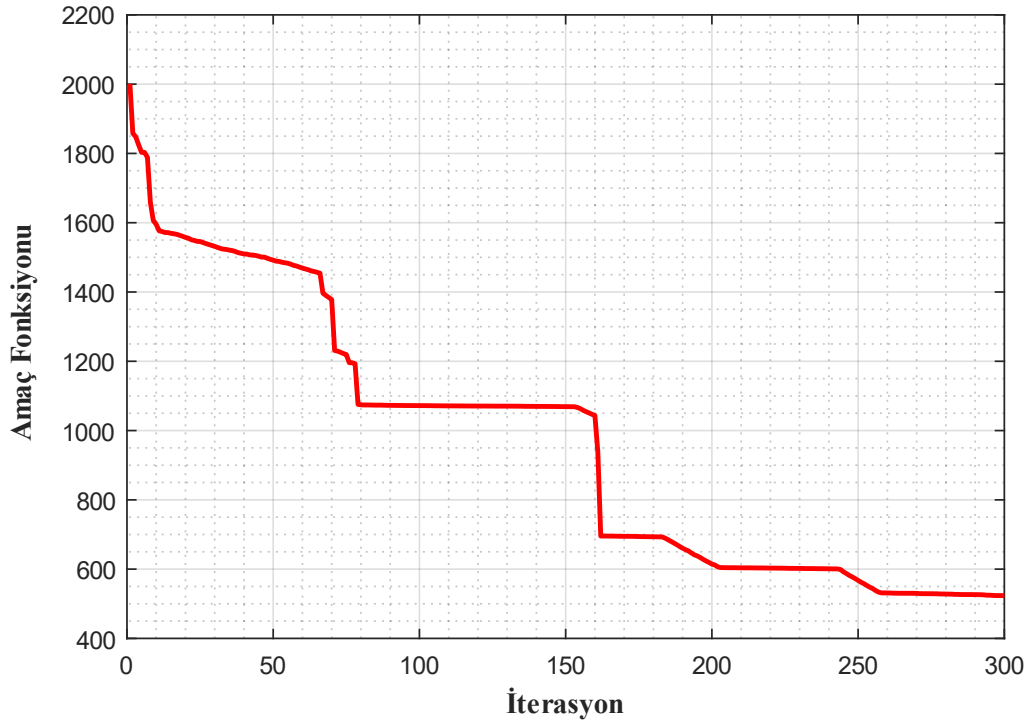
5. SAYISAL UYGULAMALAR

Fiziksel modeli MATLAB/Simulink ortamında hazırlanmış olan sistemi kullanarak kontrolcü parametreleri optimize edilmiştir. Elde edilen parametreler kullanarak belirlenmiş hareket kombinasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiş ve optimize edilmiş parametreler karşılaştırılmıştır. Ayrıca optimize edilmiş parametreler kullanarak sistem için gerekli hidromotor seçimi, silindir boyutlandırması, çalışma uzayı ve hidrolik bileşen tasarımı yapılmıştır.

5.1. Optimizasyon Sonuçları

Kontrol sistemini düzenleyen PID denetleyici parametreleri, AA yöntemi kullanarak optimize edilmiştir. Sistemlerin etkin bir şekilde işlev görebilmesi için optimizasyon çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Bu proje kapsamında, AA optimizasyonu Bölüm 4.3' te açıklanmıştır. Tanımlanan amaç fonksiyonu temel alınarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında, değişkenler için belirlenen maksimum ve minimum değerler Çizelge 4.2' de yer almaktadır.

Optimizasyon çalışmasının sonuçlarına ilişkin olarak, Şekil 5.1'de sunulan AA optimizasyonu yakınsama grafiği incelendiğinde, 300 iterasyon boyunca devam ettiği ve amaç fonksiyonunun 2000 seviyesinden 523.7549 seviyesine düştüğü görülmektedir.



Şekil 5.1. AA optimizasyonu yakınsama grafiği

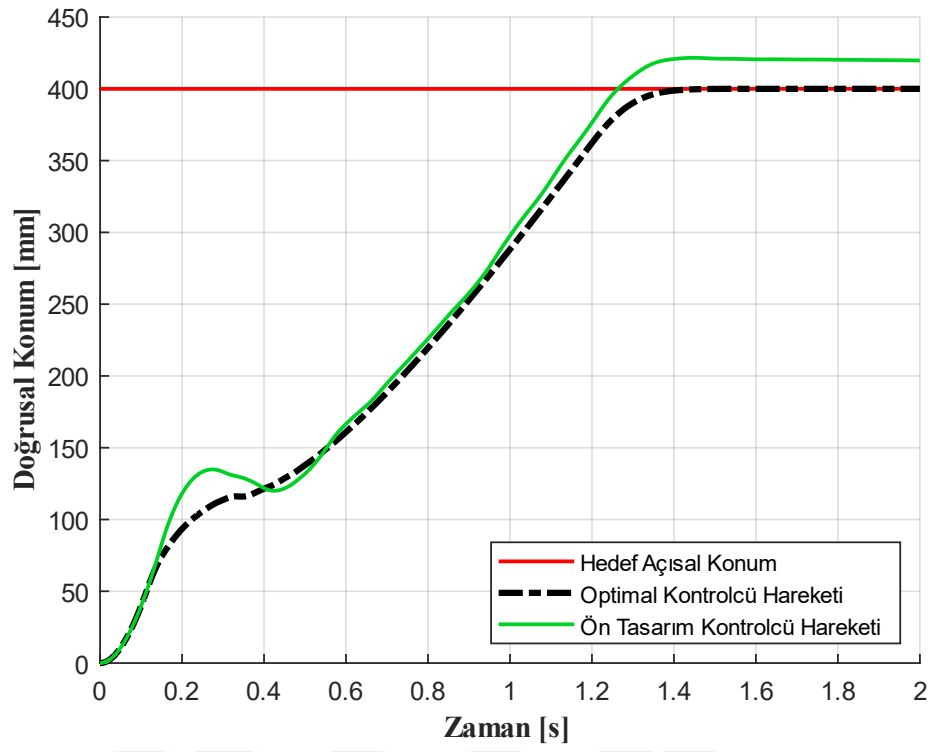
Optimizasyon öncesi ön tasarım parametreleri deneme – yanılma yolu ile elde edilmiştir. Tasarlanmış olan optimizasyon sistemi sonucu her eklem için optimum kontrolcü parametreleri elde edilmiştir. Her iki yöntem ile belirlenmiş olan kontrolcü katsayıları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ön tasarım ve optimize edilmiş kontrolcü parametreleri tablosu

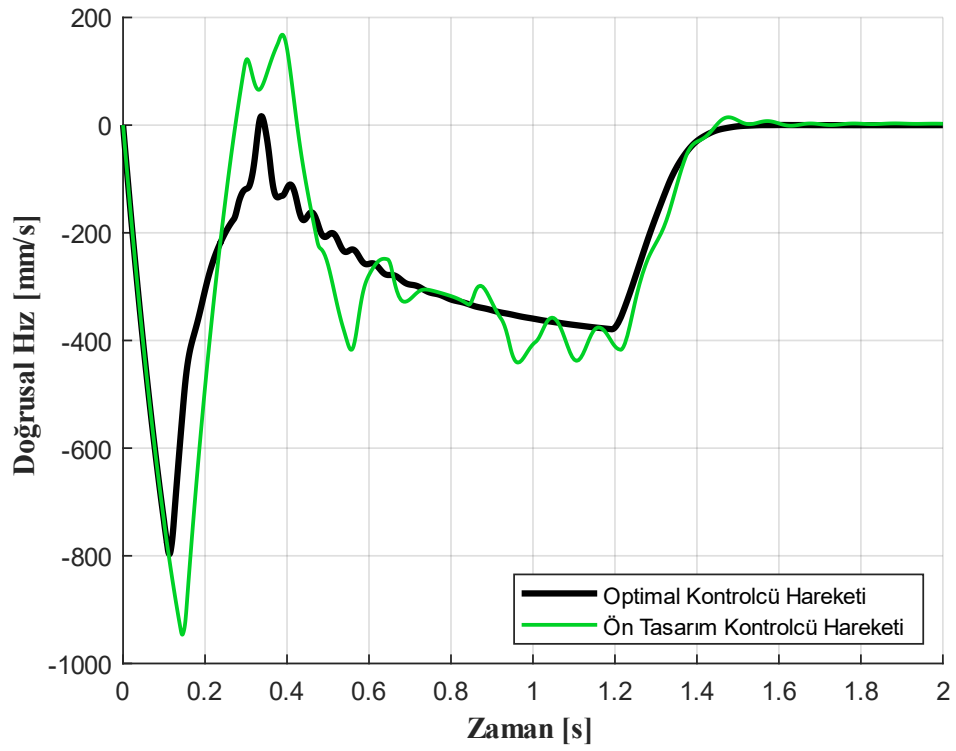
Eklem Açıklaması	Ön Tasarım Kontrolcü Parametreleri			Optimal Kontrolcü Parametreleri		
	K_p	K_i	K_d	K_p	K_i	K_d
Taşıyıcı Kızak	250	20	20	220.9117	0.0001	19.9885
Kule Dönüş	400	20	20	237.8084	1.7838	67.3889
Omuz	390	20	20	357.6729	1.0446	36.7904
Dirsek	1000	20	20	1475.7421	5.6959	95.1296
Bilek Dönüş	1000	20	10	354.5867	1.729	35.4325
Bilek Kırma	500	40	15	166.4511	1.009	24.2836
Kıskaç Dönüş	150	5	4	67.9639	1.4032	1.955

Ön tasarım ve optimize edilmiş sistem parametreleri kullanılarak bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonda, tüm eklemlere basamak girişi uygulanmış ve sistem davranışı incelenmiştir.

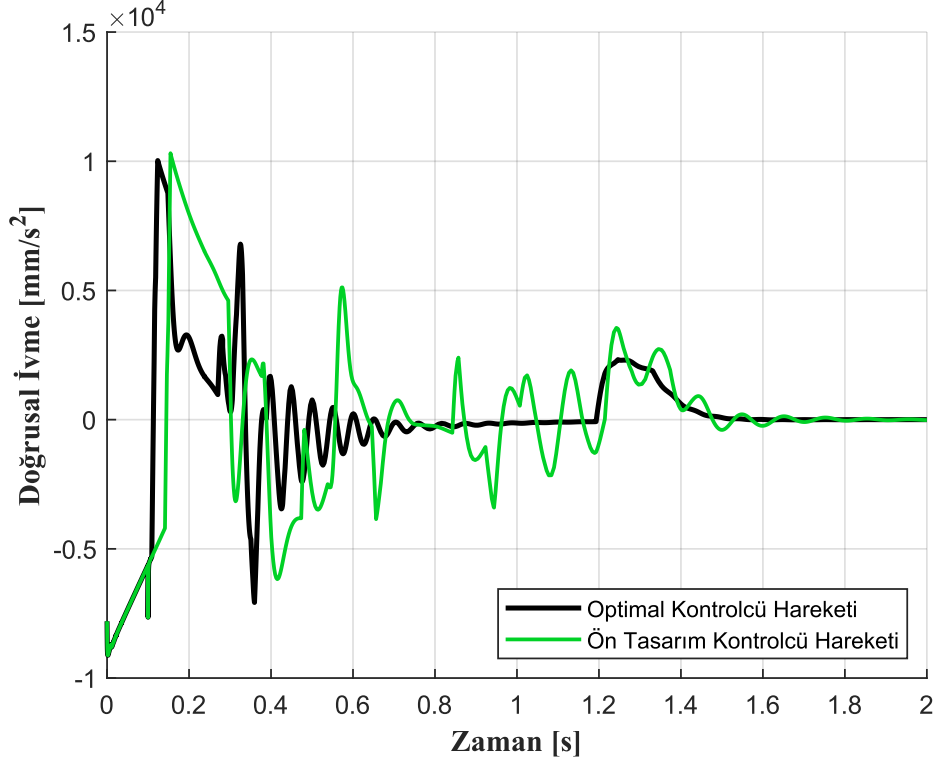
Taşıyıcı kızak hareketi için doğrusal konum – zaman, doğrusal hız – zaman ve doğrusal ivme – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te verilmiştir. Kule dönüş hareketi için açısal konum – zaman, açısal hız – zaman ve açısal ivme – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir. Omuz hareketi için açısal konum – zaman, açısal hız – zaman ve açısal ivme – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’de verilmiştir. Dirsek hareketi için açısal konum – zaman, açısal hız – zaman ve açısal ivme – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’te verilmiştir. Bilek dönüş hareketi için açısal konum – zaman, açısal hız – zaman ve açısal ivme – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’de verilmiştir. Bilek kırma hareketi için açısal konum – zaman, açısal hız – zaman ve açısal ivme – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da verilmiştir. Kıskaç dönüş hareketi için açısal konum – zaman, açısal hız – zaman ve açısal ivme – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Taşıyıcı kızak hareketi doğrusal konum – zaman grafiği



Şekil 5.3. Taşıyıcı Kızak hareketi doğrusal hız – zaman grafiği

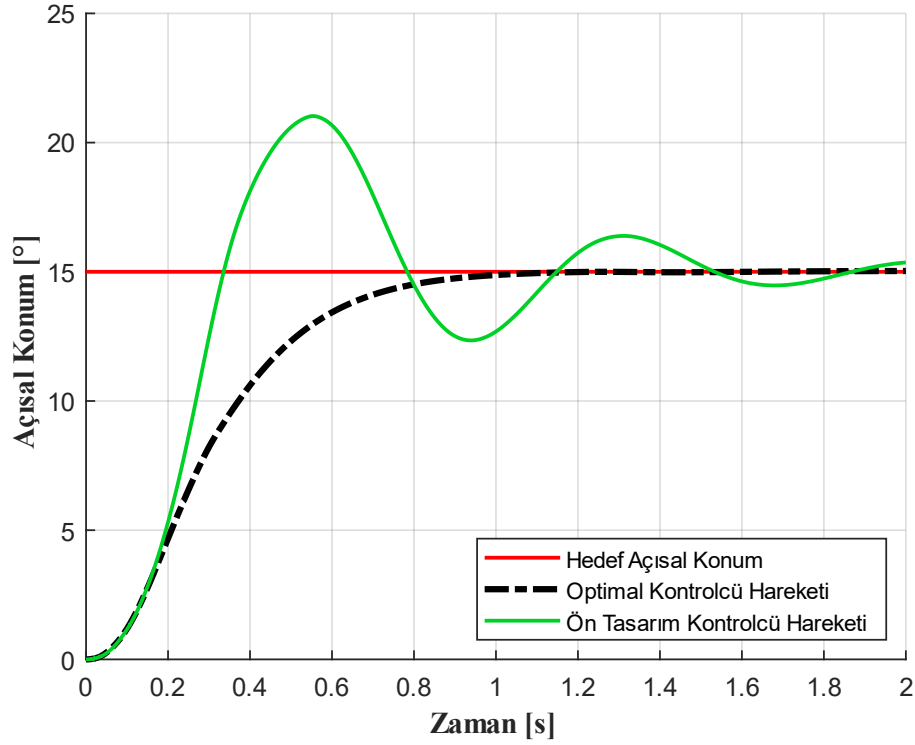


Şekil 5.4. Taşıyıcı kızak hareketi doğrusal ivme – zaman grafiği

Şekil 5.2' deki taşıyıcı kızak doğrusal konum-zaman grafiği incelendiğinde, 400 mm hedef konuma ulaşırken, ön tasarım kontrolcü hareketi sonucu hesaplanan geçici durum cevap değerleri $M_p = 21.6244$ mm, $L_{maks} = 421.6243$ mm, $e_{ss} = 19.7556$ mm olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasıyla elde edilen kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan hareketin sonucunda ise geçici durum cevap değişkenleri $M_p = -0.0042$ mm, $L_{maks} = 399.9957$ mm, $e_{ss} = -0.0042$ mm olarak elde edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, maksimum aşma oranının %5.4061'den % -0.0011'e; kalıcı hata oranının ise %4.9389' dan %-0.0011'e düştüğü gözlemlenerek kontrolcü performansının iyileştiği tespit edilmiştir.

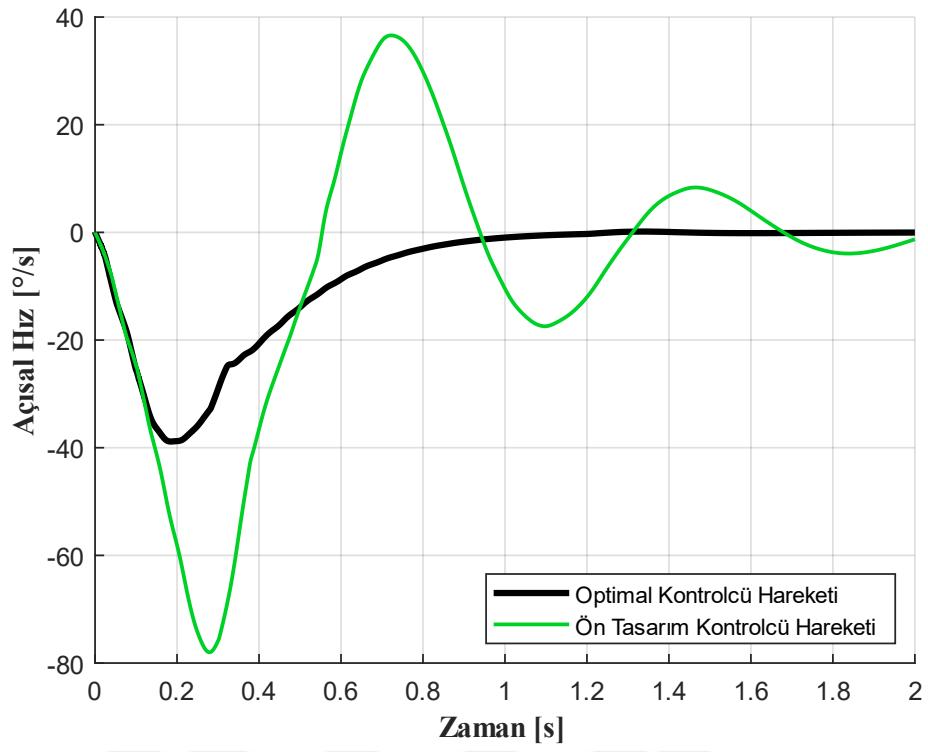
Doğrusal hız ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikte, alan altındaki değerlerin toplamı hesaplanarak, hareketin toplam yer değiştirme miktarı milimetre cinsinden elde edilebilir. Şekil 5.3 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilen hareketin sonucunda 453.31 mm'lik bir yer değişimi meydana gelirken, optimal kontrolcü kullanıldığında ise bu değer 400.42 mm olduğu belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, toplam yer değiştirme miktarının %11.66 azaldığı ve sistem performansının arttığı gözlemlenmiştir.

Doğrusal ivme ve zaman arasındaki grafikte, alan altındaki mutlak değerlerin toplamı hesaplanarak, hareket sırasında toplam hız değişimi elde edilir. Şekil 5.4 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcü parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen hareketin sonucunda toplamda 3988.13 m/s doğrusal hız değişimi meydana gelirken, optimize edilmiş harekette ise bu değer 2496.57 m/s olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, hız değişiminde %37.40'lık bir azalma gerçekleşmiş ve sistem kararlılığında artış gözlenmiştir.

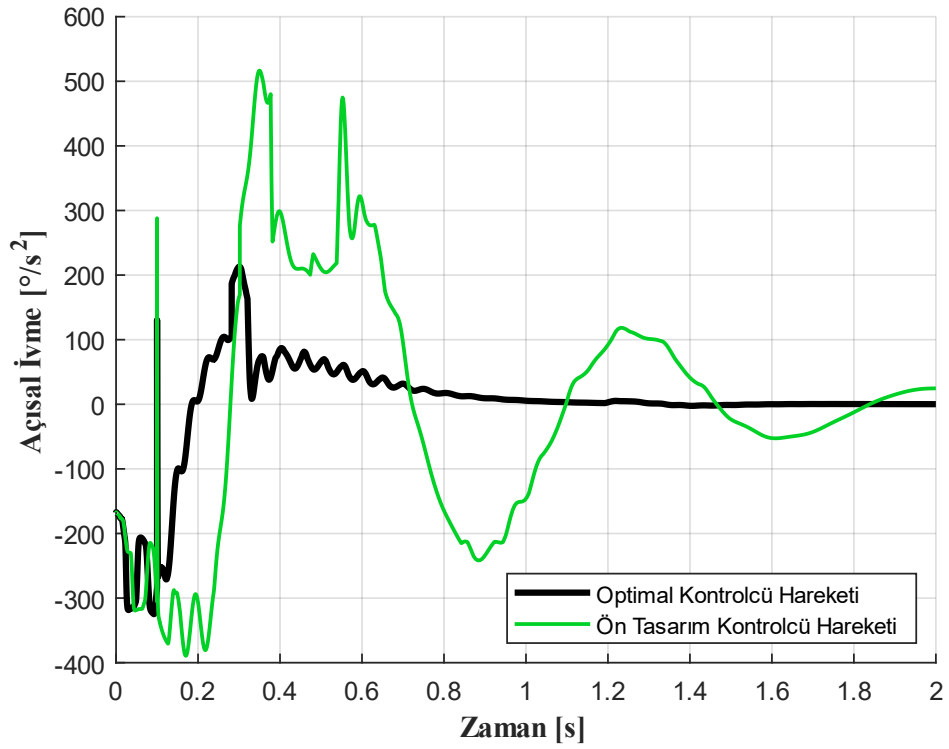


Şekil 5.5. Kule dönüş hareketi açısal konum – zaman grafiği

Şekil 5.5'teki kule dönüş hareketi açısal konum-zaman grafiği incelendiğinde, 15° hedef konuma ulaşırken, ön tasarım kontrolcü hareketi sonucu hesaplanan geçici durum cevap değerleri $M_p = 6.0274^\circ$, $\theta_{maks} = 21.0274^\circ$, $e_{ss} = 0.3614^\circ$ olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasıyla elde edilen kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan hareketin sonucunda ise geçici durum cevap değişkenleri $M_p = 0.0307^\circ$, $\theta_{maks} = 15.0307^\circ$, $e_{ss} = 0.0307^\circ$ olarak elde edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, maksimum aşma oranının %40.1825'ten %0.2049'a; kalıcı hata oranının ise %2.4091'den %0.2049'a düştüğü gözlemlenerek kontrolcü performansının iyileştiği tespit edilmiştir.



