



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



BİR ROBOT MANİPÜLATÖRÜN OPTİMUM
ENERJİ TÜKETİMİ İÇİN YÖRÜNGE
PLANLAMASI

Mücahit TOPRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mücahit TOPRAK tarafından hazırlanan “BİR ROBOT MANİPÜLATÖRÜN OPTİMUM ENERJİ TÜKETİMİ İÇİN YÖRÜNGE PLANLAMASI” 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

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

.....

Danışman

Prof. Dr. Mete KALYONCU
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi H. Hüseyin BİLGİÇ
(Necmettin Erbakan 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.

Mücahit TOPRAK

Tarih: 03/06/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

BİR ROBOT MANİPÜLATÖRÜN OPTİMUM ENERJİ TÜKETİMİ İÇİN YÖRÜNGE PLANLAMASI

Mücahit TOPRAK

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2024, 69 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mete KALYONCU
Dr. Öğr. Üyesi M. Arif ŞEN
Dr. Öğr. Üyesi H. Hüseyin BİLGİÇ

Bu çalışma, altı serbestlik dereceli ABB IRB 1010 robot manipülatörünün optimum enerji tüketimi için yörünge planlamasını ele almaktadır. İlk olarak, Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemi kullanılarak eklem değişkenleri belirlenmiştir. Ardından, bu değişkenler kullanılarak ileri ve ters kinematik hesaplamaları yapılmıştır. Daha sonra, farklı yörünge planlama fonksiyonları kullanılarak yörünge planlaması yapılmış ve dinamik hesaplamalar yapılarak bu yörünge planlama fonksiyonlarına göre eklemlerin tork gereksinimleri ve enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Yörünge planlama fonksiyonlarından birisi olan beşinci derece polinom seçilerek bu fonksiyon üzerinde enerji tüketimini azaltmak için Arı Algoritması kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Farklı yörünge planlama fonksiyonlarının ve optimize edilmiş olan beşinci derece polinomun performansları MATLAB – Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyonlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar grafikler ve tablolarla sunulmuştur. Bu sonuçlara göre en fazla enerji tüketen yöntemle göre %46,90'a kadar daha az enerji tüketimi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Altı Serbestlik Dereceli Robot Manipülatör, Arı Algoritması, Enerji Tüketimi, Optimizasyon, Yörünge Planlaması

ABSTRACT

MS THESIS

TRAJECTORY PLANNING OF A ROBOT MANIPULATOR FOR OPTIMUM ENERGY CONSUMPTION

Mücahit TOPRAK

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

Advisor: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2024, 69 Pages

Jury

**Prof. Dr. Mete KALYONCU
Dr. Öğr. Üyesi M. Arif ŞEN
Dr. Öğr. Üyesi H. Hüseyin BİLGİÇ**

This study includes trajectory planning for optimum energy consumption of a six-degree-of-freedom (6DOF) ABB IRB 1010 robot manipulator. Firstly, joint variables were determined using the Denavit-Hartenberg method. Then, forward and inverse kinematics calculations were made using these variables. Then, trajectory planning was made using different trajectory planning functions and using dynamic calculations, the torque requirements and energy consumption of the joints were calculated according to these trajectory planning functions. The fifth degree polynomial, one of the trajectory planning functions, was selected and optimization was performed on this function using the Bees Algorithm to reduce energy consumption. The performances of different trajectory planning functions and the optimized fifth degree polynomial are compared. The results of MATLAB - Simulink simulation are presented with graphics. According to these results, up to 46.90% less energy consumption was achieved compared to the method that consumes the most energy.

Keywords: 6 DOF Robot Manipulator, The Bees Algorithm, Energy Consumption, Optimization, Trajectory Planning

ÖNSÖZ

Robot manipölatörler, günümüzde endüstriyel faaliyetlerden tarımsal uygulamalara kadar birçok sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojik sistemlerin tercih edilme nedenlerinden birisi de işletme maliyetinin günümüzde kritik bir öneme sahip olmasıdır. Bu sebeple, yörünge planlamasının robot manipölatörlerin enerji tüketimine etkisi, önemli bir araştırma alanı olarak dikkat çekmektedir.

Tez çalışmamın tamamlanmasında değerli rehberliği, bilgi birikimi ve deneyimleriyle bana kılavuzluk eden Prof. Dr. Mete KALYONCU ‘ya içtenlikle teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Kendisinin sabrı, önerileri ve desteği bu çalışmanın gelişiminde büyük öneme sahiptir.

Çalışmama desteklerini esirgemeyen PANÇAOĞLU TAR. MAK. LTD. ŞTİ. ailesine teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Son olarak maddi manevi desteklerini esirgemeyen anneme, ağabeylerim Sinan TOPRAK, Selçuk TOPRAK ve Mehmet TOPRAK ‘a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca çalışmalarına büyük özveri ve sabırla destek olan kıymetli eşime içten duygularıyla teşekkür ediyorum.

Mücahit TOPRAK
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. ALTI SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPÜLATÖRÜN KİNEMATİK VE DİNAMİK HESAPLAMALARI.....	14
3.1. Kinematik Hesaplamalar.....	15
3.1.1. İleri Kinematik	16
3.1.2. Ters Kinematik	18
3.2. Yörünge Planlaması	21
3.3. Dinamik Hesaplamalar	22
4. ARI ALGORİTMASI.....	25
5. SAYISAL UYGULAMALAR.....	27
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: İki eksen arasındaki bağ uzunluğu
α	: Eksenler arasındaki bağ açısı
d	: Üst üste çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı
E	: Enerji
e_{AA}	: Seçilen ‘m’ bölge içindeki en iyi bölge sayısı
F	: Bağın kütle merkezine etkiyen kuvvet
f	: Ekleme bir önceki eklem tarafından uygulanan kuvvet
$J_{amaç}$	: Amaç fonksiyonu
g	: Yer çekimi ivmesi
I	: Atalet momenti matrisi
itr	: İterasyon sayısı
m	: Kütle
m_{AA}	: Ziyaret edilen ‘n’ bölgeden seçilen bölge sayısı
N	: Bağın kütle merkezine etkiyen tork
n	: Ekleme bir önceki eklem tarafından uygulanan tork
n_{AA}	: Kaşif arı sayısı
nep	: En iyi ‘e’ bölgeye gönderilen arı sayısı
ngh	: Bölge boyutu
nsp	: Kalan bölgeye (m-e) gönderilen arı sayı
P	: Bağın bir sonraki bağa göre konumu
P_c	: Bağın kütle merkezine göre konumu
R	: Dönme matrisi
T	: Homojen dönüşüm matrisi
t	: Zaman
t_f	: Bitiş zamanı
τ	: Tork
$\dot{v}$	: Doğrusal ivme
$\dot{v}_C$	: Kütle merkezinin doğrusal ivmesi
w	: Açısal hız
$\dot{w}$	: Açısal ivme
x, y, z	: Koordinatlar
θ	: İki bağ arasında oluşan eklem açısı

Kısaltmalar

D-H : Denavit-Hartenberg

1. GİRİŞ

Günümüz endüstriyel üretim süreçlerinde teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte robot manipülatörlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Robot manipülatörler, birçok endüstriyel alanda insan gücünün yerini alarak üretim süreçlerini otomatikleştirmekte ve verimliliği artırmaktadır. Özellikle hassas ve tekrar eden işlemlerde insan hatasını minimize etmek ve üretim süreçlerini daha hızlı hale getirmek için robot manipülatörler tercih edilmektedir.

Enerji tüketimiyle ilgili artan endişeler ve sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar, endüstride enerji verimliliği konusunu ön plana çıkarmıştır. Robot manipülatörlerin yaygın kullanımının ardında yatan önemli faktörlerden biri, işletmelerin maliyetlerini düşürmeye yönelik arayışlarıdır. İşletmeler, verimliliği artırmak ve üretim maliyetlerini azaltmak için sürekli olarak yeni teknolojileri ve yöntemleri araştırmaktadır. Bu bağlamda, enerji tüketimi endüstriyel üretim süreçlerinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. İşletmelerin enerji maliyetlerini azaltmak, karlılıklarını artırmak ve rekabet avantajı elde etmek için önemli bir strateji haline gelmiştir. Bu tez çalışması, robot manipülatörlerinin enerji tüketimini optimize etmek için yörünge planlaması konusuna odaklanmaktadır.

Kaynak araştırması bölümünde, robot manipülatörlerin kinematik ve dinamik hesaplamalarını içeren birçok çalışmanın bulunduğu görülmektedir. Bu çalışmaların bir kısmı, enerji tüketimini azaltmayı hedefleyen optimizasyon işlemlerini de kapsamaktadır. Ancak yörünge planlama fonksiyonunu Arı Algoritması ile optimize ederek enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmanın yapılmamış olması bu alandaki araştırmaların önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, altı serbestlik dereceli bir robot manipülatörün optimum enerji tüketimi için yörünge planlaması yapmak amaçlanmaktadır. Yörünge planlaması, robotun belirli bir hedef konuma gitmek için izleyeceği yolu belirlemeyi içerir. Literatürde farklı yörünge planlama yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak uç işlevcinin istenilen konuma gitmesi için çeşitli yörüngeler oluşturulabilir. Farklı yörünge planlama yöntemlerinde eklemlerin yapacağı hareketler farklı olduğundan hedefe ulaşma süresi, hedefe ulaşmak için gereken iş ve uzuvların hareketi için gerekli tork gibi parametreler değişecektir. Bu da tüketilen enerjide değişikliğe sebep olacaktır. Farklı yörünge planlama yöntemlerinin enerji tüketimi açısından karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

Daha ileri bir adım olarak optimizasyon ile enerji tüketimindeki iyileştirme potansiyeli araştırılmak istenmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak Arı Algoritması kullanılmıştır. Arı Algoritması, doğadan esinlenerek tasarlanmış bir optimizasyon yöntemidir ve karmaşık problem çözümünde etkili olabilir. Bu çalışma, robot manipülatörlerin enerji tüketimini optimize etmek için gelişmiş ve yenilikçi yaklaşımların keşfedilmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Tezin sonraki bölümlerinde ilk olarak kaynak araştırması yapılarak belirlenen konuda veya yakın konularda daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir. Daha sonra Matlab – Simulink ortamında modellenen kinematik ve dinamik hesaplamalar verilmiştir. Bir sonraki bölümde yörünge planlama fonksiyonunun Arı Algoritması ile nasıl optimize edildiği anlatılmıştır. Bu yapılan hesaplamaların ve oluşturulan simülasyonların hepsinin sonuçları sayısal uygulamalar bölümünde grafik ve tablolar ile verilerek yorumlanmıştır. Son olaraksa sonuçlar ve öneriler bölümünde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca ileriki çalışmalarda neler yapılabileceği ile ilgili öneriler verilmiştir.

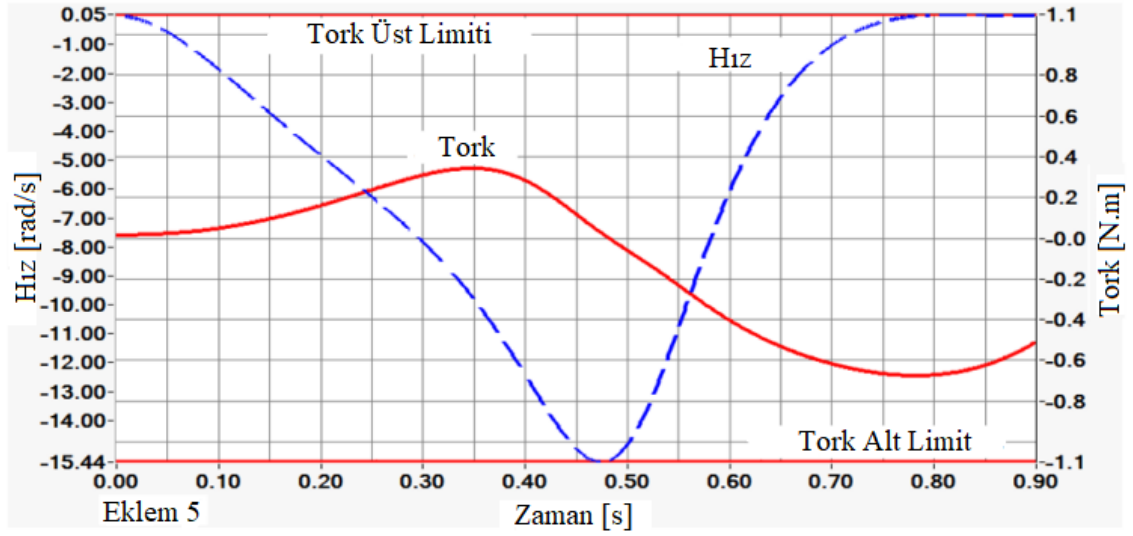
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Robot manipülatörlerin yörünge planlaması, çeşitli mühendislik disiplinlerinin kesişim noktasında yer almakta olup, enerji verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Enerji tüketiminin minimizasyonu, hem endüstriyel uygulamalarda maliyetlerin düşürülmesi hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir faktördür.