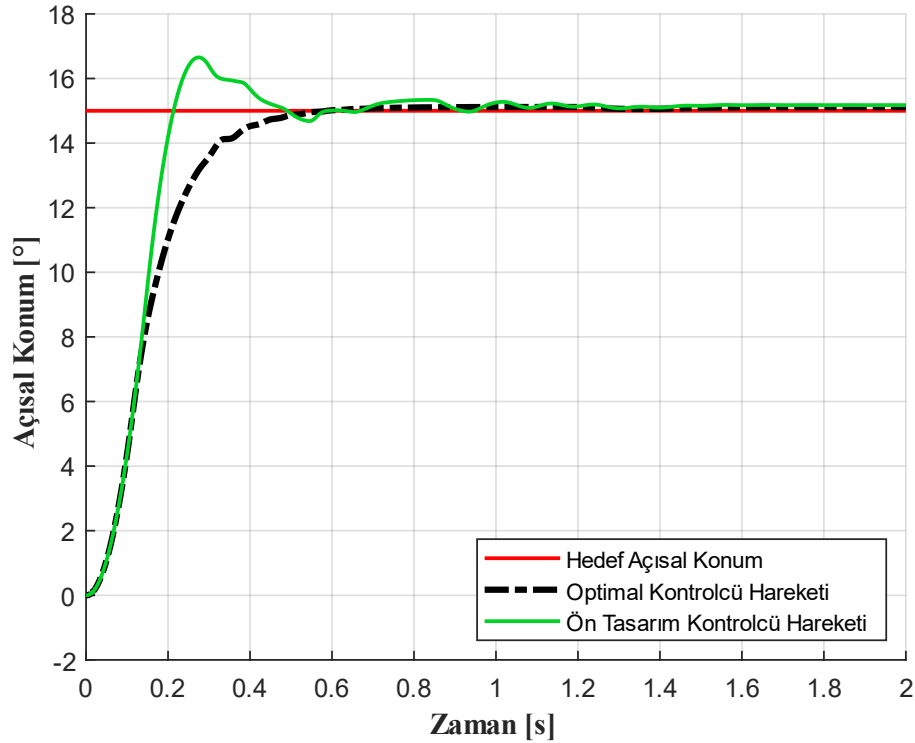
Şekil 5.6. Kule dönüş hareketi açısal hız – zaman grafiği



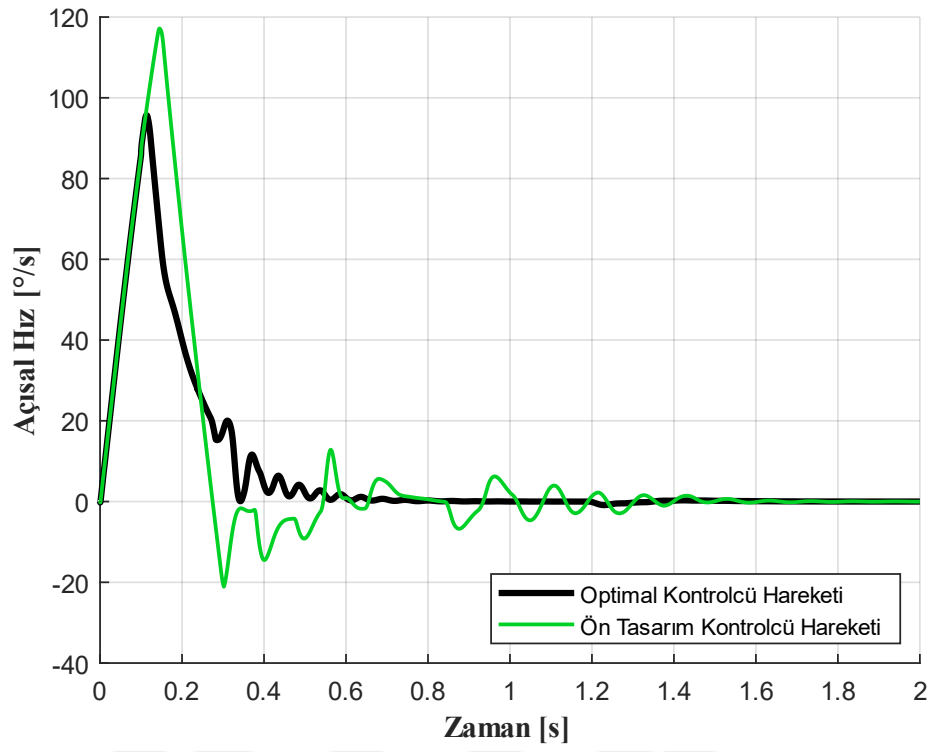
Şekil 5.7. Kule dönüş hareketi açısal ivme – zaman grafiği

Açısal hız ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikte, alan altındaki değerlerin toplamı hesaplanarak, hareketin toplam yer değiştirme miktarı $^{\circ}$ cinsinden elde edilebilir. Şekil 5.6 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilen hareketin sonucunda 36.57° 'lik bir yer değişimi meydana gelirken, optimal kontrolcü kullanıldığında ise bu değer 15.07° olduğu belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, toplam yer değiştirme miktarının %58.79 azaldığı ve sistem performansının arttığı gözlemlenmiştir.

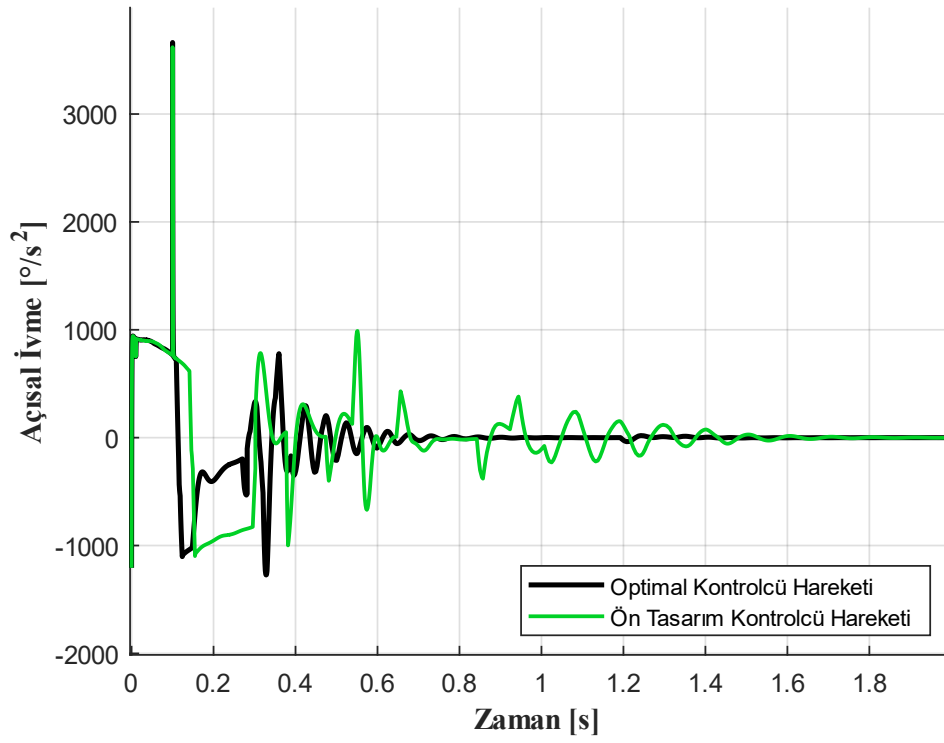
Açısal ivme ve zaman arasındaki grafikte, alan altındaki mutlak değerlerin toplamı hesaplanarak, hareket sırasında toplam hız değişimi elde edilir. Şekil 5.7 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcü parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen hareketin sonucunda toplamda $287.52 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ açısal hız değişimi meydana gelirken, optimize edilmiş harekette ise bu değer $78.30 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, hız değişiminde %72.76'lık bir azalma gerçekleşmiş ve sistem kararlılığında artış gözlenmiştir.



Şekil 5.8. Omuz hareketi açısal konum – zaman grafiği



Şekil 5.9. Omuz hareketi açısal hız – zaman grafiği

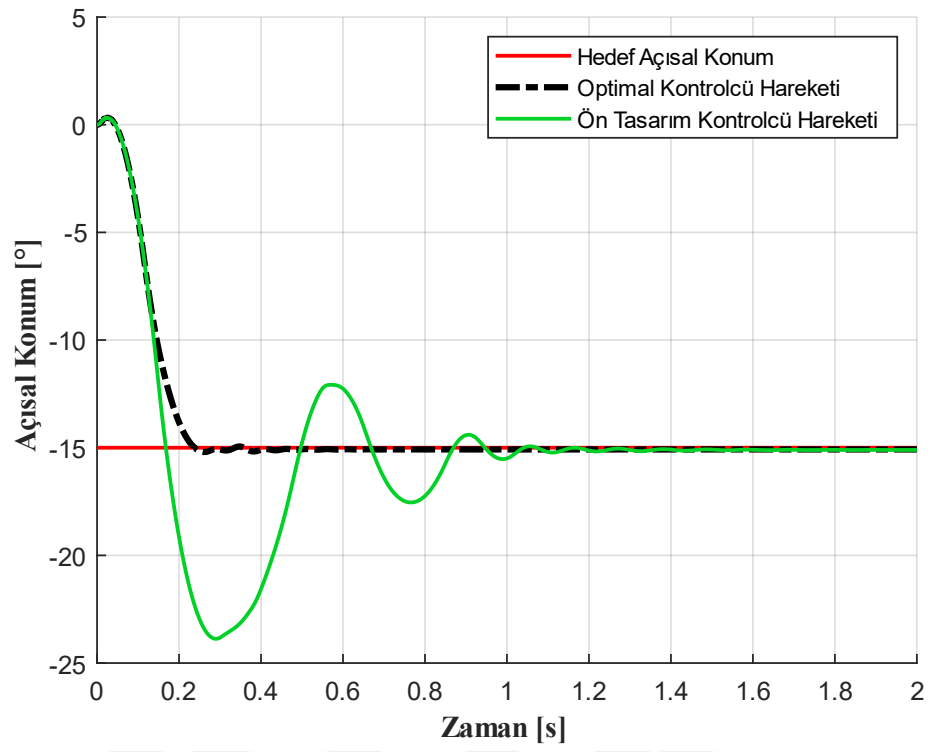


Şekil 5.10. Omuz hareketi açısal ivme – zaman grafiği

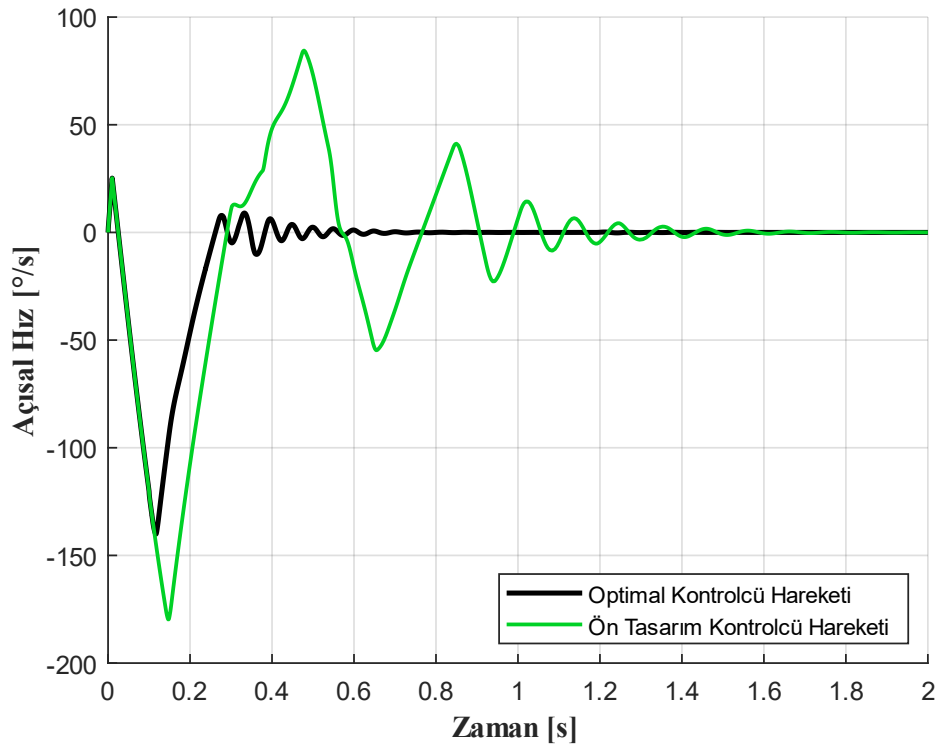
Şekil 5.8'deki omuz hareketi açısal konum-zaman grafiği incelendiğinde, 15° hedef konuma ulaşırken, ön tasarım kontrolcü hareketi sonucu hesaplanan geçici durum cevap değerleri $M_p = 1.6530^\circ$, $\theta_{maks} = 16.6530^\circ$, $e_{ss} = 0.1753^\circ$ olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasıyla elde edilen kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan hareketin sonucunda ise geçici durum cevap değişkenleri $M_p = 0.1175^\circ$, $\theta_{maks} = 15.1175^\circ$, $e_{ss} = 0.1140^\circ$ olarak elde edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, maksimum aşma oranının %11.0202'den %0.7834'e; kalıcı hata oranının ise %0.7834'ten %0.7603'e düştüğü gözlemlenerek kontrolcü performansının iyileştiği tespit edilmiştir.

Açısal hız ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikte, alan altındaki değerlerin toplamı hesaplanarak, hareketin toplam yer değiştirme miktarı $^\circ$ cinsinden elde edilebilir. Şekil 5.9 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilen hareketin sonucunda 20.89° 'lik bir yer değişimi meydana gelirken, optimal kontrolcü kullanıldığında ise bu değer 15.24° olduğu belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, toplam yer değiştirme miktarının %27.04 azaldığı ve sistem performansının arttığı gözlemlenmiştir.

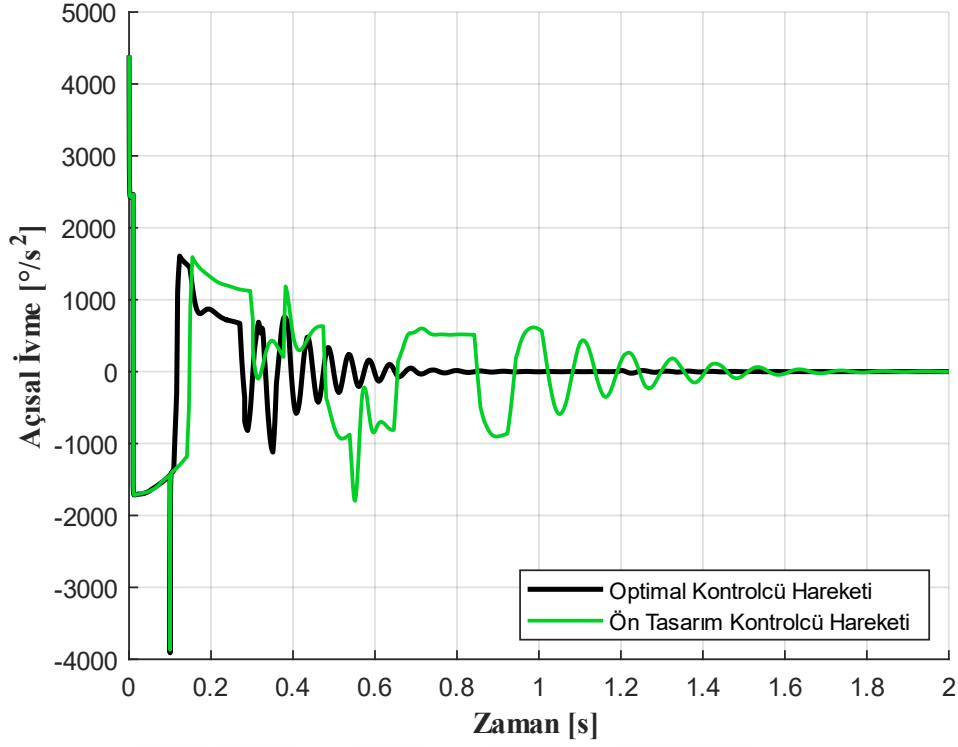
Açısal ivme ve zaman arasındaki grafikte, alan altındaki mutlak değerlerin toplamı hesaplanarak, hareket sırasında toplam hız değişimi elde edilir. Şekil 5.10 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcü parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen hareketin sonucunda toplamda $427.01^\circ/s$ açısal hız değişimi meydana gelirken, optimize edilmiş harekette ise bu değer $253.01^\circ/s$ olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, hız değişiminde %40.75'lik bir azalma gerçekleşmiş ve sistem kararlılığında artış gözlenmiştir.



Şekil 5.11. Dirsek hareketi açısal konum – zaman grafiği



Şekil 5.12. Dirsek hareketi açısal hız – zaman grafiği

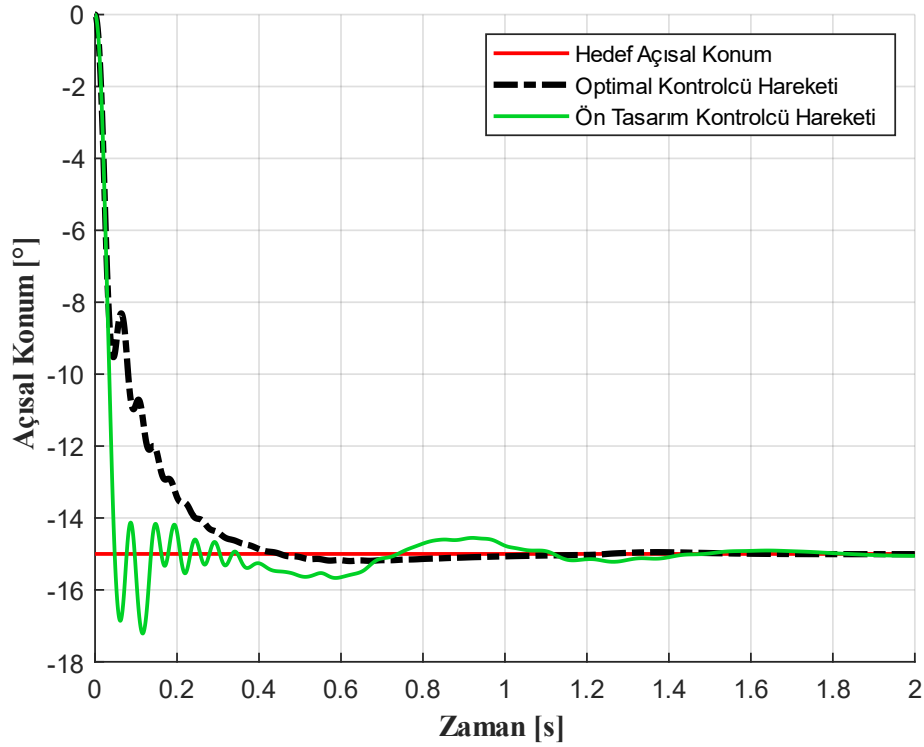


Şekil 5.13. Dirsek hareketi açısal ivme – zaman grafiği

Şekil 5.11'teki dirsek hareketi açısal konum-zaman grafiği incelendiğinde, -15° hedef konuma ulaşırken, ön tasarım kontrolcü hareketi sonucu hesaplanan geçici durum cevap değerleri $M_p = 8.8742^\circ$, $\theta_{maks} = -23.8742^\circ$, $e_{ss} = -0.1020^\circ$ olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasıyla elde edilen kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan hareketin sonucunda ise geçici durum cevap değişkenleri $M_p = 0.1971^\circ$, $\theta_{maks} = -15.1971^\circ$, $e_{ss} = -0.0802^\circ$ olarak elde edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, maksimum aşma oranının %59.1611'den %1.31452'e; kalıcı hata oranının ise %0.6803'ten %0.5346'a düştüğü gözlemlenerek kontrolcü performansının iyileştiği tespit edilmiştir.

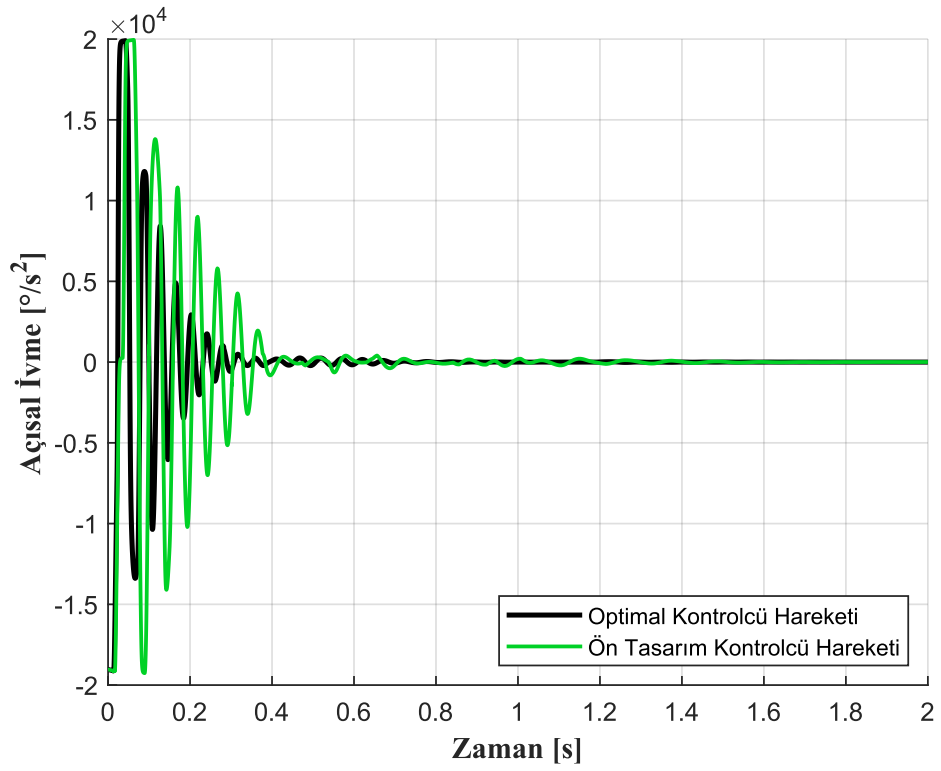
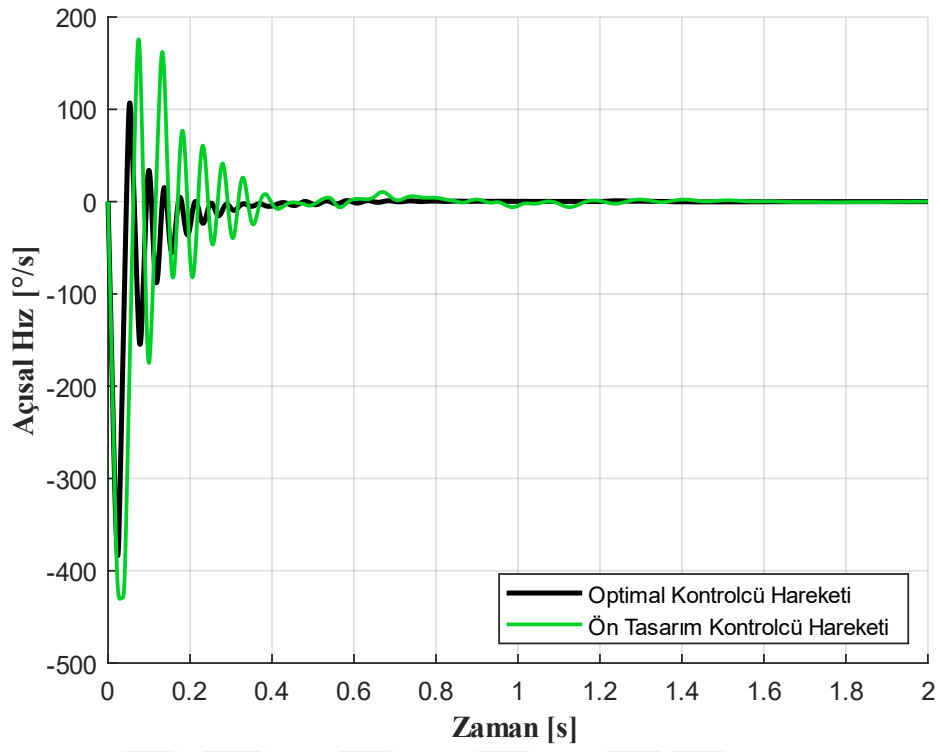
Açısal hız ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikte, alan altındaki değerlerin toplamı hesaplanarak, hareketin toplam yer değiştirme miktarı $^\circ$ cinsinden elde edilebilir. Şekil 5.12 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilen hareketin sonucunda 47.98° lik bir yer değişimi meydana gelirken, optimal kontrolcü kullanıldığında ise bu değer 16.96° olduğu belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, toplam yer değiştirme miktarının %64.64 azaldığı ve sistem performansının arttığı gözlemlenmiştir.

Açısal ivme ve zaman arasındaki grafikte, alan altındaki mutlak değerlerin toplamı hesaplanarak, hareket sırasında toplam hız değişimi elde edilir. Şekil 5.13 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcü parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen hareketin sonucunda toplamda 927.42 °/s açısal hız değişimi meydana gelirken, optimize edilmiş harekette ise bu değer 455.93 °/s olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, hız değişiminde %50.84'lik bir azalma gerçekleşmiş ve sistem kararlılığında artış gözlenmiştir.



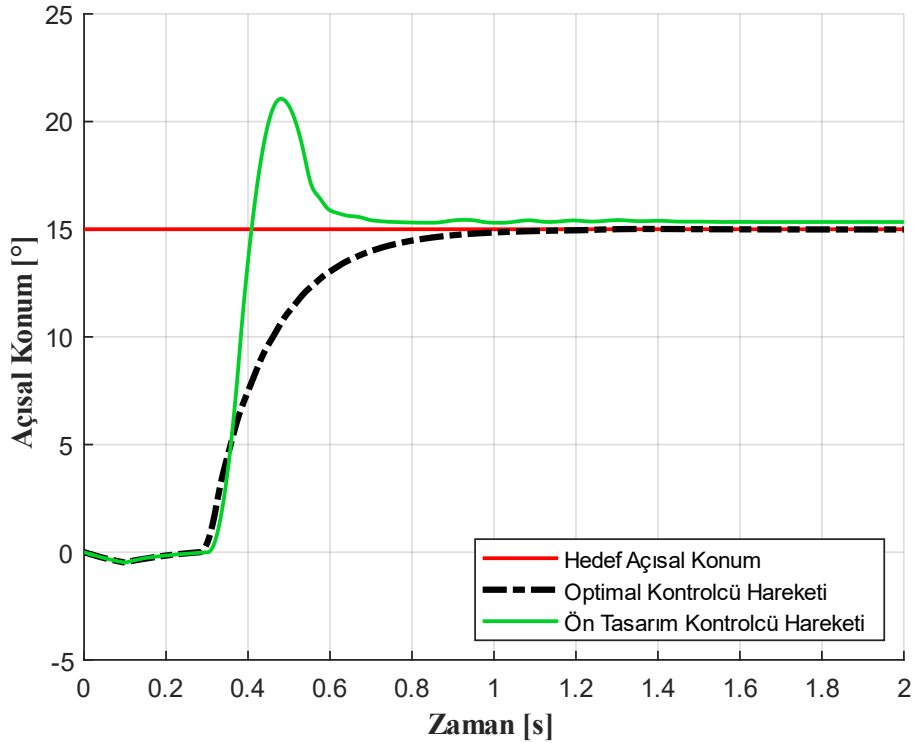
Şekil 5.14. Bilek dönüş hareketi açısal konum – zaman grafiği

Şekil 5.14'teki bilek dönüş hareketi açısal konum-zaman grafiği incelendiğinde, -15° hedef konuma ulaşırken, ön tasarım kontrolcü hareketi sonucu hesaplanan geçici durum cevap değerleri $M_p = 2.2133^\circ$, $\theta_{maks} = -17.2133^\circ$, $e_{ss} = -0.0526^\circ$ olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasıyla elde edilen kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan hareketin sonucunda ise geçici durum cevap değişkenleri $M_p = 0.1975^\circ$, $\theta_{maks} = -15.1975^\circ$, $e_{ss} = -0.0064^\circ$ olarak elde edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, maksimum aşma oranının %14.7550'den %1.3166'a; kalıcı hata oranının ise %0.3509'dan %0.0426'a düştüğü gözlemlenerek kontrolcü performansının iyileştiği tespit edilmiştir.

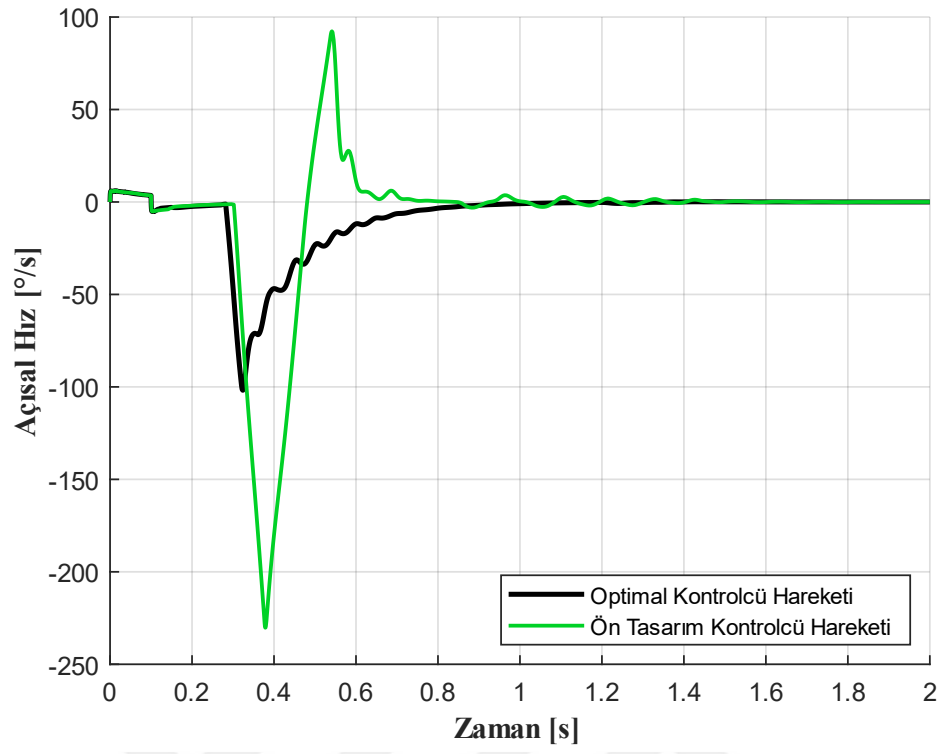


Açısal hız ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikte, alan altındaki değerlerin toplamı hesaplanarak, hareketin toplam yer değiştirme miktarı $^{\circ}$ cinsinden elde edilebilir. Şekil 5.15 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilen hareketin sonucunda 36.35° 'lik bir yer değişimi meydana gelirken, optimal kontrolcü kullanıldığında ise bu değer 18.81° olduğu belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, toplam yer değiştirme miktarının %48.27 azaldığı ve sistem performansının arttığı gözlemlenmiştir.

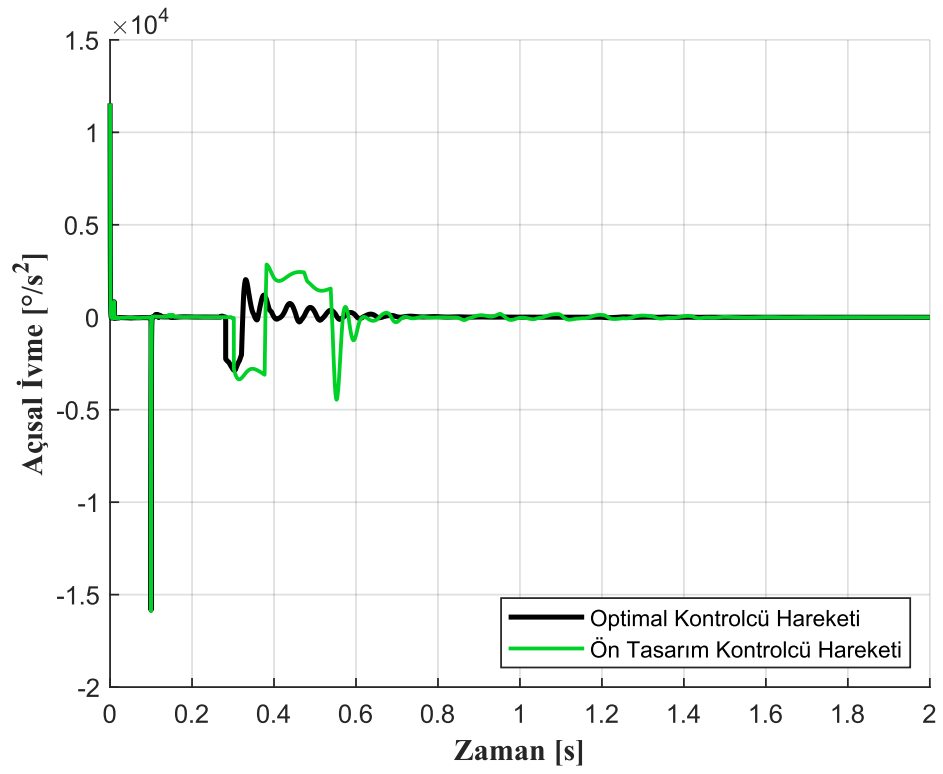
Açısal ivme ve zaman arasındaki grafikte, alan altındaki mutlak değerlerin toplamı hesaplanarak, hareket sırasında toplam hız değişimi elde edilir. Şekil 5.16 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcü parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen hareketin sonucunda toplamda $3003.99^{\circ}/s$ açısal hız değişimi meydana gelirken, optimize edilmiş harekette ise bu değer $1896.94^{\circ}/s$ olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, hız değişiminde %36.85'lik bir azalma gerçekleşmiş ve sistem kararlılığında artış gözlenmiştir.



Şekil 5.17. Bilek kırma hareketi açısal konum – zaman grafiği



Şekil 5.18. Bilek kırma hareketi açısal hız – zaman grafiği

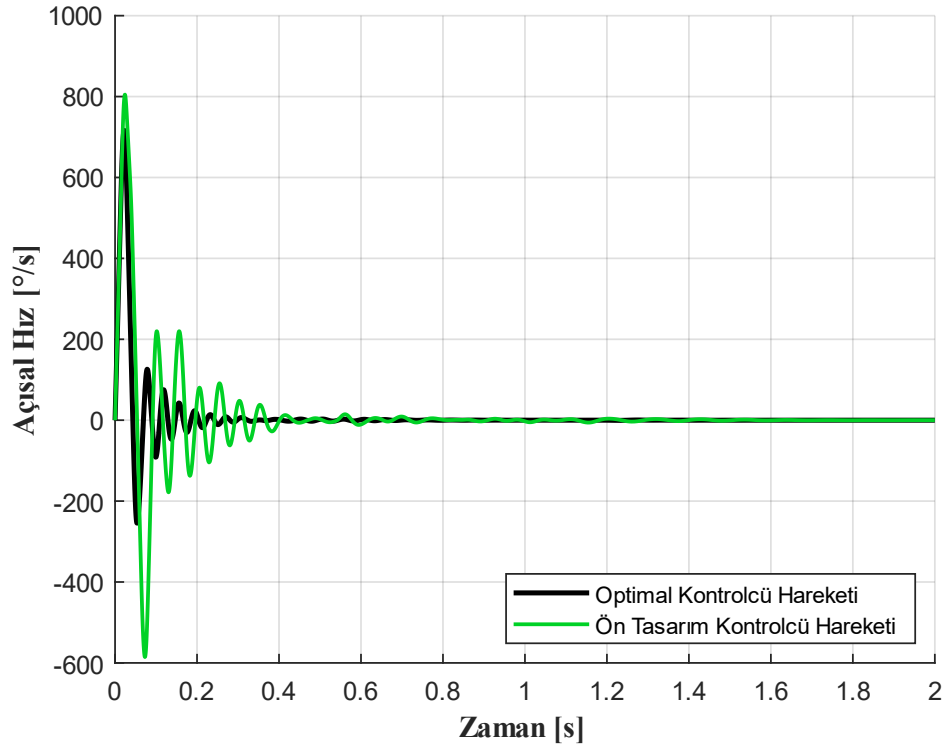
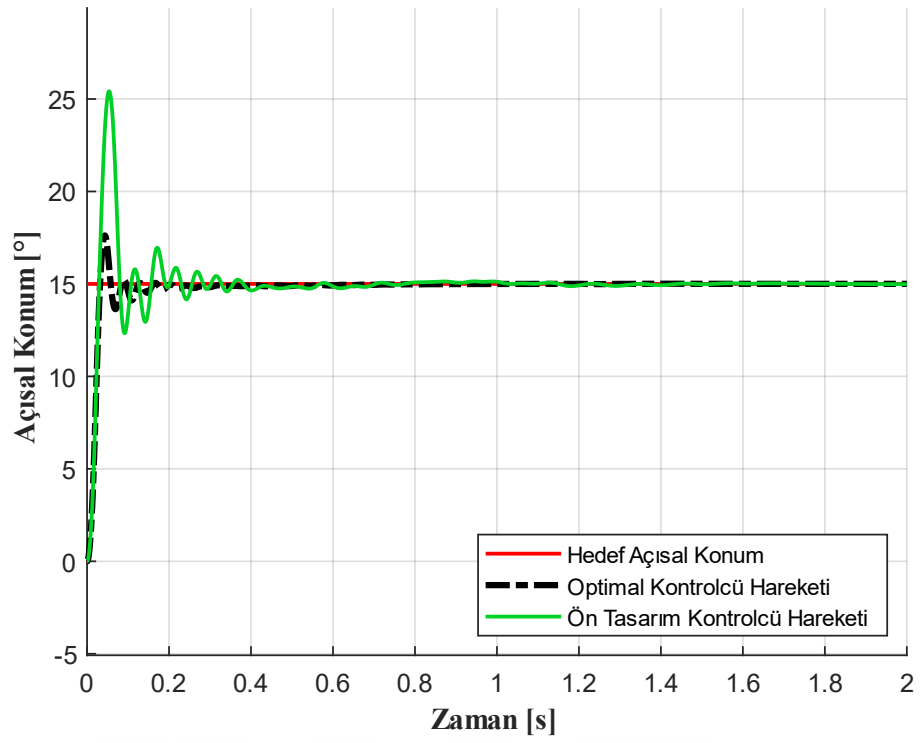


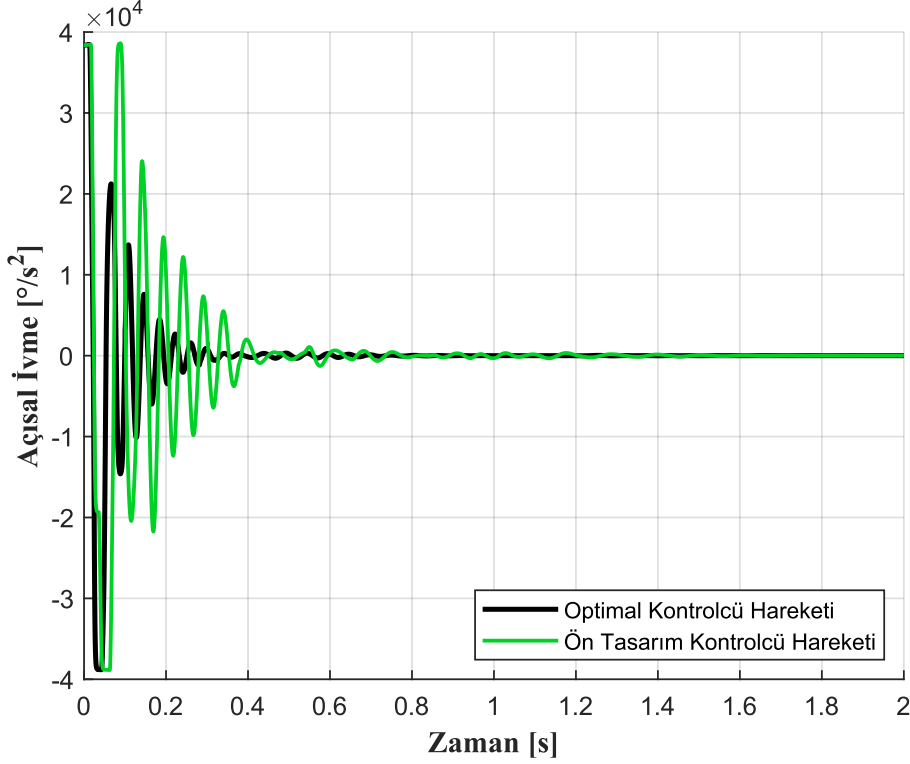
Şekil 5.19. Bilek kırma hareketi açısal ivme – zaman grafiği

Şekil 5.17'teki bilek kırma hareketi açısal konum-zaman grafiği incelendiğinde, 15° hedef konuma ulaşırken, ön tasarım kontrolcü hareketi sonucu hesaplanan geçici durum cevap değerleri $M_p = 6.0590^\circ$, $\theta_{maks} = 21.0590^\circ$, $e_{ss} = -0.3351^\circ$ olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasıyla elde edilen kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan hareketin sonucunda ise geçici durum cevap değişkenleri $M_p = 0.0123^\circ$, $\theta_{maks} = 15.0123^\circ$, $e_{ss} = 0.0117^\circ$ olarak elde edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, maksimum aşma oranının $\%-2.2341$ 'den $\%0.0821$ 'e; kalıcı hata oranının ise $\%-2.2341$ 'den $\%0.0783$ 'e düştüğü gözlemlenerek kontrolcü performansının iyileştiği tespit edilmiştir.

Açısal hız ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikte, alan altındaki değerlerin toplamı hesaplanarak, hareketin toplam yer değiştirme miktarı $^\circ$ cinsinden elde edilebilir. Şekil 5.18 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilen hareketin sonucunda 28.58° 'lik bir yer değişimi meydana gelirken, optimal kontrolcü kullanıldığında ise bu değer 16.00° olduğu belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, toplam yer değiştirme miktarının $\%44.03$ azaldığı ve sistem performansının arttığı gözlemlenmiştir.

Açısal ivme ve zaman arasındaki grafikte, alan altındaki mutlak değerlerin toplamı hesaplanarak, hareket sırasında toplam hız değişimi elde edilir. Şekil 5.19 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcü parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen hareketin sonucunda toplamda $733.29\text{ }^\circ/\text{s}$ açısal hız değişimi meydana gelirken, optimize edilmiş harekette ise bu değer $241.85\text{ }^\circ/\text{s}$ olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, hız değişiminde $\%67.02$ 'lik bir azalma gerçekleşmiş ve sistem kararlılığında artış gözlenmiştir.





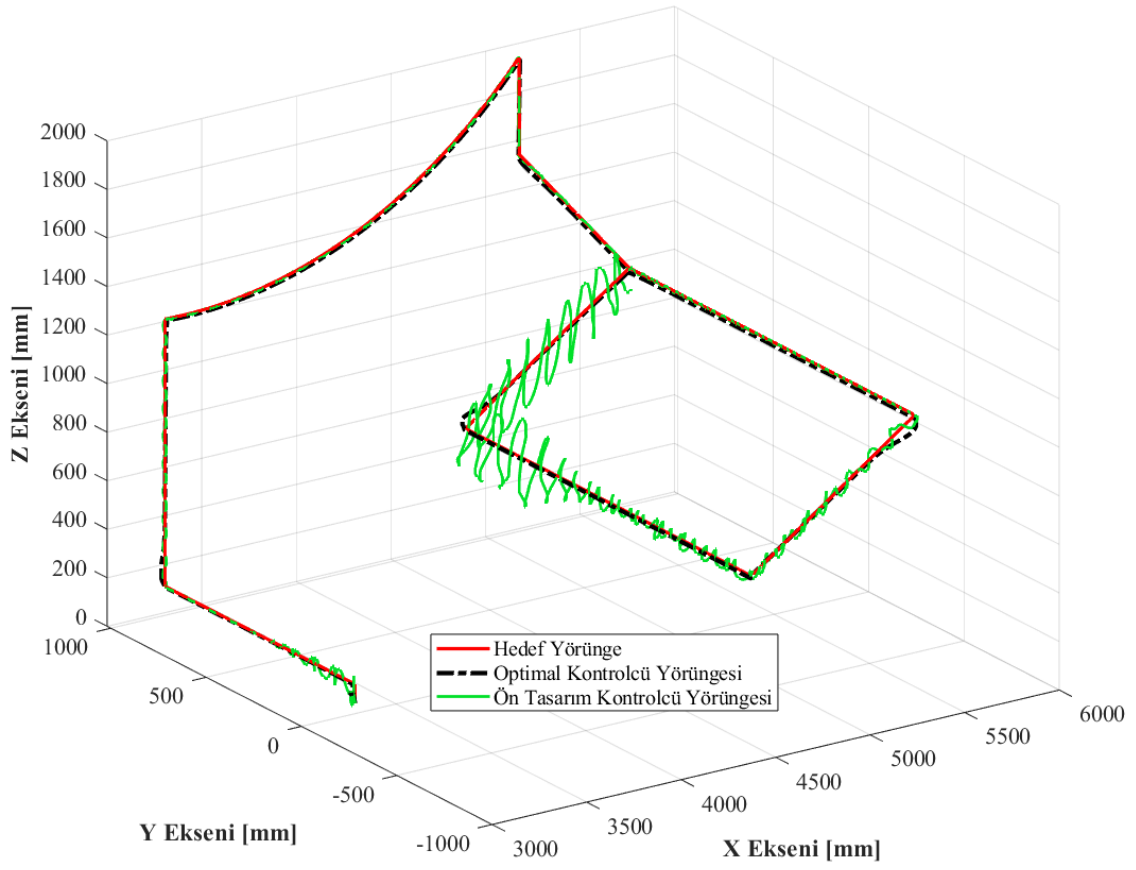
Şekil 5.22. Kısaç dönüş hareketi açısal ivme – zaman grafiği

Şekil 5.20'teki kısaç dönüş hareketi açısal konum-zaman grafiği incelendiğinde, 15° hedef konuma ulaşırken, ön tasarım kontrolcü hareketi sonucu hesaplanan geçici durum cevap değerleri $M_p = 10.4157^\circ$, $\theta_{maks} = 25.4157^\circ$, $e_{ss} = -0.0129^\circ$ olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasıyla elde edilen kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan hareketin sonucunda ise geçici durum cevap değişkenleri $M_p = 2.6190^\circ$, $\theta_{maks} = 17.6190^\circ$, $e_{ss} = 0.0048^\circ$ olarak elde edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, maksimum aşma oranının %69.4381'den %17.4603'e; kalıcı hata oranının ise %0.0860'dan %0.0320'e düştüğü gözlemlenerek kontrolcü performansının iyileştiği tespit edilmiştir.