Bu bölümde, robot manipülatörlerin yörünge planlaması ve enerji tüketimi konularında yapılmış önceki çalışmalar incelenerek, tezin temelini oluşturan teorik ve pratik bilgilerin derlenmesi amaçlanmaktadır. Literatür taraması, konuya dair mevcut bilgi birikimini ortaya koyarak, bu tezde ele alınan problemlerin çözümüne yönelik stratejilerin geliştirilmesini sağlayacaktır.

Pham ve ark. (2008) çalışmalarında, eklemlili bir robot manipülatör kolun ters kinematikini modellemek üzere sinir ağlarını eğitmek için Arı Algoritması kullanmışlardır. Arı Algoritmasının bal arılarının yiyecek arama davranışından yola çıkılarak geliştirilmiş parametre optimizasyon algoritması olduğunu ifade etmişlerdir. Arı Algoritması ile elde edilen sonuçlar Backpropagation Algoritması ve Evolutionary Algoritması ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu Arı Algoritmasının diğer algoritmalarından daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

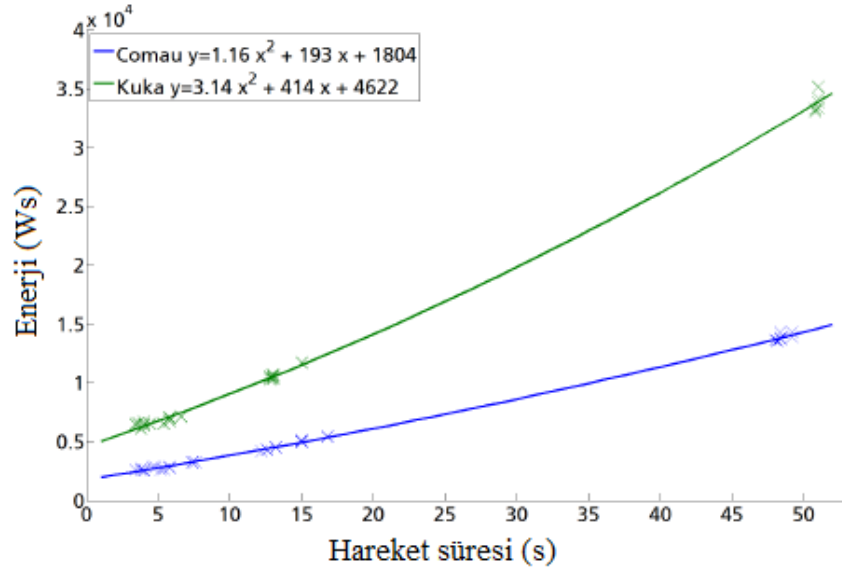
Bailón ve ark. (2010) çalışmalarında, altı serbestlik dereceli bir robot manipülatörün sekizinci dereceden denklem kullanarak yörünge planlamasını ve Genetik Algoritmaya dayalı optimizasyonunu yapmışlardır. İlk olarak yörünge planlaması için sekizinci dereceden polinom uygulanarak formülize edilmiştir. Sekizinci dereceden polinomun maksimum hızı tanımlayan bir parametre içerdiğini ve bu parametrenin kullanımının belirli bir yol için çok sayıda düzgün yörünge oluşturulmasına izin verdiğini ifade etmişlerdir. Daha sonra ters kinematik ve dinamik hesaplamalar yapılmıştır. Son olarakta optimizasyon uygulanmış ve test edilmiştir. Elde edilen test sonuçlarının yöntemin etkin olduğunu ifade etmişlerdir. Test sonucu elde edilen beşinci eklemin tork ve hız grafiği örnek olarak Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Beşinci eklem tork ve hızı (Bailón ve ark., 2010)

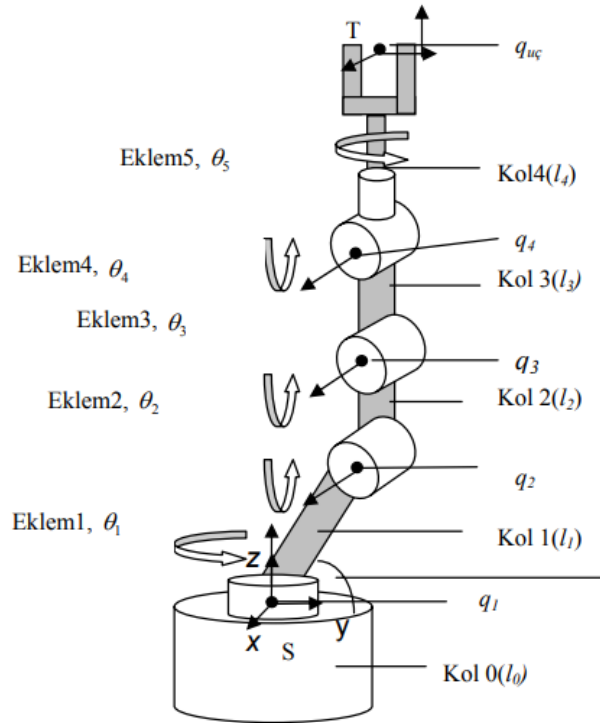
Sengupta ve ark. (2011) çalışmalarında, istilacı ot optimizasyon tekniğini kullanarak bir robot kolun enerji verimli yörünge planlamasını yapmışlardır. İlk olarak çevredeki engelleri ve diğer hareket kısıtlarını göz önünde bulundurarak bir yol fonksiyonu oluşturmuşlar ve istilacı ot optimizasyonu kullanılarak minimum enerji tüketimi sağlayacak yol belirlenmiştir. Simülasyondan olumlu sonuç elde edildiği ifade edilmiş ve bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Chemnitz ve ark. (2011) çalışmalarında, iki endüstriyel robota belirlenen hareket modelini yaptırarak enerji tüketimlerini kıyaslamışlardır. Ayrıca farklı ivme ve hız değerlerini içeren bu hareket modelini kullanarak düşünülenin aksine yavaş hareketin enerji açısından en verimli durum olmadığını ifade etmişlerdir. İki endüstriyel robotun enerji tüketimleri Şekil 2.2'de verilmiştir. Aralarındaki farkı gözlemleyerek enerji tasarrufu için robot modelinin çok önemli olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.2. İki robotun enerji tüketimi (Chemnitz ve ark., 2011)

Tonbul ve Sarıtaş (2013) çalışmalarında, beş eksenli bir Edubot robot için ters kinematik hesaplama ve yörünge planlaması yapmışlardır. Edubot robot kolun genel görünüşü Şekil 2.3'te verilmiştir. Matlap ortamında uç işlevcinin konumuna göre eklemlerdeki açı değerleri ters kinematik hesaplama sonucu elde edilmiştir. Ayrıca Matlap ortamında beşinci derece polinom kullanılarak yörünge planlaması yapılmıştır.

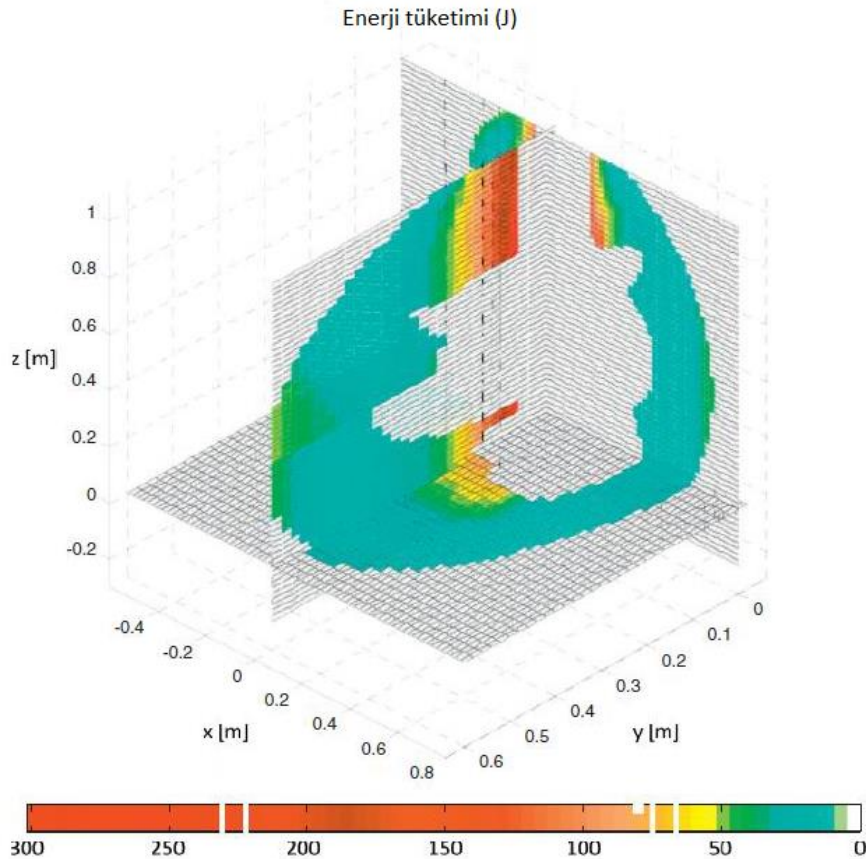


Şekil 2.3. Edubot'un genel görünüşü (Tonbul ve Sarıtaş, 2013)

Mohammed ve ark. (2014) çalışmalarında, robot kol hareketi için enerji tüketimini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. İlk olarak D-H yöntemiyle eklem konfigürasyonları tespit edilmiş ve ters kinematiğin çözümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra robot kolun dinamiğinin hesaplanmasıyla her bir ekleme uygulanan tork ve kuvvetler elde edilmiştir. Bu hesaplamalar kullanılarak eklemlerin enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Son olarak enerji tüketim sonuçları kullanılarak optimizasyon işlemi yapılmıştır. Optimizasyon sonrası kare yörüngedeki enerji tüketim verileri Çizelge 2.1’de ve robot çalışma uzayı enerji tüketim analizi sonucu Şekil 2.4’te verilmiştir.

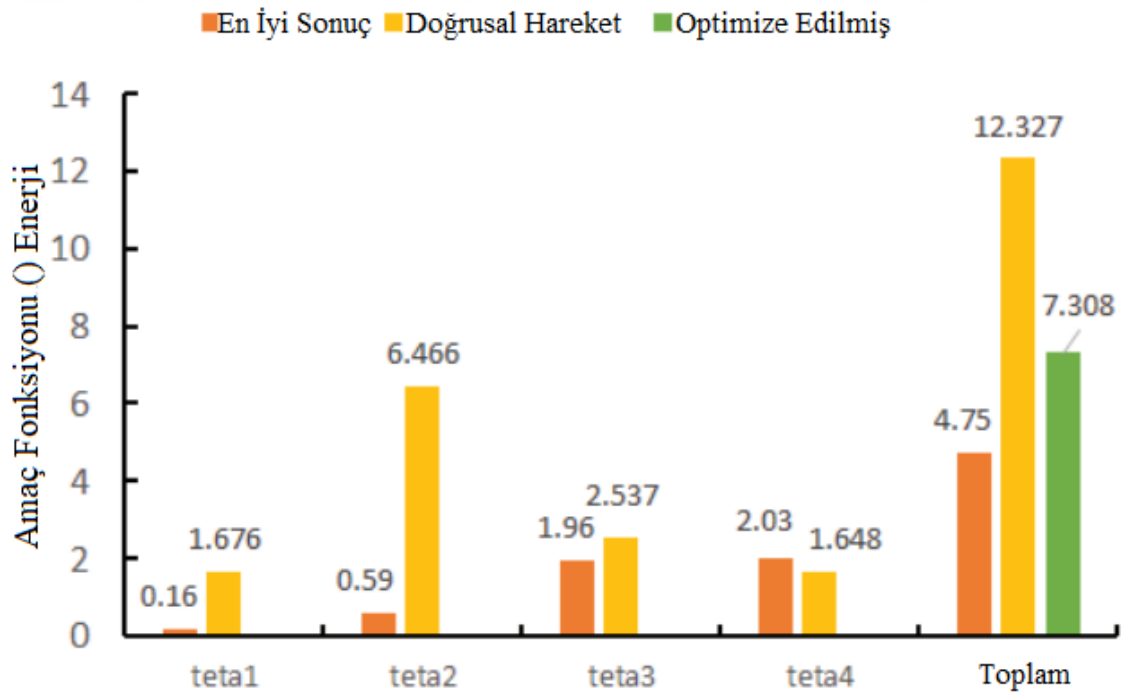
Çizelge 2.1. Kare yörüngede enerji tüketim verileri

Eklem konfigürasyonu	Enerji tüketimi [J]	
	Yüksüz	Yüklü
(-1,1,0,x)	80.5	88.8
(1,1,0,x)	150.0	158.0
(-1,-1,1,x)	104.9	112.5