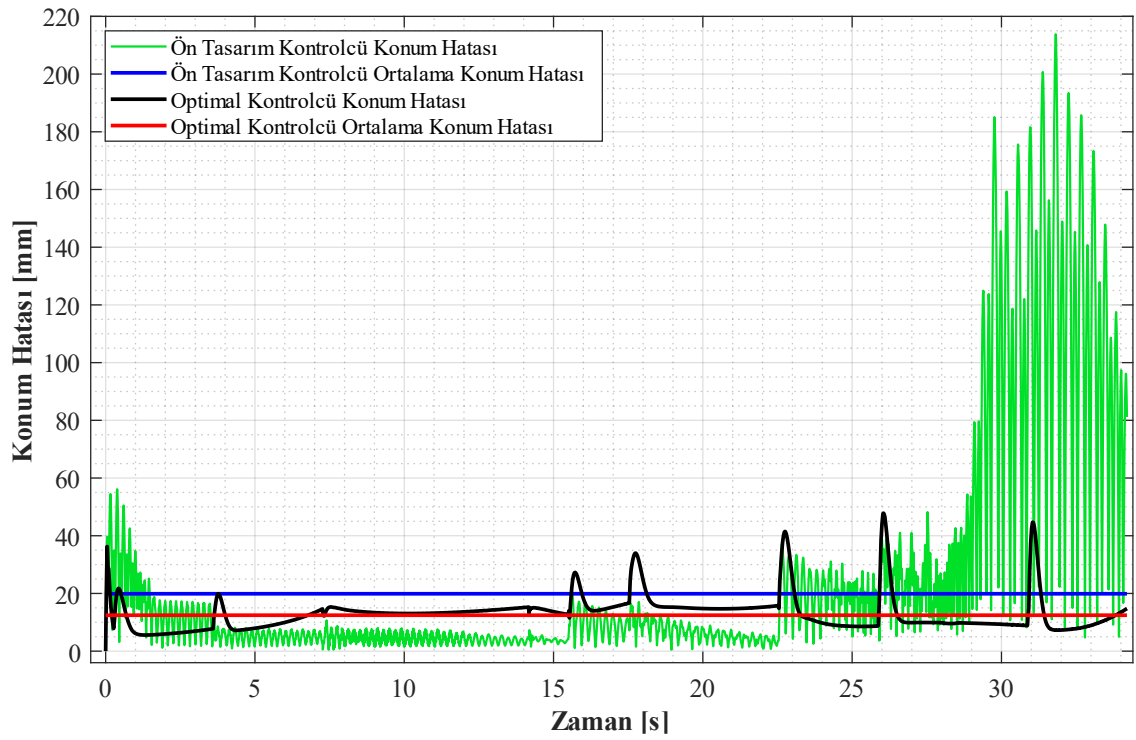
Açısal hız ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikte, alan altındaki değerlerin toplamı hesaplanarak, hareketin toplam yer değiştirme miktarı $^\circ$ cinsinden elde edilebilir. Şekil 5.21 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilen hareketin sonucunda 62.31° lik bir yer değişimi meydana gelirken, optimal kontrolcü kullanıldığında ise bu değerin 28.34° olduğu belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, toplam yer değiştirme miktarının %54.51 azaldığı ve sistem performansının arttığı gözlemlenmiştir.

Açısal ivme ve zaman arasındaki grafikte, alan altındaki mutlak değerlerin toplamı hesaplanarak, hareket sırasında toplam hız değişimi elde edilir. Şekil 5.22 incelendiğinde, ön tasarım kontrolcü parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen hareketin sonucunda toplamda 5576.27 °/s açısal hız değişimi meydana gelirken, optimize edilmiş harekette ise bu değer 3014.14 °/s olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, hız değişiminde %45.95'lik bir azalma gerçekleşmiş ve sistem kararlılığında artış gözlenmiştir.

Ön tasarım ve optimal parametreler kullanılarak bir yörünge takip simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası yörünge takibini gösteren grafik Şekil 5.23'te sunulmuştur. Şekil 5.23'teki veriler temel alınarak yapılan ön tasarım ve optimal kontrolcü hareketlerinin hedef yörüngeye göre sapmaları, Bölüm 3.3.6'da açıklanan ve Denklem 3.34'te verilen Öklid Mesafesi yöntemi ile tespit edilmiştir. 34.2 saniye süren simülasyon sırasında, ön tasarım kontrolcü ile optimal kontrolcü noktalarının hedef yörüngeye olan uzaklıkları esas alınarak Şekil 5.24'te konum hatası-zaman grafiği oluşturulmuştur. Şekil 5.24 incelendiğinde, en büyük sapmanın ön tasarım kontrolcüsü ile 213.8 mm olarak kaydedildiği görülmüştür. Optimizasyon sonucunda elde edilen parametrelerle gerçekleştirilen hareket simülasyonunda ise en büyük sapmanın 47.83 mm olduğu ve bu değer %77.62 oranında azaltıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ortalama hata, ön tasarım kontrolcüsü ile 19.89 mm iken, optimal kontrolcü ile yapılan simülasyon sonucunda 12.45 mm'ye düşmüştür. Bu sonuçlar, optimizasyonun sonucunda ortalama hatanın %37.40 oranında azaldığını ve kontrolcü performansının arttığını göstermektedir.



Şekil 5.23. Optimizasyon öncesi ve sonrası yörünge takibi grafiği



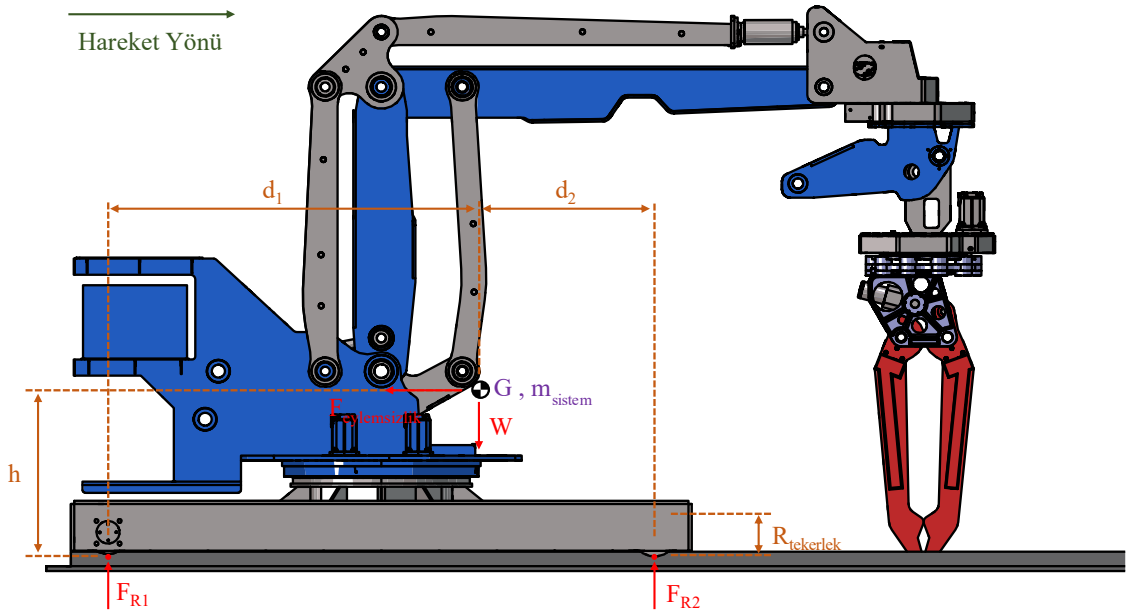
Şekil 5.24. Ön tasarım ve optimal kontrolcü yörünge takibi sırasındaki konum hatası – zaman grafiği

5.2. Hidromotor Seçimi

5.2.1. Taşıyıcı Kızak Hidromotoru İçin Gerekli Tork Hesabı

Sistem, hareket kabiliyetini artırmak ve kullanım esnasında esneklik sağlamak amacıyla bir ray üzerinde kaydırılarak hareket ettirilmektedir. Doğru hidromotor seçimi için taşıyıcı kızıağın istenen şartları sağlaması karşısında gerekli tork miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Hesaplama sürecinde özellikle dikkate alınması gereken bir husus, hidromotorun dönüşü sırasında üretilen tork miktarının, ray ile tekerlek arasındaki sürtünmeyi aşarak tekerin patinaj yapmasına yol açabilmesidir. Bu durumda, istenen hızda hareket edebilmek için gereken ivme önem arz etmektedir. Yüksek ivmeli hareketlerde, sistemin patinaj yapma riski bulunmaktadır.

Şekil 5.25'te sistemin serbest cisim diyagramı sunulmuştur. Bu diyagramda, F_{R1} ve F_{R2} kuvvetleri zeminin sisteme uyguladığı reaksiyon kuvvetlerini, $F_{\text{eylemsizlik}}$ ise hareket sırasında meydana gelen eylemsizlik kuvvetlerini temsil etmektedir. G noktası, sistemin kütle merkezini göstermekte olup, h yüksekliği kütle merkezi ile ray arasındaki uzaklığı ifade ederken, d_1 ve d_2 uzaklıkları arka ve ön tekerleklerin merkezlerinin kütle merkezine olan uzaklıklarını simgelemektedir. Ayrıca sistemin kütlesi m_{sistem} sembolü ile ifade edilmiştir. Sistemin hareketli durumu incelenirken meydana gelen ivme α_{hareket} sembolü ile ifade edilmiştir. Bununla birlikte sürtünme katsayısı μ_s , tekerlek çapı ise R_{tekerlek} olarak ifadesi kullanılmaktadır.



Şekil 5.25. Taşıyıcı kızak tahrik hidromotoru tork hesaplama için kullanılan serbest cisim diyagramı

Öncelikle sistem statik olarak incelenerek, tahrikli olan ön tekerleklere etkiyen reaksiyon kuvveti F_{R2} hesaplanır. Arka tekerleğin raya temas ettiği noktayı referans kabul edilerek yapılan moment hesabı sonucu F_{R2} denklemi Denklem 5.2’de verilmiştir. Ayrıca yerçekimi etkisi ile meydana gelen kuvvet (W) Denklem 5.1’ de verilmiştir.

$$W = m_{sistem}g \quad (5.1)$$

$$F_{R2} = \frac{Wd_1}{d_1 + d_2} \quad (5.2)$$

Sistem, ray üzerinde $\alpha_{hareket}$ ivmesi ile Şekil 5.25’te gösterilmiş olan diyagramda gösterilmiş olan yönde hareket ederken meydana gelen eylemsizlik kuvveti, tahrikli olan ön tekerleğin yere basma kuvvetini azaltacak yönde etki etmektedir. Dolayısıyla bu kuvvet hesaplara dahil edilerek etkisi dahil edilmesi gerekmektedir. $F_{eylemsizlik}$ kuvveti Denklem 5.3’te, arka tekerleğin raya temas ettiği nokta dönme merkezi olarak yapılan moment hesabı sonucu yere basma kuvvetindeki değişiklik $F_{\Delta W}$ denklemi ise Denklem 5.4’te verilmiştir.

$$F_{eylemsizlik} = m\alpha_{hareket} \quad (5.3)$$

$$F_{\Delta W} = \frac{F_{eylemsizlik} * h}{d_1 + d_2} \quad (5.4)$$

Sistemin ivmeli hareketi sırasında ön tekerleklerin yere basmasından kaynaklı normal kuvvet n_{tahrik} hesabı Denklem 5.5’te verilmiştir.

$$n_{tahrik} = F_{R2} - F_{\Delta W} \quad (5.5)$$

Denklem 5.5 göz önünde bulundurularak maksimum sürtünme kuvveti $f_{s(maks)}$ Denklem 5.6’da verilmiştir.

$$f_{s(maks)} = n_{tahrik} \mu_s \quad (5.6)$$

Bu durumda eylemsizliğin yenilmesi için gerekli kuvvet $F_{eylemsizlik}$, maksimum sürtünme kuvveti $f_{s(maks)}$ değerini geçerse sistem yere tutunamadan patinaj yapmaya

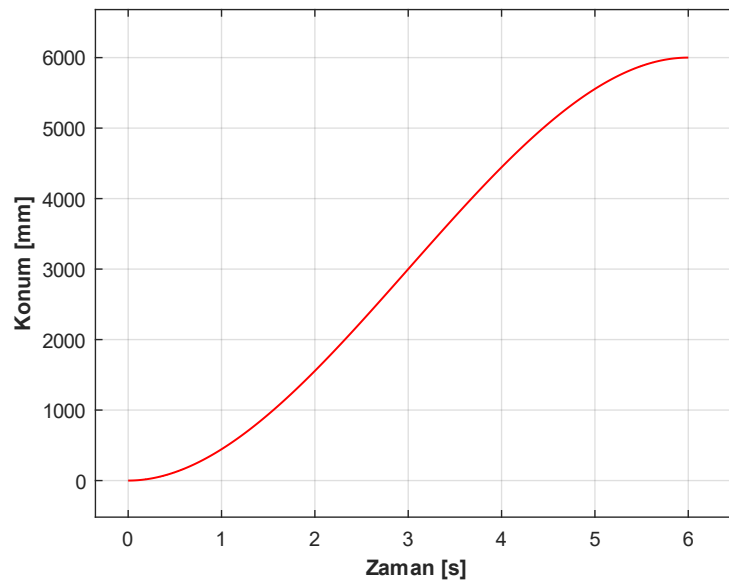
başlar. Ancak $F_{eylemsizlik}$, $f_{s(maks)}$ 'dan küçük olursa sistem patinaj yapmadan ilerlemeye başlayabilir.

Patinaj kontrolü yapılan kuvvet, tekerlek yarıçapına bölünerek, sistemin rayda ilerlemesini sağlayan ve iki hidromotorun toplam karşılaması gereken tork miktarının elde edilmesine imkan sağlar. Ayrıca elde edilen tork miktarı tekrar ikiye bölünerek motor başına gerekli tork hesaplanmış olur. Motor başına gerekli maksimum tork denklemi Denklem 5.7'de verilmiştir.

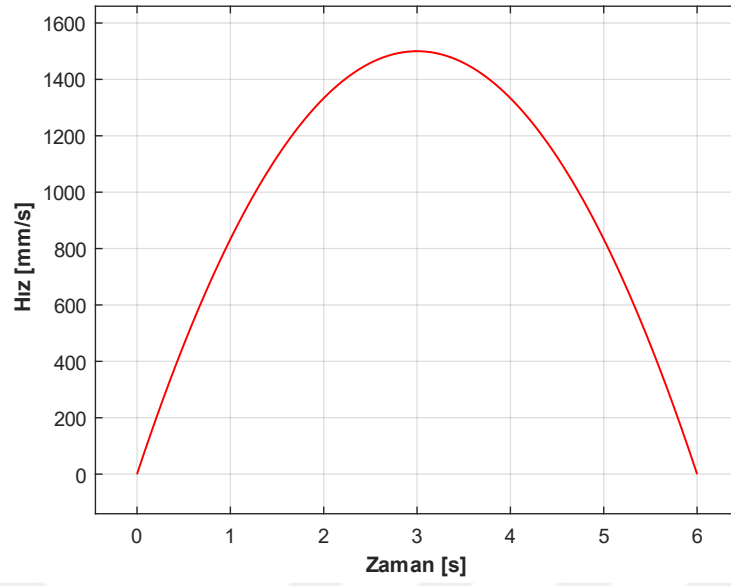
$$T_{motor} = \frac{\frac{F_{eylemsizlik}}{R_{tekerlek/2}}}{2} \quad (5.7)$$

Bu denklemler bütünü kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonucu gerekli tork kapasitesi ve hidromotor seçimi yapılmıştır. Hesaplama sırasında, üçüncü derece polinom fonksiyonu esas alınarak oluşturulmuş hareket profili kullanılmıştır (Erdemir ve Kalyoncu, 2023).

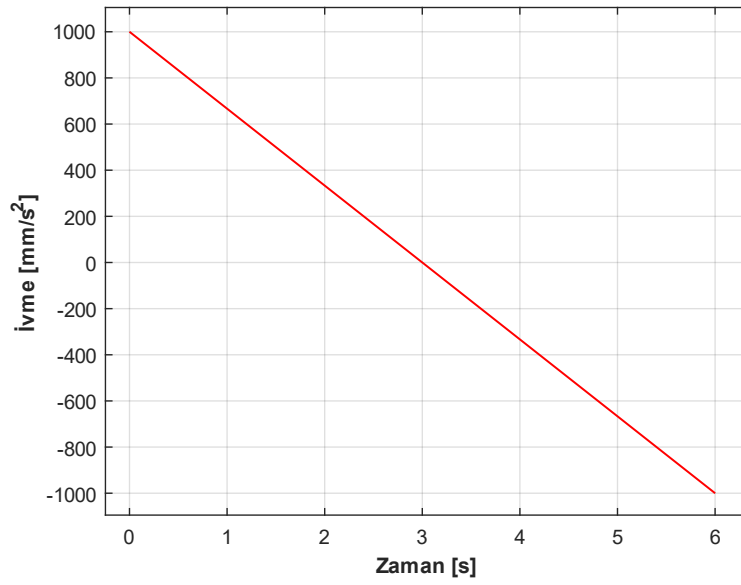
Hareket profili, durgun halden başlayarak, 6 metre yol alarak tekrar durmuştur. Bu hareket sırasında maksimum 1.5 m/s doğrusal hıza, maksimum 1 m/s² ivme değerine ulaşmıştır. Üçüncü derece polinom denklemi kullanılarak elde edilmiş olan konum – zaman, hız – zaman ve ivme – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.26. Kızak hareketi konum-zaman grafiği

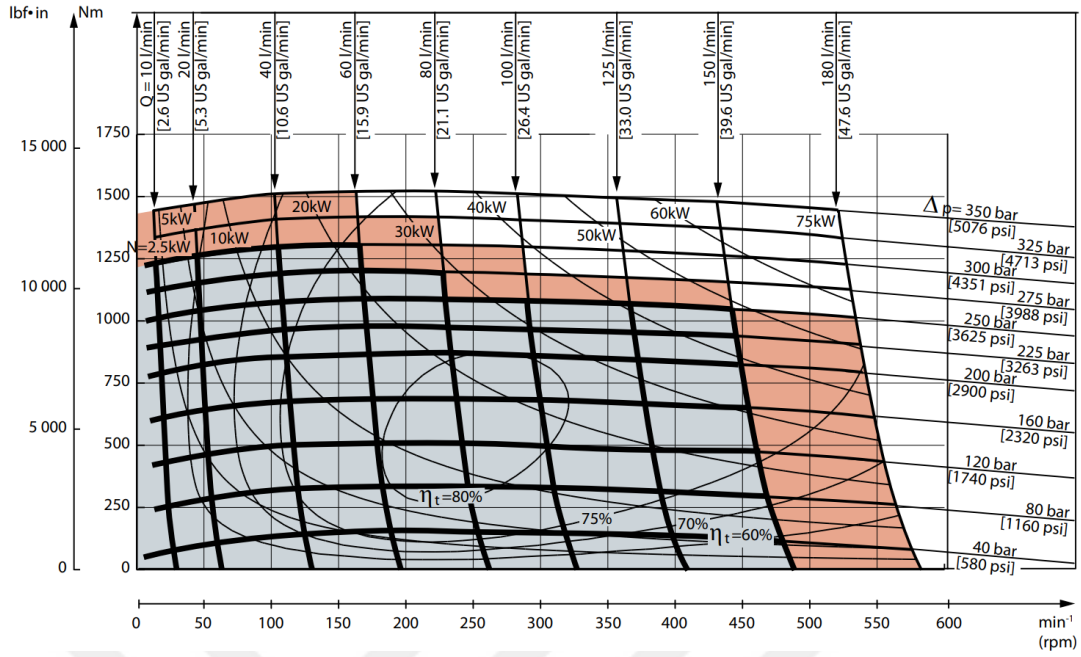


Şekil 5.27. Kızak hareketi hız-zaman grafiği

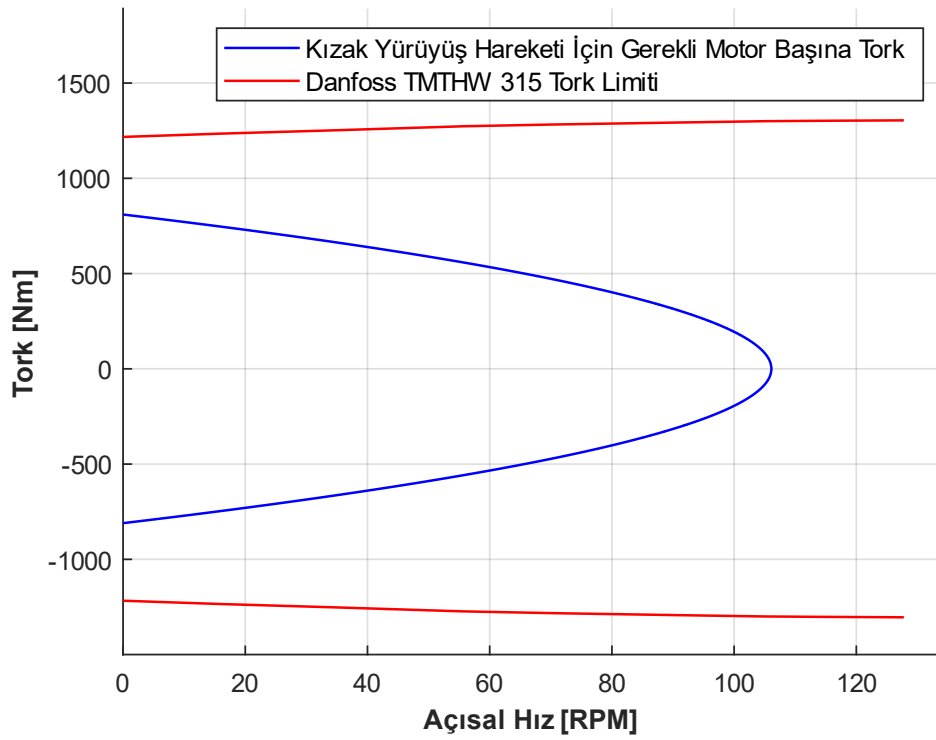


Şekil 5.28. Kızak hareketi ivme-zaman grafiği

Konum, hız ve ivme hareketleri esas alınarak ve söz konusu hesaplar dahilinde yapılan hesaplama sonucunda, patinaj olmadan yapılan kızaklama hareketi sonucu motorun karşılaması gereken tork – açısal hız grafiği Şekil 5.30’da verilmiştir. Gerekli tork – hız grafiği incelenerek Danfoss (2024d) TMTHW 315 hidromotoru bu görev için uygun görülmüştür. Bu hidromotorun tork – açısal hız grafiği Şekil 5.29’de verilmiştir.