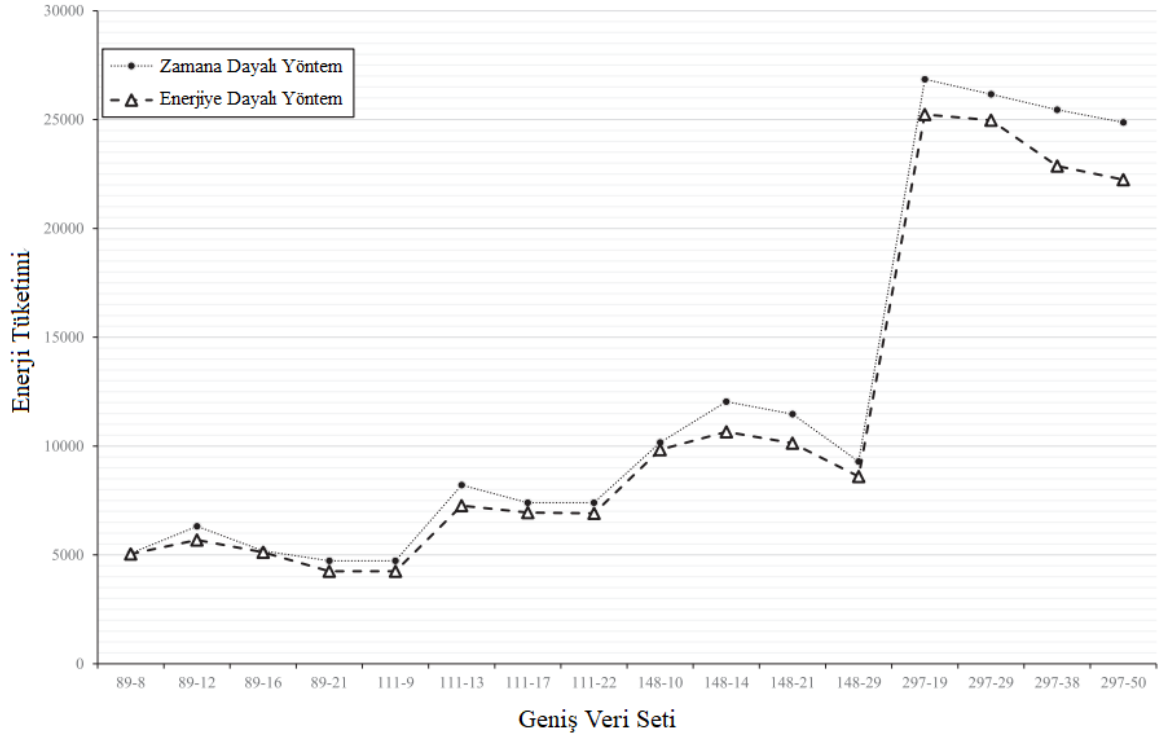
Şekil 2.4. Robot enerji tüketiminin karşılaştırılması (Mohammed ve ark., 2014)

Mahdavian ve ark. (2015) çalışmalarında, dört serbestlik dereceli robot kolun hareketli engellerden kaçınmasını sağlamak ve enerji tüketimini minimize etmek için yörünge planlaması yapmışlardır. İlk olarak robot kolun kinematik analizlerini yapmışlardır. Daha sonra Lagrange yöntemini kullanarak bir dinamik model geliştirmişlerdir. Her bir kol için ikinci dereceden polinom kullanarak yörünge planlaması yapmışlardır. Ayrıca robot çalışma alanına engel yerleştirmişlerdir. Matlab ortamında Genetik Algoritma kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyonun temel amacı belirtilen başlangıç ve hedef noktaları arasında, belirli süre içerisinde ve engelden kaçarak robotun hareketi en düşük enerji tüketimiyle tamamlamasıdır. Her bir eklemi tahrik eden motorun enerji tüketimi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Motorların enerji tüketimi (Mahdavian ve ark., 2015)

Nilakantan ve ark. (2015) çalışmalarında, robotik montaj hatlarındaki çevrim süresini ve enerji tüketimini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda çevrim süresi odaklı ve enerji tüketimi odaklı iki model oluşturmuşlardır. Bu modelleri optimize etmek için ise parçacık sürü optimizasyonunu kullanmışlardır. Modeller üzerinde hesaplamalı deneyler yapmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Şekil 2.6'da iki metodun büyük boyutlu veri setlerindeki enerji tüketim karşılaştırması verilmiştir.



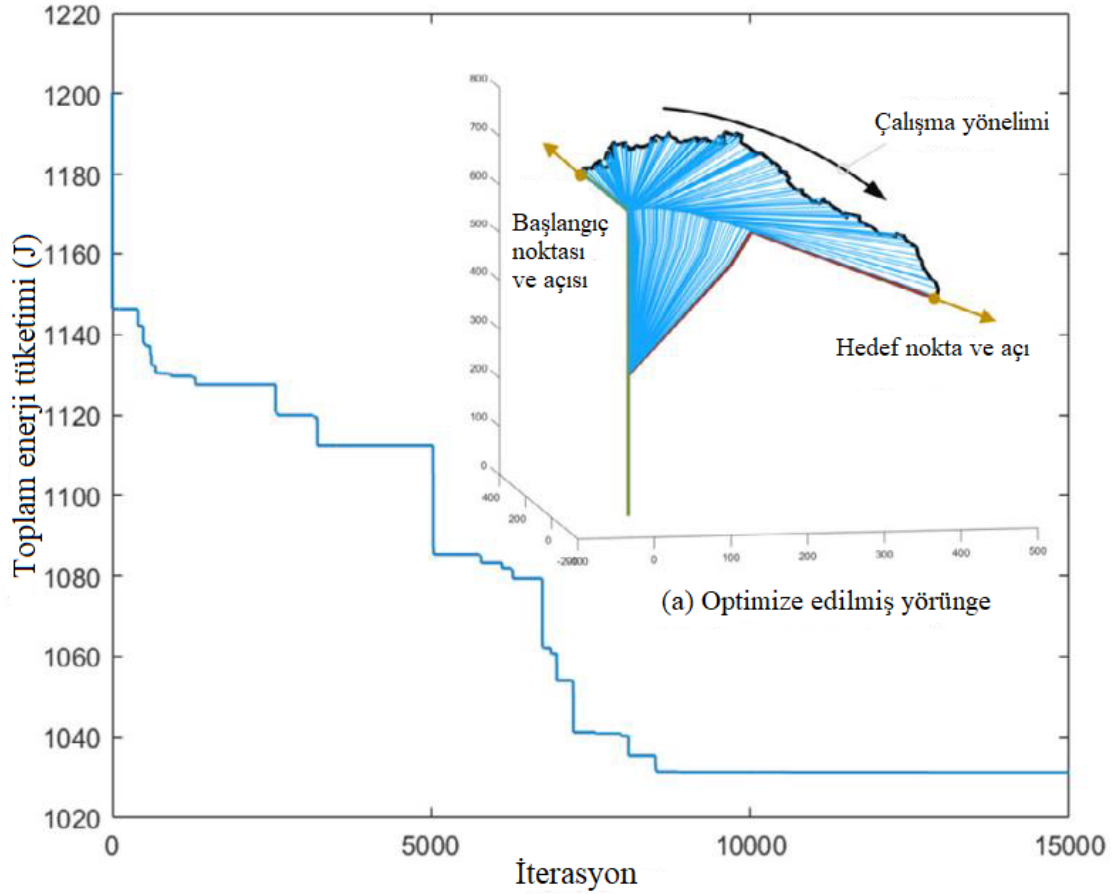
Şekil 2.6. Enerji tüketimi karşılaştırması (Nilakantan ve ark., 2015)

Uzuner ve ark. (2017) çalışmalarında, beş serbestlik dereceli bir manipülatörün eklem uzayında yörünge planlamasını yapmışlardır. İlk olarak mekanik tasarımı yapılan manipülatörün sırası ile ters kinematik hesaplamaları ve yörünge planlaması yapılmıştır. İkinci eklem açısı değeri analitik yöntemle formülize edilemediği için Basit Arama Algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Yörünge planlaması ise eklem uzayında üçüncü dereceden polinom kullanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda istenilen şartta hareketlerin gerçekleştiği görülmüştür.

Das ve ark. (2018) çalışmalarında, Differential Evolution Algoritmasını kullanarak engellerin bulunduğu bir çalışma uzayında bir endüstriyel robot kolun enerji verimli yörünge planlamasını yapmışlardır. Kinematik hesaplamaları, enerji tüketim hesaplamalarını ve çalışma uzayındaki engelden kaçınma hesaplamalarını sırasıyla tamamlamışlardır. Son olarakta Differential Evolution Algoritmasını robot kola uyarlayarak sistemi optimize etmişlerdir. Yapılan çalışma sonucu Differential Evolution Algoritmasının rakiplerine göre daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Yin ve ark. (2019) çalışmalarında, Machine Learning tabanlı bir yaklaşım kullanarak endüstriyel robot için enerji verimli yörünge planlaması yapmışlardır. İlk olarak robotun eklem uzayında yörünge örnekleri oluşturularak dijital ortamda simüle edilmiş ve bu işlem yapılırken enerji tüketimleri kaydedilmiştir. Daha sonra yörünge

verileri ve ölçüm değerleri birleştirilerek Machine Learning modelini eğitmek için veri olarak kullanılmıştır. Son olarak çalışmada basitleştirilmiş bir örnek yapılarak sistemin doğruluğu sınanmıştır. Elde edilen enerji tüketim grafiği Şekil 2.7’de verilmiştir.



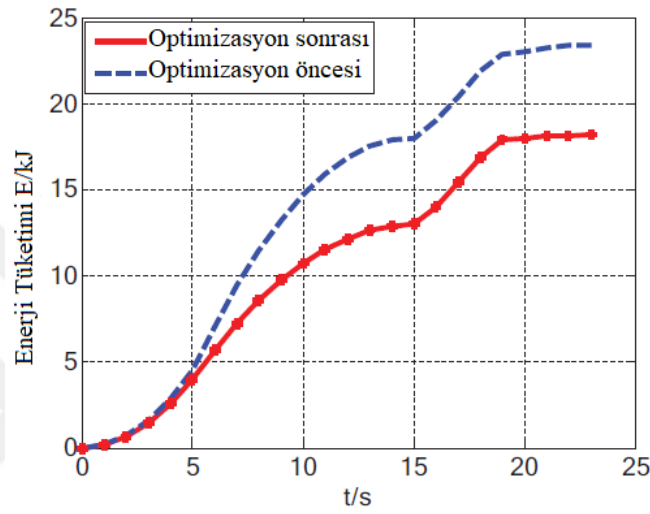
Şekil 2.7. Enerji tüketim optimizasyonunun hesaplama sonucu (Yin ve ark., 2019)

Zhang ve ark. (2019) çalışmalarında, Par4 paralel robot için yörünge planlaması ve optimizasyonu üzerinde durmuşlardır. Optimizasyon yöntemi olarak GreyWolf Algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon yönteminin geçerliliği yapılan çalışmayla doğrulanmıştır. Ayrıca beşinci derece polinom hareket metodu altıncı derece polinom hareket metoduna göre daha az enerji tüketimi sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durumu gösterir çizelgelerden birisi Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. GreyWolf optimizasyonuna göre sonuçlar

Hareket metodu	e/mm	f/mm	E_{min}/J
Beşinci derece polinom	250.2	32.3	8.209
Altıncı derece polinom	250.2	38.2	8.500

Jiang ve ark. (2021) çalışmalarında yüksek voltajlı iletim hattı mobil robot manipülatörünün enerji tüketimini minimize etmek için optimizasyon çalışması yapmışlardır. İlk olarak robotun temel yapısını ve yörünge planlama algoritmasını oluşturmuşlar daha sonra farklı uygulamalara uygun enerji tüketim modelini oluşturmuşlardır. Son olarak enerji tüketimini Genetik Algoritma kullanarak optimize etmişlerdir. Robotun optimizasyon öncesi ve sonrasındaki enerji tüketim karşılaştırması Şekil 2.8’de verilmiştir.



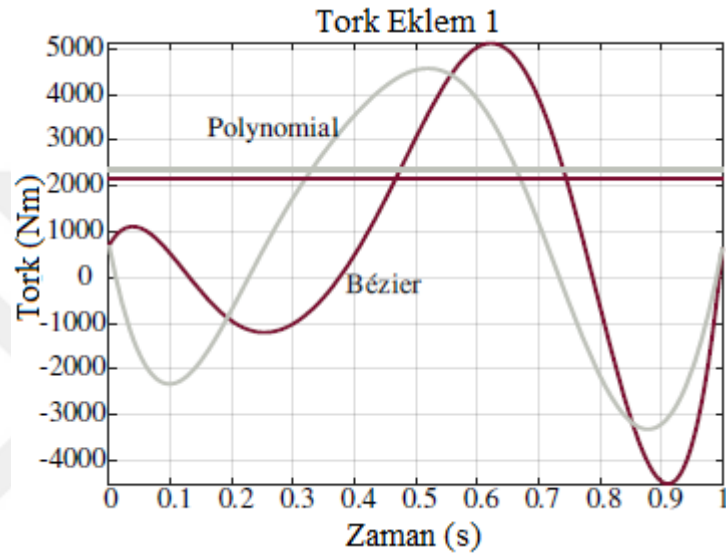
Şekil 2.8. Robot enerji tüketiminin karşılaştırılması (Jiang ve ark., 2021)

Li ve ark. (2021) çalışmalarında, robot yörüngesine optimizasyon uygulayarak enerji verimliliğini artırmaya çalışmışlardır. Optimizasyon olmaksızın, Linear Time-Scaling optimizasyonu uygulayarak, Dynamic Programming optimizasyonu uygulayarak ve önerilen optimizasyon uygulanarak enerji tüketimi ayrı ayrı hesaplanmış ve Çizelge 2.3’te sonuçları verilmiştir. Bu verilere göre önerilen optimizasyon yöntemi optimizasyonsuz enerji tüketimine göre %33,7 daha az enerji tüketerek en az enerji tüketimini sağlamıştır. Ayrıca Dynamic Programming yöntemine göre hesaplama süresinin %99 daha az olduğu görülmüştür.

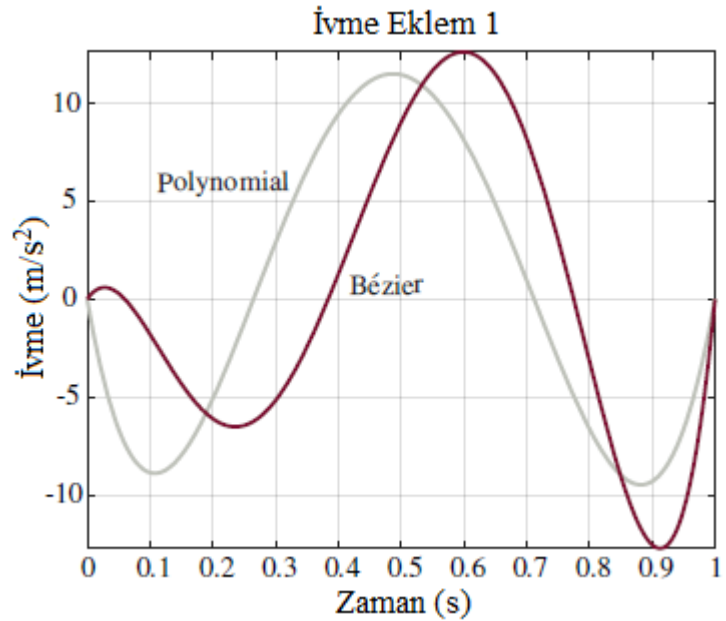
Çizelge 2.3. Optimizasyon yöntemlerin karşılaştırması

Optimizasyon metotları	Hesaplama süresi (s)	Çalışma süresi (s)	Gerçek enerji tüketimi (J)
Optimizasyon yok	0	12	9650
Linear time-scaling	10.3	10	8169
Traditional Dynamic Programming	5477.2	9.25	6392
Önerilen metot	60.5	9.25	6392

Stephan ve Mercorelli (2021) çalışmalarında, Bernstein polinomlarını kullanarak iki eklemlili bir manipülatörün hareket planlamasında enerji optimizasyonu yapmışlardır. İlk olarak belirlenmiş olan eklem parametrelerine uygun olacak hareket denklemleri oluşturulmuştur. Daha sonra Bernstein polinomlarını kullanarak optimizasyon uygulamışlar ve güç tabanlı polinoma göre kıyaslama yapmışlardır. Yapılan simülasyon sonucu belirlenen hareket için eklemlerden birisinin gerekli tork grafiği Şekil 2.9'da verilmiştir. Bu eklemdaki ivmelenmelerde Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Birinci eklem için gerekli tork (Stephan ve Mercorelli, 2021)



Şekil 2.10. Birinci eklemin ivme grafiği (Stephan ve Mercorelli, 2021)

Grafikleri inceleyerek Bernstein polinomunun hareket planlaması için daha düzgün yörüngeler, küçük ivmelenmeler ve torklar sunduğu dolayısıyla az enerji tükettiği sonucuna varmışlardır.

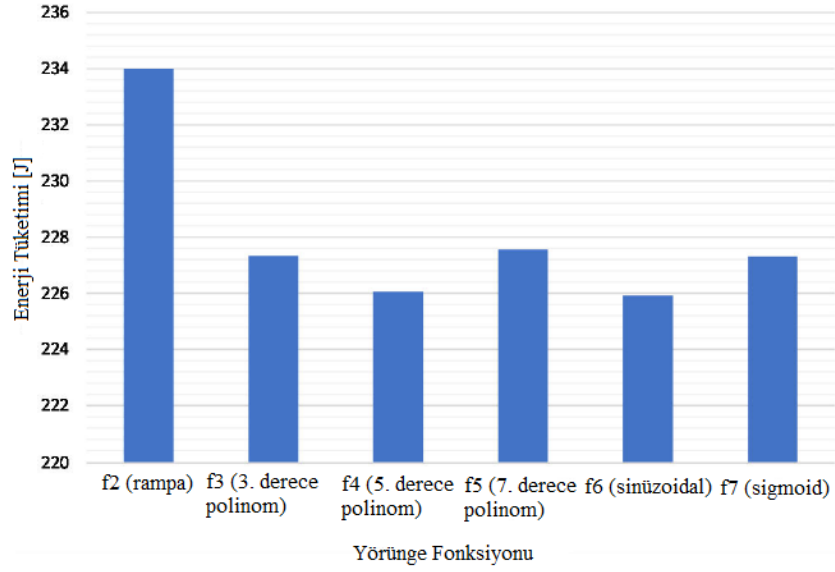
Stuhlenmiller ve ark. (2021) çalışmalarında, enerji tüketiminin yörünge optimizasyonu ve robotik sistemin hizmet ömrü üzerinde durmuşlardır. Enerji tüketiminin ve hizmet ömrünün birlikte optimize edilmesinin önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Buna uygun olarak her iki kriteri dahil ederek örnek bir manipülatör yapısı ve bileşenleri modellemişlerdir. Sonuç olarak enerji tüketimi ve hizmet ömrünün bileşik optimizasyonunun sistemin genel kaynak verimliliğini artırdığını belirtmişlerdir.

Duan ve ark. (2022) çalışmalarında, robot manipülatörler için enerji tüketimini optimize etmek amacıyla farklı yörünge planlama yöntemlerini değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirmede endüstriyel robotlarda çokça tercih edildiğini ifade ettikleri yörünge planlama yöntemlerini kullanmışlardır. Araştırma kapsamında, aynı başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki farklı yörünge planlama yöntemlerine göre gerçekleştirilen hareketlerin enerji tüketimlerinde belirgin farklılıklar tespit etmişlerdir. Çalışmada altı serbestlik dereceli bir robot manipülatör kullanmışlardır. Elde ettikleri enerji tüketim değerleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Zaman ve enerji tüketimi

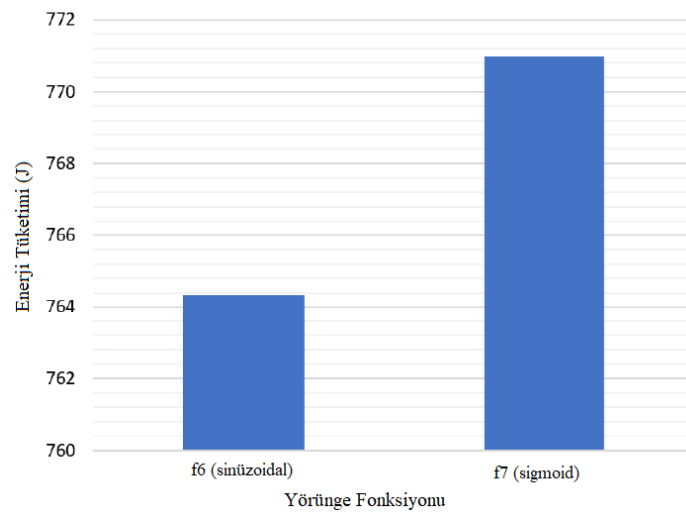
Algoritma	Zaman	Enerji
Dördüncü derece polinom	0.01104	1319.6
Beşinci derece	0.01140	1604.3
Yedinci derece	0.01414	2128.3
En kısa yol	8.96616	1843.8
Kübik Bezier	8.62304	10664.6

Erdemir ve Kalyoncu (2023a) çalışmalarında, 2R planar robotun enerji tüketimini incelemişlerdir. Belirlenen noktalardan geçmesi istenen robot için step, ramp, üçüncü derece polinom, beşinci derece polinom, yedinci derece polinom, sinüzoidal ve sigmoid yörünge planlama fonksiyonları kullanılmıştır. Bu fonksiyonlardan hangisinin enerji tüketimi açısından daha iyi sonuç vereceği incelenmiştir. Ayrıca robot ile çevre arasındaki dinamik ilişkiyi kontrol etmek için empedans kontrolü kullanılmıştır. Empedans kontrolü enerji tüketimini doğrudan etkileyen bir faktör olduğu için empedans kontrol parametreleri Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Bu sayede enerji tüketimi azaltılmak istenmiştir. Optimizasyon sonucu yörünge planlama fonksiyonlarının enerji tüketim karşılaştırması Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Enerji tüketim karşılaştırması (Erdemir ve Kalyoncu, 2023a)

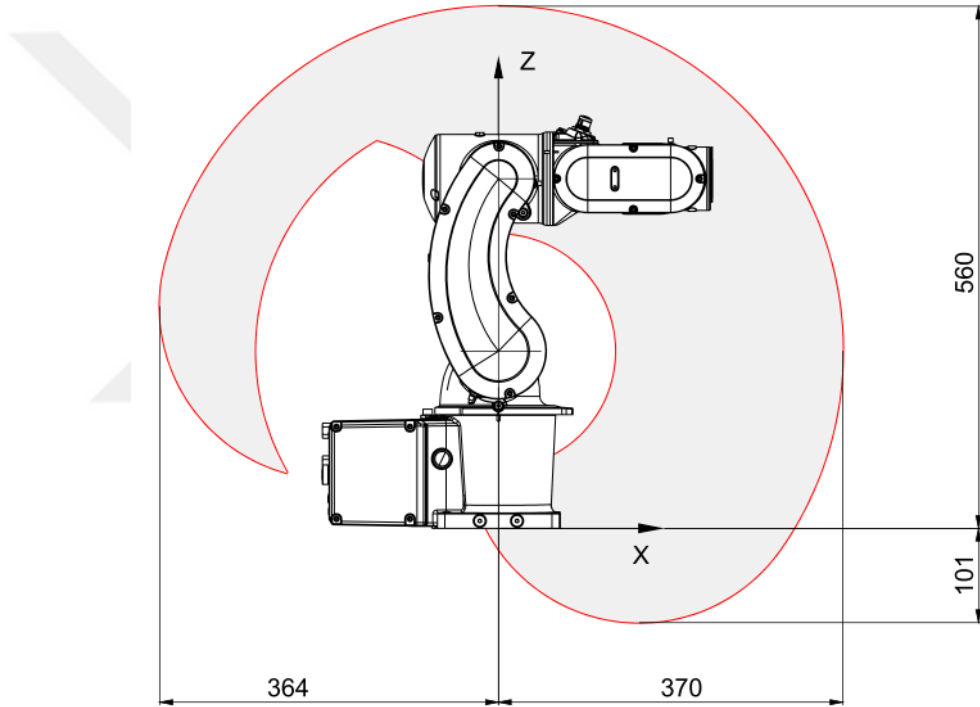
Erdemir ve Kalyoncu (2023b) çalışmalarında, 3 serbestlik dereceli robotun enerji tüketimini incelemişlerdir. Belirlenen noktalardan geçmesi istenen robot için sinüzoidal ve sigmoid yörünge planlama fonksiyonları kullanılmıştır. Bu fonksiyonlardan hangisinin enerji tüketimi açısından daha iyi sonuç vereceği incelenmiştir. Ayrıca robot ile çevre arasındaki dinamik ilişkiyi kontrol etmek için empedans kontrolü kullanılmıştır. Empedans kontrolü enerji tüketimini doğrudan etkileyen bir faktör olduğu için empedans kontrol parametreleri Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Bu sayede enerji tüketimi azaltılmak istenmiştir. Optimizasyon sonucu yörünge planlama fonksiyonlarının enerji tüketim karşılaştırması Şekil 2.12’de verilmiştir.



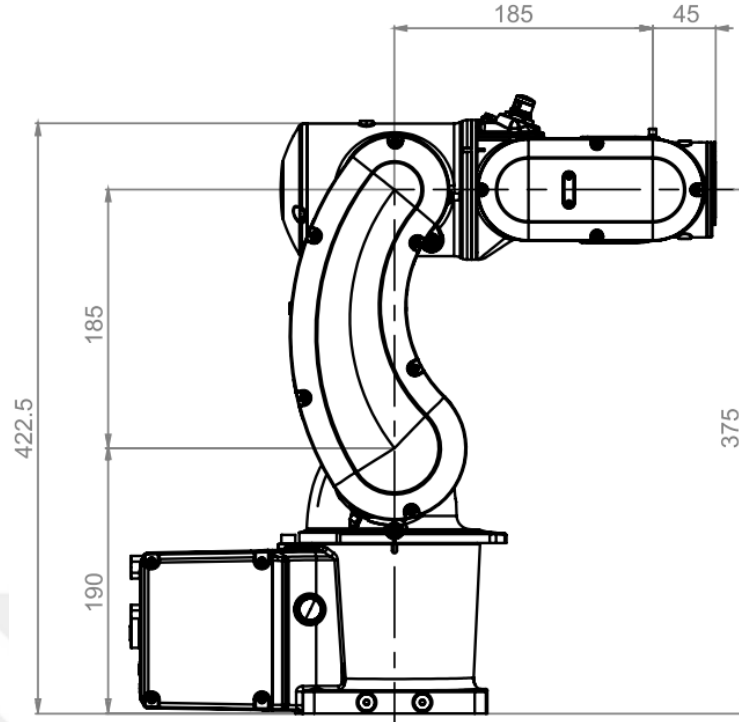
Şekil 2.12. Enerji tüketim karşılaştırması (Erdemir ve Kalyoncu, 2023b)

3. ALTI SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPÜLATÖRÜN KİNEMATİK VE DİNAMİK HESAPLAMALARI

Bu çalışmada enerji tüketimi hesaplamaları ve yörünge planlamaları için ABB IRB 1010 robot manipülatörü seçilmiş ve bu robot manipülatörün verileri doğrultusunda matematiksel model oluşturulmuştur. ABB IRB 1010 robot manipülatörün çalışma uzayı Şekil 3.1’de verilmiştir. Seçilen robot manipülatör altı serbestlik derecelidir ve uzuvların tamamı birbirine döner mafsallarla bağlanmıştır. Uzuvların boyutları Şekil 3.2’de ve çalışma aralıkları ile hız limitleri ise Çizelge 3.1 de verilmiştir (ABB, 2022b).