Şekil 5.29. Danfoss TMTHW 315 hidromotoru tork – açısız hız grafiği

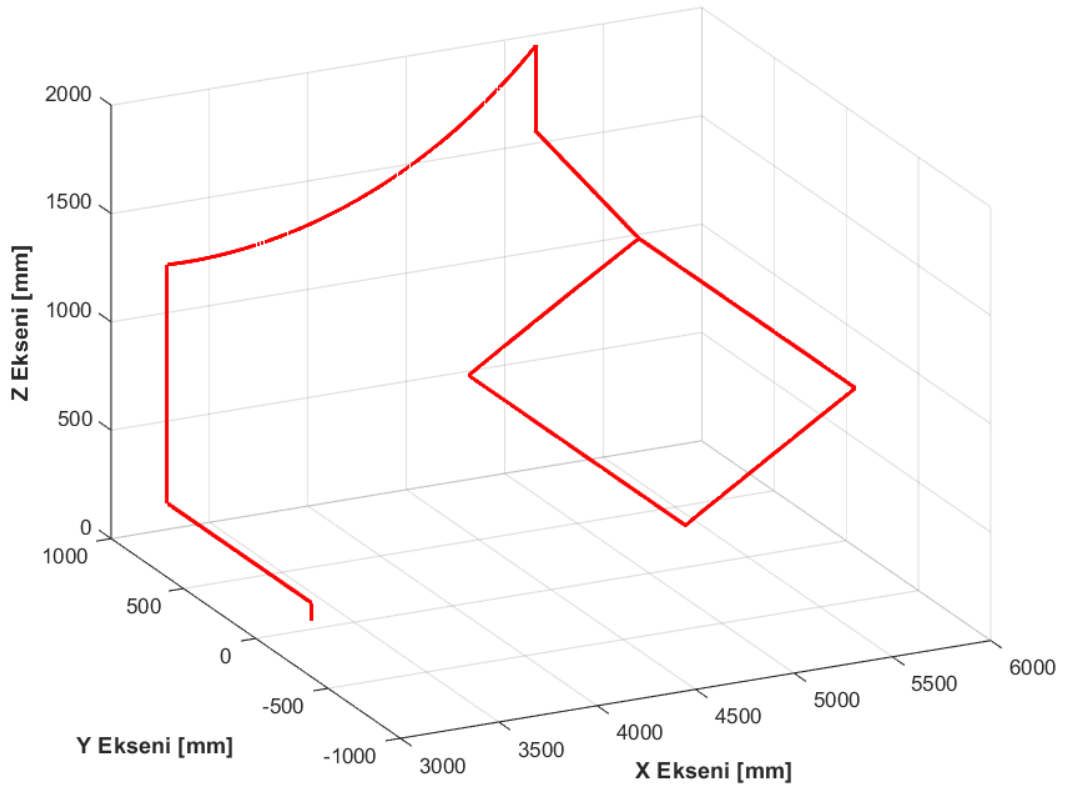


Şekil 5.30. Kızak yürüyüşü için gerekli tork – açısız hız grafiği

5.2.2. Döner Eklem Hidromotorları İçin Gerekli Tork Hesabı

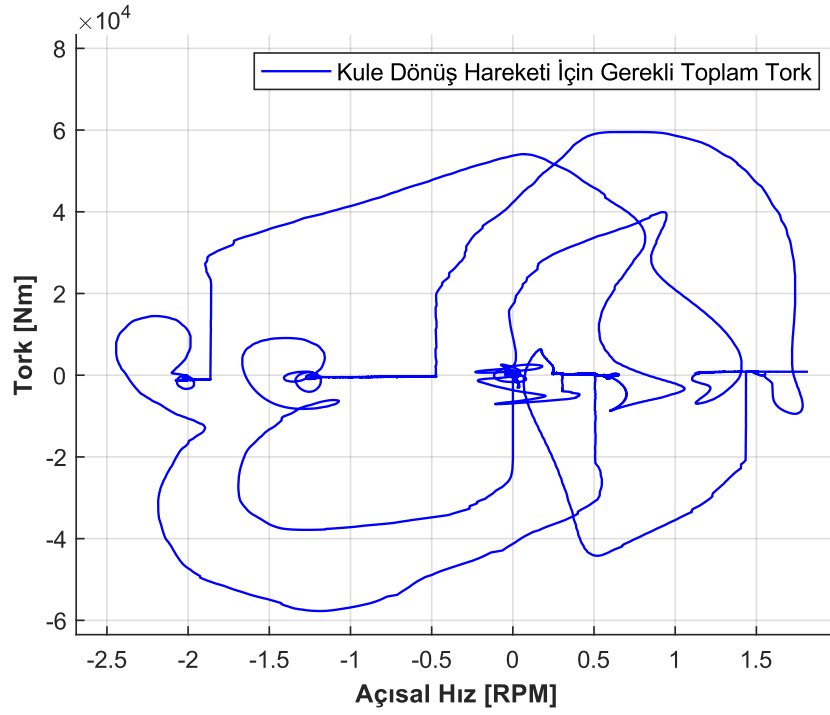
Robot kolun hareketini sağlayan, omuz, dirsek ve bilek kırma eklemleri hidrolik silindirlerle tahrik edilirken; kule dönüş, bilek dönüş ve kıskaç dönüş eklemleri ise hidromotor tahriki ile çalışmaktadır. Dönüş eklemleri için gerekli hidromotor seçiminin doğru yapılabilmesi için gerekli torkların doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Sistemin istenen şekilde hareket etmesi için gerekli tork MATLAB/Simulink ortamında hazırlanmış fiziksel model kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyon ortamında bulunan robot Şekil 5.31’de verilmiş olan yörünge izlenerek kule dönüş için gerekli tork gerekliliği ile ilgili simülasyon yapılmıştır.

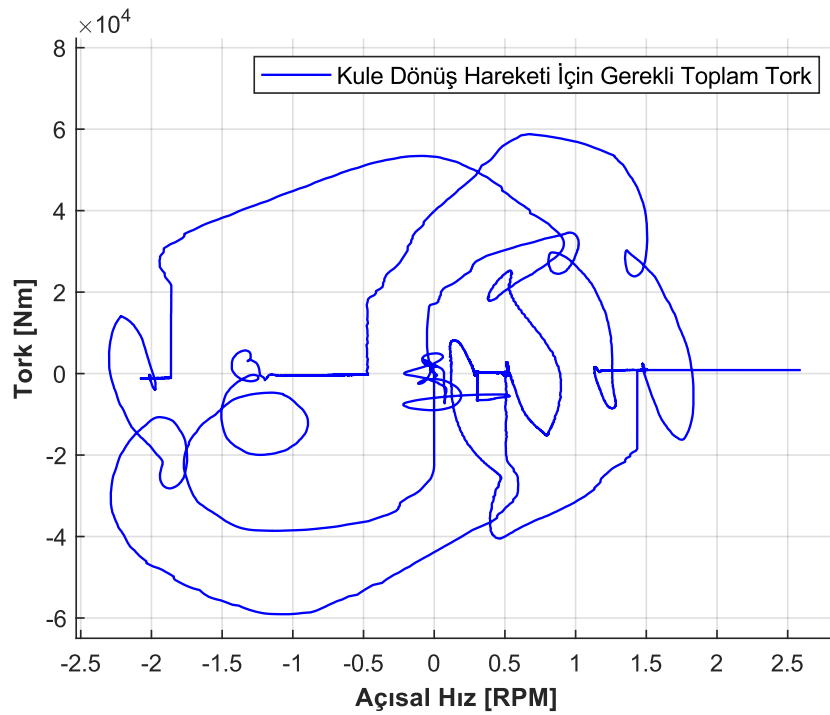


Şekil 5.31. Simülasyon yörüngesi

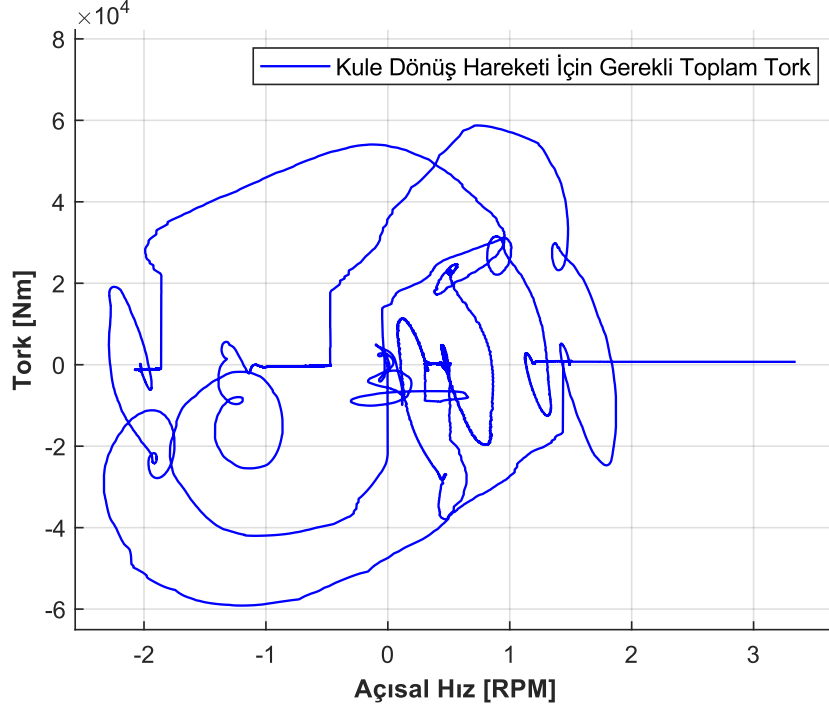
İzlenen simülasyon yörüngesi boyunca robot kol yüksüz bir şekilde 400 mm/s uç işlevci hızında hareket ettirilmiştir. Bu durumda kule dönüş tahrik elemanlarının karşılaması gereken açısal hız – tork grafiği Şekil 5.32’de verilmiştir. Ayrıca aynı yörünge 325 kg ve 650 kg yüklü halde hareket ettirilmiş ve açısal hız – tork grafikleri sırasıyla Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’te verilmiştir.



Şekil 5.32. 400 mm/s uç işlevci hızında ve yüksüz iken kule dönüş hareketi sırasında gerekli toplam tork – açısal hız grafiği

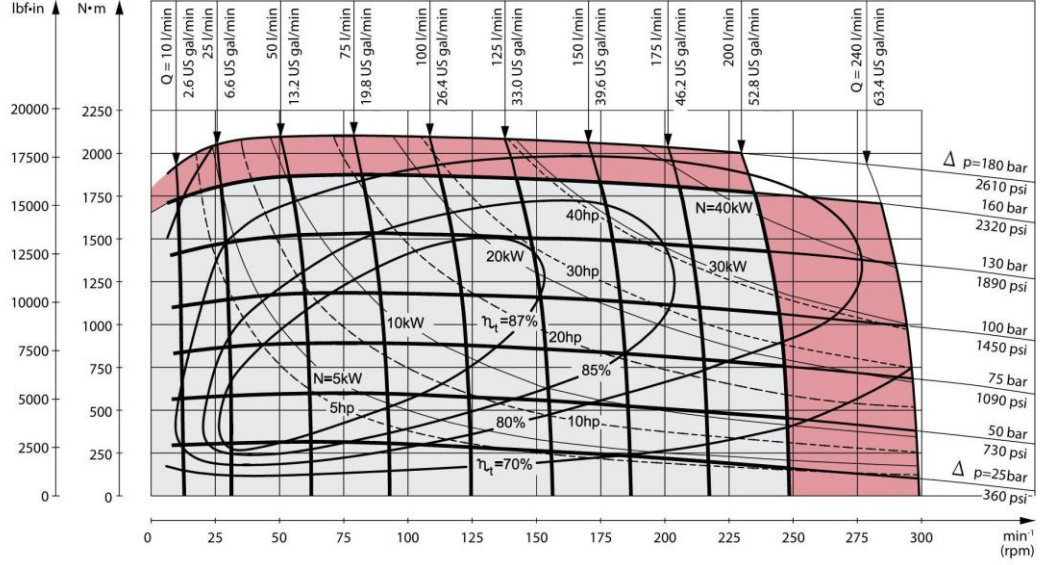


Şekil 5.33. 400 mm/s uç işlevci hızında ve 325 kg yüklü iken kule dönüş hareketi sırasında gerekli toplam tork – açısal hız grafiği



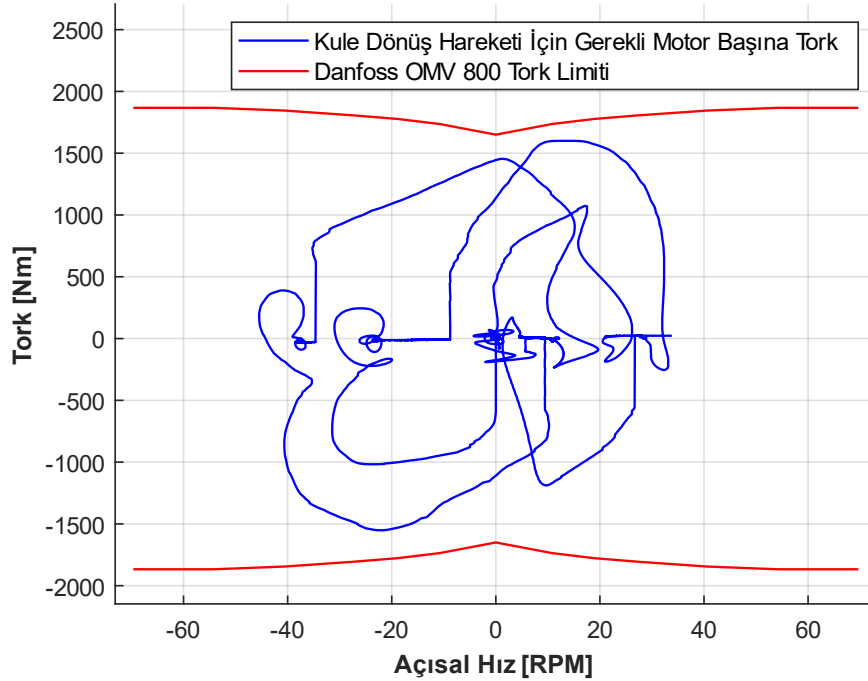
Şekil 5.34. 400 mm/s uç işlevci hızında ve 650 kg yüklü iken kule dönüş hareketi sırasında gerekli toplam tork – açısal hız grafiği

400 mm/s uç işlevci hızında ve yüksüz, 325 kg ve 650 kg yükleme şartları altında yapılan simülasyon sonucunda gerekli tork miktarları sırasıyla, 0.72 RPM dönüş hızında 59519 Nm; -1.0877 RPM dönüş hızında -59066 Nm; -1.208 RPM dönüş hızında -59129 Nm maksimum tork ihtiyacı bulunduğu görülmektedir. Bu şartlar göz önüne alındığında iki adet Danfoss markasının OMV 800 (Danfoss, 2024b) model hidromotor kullanılması ve uygun çevrim oranında redüktör ve çember dişli grubu kullanarak motor zarfının değiştirilmesi kararına varılmıştır. Bu hidromotor 800 cc deplasmana sahip ve maksimum dönüş hızı 300 RPM'dir. Ayrıca bu hidromotor maksimum 1880 Nm torka sahiptir. Kısa süreli olarak ise 2110 Nm tork verebilmektedir. Danfoss OMV 800 Hidromotor açısal hız – tork grafiği Şekil 5.35'te verilmiştir

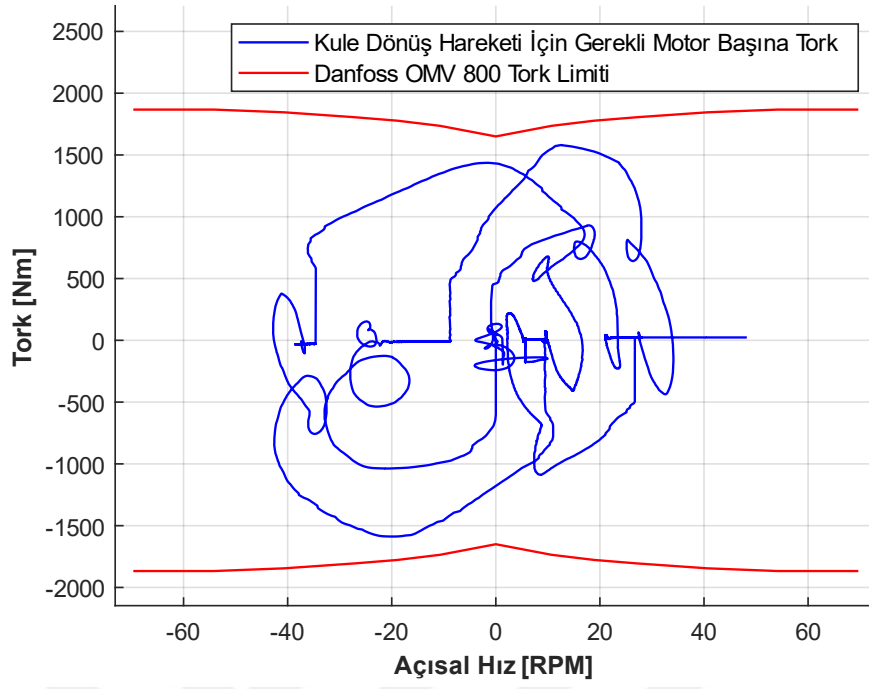


Şekil 5.35. Danfoss OMV 800 Hidromotor açısız hız – tork grafiği

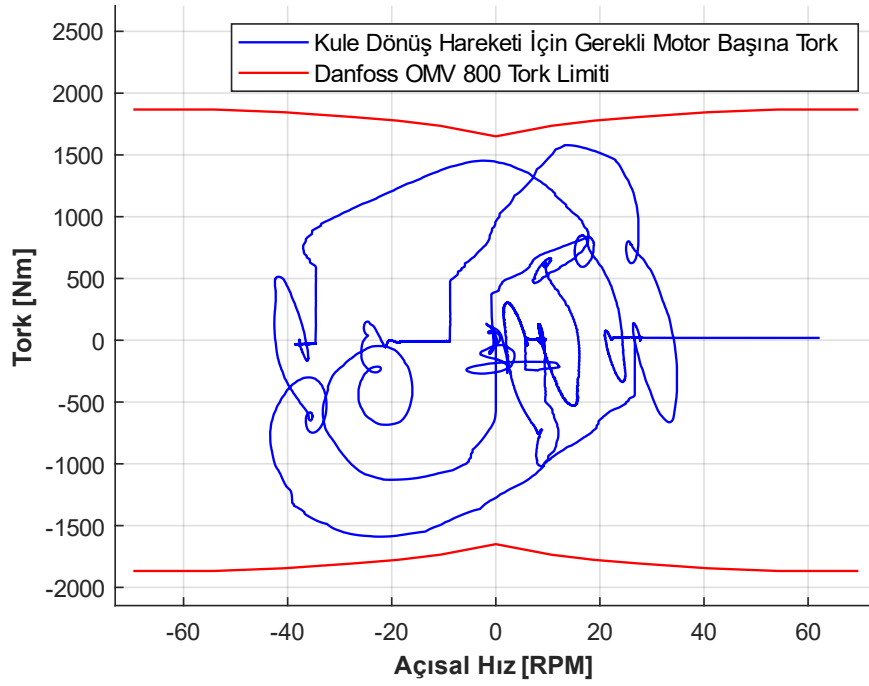
Bahsi geçen sayıda motor kullanılarak gerekli dişli yapısı kurulmuş olan sistemin motor başına düşen açısal hız – tork grafikleri yüksüz, 325 kg ve 650 kg olmak üzere sırasıyla Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de verilmiştir. Hidromotor ve dişli grubu seçimi, sistemin gerekli tork ve açısal hız gereksinimini karşılayacak şekilde konfigüre edilmiştir.