Şekil 3.1. Altı serbestlik dereceli robot manipülatörün çalışma uzayı (ABB, 2022a)



Şekil 3.2. Altı serbestlik dereceli robot manipulatörün boyutları (ABB, 2022a)

Çizelge 3.1. Döner mafsalların çalışma aralığı ve hız limitleri

Eklemler	Çalışma Aralığı	Hız
1	-170° / +170°	320°/s
2	-75° / +125°	320°/s
3	-180° / +50°	375°/s
4	-170° / +170°	500°/s
5	-125° / +125°	470°/s
6	-360° / +360°	500°/s

3.1. Kinematik Hesaplamalar

Kinematik analiz bir robot manipulatörün yaptığı hareketler ile ilgilenir. Robot manipulatörün konum, hız ve ivmesi kinematik analiz ile hesaplanır ve ilişkilendirilir. Özellikle eklem hareketleri ile uç işlevci hareketleri arasındaki ilişkiyi kurmak ve birisindeki değişimin diğerindeki etkisini hesaplamak için oldukça kullanışlıdır.

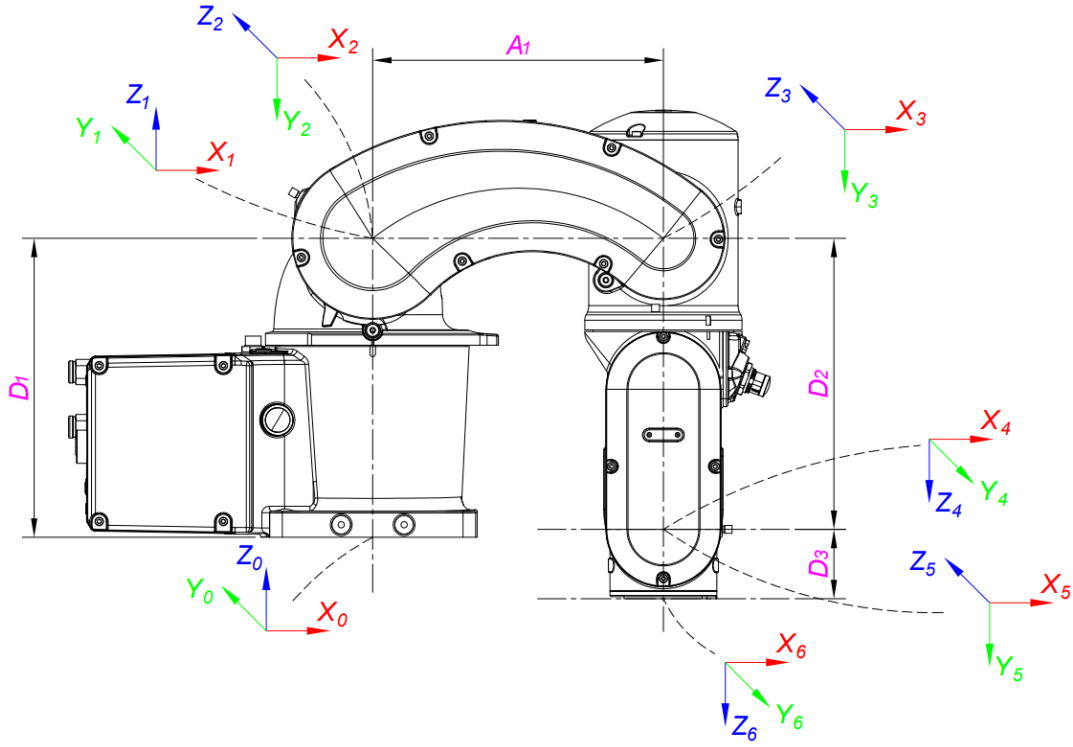
Robot manipulatörün eklem hareketlerine göre uç işlevcinin hareketinin hesaplanması ileri kinematik, uç işlevcinin hareketine göre eklem hareketlerinin hesaplanmasına ise ters kinematik denir (Bingül ve Küçük, 2021).

3.1.1. İleri Kinematik

İleri kinematik hesaplamaların yapılabilmesi için öncelikle matematiksel modelin oluşturulması gerekir. Matematiksel modelin oluşturulması işlemi eklem değişkenlerinin belirlenmesi ve dönüşüm matrislerinin elde edilmesi ile yapılmıştır.

Robot manipülatörün eklem değişkenlerinin belirlenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada genellikle tercih edilen D-H olarak ifade edilen Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmıştır.

İlk olarak robot manipülatörün eklem noktaları ve uzuv uzunlukları tespit edilmiş, daha sonra eklemlere koordinat sistemleri yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan robot manipülatöre koordinat sistemlerinin yerleşimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Altı serbestlik dereceli robot manipülatöre koordinat sistemlerinin yerleştirilmesi

Uzuv uzunlukları ve eklemlere yerleştirilen koordinat sistemleri kullanılarak Çizelge 3.2'deki D-H değişkenleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. D-H değişkenleri

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	D_1	θ_1
2	-90	0	0	θ_2
3	0	A_1	0	θ_3
4	-90	0	D_2	θ_4
5	90	0	0	θ_5
6	-90	0	D_3	θ_6

Belirlenen D-H değişkenleri kullanılarak her bir eklem için dönüşüm matrisi Denklem 3.1 kullanılarak bulunmuştur.

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

Her bir eklemin birbirine göre dönüşüm matrisleri Denklem 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 ve 3.7’de ve her birinin çarpılması ile oluşan matris Denklem 3.8’de verilmiştir. Bu matristen ileri kinematik sonuçları elde edilmektedir.

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

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

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

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D_2 \\ -\sin(\theta_4) & -\cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

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

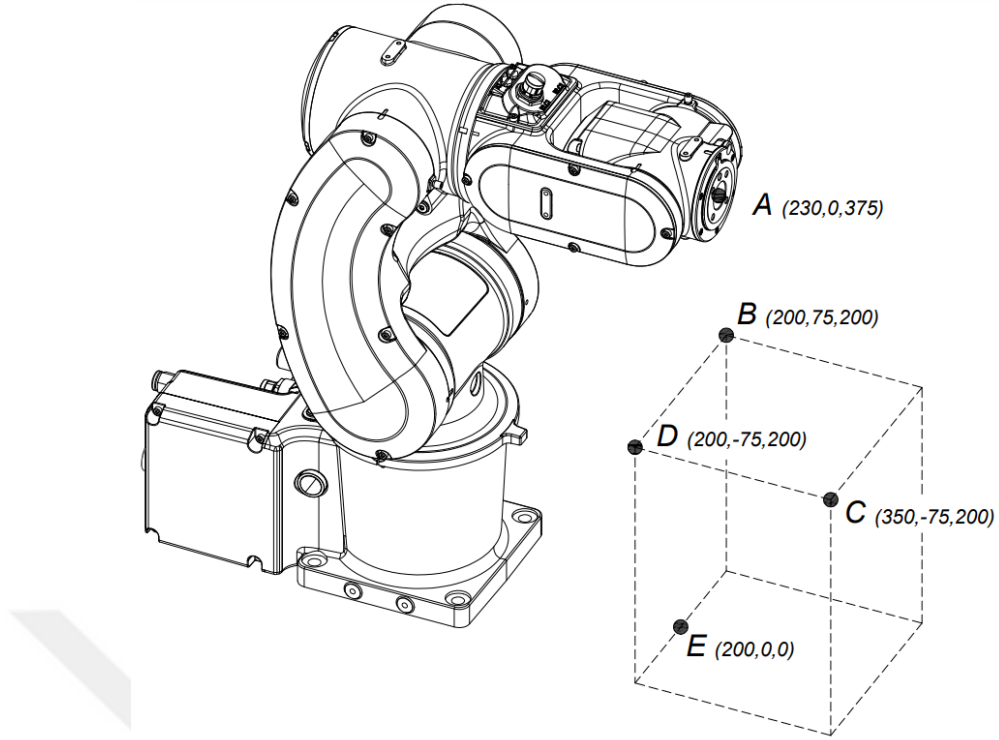
$${}^5_6T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_6) & -\cos(\theta_6) & 0 & D_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^0_6T = {}^0_1T * {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_4T * {}^4_5T * {}^5_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{33} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.1.2. Ters Kinematik

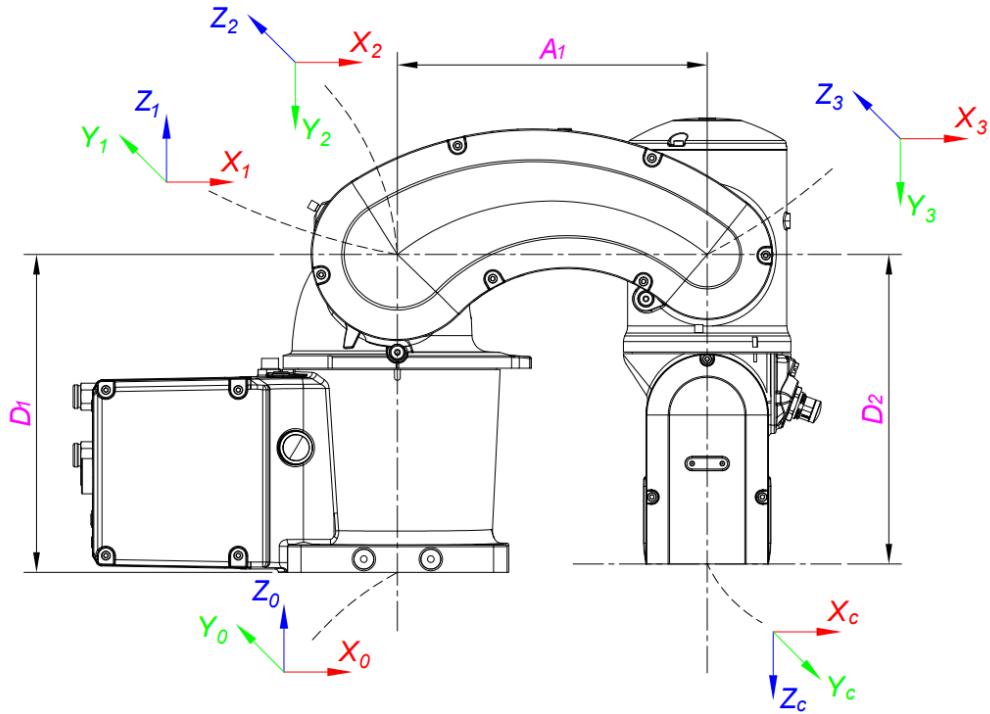
Ters kinematik, uç işlevcinin istenilen konuma gitmesi için uzuvların yapması gereken hareketi hesaplamak için kullanılır. Robot manipülatörün ilk üç eklemi ana eklem olarak adlandırılır ve uç işlevcinin konumlandırılması görevini yaparlar. Diğer üç eklem ise uç işlevcinin yönelimini sağlar. Altı serbestlik dereceli bir robot manipülatörün ters kinematik hesaplamaları oldukça zor ve karmaşıktır. Analitik yöntem sayısal yöntemle göre daha kolay olduğu için analitik yöntem kullanılmıştır.

Altı serbestlik dereceli robot manipülatörde uç işlevcinin belirlenen bir noktada olması için uzuvların yapması gereken hareketin birçok alternatifi vardır. Hesaplamaları yapabilmek ve bu alternatifleri azaltmak için robot manipülatöre yönelim verilmiştir. Robot manipülatörün uç işlevcisinin Şekil 3.4'te gösterilen A, B, C, D ve E konumlardan sırası ile geçeceği bir hareket yapması istenmiştir. Konumlar hesaplamalar için örnek olarak seçilmiştir. Seçim yapılırken, hareket esnasında ilk beş eklemin hiçbirinin durağan kalmamasına dikkat edilmiştir. Bu noktaların her birinde uç işlevcinin yönelim açısı farklı belirlenmiştir.



Şekil 3.4. Uç işlevcinin geçeceği noktalar

İlk olarak robot manipülatörün ana eklemlerini kapsayacak şekilde robot manipülatör Şekil 3.5'teki gibi ikiye bölünür.



Şekil 3.5. Robot manipülatörün ana eklemleri

Uç işlevcinin yapacağı yönelim hareketlerine göre $C(X_c, Y_c, Z_c)$ konumu Denklem 3.9'da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Konumu bulunmaya çalışılan C noktası beş numaralı koordinat sistemiyle aynı yerde olduğu için 0_6T dönüşüm matrisi ile 5_6T dönüşüm matrisinin tersinin sağdan çarpılması C noktasını vermiştir. 0_6T dönüşüm matrisinin ilk üç satır ve sütunundan oluşan dönme matrisi kısmı uç işlevcinin yapması istenilen yönelimine göre Denklem 3.10'daki gibi hesaplanmıştır.

$${}^0_cT = {}^0_6T * {}^5_6T^{-1} \quad (3.9)$$

$${}^0_6R = \begin{bmatrix} \hat{X}_6 \cdot \hat{X}_0 & \hat{Y}_6 \cdot \hat{X}_0 & \hat{Z}_6 \cdot \hat{X}_0 \\ \hat{X}_6 \cdot \hat{Y}_0 & \hat{Y}_6 \cdot \hat{Y}_0 & \hat{Z}_6 \cdot \hat{Y}_0 \\ \hat{X}_6 \cdot \hat{Z}_0 & \hat{Y}_6 \cdot \hat{Z}_0 & \hat{Z}_6 \cdot \hat{Z}_0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

0_cT dönüşüm matrisi hesaplandıktan sonra Denklem 3.11'deki eşitlik kullanılarak Denklem 3.12, 3.13 ve 3.14'teki eşitlikler elde edilmiştir. Elde edilen üç denklemde bilinmeyenler sadece ilk üç eklem değişkenidir. Denklem denkleştirme işlemi yapılarak bu değerler hesaplanmıştır.

$${}^1_cT = {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_cT = [{}^0_1T]^{-1} * {}^0_cT \quad (3.11)$$

$$p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 = A_1 \cos \theta_2 - D_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (3.12)$$

$$p_y \cos \theta_1 - p_x \sin \theta_1 = 0 \quad (3.13)$$

$$p_z - D_1 = -A_1 \sin \theta_2 - D_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (3.14)$$

Daha sonra Denklem 3.15'teki dönme matrisi eşitliği kullanılarak diğer üç eklem eklem değişkenleri hesaplanmıştır. İlk üç eklem değişkeni ve uç işlevcinin yönelimi önceki kısımlarda hesaplandığı için 0_3R ve 0_6R dönme matrislerin sayısal değerleri bilinmektedir. İleri kinematik bölümünde hesaplanan dönme matrisinin denklem haliyle hesaplanan sayısal değerlerin eşitliğinden Denklem 3.16, 3.17 ve 3.18'deki eşitlikler elde edilmiştir. Elde edilen üç denklemde bilinmeyenler sadece eklem değişkenleridir. Denklem denkleştirme işlemi yapılarak bu değerler hesaplanmıştır.

$${}^3_6R = [{}^0_3R]^{-1} * {}^0_6R \quad (3.15)$$

$$-\cos \theta_4 \sin \theta_5 = \text{sayısal değer} \quad (3.16)$$

$$\cos \theta_5 = \text{sayısal değer} \quad (3.17)$$

$$\sin \theta_4 \sin \theta_5 = \text{sayısal değer} \quad (3.18)$$

3.2. Yörünge Planlaması

Yörünge planlaması belirlenen noktalar arasında robot manipülatörün yaptığı hareketin zamana bağlı olarak hesaplanmasıdır. Robot manipülatörün belirlenen noktalar arasında hareket ederken ki hızını, ivmesini ve çizeceği rotayı belirlemek titreşimsiz bir hareket sağlamak için önemlidir (Bingül ve Küçük, 2021).

Yörünge planlamasında kullandığımız, yapılan hareketi bize tanımlayan fonksiyona yörünge planlama fonksiyonu adı verilir. Seçilen bu fonksiyonun girdilerine göre hareket süresi, hız ve ivme gibi hareketi şekillendirecek parametreler üzerinde değişiklik yapabiliriz. Ayrıca bütün eklemlerin başlangıç ve bitiş pozisyonları değiştirilmese bile yörünge planlama fonksiyonu seçimi ve parametre seçimi ile robot manipülatörün hareketi üzerinde büyük değişiklik yapılabilir. Bu durumda uç işlevcinin istenilen iki konum arasında hareket ederken uzuvlarının izlediği yol, hareketi tamamladığı süre, tüketilen enerji gibi birçok önemli faktörü etkilemektedir.

Bu çalışmada yörünge planlaması için Denklem 3.19’da verilen üçüncü derece polinom, Denklem 3.20’de verilen beşinci derece polinom, Denklem 3.21’de verilen yedinci derece polinom, Denklem 3.22’de verilen sikloid ve Denklem 3.23’te verilen sigmoid yörünge planlama fonksiyonları kullanılmıştır. Bu denklemlerin türevleri alınarak hız ve ivme denklemleri de elde edilmiştir.

$$\theta = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (3.19)$$

$$\theta = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (3.20)$$

$$\theta = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 + a_6t^6 + a_7t^7 \quad (3.21)$$

$$\theta = (\theta_f - \theta_i) \left(\frac{t-t_i}{t_f-t_i} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi(t-t_i)}{t_f-t_i} \right) \right) + \theta_i \quad (3.22)$$

$$\theta = (\theta_f - \theta_i) \left(\frac{1}{1+e^{-12 \left(\frac{t-t_i}{t_f-t_i} - 0,5 \right)}} \right) + \theta_i \quad (3.23)$$

Şekil 3.4'te uç işlevcinin geçmesi istenilen konumlar verilmişti ve o konumlarda uç işlevcinin yapması istenilen yönelime göre ters kinematik hesaplamalar bir önceki bölümde yapılmıştı. Ters kinematik hesaplamalar sonucu uç işlevcinin A,B,C,D ve E konumlarında olmasını sağlayan eklem açıları hesaplanmıştır. Bu konumlarda ki eklem hız ve ivmeleri sıfır kabul edilmiştir. Hesaplanan eklem açıları, kabul edilen eklem hızları, eklem ivmeleri ve hareketin süresi kullanılarak yörünge planlama fonksiyonları oluşturulmuştur. Hareketin tamamlanacağı süre 1,65 saniye olarak belirlenmiştir. Ayrıca yörünge planlama fonksiyonları uç işlevcinin hareketin başlangıcında A konumunda, 0,3'üncü saniyede B konumunda, 0,75'inci saniyede C konumunda, 1,2'nci saniyede D konumunda ve 1,65'inci saniyede E konumunda olacak şekilde düzenlenmiştir. Hareket süreleri Çizelge 3.1'de verilen eklem hızları dikkate alınarak belirlenmiştir. Beşinci derece polinom yörünge planlama fonksiyonuna göre hesaplanan eklem hızlarının tablo değerlerinin altında kalması istenmiştir.

3.3. Dinamik Hesaplamalar

Dinamik analiz robot manipülatörün kinematik analiz ve yörünge planlaması bölümlerinde hesaplanan konumu, hızı ve ivmesi ile kuvvet ve moment arasındaki bağıntıyı inceler. Dinamik analiz bölümünde bu bağıntılar kullanılarak robot manipülatörün tork ve enerji tüketim verileri hesaplanmıştır.

Lagrange-Euler ve Newton-Euler denklemleri robot manipülatörün dinamik analizi için temel yöntemlerdir. Bu çalışmada Newton-Euler denklemleri kullanılmıştır (Bingül ve Küçük, 2017).

İlk olarak Denklem 3.24'teki gibi her uzvun kütle merkezi konumu Şekil 3.3'te gösterilen kendi koordinat sistemine göre belirlenmiştir.

$$P_{C_{i+1}}^{i+1} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Her bir uzvun eklem üzerinde oluşturduğu atalet momenti hesaplanmış ve Denklem 3.25'teki gibi atalet matrisi oluşturulmuştur.

$$I_{i+1} = \begin{bmatrix} I_{xx_n} & -I_{xy_n} & -I_{xz_n} \\ -I_{yx_n} & I_{yy_n} & -I_{yz_n} \\ -I_{zx_n} & -I_{zy_n} & I_{zz_n} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Daha sonra eklemlerinin açısal hızları Denklem 3.26'daki gibi hesaplanmıştır. Robot manipülatörün çevresi hareketsiz olduğu için açısal hızı (w_0) ve açısal ivmesi ($\dot{w}_0$) sıfır kabul edilir. Denklemdeki ${}_{n-1}^nR$ matrisi dönme matrisinin devriğini ifade etmektedir. Eklemlere ait açısal ivme ise Denklem 3.27'deki gibi hesaplanmıştır.

$$w_{i+1} = {}^{i+1}_i R w_i + \dot{\theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1} \quad (3.26)$$

$$\dot{w}_{i+1} = {}^{i+1}_i R \dot{w}_i + \ddot{\theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1} + {}^{i+1}_i R w_i \times \dot{\theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1} \quad (3.27)$$

Eklemlere ait doğrusal ivme ise Denklem 3.28'deki gibi hesaplanmaktadır. Ayrıca yerçekimi vektörü temel koordinat sistemine göre Z ekseninde olduğundan Denklem 3.29'daki gibi hesaplanmıştır.

$$\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}_i R (\dot{w}_i \times P_{i+1}^i + w_i \times (w_i \times P_{i+1}^i)) + \dot{v}_i \quad (3.28)$$

$$\dot{v}_0 = g \hat{Z}_0 \quad (3.29)$$

Yukarıda hesaplanan doğrusal ivmeler Denklem 3.30'da gösterildiği gibi uzuvların kütle merkezlerinin doğrusal ivmelerini hesaplamakta kullanılmıştır.

$$\dot{v}_{C_{i+1}} = \dot{w}_{i+1} \times P_{C_i}^i + w_{i+1} \times (w_{i+1} \times P_{C_i}^i) + \dot{v}_{i+1} \quad (3.30)$$

Kütle merkezinin doğrusal ivmesi ile uzvun kütlesi çarpılarak Denklem 3.31'de gösterildiği gibi kütle merkezine etkiyen kuvvet hesaplanmıştır. Denklem 3.32'de ki yöntemle de kütle merkezine etkiyen tork hesaplanmıştır.

$$F_{i+1} = m_{i+1} + \dot{v}_{C_{i+1}} \quad (3.31)$$

$$N_{i+1} = I_{i+1}\dot{w}_{i+1} + w_{i+1} \times I_{i+1}w_{i+1} \quad (3.32)$$

Eklemlere etkiyen kuvvet ve tork ise Denklem 3.33 ve 3.34'teki gibi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken, uç işlevciye etkiyen tork ve kuvvetten başlayarak ardışık hesaplamalarla bir numaralı ekleme kadar sırası ile yapılmıştır. Daha sonra Denklem 3.35'teki işlem yapılarak tork değeri elde edilmiştir.

$$f_i = {}_{i+1}^i R f_{i+1} + F_i \quad (3.33)$$

$$n_i = N_i + {}_{i+1}^i R n_{i+1} + P_{C_i}^i \times F_i + P_{i+1}^i \times {}_{i+1}^i R f_{i+1} \quad (3.34)$$

$$\tau_i = (n_i)^T \hat{Z}_i \quad (3.35)$$

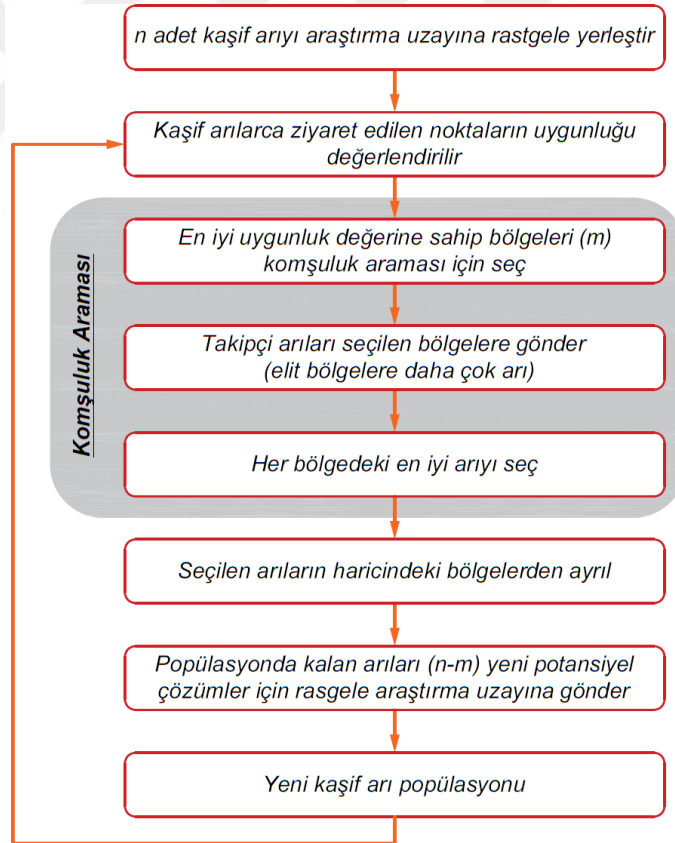
Denklem 3.35'ten elde edilen zamana bağlı tork değerleri ile zamana bağlı açısal hız değerleri çarpılmış ve çıkan grafiğin altında kalan alan hesaplanarak her bir eklemin tükettiği enerji Denklem 3.36'daki gibi elde edilmiştir. Bölüm 3.2'de hesaplanan beş yörünge planlamasının her birisini gerçekleştirmek için robot manipülatörün tüketeceği toplam enerji ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$E_i = \int_0^{t_f} (\tau_i * w_i) dt \quad (3.36)$$

4. ARI ALGORİTMASI

Dinamik analiz bölümünde altı serbestlik dereceli robot manipülatörün her bir ekleminin belirlenen hareketi yapmak için tükettiği enerji hesaplanmıştır. Bu bölümde eklemlerinin tükettiği enerjilerin toplamını optimize ederek daha az enerji tüketimi ile hareketin yapılabilirliği sınanmak istenmiştir. Optimizasyon tekniği olarak Arı Algoritması seçilmiştir.