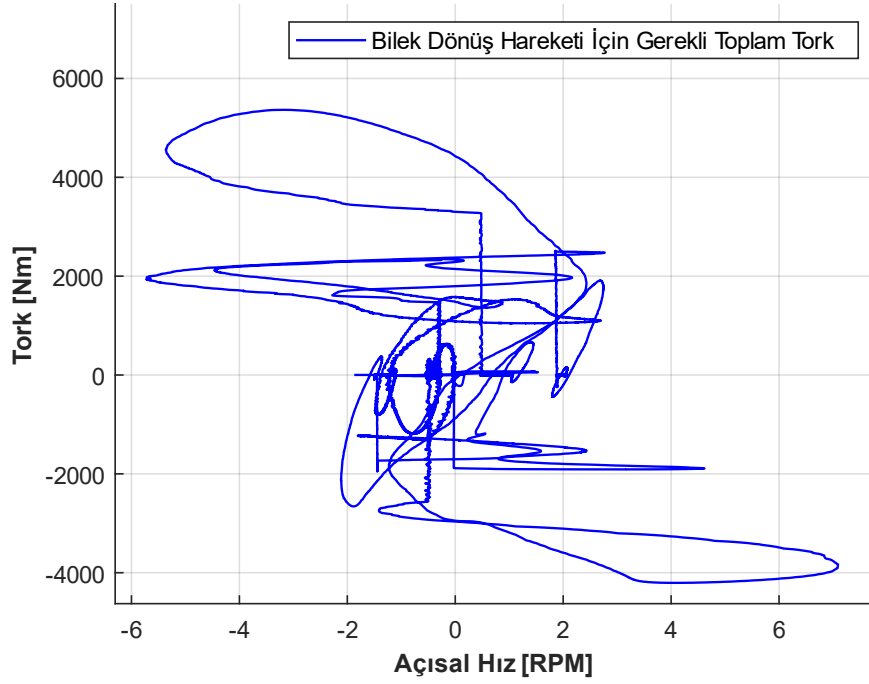
Şekil 5.36. Kule dönüş hareketi için yüksüz halde açısal hız – tork grafiği



Şekil 5.37. Kule dönüş hareketi için 325 kg yüklü halde açısal hız – tork grafiği

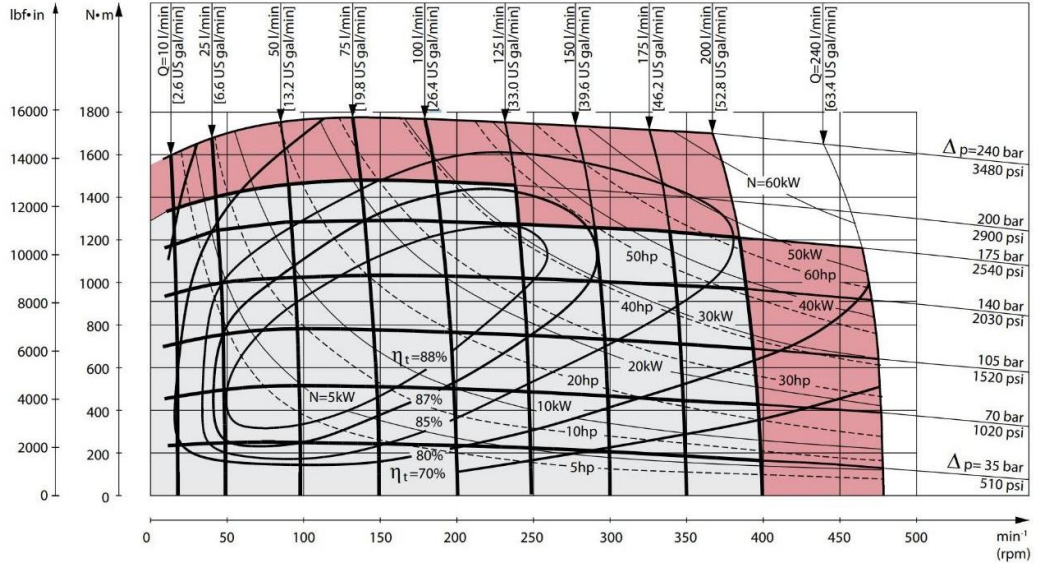


Şekil 5.38. Kule dönüş hareketi için 650 kg yüklü halde açısal hız – tork grafiği

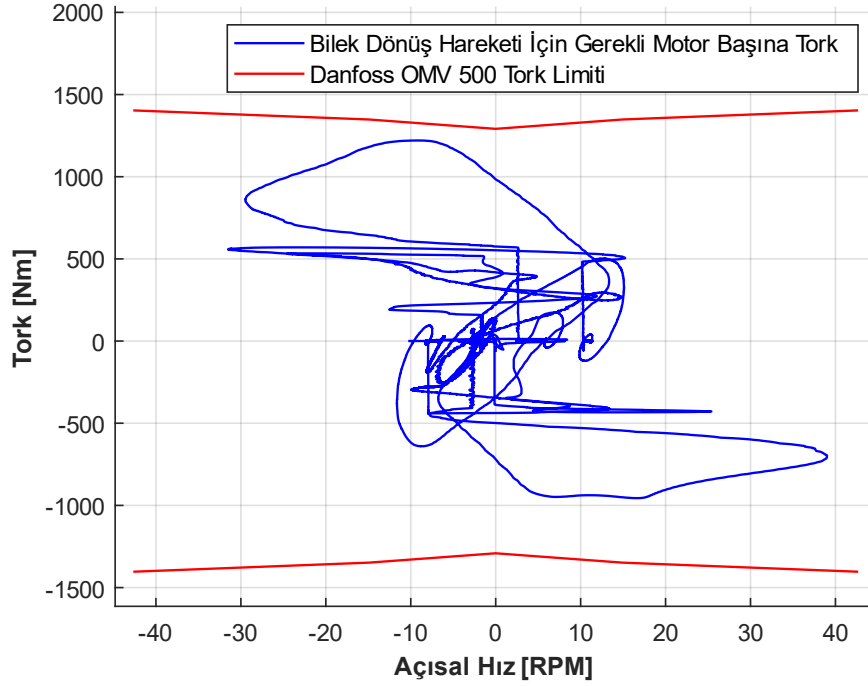


Şekil 5.39. 400 mm/s uç işlevci hızında ve 625 kg yüklü iken bilek dönüş hareketi sırasında gerekli toplam tork – açısal hız grafiği

Şekil 5.31’da verilmiş yörünge izlenerek elde edilmiş bir diğer bilgi ise bilek dönüş eklemi açısal hız – tork grafiğidir. Bu grafik incelenerek en ağır yüklü haldeki 650 kg yüklü şartlardaki açısal hız – tork grafikleri elde edilmiştir. Bu grafik Şekil 5.39’de verilmiştir. Şekil 5.39’da verilmiş olan grafik incelendiğinde, bilek ekleminin hareketi sırasında görülmüş olan en büyük tork, -3.22 RPM dönüş hızında iken 5364 Nm olarak tespit edilmiştir. Bu şartlar dikkate alınarak yapılan dişli seçimi sırasında, 5.5:1 çevrim oranına sahip çember dişli, pinyon dişli çifti kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca bu eklem için hidromotor seçimi Danfoss markasının OMV 500 model (Danfoss, 2024a) hidromotorundan yana yapılmıştır. Bu hidromotor 500 cc deplasmana ve maksimum 400 RPM dönüş hızına sahiptir. Ayrıca maksimum torku 1460 Nm iken kısa süreli olarak 1760 Nm tork üretebilmektedir. Bu hidromotorun açısal hız – tork grafiği Şekil 5.40’da verilmiştir. Seçim sonrası eklemin açısal hız – tork grafiği Şekil 5.41’da verilmiştir. Şekil 5.41 incelendiğinde, OMV 500 hidromotor ve 5.5:1 çevrim oranındaki dişli çiftinin kullanımı ile sistemin bu eklem için gerek duyduğu tork ve açısal hız ihtiyacı karşılanmıştır.



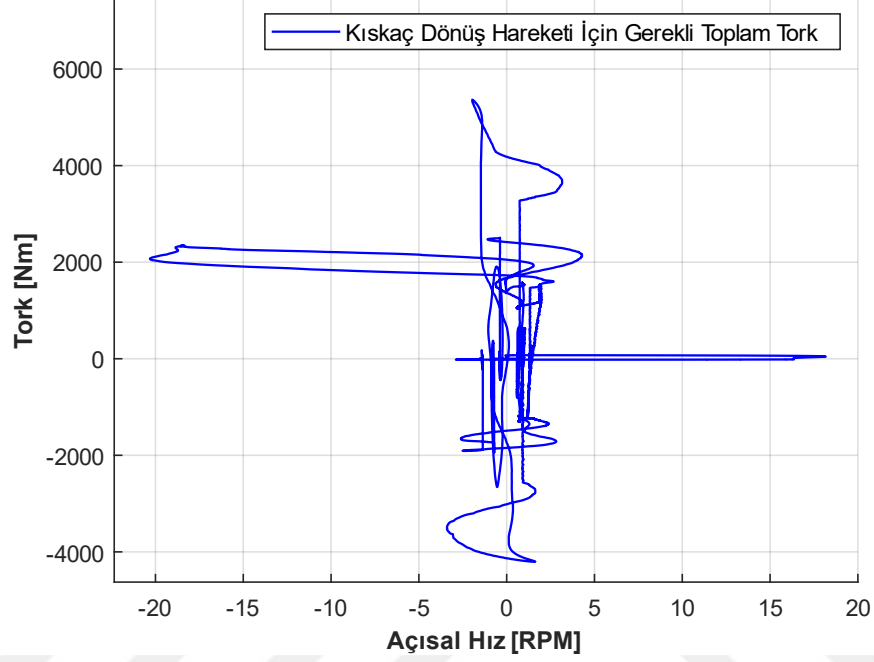
Şekil 5.40. Danfoss OMV 500 hidromotoru açısız hız – tork grafiği



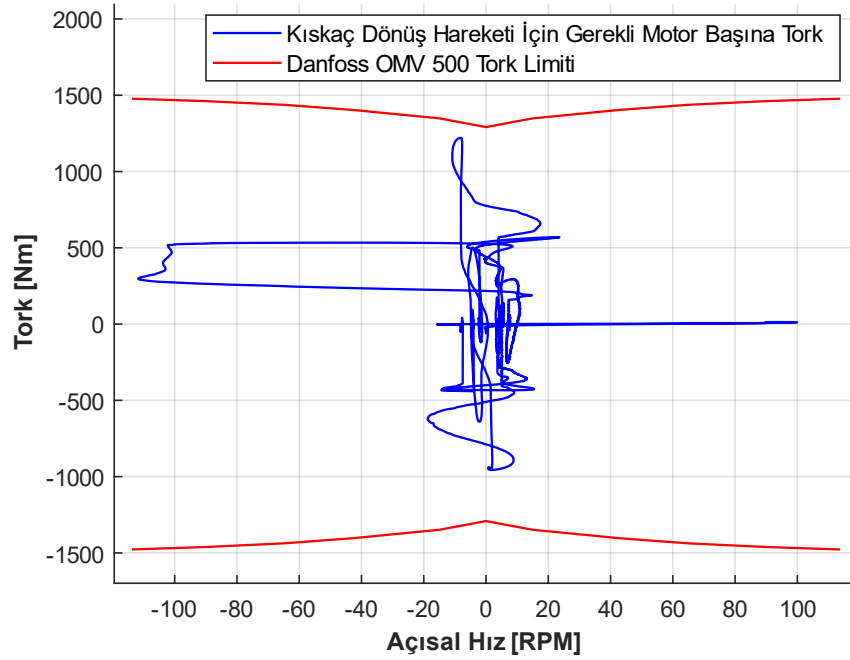
Şekil 5.41. Bilek dönüş hareketi için 650 kg yüklü halde açısız hız – tork grafiği

Ayrıca uç işlevci dönüşünü sağlayan yedinci eklem istenen yönelimde kalacak şekilde tasarlanmıştır. Hareketi sırasında bu eklemin dönüşü için gerekli açısız hız – tork grafiği Şekil 5.42’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek tork gerekliliğinin - 1.96 RPM dönüş hızında iken 5365 Nm olduğu görülmektedir. Bu şartlar göz önüne alınarak, bu eklem için uygun görülen çevrim oranı 5.5:1 olmuş ve çember dişli ve pinyon sayısı diş adetleri bu çevrim oranını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Bu eklemin tahriki

için ise, parça çeşitliliğinin artırılmaması adına bilek dönüş eklemünde kullanılmış olan Danfoss OMV 500 hidromotoru kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca çevrim oranı sonrası açısız hız – tork grafiği Şekil 5.43’de verilmiştir. Şekil 5.43 incelendiğinde, OMV 500 hidromotor ve dişli çifti kullanımı sonucunda sistemin kısıkaç dönüş eklemi için açısız hız ve tork ihtiyacı karşılanmıştır.



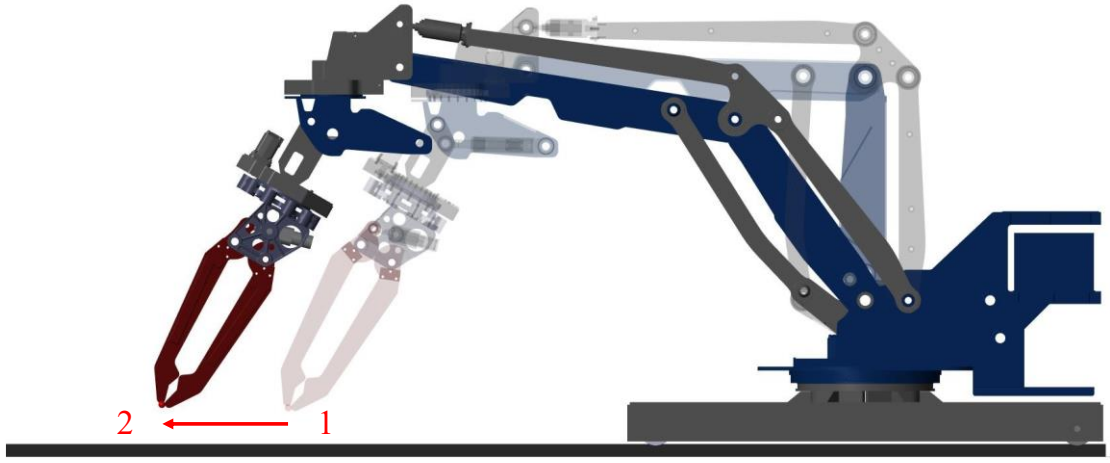
Şekil 5.42. 400 mm/s uç işlevci hızında ve 625 kg yüklü iken kısıkaç dönüş hareketi sırasında gerekli toplam tork – açısız hız grafiği



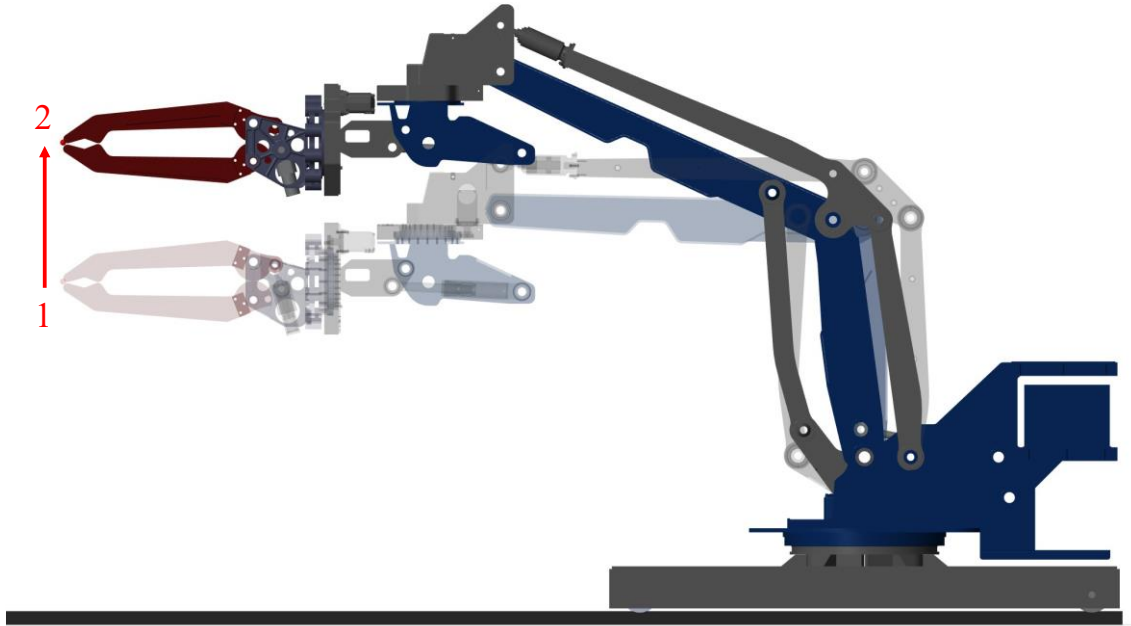
Şekil 5.43. Bilek dönüş hareketi için 650 kg yüklü halde açısız hız – tork grafiği

5.3. Silindir Boyutlandırması

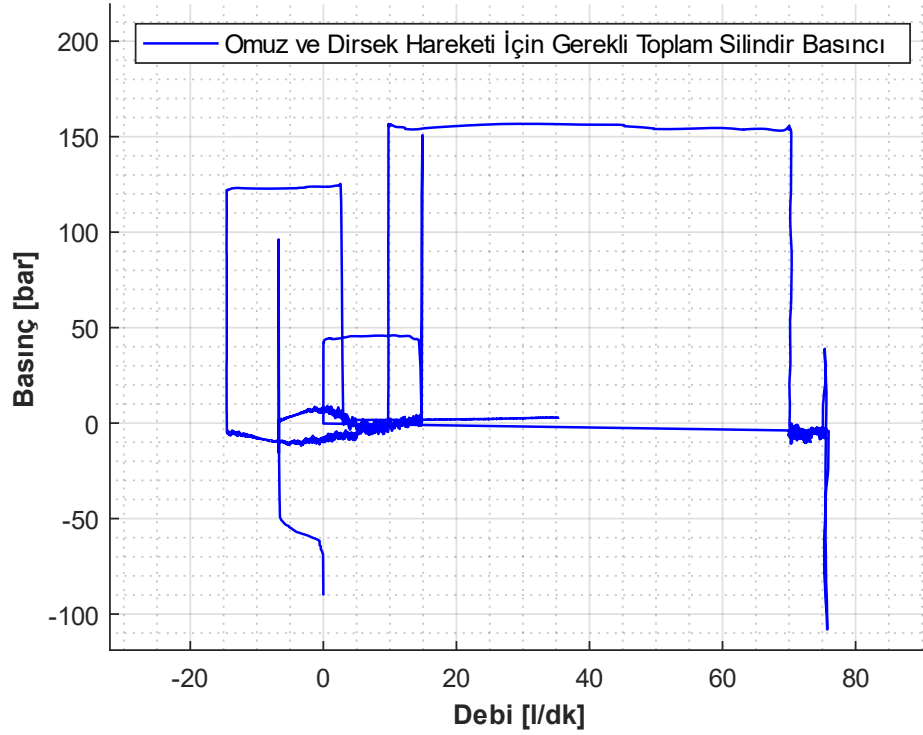
Sistemin tasarım hedefleri arasında dikey ve yatay hareketlerde 1 m/s uç işlevci hızını sağlaması hedeflenmektedir. Bu hareketi sağlayan en önemli iki aktüatör ise omuz ve dirsek uzuvlarının hareketini sağlayan hidrolik silindirlerdir. Bu silindirlerin uygun debi ve basınç şartlarında tahrik edilerek bu hedefin sağlanması gerekmektedir. Sistemin gerçekleştirmesi hedeflenen yatay ve dikey hareket yörüngesi Şekil 5.44'te ve Şekil 5.45'de verilmiştir. Şekillerde gösterilmiş olan hareket 1 metre uç işlevci hareketinin 1 saniyede tamamlanarak, 1m/s uç işlevci hızı sağlanması hedeflenmiştir.