Arı Algoritması Pham ve ark. (2006) tarafından optimizasyon için önerilmiştir. Popülasyon tabanlı sezgisel bir arama algoritmasıdır. Algoritma, bal arısı sürülerinin yiyecek arama ve birbirleriyle iletişim davranışlarını taklit etmektedir. Arı Algoritması popülasyonu üç grup arıya ayırmıştır. Bunlar kaşif arılar, takipçi arılar ve izci arılardır. Şekil 4.1’de Arı Algoritması şematik olarak açıklanmıştır. Çizelge 4.1’de ise Arı Algoritması parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Arı Algoritması şeması

Çizelge 4.1. Arı Algoritması Parametreleri

n_{AA}	: Kaşif arı sayısı
m_{AA}	: Ziyaret edilen 'n' bölgeden seçilen bölge sayısı
e_{AA}	: Seçilen 'm' bölge içindeki en iyi bölge sayısı
nep	: En iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı
nsp	: Kalan bölgeye (m-e) gönderilen arı sayı
ngh	: Bölge boyutu
itr	: İterasyon sayısı

Bölüm 3.2'de yörünge planlama fonksiyonları hesaplanırken Şekil 3.4'de verilen başlangıç konumu, ara konumlar ve bitiş konumu (A,B,C,D ve E) için eklemelerin hız ve ivmeleri 0 olarak belirlenmişti. Arı Algoritmasının ara konumlardaki (B,C ve D) eklem hız ve ivmelerini değiştirerek enerji tüketimini minimize etmesi istenmiştir. Amaç fonksiyonu Denklem 4.1'de verilmiştir. Optimizasyon, beşinci dereceden polinom yörünge planlama fonksiyonuna uygulanmıştır. Beşinci dereceden polinom yörünge planlama fonksiyonuna farklı konfigürasyonlarda Arı Algoritması parametreleri uygulanmış ve en iyi sonuç veren Çizelge 4.2'de ki Arı Algoritması parametresi uygulanarak optimizasyon tamamlanmıştır.

$$J_{amaç} = \left[\int_0^{t_f} (\tau_1 * w_1) dt \right] + \left[\int_0^{t_f} (\tau_2 * w_2) dt \right] + \left[\int_0^{t_f} (\tau_3 * w_3) dt \right] + \left[\int_0^{t_f} (\tau_4 * w_4) dt \right] + \left[\int_0^{t_f} (\tau_5 * w_5) dt \right] + \left[\int_0^{t_f} (\tau_6 * w_6) dt \right] \quad (4.1)$$

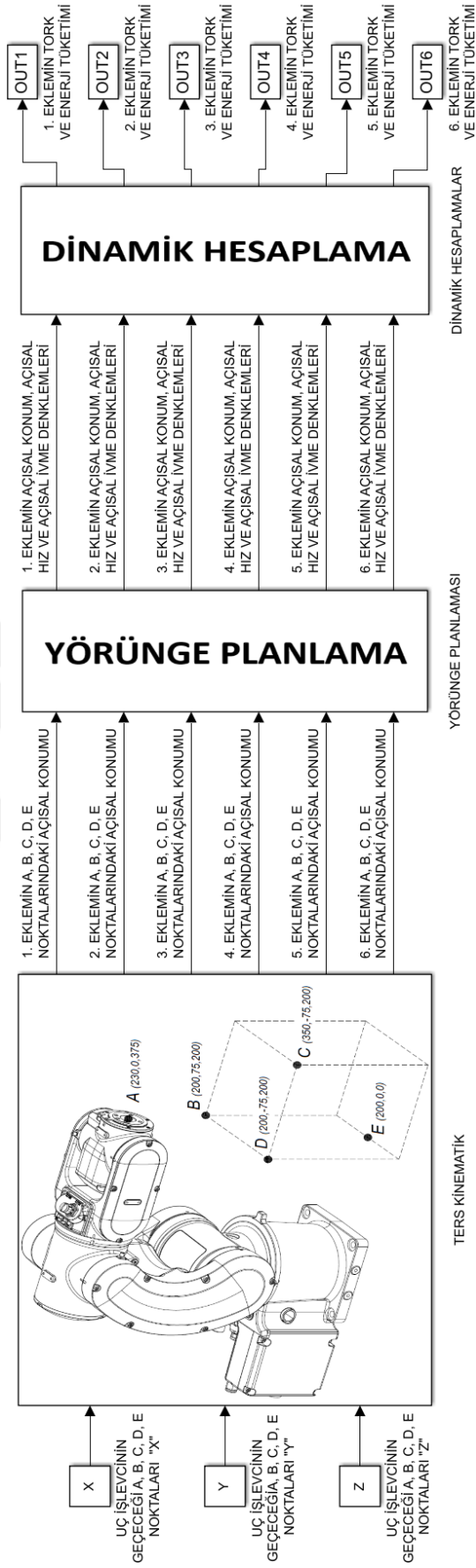
Çizelge 4.2. Robot manipülatörün enerji tüketim optimizasyonu için Arı Algoritması parametreleri

Parametreler	
n_{AA}	20
m_{AA}	10
e_{AA}	5
nep	5
nsp	3
ngh	0.1
itr	2861

5. SAYISAL UYGULAMALAR

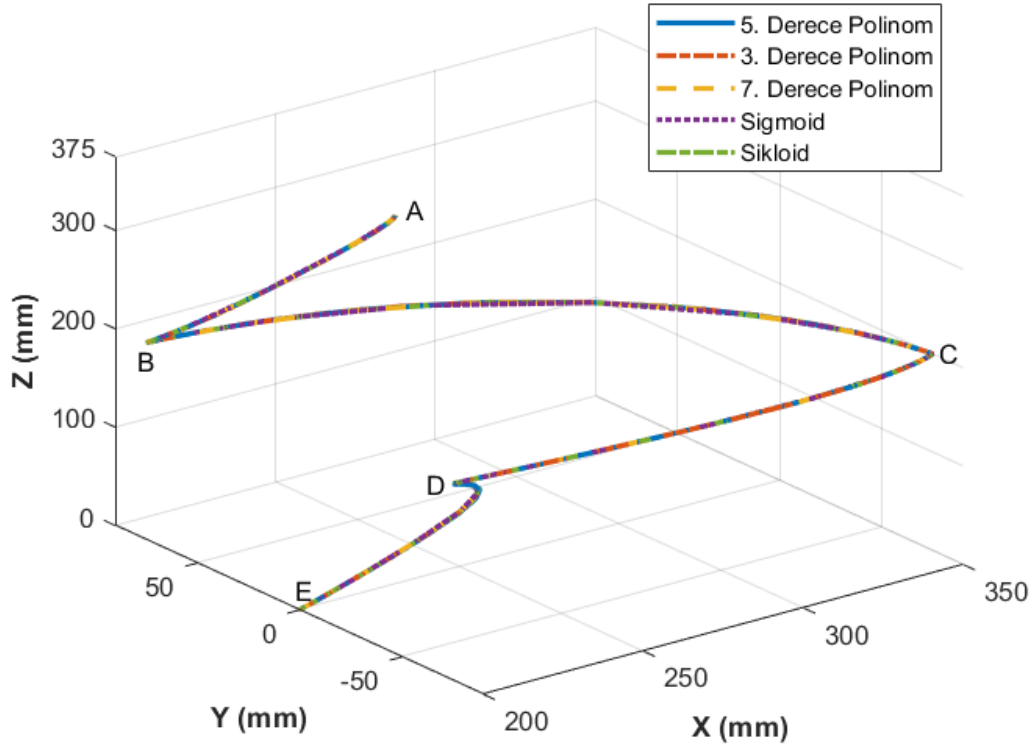
Önceki bölümlerde verildiği gibi ilk olarak altı serbestlik dereceli robot manipülatörün kinematik hesaplamaları yapılmıştır. Daha sonra beş farklı yörünge planlama fonksiyonuyla ayrı ayrı yörünge planlamaları yapılmış ve her birinin dinamik hesaplamaları modellenerek enerji tüketimleri bulunmuştur. Bu hesaplamaların tamamı Matlab Simulink ortamında modellenmiştir. Yapılan hesaplamaların Matlab Simulink modeli Şekil 5.1’de verilmiştir. Robot manipülatörün altıncı eklemi uç işlevcinin hareketine etki etmediği sadece uç işlevcinin pozisyonunu belirlediği için hareketsiz bırakılmıştır. Dolayısıyla enerji tüketimi yoktur.





Şekil 5.1. Matlab Simulink modeli

Uç işlevcinin yörünge planlama fonksiyonlarına göre hareketi Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi farklı yörünge planlamaları arasında uç işlevcinin izlediği yol yönünden ciddi bir fark oluşmamaktadır.



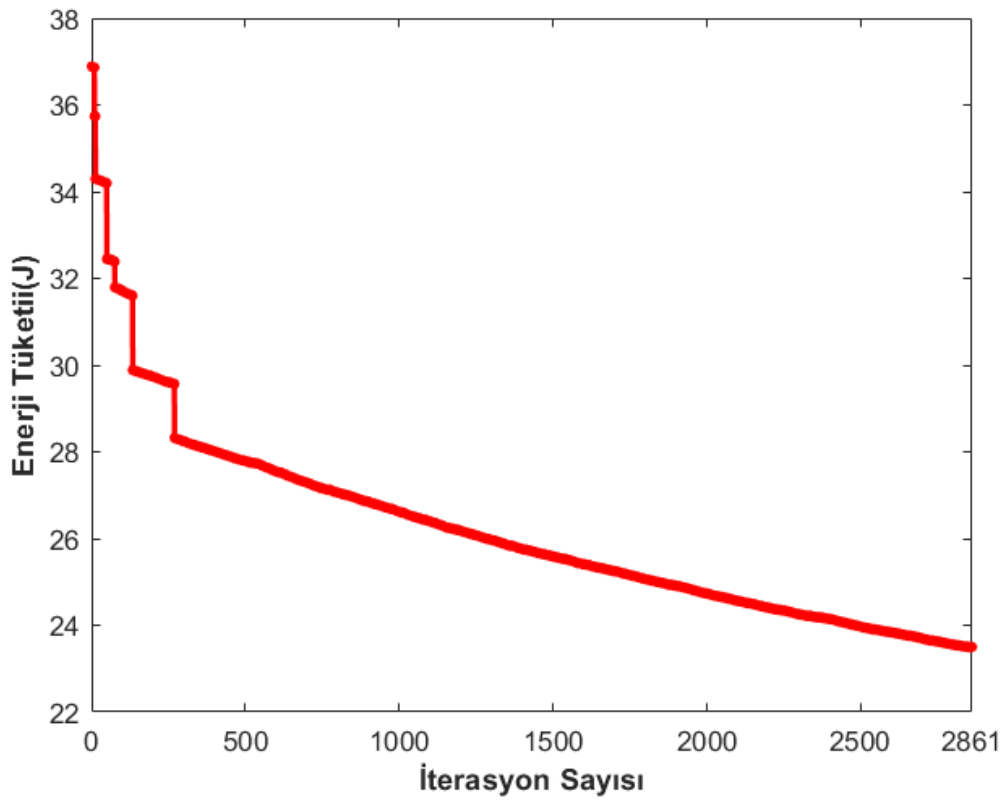
Şekil 5.2. Uç işlevcinin hareketi

Beş farklı yörünge planlama fonksiyonuna göre robot manipülatörün yaptığı hareket sonucu tüketilen toplam enerji Çizelge 5.1’de verilmiştir. Toplam enerji tüketimi robot manipülatörün her bir eklemının harcadığı enerjinin toplamını ifade etmektedir. Bu sonuçlar elde edilirken her bir hesaplamada ağırlık merkezi robot manipülatörün uç noktası olan 1,5 kg’lık yük bağlanmış ve hareket bu yükle birlikte yaptırılmıştır. Enerji tüketimi açısından en verimli yörünge planlama fonksiyonunun üçüncü derece polinom, en verimsiz olan ise sigmoid olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.1. Enerji tüketimi

Enerji Tüketimi (J)		
5. Derece Polinom	:	26,53
3. Derece Polinom	:	23,76
7. Derece Polinom	:	30,24
Sigmoid	:	44,24
Sikloid	:	27,31

Arı Algoritması ile optimizasyon, beşinci derece polinom kullanılan yörünge planlamasına uygulanmıştır. Enerji tüketiminin tekrar sayısı arttıkça en iyi sonuca yakınsaması Şekil 5.3'te verilmiştir. Optimizasyon yapılırken en düşük enerji tüketimi olan 23,76 joule değerinden daha düşük enerji tüketimi hedeflenmiştir. Bu yüzden de durdurma kriteri olarak 23,50 joule değeri belirlenmiştir. Optimizasyon, enerji tüketimi bu değerin altına indiğinde sonlandırılmıştır. İterasyon sayısı 2861 olduğunda enerji tüketiminin 23,49 joule'e düştüğü görülmüştür. Şekil incelendiğinde iterasyon sayısı daha çok artırılarak enerji tüketiminin daha fazla azaltılabileceği yorumlanmıştır.