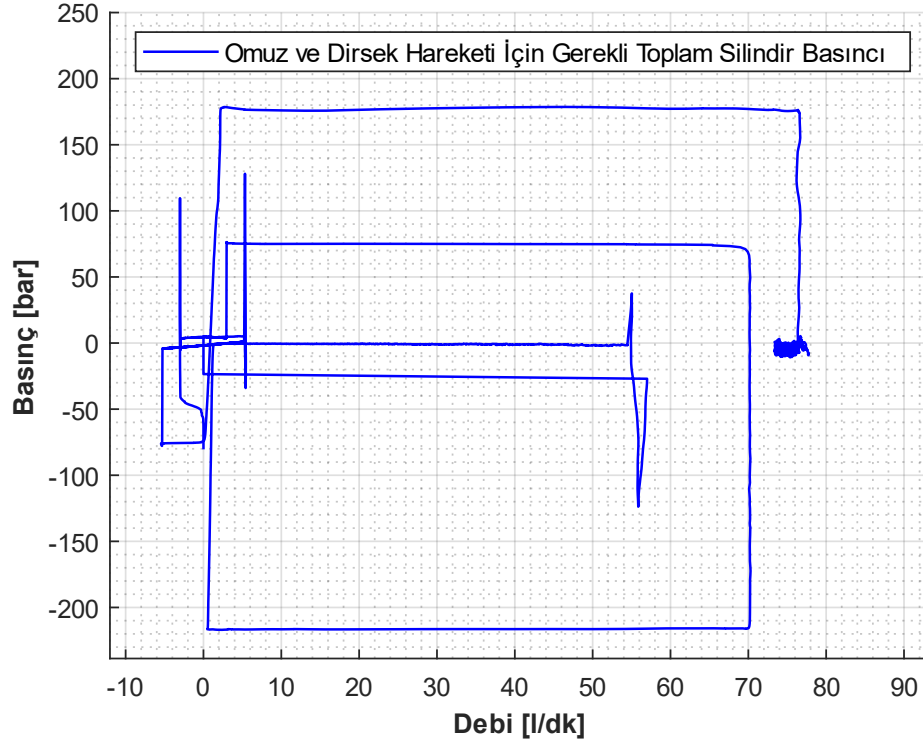
Şekil 5.44. 1 m/s uç işlevci hızında 1 metre yatay hareket



Şekil 5.45. 1 m/s uç işlevci hızında 1 metre dikey hareket



Şekil 5.46. 1 m/s uç işlevci hızındaki dikey 1 metre hareket ederken ve 650 kg yüklü halde iken omuz ve dirsek silindirleri debi – basınç grafiği



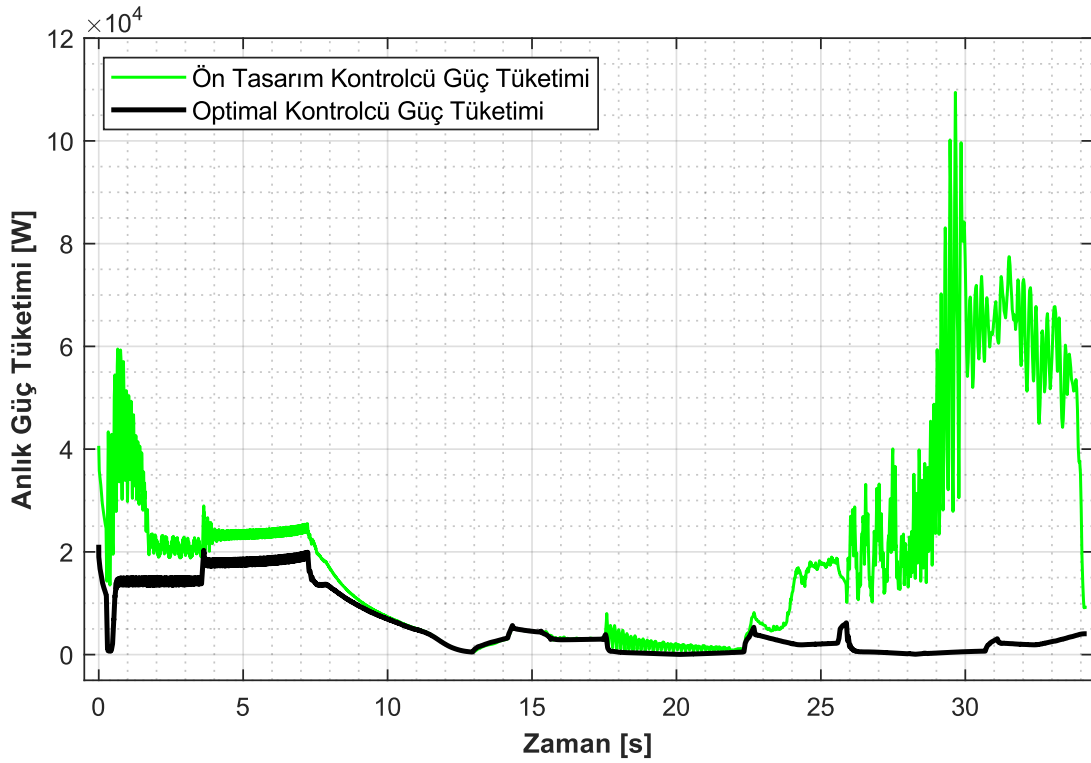
Şekil 5.47. 1 m/s uç işlevci hızındaki yatay 1 metre hareket ederken ve 650 kg yüklü halde iken omuz ve dirsek silindirleri debi – basınç grafiği

Şekil 5.44 ve Şekil 5.45’de planlanmış olan hareket, 1 m/s uç işlevci hızında ve 650 kg yüklü olacak şekilde simüle edilmiştir. Bu simülasyon sonucunda, dikey ve yatay hareket için ayrı ayrı silindir debi – basınç grafikleri elde edilmiş ve Şekil 5.46 ve Şekil 5.47’de verilmiştir. Her iki grafik de incelendiğinde hidrolik pompa, maksimum gereken basıncı olarak 234 bar ve akışkan debisi olarak 134 l/dk şartlarını sağlaması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

5.4. Enerji Tüketimi

Robotlarda enerji verimliliği hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük bir öneme sahiptir. Enerji verimliliğini artırmak, robotların daha uzun süre kesintisiz çalışabilmesini sağlar ve işletme maliyetlerini düşürür. Bu, özellikle üretim hatlarında ve sürekli çalışması gereken diğer endüstriyel uygulamalarda kritik bir avantajdır. Ayrıca, enerji verimliliği, fosil yakıt tüketimini ve karbon ayak izini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunur.

Bu çalışmada, Şekil 5.23’te sunulan yörünge takibi sırasında kaydedilen anlık güç tüketimi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ön tasarım kontrolcü ile optimal kontrolcü parametrelerine ait zamana bağlı anlık güç tüketim grafiği ise Şekil 5.48’de verilmiştir.

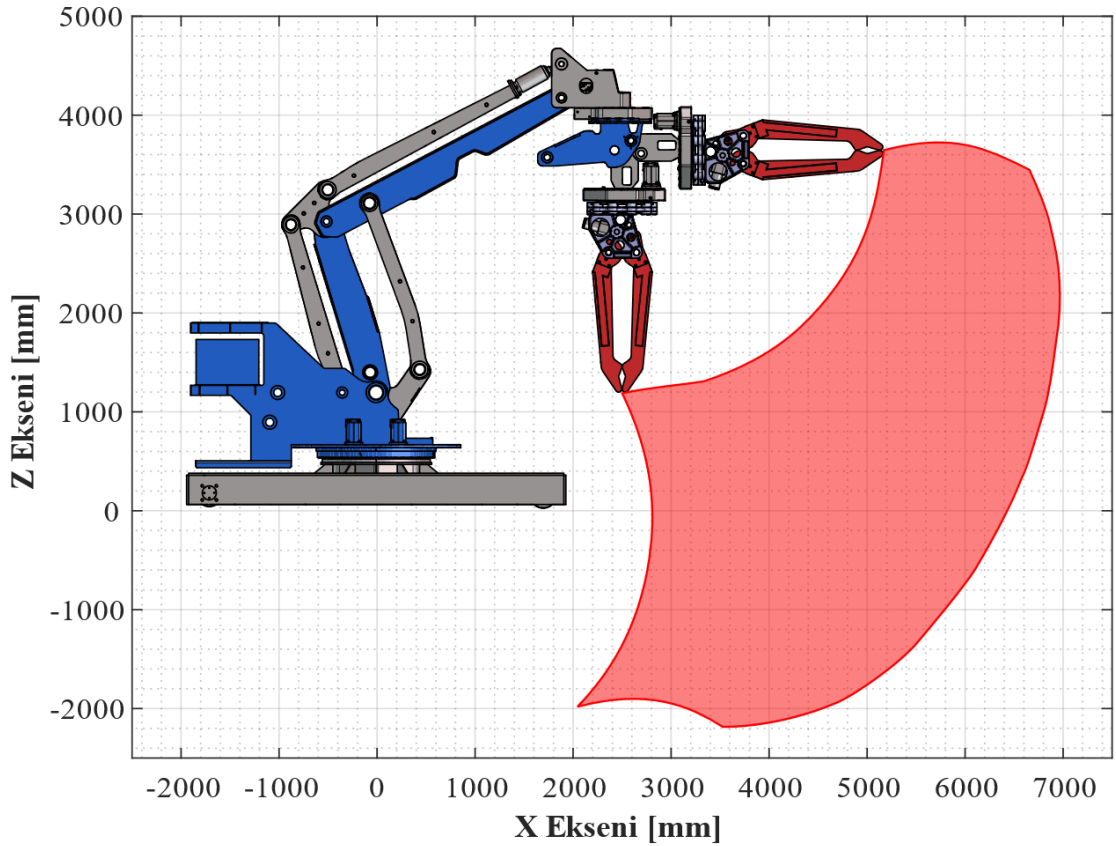


Şekil 5.48. Yörünge takibi sırasında kaydedilen, optimal ve ön tasarım kontrolcülerinin, anlık güç tüketim – zaman grafiği

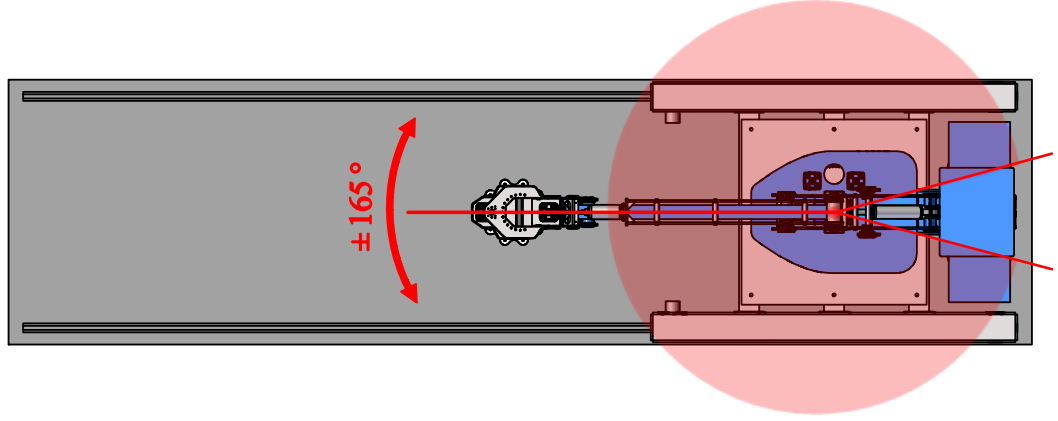
Grafiğin altında kalan alan hesaplanarak, sistemin hareketi süresince tüketilen toplam enerjinin belirlenmesi mümkündür. Sistem, ön tasarım kontrolcü parametreleri ile simüle edildiğinde, toplam enerji tüketiminin 680199 J olduğu tespit edilmiştir. Ancak, optimal kontrolcü parametrelerinin kullanılması durumunda enerji tüketiminin 192899 J seviyesine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, optimal kontrolcü kullanımı sayesinde, sistemin hareketi boyunca enerji tüketimi açısından %71.65 oranında bir iyileşme elde edilmiştir.

5.5. Çalışma Uzayı

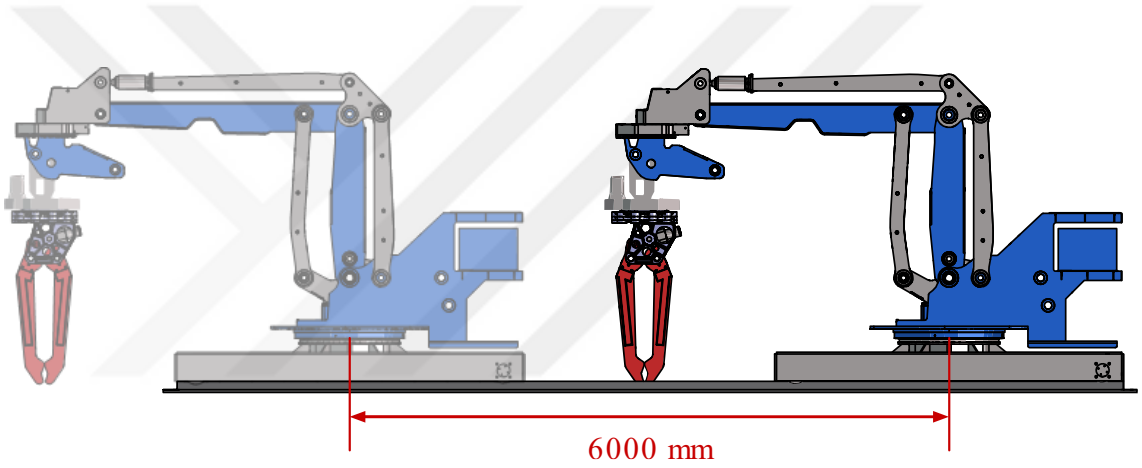
Sistem tasarım hedeflerinde tanımlandığı gibi yatayda minimum 2000 mm, maksimum 7000 mm; dikeyde ise minimum -2100 mm, maksimum 3650 mm mesafelere ulaşabilmektedir. Ayrıca kule dönüş eklemi $\pm 165^\circ$ olmak üzere toplamda 330° dönüş açısına sahiptir. Bunlarla beraber sistem bir taşıyıcı kızak üzerinde 6 metre yer değiştirebilmektedir. Sistemin yan görünümünden çalışma uzayı Şekil 5.49’de, üst görünümünden çalışma uzayı Şekil 5.50’de, taşıyıcı kızak hareket mesafesi ise Şekil 5.51’de gösterilmiştir.



Şekil 5.49. Sistemin yan görünümünden çalışma uzayı



Şekil 5.50. Sistemin üst görünümünden çalışma uzayı



Şekil 5.51. Taşıyıcı kızak hareket mesafesi

5.5. Hidrolik Bileşen Tasarımı

Amaçlanan sistem, öncelikle döküm ve dövme fabrikalarında olduğu gibi tozlu ve yüksek sıcaklık gibi zorlu ortamlarda dahi hassas bir şekilde işlev görebilme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Bu hedef doğrultusunda, tüm ekipmanlar bu zorlu koşullarda sorunsuz bir şekilde çalışabilecek şekilde seçilmiştir.

5.5.1. Pompa ve Elektrik Motoru Seçimi

Hidrolik pompa sistemleri, güçlerini elektrikli veya içten yanmalı motorlardan sağlayacak şekilde yapılandırılabilir. Bu projenin kapsamında tasarlanan sistem, bir fabrika ortamında ve elektriğe kesintisiz erişimin sağlandığı bir alanda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, söz konusu sistem, elektrik motoru aracılığıyla pompayı çalıştırmak üzere düzenlenmiştir.

Pompa ve güç sağlayıcı elektrik motoru, sistemdeki hidrolik güç gereksinimine uygun olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, pompanın sistemin maksimum basıncını karşılayabilecek ve istenen hızda kesintisiz ve istikrarlı bir debi sağlayabilecek şekilde seçilmesi önemlidir. Bununla birlikte, pompanın gereksinimleri karşılayacağından emin olmak için uygun bir elektrik motorunun seçilmesi gerekmektedir.

Proje kapsamında tasarlanmış olan ve Bölüm 3'te detaylandırılan hidromotor seçimi ve silindir boyutlandırması sonuçlarına dayanarak, sistem maksimum 234 bar basınçta çalışacak ve dakikada 134 l/dk debiye ihtiyaç duyacaktır. Veriler dikkate alınarak, Danfoss (2024c) Series 45 Elektronik Tork Limitli (Electronic Torque Limiting [ETL]) serisi bir pompa kullanılmasına karar verilmiştir. Gerekli debi kapasitesi göz önüne alınarak, 130 cc deplasman büyüklüğüne sahip bir pompa tercih edilmiştir. Ayrıca bu pompa nominal olarak 310 bar seviyesinde basınç üretebilmektedir.

ETL pompa, eksenel pistonlu yapıya sahip olan ve eğik plakalı değişken deplasmanlı bir pompa türüdür. Ancak, bu pompa diğerlerinden farklı olarak, entegre edilmiş bir dizi elektronik bileşen aracılığıyla tork kontrol sistemine sahip olacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu kontrol sistemi, pompa tarafından hidrolik sistemin basınç ve debi ihtiyacı karşılanırken gerekecek torku kontrol altında tutarak sistemi besleyen tahrik elemanın tork ve güç kapasitesini aşmasına engel olacak şekilde basınç ve debiyi limitlemekle görevlidir. Dolayısıyla, pompa sisteminin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlayarak aşırı torka bağlı hasarları önlemektedir. Eğer sistemde içten yanmalı bir motor tercih edilmiş ise, ETL pompa aşırı tork durumlarında motorun durmasını engelleyerek motorun ömrünün uzatılmasına ve yakıt tasarrufuna yardımcı olur. Bununla birlikte, eğer sistemde bir elektrik motoru kullanılmışsa, pompa motorun aşırı akım çekmesini engelleyerek olası hasarların önüne geçmektedir. Ayrıca, tork kontrolü pompa tarafından sağlandığı için ayrıca bir motor sürücü kullanılmasına gerek duyulmamaktadır. Ancak, ETL pompa karmaşık bir elektronik kontrol algoritması ve donanımı gerektirmektedir.

Pompalar için motor seçimi yapılırken şu üç kritere dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunlar, maksimum çekilen pompa torku, istenen debi kapasitesi için dönüş hızı ve güç kapasitesidir. Bu değerler, çeşitli denklemler aracılığıyla hesaplanabilmektedir.

Debi kapasitesi hesabı için Denklem 3.8 kullanılmaktadır. Bu denklemde, V_d cm³/devir cinsinden deplasmanı, n_m devir/dk cinsinden dönüş hızını ve η_h ise hidrolik

pompanın hacimsel verimi temsil etmektedir. Hesaplama sonucunda hidrolik pompanın debi kapasitesi olan Q_{pompa} litre/dk cinsinden hesaplanabilmektedir.

$$Q_{pompa} = \frac{V_d * n_m * \eta_h}{1000} \quad (5.8)$$

Pompa torku için ise Denklem 3.9 kullanılmaktadır. Bu denklemde ise V_d hidrolik pompa deplasmanını, Δ_b istenen basınç farkını bar cinsinden ve η_{mh} ise mekanik - hidrolik verimleri temsil etmektedir. Hesaplama sonucunda pompanın istenen basınç farkında hidrolik akışkanı basınçlandırması için gerekli pompa giriş torku M_{pompa} , Nm cinsinden hesaplanmaktadır.

$$M_{pompa} = \frac{1.59 * V_d * \Delta_b}{100 * \eta_{mh}} \quad (5.9)$$

Son olarak pompa belli bir basınç farkı şartlarında ürettiği debi karşısında motordan alması gereken güç miktarı hesaplanmalıdır. Bu hesap Denklem 3.10'da verilmiştir. Denklem incelendiğinde Q_p istenen debiyi, Δ_b ise istenen basınç farkını ifade etmektedir. Ayrıca, η_t ise hacimsel verim η_h ve mekanik-hidrolik verimin η_{mh} çarpımını ifade etmektedir. Hesaplama sonucunda elde edilen P_{pompa} ise kW cinsinden gücü temsil etmektedir.

$$P_{pompa} = \frac{Q_p * \Delta_b}{600 * \eta_t} \quad (5.10)$$

Hidrolik pompa seçiminde kullanılan Denklem 3.8, Denklem 3.9 ve Denklem 3.10 denklem takımı kullanarak yapılan hesaplama sonucunda 1500 dev/dk nominal dönüş hızına, 240 Nm maksimum torka ve 37 kW maksimum güce ulaşabilen bir motorun bu sistemin ihtiyacını karşılayacağı sonucuna varılmıştır. Bu şartları karşılayan elektrik motoru olarak GAMAK firmasının üreticiliğini yaptığı 37 kW 3 fazlı asenkron motor (GAMAK, 2024) kullanılması uygun görülmüştür.

5.5.2. Yön Kontrol Valfi Seçimi

Hidrolik akışkan tahrik sistemlerinde kullanıldığında küçük bir alanda yüksek güç üretebilmektedir. Ancak bu avantajının yanında ise hassas bir şekilde kontrol edilmesi zor sistemlerdir. Yüksek basınçlı akışkanı, hassas debi kontrolü sağlayacak şekilde yönetmek için nispeten daha özel ekipmanlar kullanılmasını gerektirmektedir.

Bu proje kapsamında geliştirilen hidrolik robot kol, yüksek tekrarlanabilirlik ve operasyon hızı hedeflenmektedir. Dolayısıyla seçilen hidrolik ekipmanların bu amaç doğrultusunda uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca sistem genellikle fabrika gibi ortamlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Dolayısıyla bu sistemin hidrolik ekipmanları endüstriyel ekipmanlar kullanılması uygun görülmüştür. Bu doğrultuda, piyasada basınç ve debi kontrolünü hassas bir şekilde sağlayan yön kontrol valfleri tiplerinden servo performanslı oransal hidrolik valfler bu projede kullanılmaktadır.

Pek çok uygulama alanı için ürün üreten Danfoss firmasının servo performanslı oransal hidrolik valf grubu olan Axis Pro oransal valflerinden (Danfoss, 2024a) KBS Serisi oransal yön kontrol valfleri kullanılacaktır. Eklemlerin hareketi için gerekli debi kapasitesi göz önüne alınarak, kule dönüş, omuz ve dirsek eklemlerinin hareketleri D05 modeli olan ve 100 lt/dk debi geçirgenliği olan model kullanılırken, yürüyüş, bilek dönüş, bilek kırma ve kısıkaç dönüş eklemleri D03 modeli olan 40 lt/dk debi geçirgenliğine sahip valfler tercih edilmiştir.

5.5.3. Filtreleme Bileşenlerinin Seçimi

Hidrolik sistemlerin hassas ve sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için hidrolik akışkanın temizliği hayati öneme sahiptir. Kirlenmiş bir hidrolik akışkan, hidrolik devre elemanlarının performansında düşüğe neden olabilir. Bu proje kapsamında incelenen servo performanslı oransal hidrolik yön kontrol valflerinin sürgülerinin kirlenmesi ve takılması oluşabilecek sorunlara örnek olarak gösterilebilir. Bu durum, sistemde emniyetsiz koşulların oluşmasına ve valflerin işlevsiz hale gelmesine yol açabilir. Bu nedenle, hidrolik akışkanın yeterince temiz olabilmesi için uygun filtreleme elemanlarının doğru bir şekilde seçilmesi ve kullanılması gerekmektedir.

Bu projede, uluslararası standartlardan biri olan TS ISO 4406 (TSE, 2024) referans alınmıştır. Projede, servo performanslı oransal hidrolik valfler kullanılmaktadır. Bu valfler için standart kapsamında önerilen kirlilik sınıfı 16/14/11 olarak belirlenmiştir. Bu sınıfa giren hidrolik ekipmanların, 5-10 µm aralığında bir filtrasyona tabi tutulması standartlarca önerilmektedir. Proje kapsamında, basınç filtresi için 5 µm, geri dönüş filtresi için 15 µm ve hava filtresi için ise 3 µm filtrasyon sağlayan filtreleme ekipmanları kullanılmıştır.

5.5.4. Hidrolik Akışkan Tankı Tasarımı

Hidrolik akışkan devresinin etkin işleyişi, önemli bir unsur olan hidrolik akışkanın etkili bir şekilde yönetilmesine dayanır. Bu akışkanın verimli bir şekilde kullanılabilmesi için öncelikle bir tank içerisinde depolanması ve gerektiğinde pompa yardımıyla devreye gönderilmesi gerekmektedir. Yağ tankının boyutlandırılması, çeşitli kriterlere dayandırılarak gerçekleştirilebilir.

Boyutlandırma sürecinde önemli bir husus, hidrolik akışkanın sistemde kesintisiz olarak sağlanmasıdır. Bu süreklilik, yağ tankındaki akışkan miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Doğru boyutta olmayan bir yağ tankı, pompanın basınçlandırmak için yeterli yağ bulamadığı durumda sistemde hava birikmesine veya dipte kalan kirletici partiküllerin sisteme sürüklenmesine neden olabilir. Hava birikimi durumunda, hat boyunca sıkışan hava boşlukları istenilen hareketin gerçekleşmemesine, beklenmeyen hareketlere ve tehlikeli durumların ortaya çıkmasına yol açabilir. Yağ tankı boyutlandırılması sürecinde hesaplamalı yöntemlerle birlikte teknik deneyime dayalı yaklaşımlar da geliştirilmiştir.

Sistemdeki hidrolik elemanlar, örneğin akümülatörler, hidromotorlar, silindirler vb., sistemin kapalı konumda dahi yağ tankı gibi davranması ilkesine dayalı olarak sistemin yağ ihtiyacı belirlenebilir. Örneğin, sistemdeki çift etkili silindirler kapalı durumda, piston tarafındaki hacimde hidrolik akışkanı muhafaza etmektedir. Ancak silindir açıldığında, rod tarafındaki bölümde, piston tarafına kıyasla daha fazla hidrolik akışkanı kullanılarak işlem gerçekleştirilir. Bu farktan kaynaklanan akışkan, hidrolik yağ tankında depolanmalıdır.

Ayrıca, pompa debisi hidrolik yağ tankı boyutlandırmasında önemli rol oynamaktadır. Pompa debisi yüksek olan ancak yeterince akışkan tutulmayan bir konfigürasyonda, pompa çok hızlı bir şekilde muhafaza edilen yağı sisteme gönderebilir ve yine sistemin hava ve kirletici partikül aktarılmasına sebep olabilmektedir. Bu durumda Ayrıca, pompa debisi hidrolik yağ tankı boyutlandırmasında kritik bir faktördür. Yüksek debili bir pompa, yeterli miktarda akışkanı muhafaza edemeyen bir yapıda hızlıca yağı sisteme gönderebilir ve böylece sistemin hava ve kirletici partiküllerle sisteme gönderilmesine neden olabilir. Bu durumda, endüstri normlarına dayalı deneyimlerle boyutlandırma gerçekleştirilebilir. Bu normlar genellikle, hidrolik yağ tankı hacminin hidrolik pompanın maksimum debisinin 3 ile 5 katı aralığında olması gerektiğini kabul etmektedir.

Ayrıca, hidrolik yağ tankının büyük hacimde tasarlanması, yağın dinlenerek sisteme geri gönderilmesine ve yağ tankının duvarları aracılığıyla pasif bir şekilde soğutulmasına olanak tanır. Bu durum hidrolik sistem için avantaj sağlamaktadır. Ancak, büyük hacimli bir yağ tankı tasarımı, sistem üzerinde geniş bir yer kaplamasına neden olabilmektedir. Bu durum özellikle mobil hidrolik sistemlerde ciddi bir sorun oluşturabilmektedir. Ayrıca, hidrolik akışkanın çalışma koşullarına bağlı olarak belirli periyotlarla kontrol edilerek yenilenmesi gerekmektedir. Yenileme süreci sırasında akışkanın maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tez kapsamında geliştirilen hidrolik sistemde, kullanılan pompanın debisi esas alınarak boyutlandırma gerçekleştirilmiştir. Gerekli akışkan hesaplamaları yapıldıktan sonra, sisteme entegre edilmek üzere 530 litre hidrolik akışkan tutabilen bir hidrolik yağ tankı tasarlanmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tez, yüksek taşıma kapasiteli bir paralel robotun tasarımı ve kontrolüne odaklanmaktadır. Robot kol sistemi, paralel kol mekanizmasını temel alarak geliştirilmiştir ve hidrolik güç ile çalışmaktadır. Matematiksel model, MATLAB/Simulink/Simscape kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kinematik modelin oluşturulması sırasında ileri kinematik, ters kinematik, yörünge hesapları ve hareket planlama algoritmaları geliştirilmiştir. Her ekleme PID kontrolcüsü tasarlanmış ve sezgisel optimizasyon yöntemleriyle optimal parametreler belirlenmiştir. Simülasyonlar, optimal kontrolcülerin kullanılmasıyla hidromotor seçimi ve silindir boyutlandırması için rehberlik sağlamıştır. Ayrıca, sistem çalışma uzayı grafiklerle görselleştirilmiştir.

Giriş bölümünde, tezin amacı ve önemi vurgulanmış, projenin insanlık için motivasyonu ve faydası üzerinde durulmuştur. Kaynak araştırması, endüstriyel robot kol sistemlerinin özelliklerini içeren tablolar ve hidrolik manipülatör sistemleri üreten firmaların ürün gamlarını tanıtan bir bölüm içermektedir.

Sistem tasarımında, teknik ve tasarım hedefleri belirlenmiş, mekanik tasarım ve kullanılan paralel kol mekanizması detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Kinematik model oluşturulmuş ve Simscape modülü kullanılarak fiziksel model elde edilmiştir.

Kontrolcü tasarımında, otomatik kontrol altyapısı ve PID kontrolcüsü tasarımı açıklanmış, ardından geçici durum cevabını minimize etmek için AA optimizasyonu kullanılmıştır.

Sayısal uygulamalar kısmında, hidrolik robot kol sistemi için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- AA optimizasyonu sonucunda, sistemin ön tasarım parametreleri ve optimal kontrolcü parametreleri tablolar halinde sunulmuştur. Konum kontrolünün önemli olduğu bu sistemde AA optimizasyonu sonucunda tüm K_i parametreleri ön tasarıma ait K_i parametrelerine oranla ortalama %85.46 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm eklemler için basamak giriş verilerek sistem davranışı incelenmiştir. Ön tasarım ve optimal kontrolcü parametreleri kullanarak simülasyon sonucunda, maksimum aşma (M_p), kalıcı hata (e_{ss}), toplam yer değiştirme, toplam hız değişimi kriterleri esas alınarak performansları karşılaştırılmıştır. M_p kriteri bakımından en iyi performans artışı %57.84

değeri ile dirsek eklemünde; e_{ss} bakımından en iyi performans artışı %4.9379 ile taşıyıcı kızak eklemünde görülmüştür. Ayrıca, yer değiştirme kriteri bakımından en iyi performans artışı, %64.64 ile dirsek eklemünde görülürken; hız değişimi bakımından en iyi performans artışı %72.76 ile kule dönüş eklemünde görülmüştür. Bununla beraber, her bir eklemin konum-zaman, hız-zaman, ivme-zaman grafikleri hem ön tasarım hem de optimal hareketler için verilmiştir.

- Ön tasarım ve optimal parametreler kullanılarak yörünge takibi simülasyonları yapılmıştır. Öklid Mesafesi metodu esas alınarak yapılan sapma hesapları göz önüne alınarak konum hatası – zaman grafiği oluşturulmuştur. Bu grafik incelenerek, en büyük hata 213.8 mm'den 47.83 mm' düşürülerek, yörünge takip performansında %77.62 iyileşme görülmüştür. Ayrıca, 19.89 mm olan ortalama konum hatası, 12.45 mm seviyesine düşürülerek, %37.40 oranında iyileşme kaydedilmiştir.
- Yörünge takibi sırasında sistemin tükettiği anlık güç kaydedilmiş ve incelenmiştir. Ön tasarım kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan simülasyon boyunca sistem toplamda 680199 J enerji tüketirken, optimal kontrolcü kullanıldığında ise 192899 J enerji tüketimi gözlenmiştir. Bu bağlamda optimal kontrolcü, ön tasarım kontrolcüyeye göre % 72.65 oranında iyileşme sağlamıştır.
- Sistemde taşıyıcı kızak, kule dönüş, bilek dönüş ve kısıkaç dönüş hareketlerini sağlayan eklemler için hidromotor seçimi ve motor zarfını değiştirmek adına dişli ve redüktör sistemleri tasarlanmıştır. Bu seçim sürecinde taşıyıcı kızak için 2 adet Danfoss (2024d) TMTHW 315, kule dönüş için 2 adet Danfoss (2024b) OMV800, 1 adet bilek dönüş eklemi ve 1 adet kısıkaç dönüş eklemi olmak üzere Danfoss (2024b) OMV500 hidromotorları uygun görülmüştür.
- Sistemin tasarım hedeflerinden biri olan dikey ve yatayda 1 m/s uç işlevci hızı için uygun omuz ve dirsek silindir boyutlandırması gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonucunda gereken basınç ve debi gereksinimleri grafikler halinde sunulmuş ve uygun boyutlandırma yapılmıştır. Grafikte incelendiğinde, gerekli hidrolik basınç 234 bar, gerekli akışkan debisi 134 l/dk olarak tespit edilmiştir.

- Sistem yatayda minimum 2000 mm, maksimum 7000 mm; dikeyde ise minimum -2100 mm, maksimum 3650 mm uzaklığa erişebilmektedir. Kule dönüş eklemi $\pm 165^\circ$ olmak üzere 330° dönebilmektedir. Ayrıca sistem bir taşıyıcı kızak üzerinde 6 metre yer değiştirebilmektedir. Çalışma uzayı yandan, üstten olmak üzere iki farklı bakış açısı esas alınarak verilmiştir. Ayrıca taşıyıcı kızak hareketi şematik olarak gösterilmiştir.
- Sistemin hidrolik sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistemin hidrolik devresi için 130 cc deplasmana sahip Danfoss (2024c) Series 45 ETL pompa ve 37 kW gücünde (GAMAK, 2024) elektrik motoru seçimi yapılmıştır. Servo performanslı oransal yön kontrol valfleri seçilmiş ve boyutlandırılmıştır. Filtreleme elemanları TS ISO 4406 standardına uygun olarak seçilmiştir. Ayrıca, sistemi kesintisiz bir şekilde hidrolik akışkan sağlayabilmesi için 530 litre kapasiteye sahip yağ tankı boyutlandırması yapılmıştır.

Sistem, optimal kontrolcüler, kinematik çözücüler ve planlama algoritmalarıyla birlikte verilen yörüngeyi hassas ve doğru bir şekilde izleyebilmiştir.

6.2 Öneriler

Bu sistemin bilgisayar ortamında tasarımı ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Üretimi mümkündür ve üretildiği takdirde, elde edilen simülasyon verileri ile gerçek prototip üzerinde yapılan testlerin sonuçları karşılaştırılabilir.

Sistemin simülasyonlar için oluşturulan fiziksel modeli geliştirilerek, gerçeğe daha yakın bir hal alabilir. Bu yaklaşım, simülasyon ortamında gerçekleştirilen testlerin, gerçek prototip üzerindeki testlerin sayısını azaltabilir. Bu durum, potansiyel tehlikeli durumların önceden tespit edilmesine ve karmaşık kontrol algoritmalarının önceden simüle edilmesine olanak sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- ABB, 2024, *IRB 8700* [online], Zurich, Switzerland, <https://tinyurl.com/5fukjj6u>, [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2024].
- Andromat, 2023, *Andromat Manipulators* [online], Kassel, Deutschland, <https://andromat.com/en/manipulators/>, [Ziyaret Tarihi: 19 Ekim 2023].
- Ang, K. H., Chong, G., ve Li, Y., 2005, PID control system analysis, design, and technology, *IEEE transactions on control systems technology*, 13(4), 559-576.
- Cerps, 2022, *Clansmann Dynamics Foundary Manipulators* [online], São Paulo, SP, <https://cerp.com.br/wp-content/uploads/2021/05/Manipuladores-Clansman.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 19 Ekim 2022].
- Chen, F., Xiong, H., Guo, L., Tao, Y., ve Wang, T., 2014, Modeling and simulation of a hybrid palletizing robot arm, *2014 International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems (MFI)*, China, 1-6.
- Çınar, M. A., Kalyoncu, M., ve Şen, M. A., 2023, Üç serbestlik dereceli (3R) bir çizim robotunun tasarımı ve arı algoritması kullanılarak optimal yörünge kontrolü, *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- Danfoss, 2024a, *Danfoss AxisPro Servo Performanslı Oransal Yön Kontrol Valfi* [online], Syddanmark, Denmark, <https://assets.danfoss.com/documents/317421/AD425945248535en-000201.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 10 Mart 2024a].
- Danfoss, 2024b, *Danfoss OMV Series Orbital Motors* [online], Syddanmark, Denmark, <https://assets.danfoss.com/documents/189456/BC152886483862en-000801.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 26 Şubat 2024b].
- Danfoss, 2024c, *Danfoss Series 45 Electronic Torque Limiting (ETL) Pumps* [online], Syddanmark, Denmark, <https://assets.danfoss.com/documents/76057/AI152986481607en-000303.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 6 Şubat 2024c].
- Danfoss, 2024d, *Danfoss TMTHW Series Orbital Motors* [online], Syddanmark, Denmark, <https://assets.danfoss.com/documents/54170/BC152986483537en-000202.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 26 Şubat 2024d].
- Denavit, J., ve Hartenberg, R. S., 1955, A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, *Journal of Applied Mechanics*, 23(1), 151-153.
- Erdemir, A., ve Kalyoncu, M., 2023, Polynomial Input Trajectory Functions for Improved Energy Efficiency in 3 DOF Impedance Controlled Robots, *7th International European Conference on Interdisciplinary Scientific Research, Frankfurt, Germany*, 568-581.

- FANUC, 2024, *M-2300-iA* [online], Echternach, Luxembourg, <https://www.fanuc.eu/tr/tr/robotlar/robot-filtre-sayfas%C4%B1/m-2000-serisi/m-2000ia-2000>, [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2024].
- Fu, C., Jing, B., Huiyu, W., ve Xiaoguang, X., 2019, Reducing the Energy Consumption of a Palletizing Robot through RobotStudio, *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Chaina, 5608-5610.
- GAMAK, 2024, *3 Fazlı Asenkron Motor C.AGM2EL 200 L 4b* [online], İstanbul, Türkiye, https://www.gamak.com/uploads/files/urun_dosyalari/C-AGM2EL-200-L-4b-B3.pdf, [Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2024].
- He, X., 2018, Analysis on Kinematics and Workspace of the Palletizing Robot, *2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Internet of Things (CCIoT)*, China, 498-501.
- Hua, H., ve Yan, X., 2020, Lightweight Design of Palletizing Manipulator Based on Structural Performance Influence Analysis, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, China, 964, 012012.
- Issa, A., Aqel, M. O., Albelbeisi, M. M., Elaila, M. O., ve Mortaja, M. A., 2017, Palletizing Manipulator Design and Control Using Arduino and MATLAB, *2017 International Conference on Promising Electronic Technologies (ICPET)*, Palestine, 60-65.
- Kalyoncu, M., ve Haydim, M., 2009, Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage, *Mechatronics*, 19(6), 847-858.
- Kelly, B., Padayachee, J., ve Bright, G., 2019, Quasi-serial Manipulator for Advanced Manufacturing Systems, *ICINCO (2)*, France, 300-305.
- KUKA, 2024, *KR 1000 Titan* [online], Augsburg, Deutschland GmbH, <https://tinyurl.com/ywa7be72>, [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2024].
- Meta-Mak Metalurji Makina Mümessillik, 2023, *Andromat Manipulator Teknik Bilgiler Kataloğu* [online], İstanbul, Türkiye, <https://tinyurl.com/25nzkfk2>, [Ziyaret Tarihi: 2023].
- Pham, D., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., ve Zaidi, M., 2005, The bees algorithm, *Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK*, 44-48.
- Pham, D., ve Kalyoncu, M., 2009, Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm, *2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Cardiff, UK, , 475-480.
- Pham, D., Koç, E., Kalyoncu, M., ve Tınkır, M., 2008, Hierarchical PID controller design for a flexible link robot manipulator using the bees algorithm, *Methods (eg. genetic algorithm)*, 25, 32.

- Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., ve Zaidi, M., 2006, The bees algorithm—a novel tool for complex optimisation problems, *Intelligent production machines and systems*, 454-459.
- Sen, M., Bakırcıoğlu, V., ve Kalyoncu, M., 2017, Modelling and PID control of scara robot, *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'17)*,
- Tao, Y., Chen, F., ve Xiong, H., 2014, Kinematics and workspace of a 4-DOF hybrid palletizing robot, *Advances in mechanical engineering*, 6, 125973.
- Türk Standartları Enstitüsü, 2024, *TS ISO 4406 - Hidrolik Sıvı Gücü - Sıvılar - Katı Parçacıkların Kirlilik Seviyesini Kodlama Yöntemi* [online], Türkiye, <https://tinyurl.com/y7mesmw5>, [Ziyaret Tarihi: 27 Mart 2024].
- Wei, W., Xuan, D., ve Wenlin, G., 2020, Research on Design Method of Mechanism Dimensional Parameters for Double Parallelogram Palletizing Robot Based on Task Space, *2020 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*, 152-157.
- Xiao, Y., Sun, J., Chen, T., ve Fan, X., 2013, Analysis and optimization for the counterbalancing method of heavy-load palletizing manipulators, *Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, China, 716-719.
- Xiaoqing, G., ve Jidong, W., 2011, Mechanical design and kinematic analysis of a new kind of palletizing robot, *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, China, 404-408.
- Xu, W., Cao, J., ve Nie, X., 2016, The Design of a Heavy-load Palletizing Robotic Structure for Coating Handling, *International Symposium on Mechanical Engineering and Material Science (ISMEMS-16)*, South Korea, 467-473.
- YASKAWA, 2024, *MH 900* [online], Kitakyushu, Japan, <https://tinyurl.com/cr7z4pzw>, [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2024].
- Ye, Y., Yin, C.-B., Gong, Y., ve Zhou, J.-j., 2017, Position control of nonlinear hydraulic system using an improved PSO based PID controller, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 83, 241-259.
- Zhang, L., Mei, J., Zhao, X., Gong, J., Gong, Y., Jiang, Y., Sheng, J., ve Sun, L., 2008, Layout analysis and path planning of a robot palletizing production line, *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, China, 2420-2425.
- Zhao, J., Han, L., Wang, L., ve Yu, Z., 2016, The fuzzy PID control optimized by genetic algorithm for trajectory tracking of robot arm, *2016 12th world congress on intelligent control and automation (WCICA)*, China, 556-559.
- Zhuo, Z., ve Cheng, Z., 2022, Research on trajectory smoothness optimization and dynamics simulation of palletizing robot, *2022 IEEE 6th Advanced Information*

Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 1545-1549.

Zhuo, Z., Cheng, Z., Zhenjie, D., ve Haijie, F., 2023, Modelling and Dynamic Simulation of Palletizing Robot System Based on Multibody, *2023 IEEE 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 6, 583-587.



EKLER

EK-1 İleri kinematik hesabı sonucu 0_8T matrisi denklemleri

$$\begin{aligned} {}^0_8T_{11} = r_{11} = & \cos(\theta_7) (\cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_6)) \\ & + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6)) \\ & - \sin(\theta_7) (\cos(\theta_5) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_5)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^0_8T_{12} = r_{12} = & -\sin(\theta_7) (\cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) \\ & - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_6) \\ & + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6)) \\ & - \cos(\theta_7) (\cos(\theta_5) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_5)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^0_8T_{13} = r_{13} = & \sin(\theta_6) (\sin(\theta_1) \sin(\theta_5) + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5)) \\ & + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^0_8T_{14} = P_x = & A_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_1) + A_1 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + A_4 \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) \\ & + A_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) - D_2 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \\ & - A_5 \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) - D_3 \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\ & - D_4 \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\ & + A_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \\ & - D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \\ & - D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \\ & + A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_6) \\ & - A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\ & - D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\ & - D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^0_8T_{21} = r_{21} = & \sin(\theta_7) (\cos(\theta_1) \cos(\theta_5) + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5)) \\ & - \cos(\theta_7) (\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) \\ & + \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \sin(\theta_5) \\ & - \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^0_8T_{22} = r_{22} = & \sin(\theta_7) (\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \sin(\theta_5) \\ & - \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1)) \\ & + \cos(\theta_7) (\cos(\theta_1) \cos(\theta_5) + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^0_8T_{23} = r_{23} = & \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\ & - \sin(\theta_6) (\cos(\theta_1) \sin(\theta_5) - \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_1)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^0T_{24} = P_y = & A_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_1) + A_1 \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) - A_4 \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \\
& + A_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) - D_2 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \\
& + A_5 \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \sin(\theta_5) + D_3 \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& + A_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \\
& - D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
& - D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
& + A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) \\
& - A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
& - D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) \\
& - D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^0T_{31} = r_{31} = & -\cos(\theta_7) (\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6)) \\
& - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_5) \sin(\theta_7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^0T_{32} = r_{32} = & \sin(\theta_7) (\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6)) \\
& - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_7) \sin(\theta_5)
\end{aligned}$$

$${}^0T_{33} = r_{33} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_6) - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6)$$

$$\begin{aligned}
{}^0T_{34} = P_z = & D_1 - A_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) - A_1 \sin(\theta_2) - D_2 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& - A_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - A_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \\
& + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& - D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
& + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6)
\end{aligned}$$

$${}^0T_{41} = 0$$

$${}^0T_{42} = 0$$

$${}^0T_{43} = 0$$

$${}^0T_{44} = 1$$

EK-2 J_f Jakobiyen matrisi denklemleri

$$\begin{aligned}
 J_{f_{11}} = & A_4 \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) - A_1 \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) - A_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_1) \\
 & - A_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) + D_2 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \\
 & - A_5 \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \sin(\theta_5) - D_3 \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & - D_4 \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & - A_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \\
 & + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
 & + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
 & - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) \\
 & + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
 & + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) \\
 & + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{f_{12}} = & A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_6) - A_1 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \\
 & - D_2 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) - A_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \\
 & - D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \\
 & - D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \\
 & - A_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) - A_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_1) \\
 & + A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
 & + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{f_{13}} = & A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_6) - D_2 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \\
 & - A_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \\
 & - D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \\
 & - D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \\
 & - A_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) - A_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_1) \\
 & + A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
 & + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{f_{14}} = & A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_6) - A_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \\
 & - D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \\
 & - D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \\
 & - A_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \\
 & - D_2 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \\
 & + A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
 & + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{f_{15}} = & A_4 \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) - A_5 \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
 & - D_3 \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) - D_4 \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) \\
 & - A_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \\
 & + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \sin(\theta_5) \\
 & + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f_{25}} = & A_5 \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - A_4 \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) + D_3 \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_1) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) - A_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) \\
& + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) \\
& + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f_{26}} = & D_3 \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \sin(\theta_5) + D_4 \cos(\theta_1) \cos(\theta_6) \sin(\theta_5) \\
& - A_5 \cos(\theta_1) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) + A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
& + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) \\
& - D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
& - D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1) \\
& + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6)
\end{aligned}$$

$$J_{f_{31}} = 0$$

$$\begin{aligned}
J_{f_{32}} = & D_2 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - A_1 \cos(\theta_2) - A_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& - A_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) - A_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) \\
& + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& - A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
& + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f_{33}} = & D_2 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - A_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - A_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
& - A_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& - A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
& + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f_{34}} = & D_2 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - A_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& - A_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_5) + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& - A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
& + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f_{35}} = & A_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_5) - D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& - D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& - D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& - D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \sin(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
& - A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \sin(\theta_5) \\
& - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \sin(\theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f_{36}} = & D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \sin(\theta_6) + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) - D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& + A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_6) \\
& + D_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + D_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
& + D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \sin(\theta_4) \\
& + D_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
& - A_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \sin(\theta_6) \\
& - A_5 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) \sin(\theta_6)
\end{aligned}$$