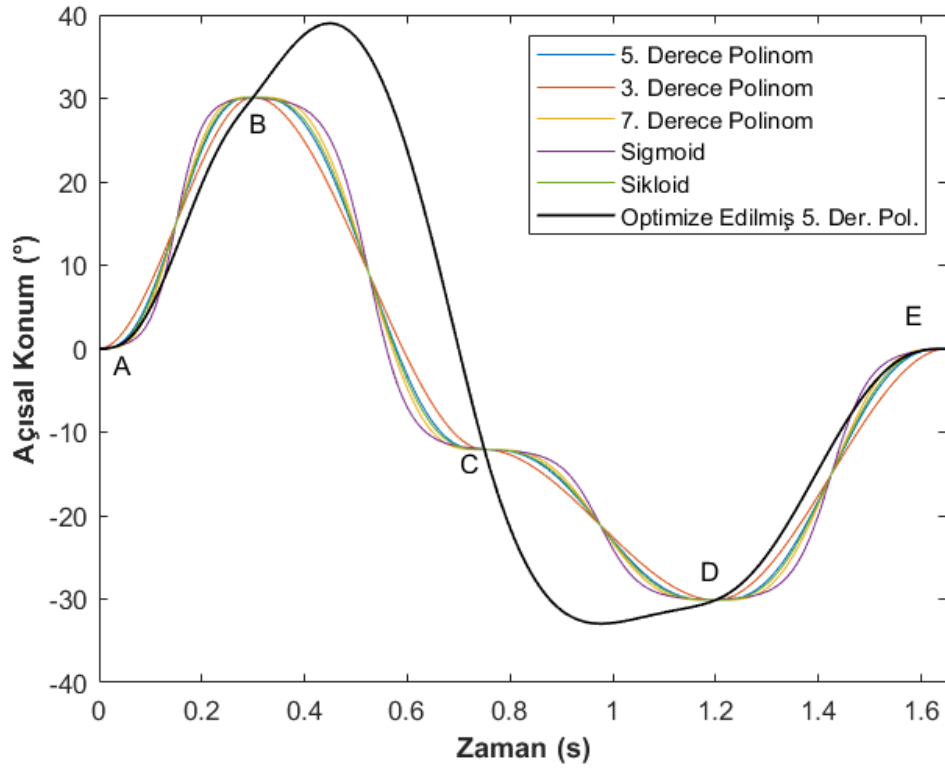
Şekil 5.3. Enerji tüketiminin en aza yakınsaması

Enerji tüketiminin en fazla olduğu sigmoid fonksiyonunun kullanıldığı yörünge planlamasına göre diğerlerinin enerji tasarrufu Çizelge 5.2'de verilmiştir. Yörünge planlamada kullanılan fonksiyonun enerji tüketimine % 45'lere varan etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca bu ciddi etkiyi Arı Algoritması ile optimize ederek daha da artırabildiğimiz gözlemlenmiştir.

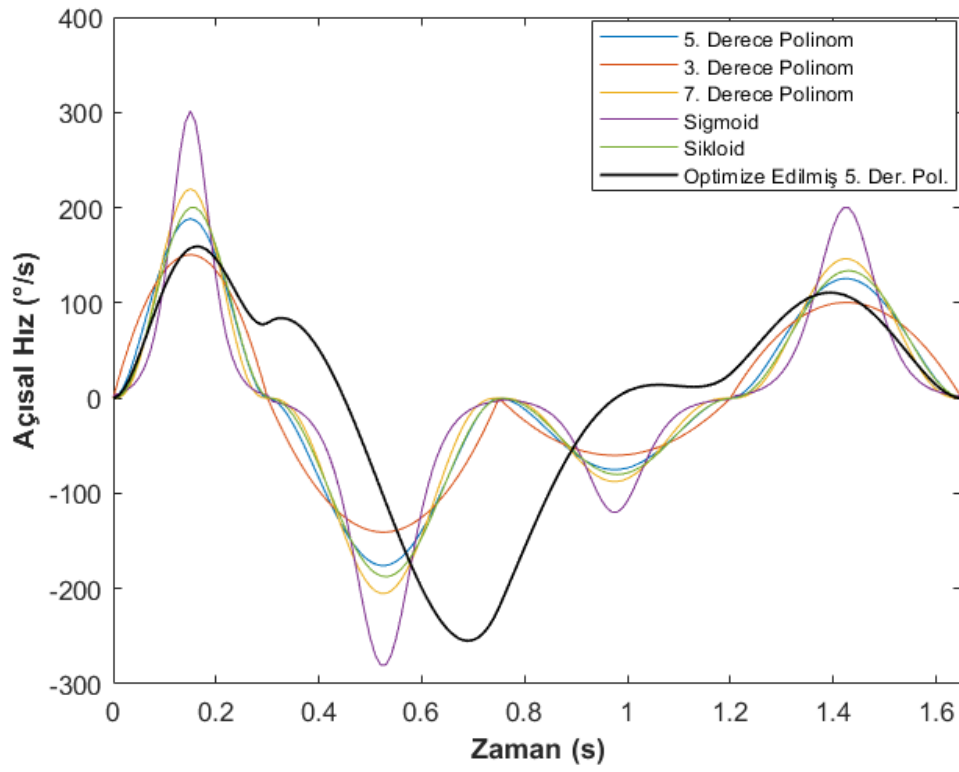
Çizelge 5.2. Enerji tüketim karşılaştırması

Enerji Tasarrufu		
5. Derece Polinom	:	% 40,03
3. Derece Polinom	:	% 46,30
7. Derece Polinom	:	% 31,64
Sigmoid	:	% 0,00
Sikloid	:	% 38,26
Optimize Edilmiş 5. Der. Pol.	:	% 46,90

Eklemlerin yörünge planlama fonksiyonlarına göre açısal konum, açısal hız ve açısal ivme grafikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Birinci eklemin açısal konum, açısal hız ve açısal ivme grafiği sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. Açısal konum grafikleri incelendiğinde optimize edilmiş beşinci derece polinom haricindeki yörünge planlamalarının benzer harekette bulunduğu görülmektedir. Hareket formları benzer olsa da fonksiyonların açısal hız ve açısal ivme değerlerinin arasında fark olduğu görülmektedir. Şekil 5.5'e bakıldığında en yüksek açısal hız değerinin beşinci derece polinom için $188^{\circ}/s$, üçüncü derece polinom için $150^{\circ}/s$, yedinci derece polinom için $219^{\circ}/s$, sigmoid fonksiyon için $301^{\circ}/s$, sikloid fonksiyon için $200^{\circ}/s$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $252^{\circ}/s$ olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinom haricindeki yöntemlerin açısal hız grafiği benzer formda gerçekleşmiştir. Ancak grafikte de görüldüğü gibi ulaştıkları tepe değerleri arasında farklılıklar bulunmaktadır. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun en yüksek açısal hız değeri diğer yöntemlerin bir kaçından büyük olsa da diğer yöntemlere göre daha az tepe değeri oluşturması enerji tüketimi açısından önemlidir.

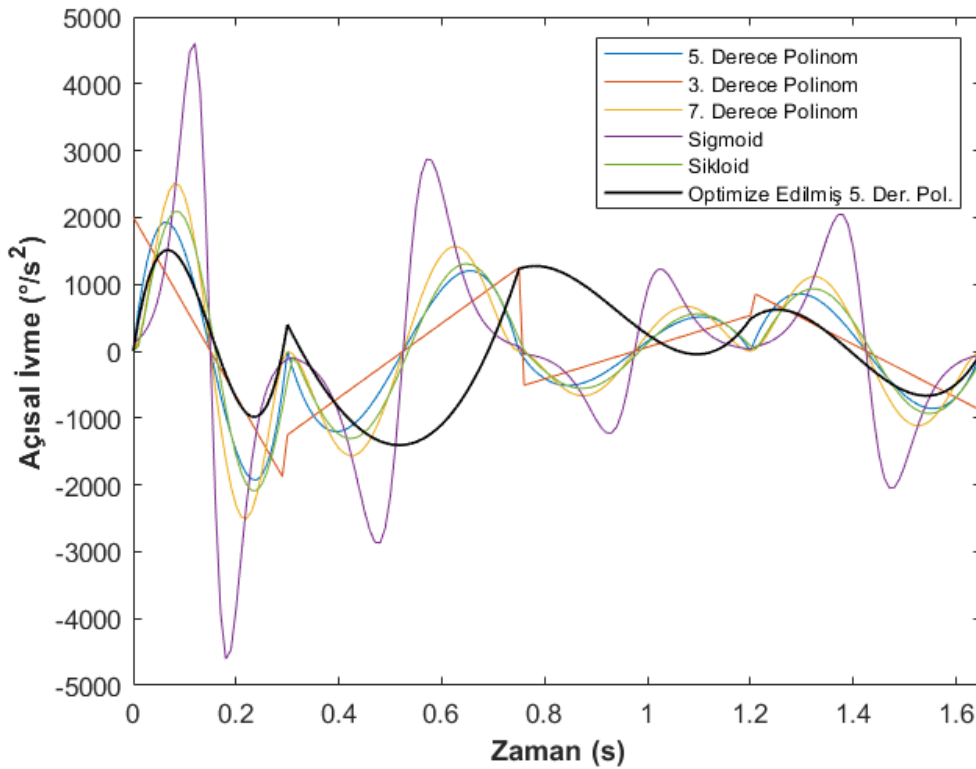


Şekil 5.4. Birinci eklemin karşılaştırılmalı açısal konum grafiği



Şekil 5.5. Birinci eklemin karşılaştırılmalı açısal hız grafiği

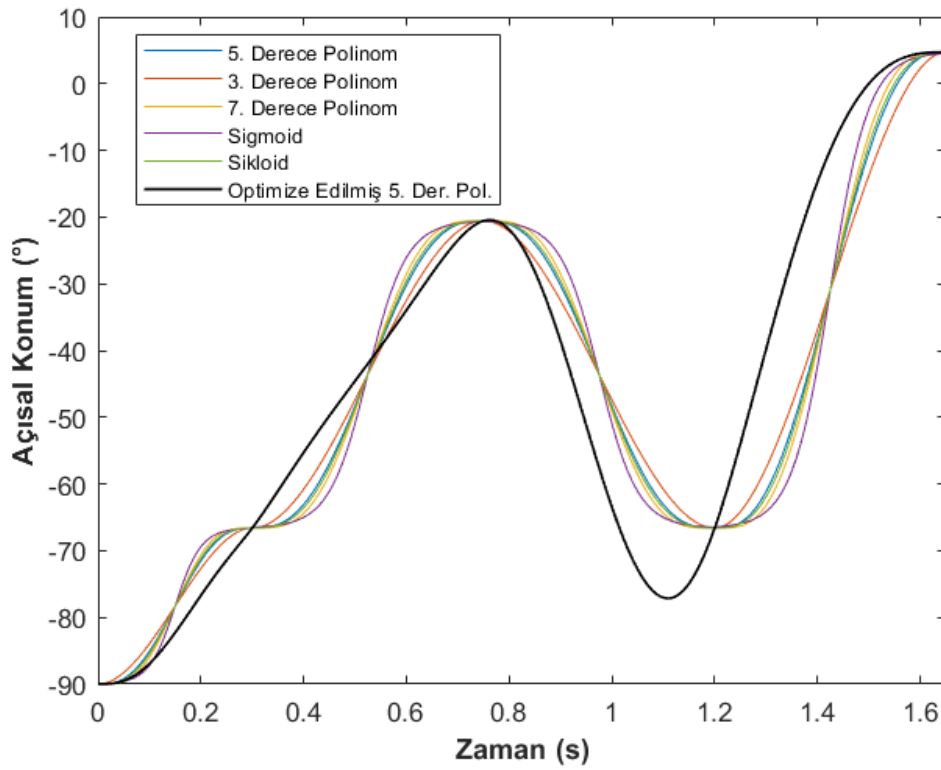
Şekil 5.6’da verilen açısal ivme grafiğine bakıldığında ise en yüksek açısal ivme değerlerinin beşinci derece polinom için $1928^{\circ}/s^2$, üçüncü derece polinom için $2008^{\circ}/s^2$, yedinci derece polinom için $2509^{\circ}/s^2$, sigmoid fonksiyon için $4605^{\circ}/s^2$, sikloid fonksiyon için $2084^{\circ}/s^2$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $1514^{\circ}/s^2$ olduğu görülmektedir. Sigmoid fonksiyonun en yüksek açısal ivme değerinin diğerlerinden önemli miktarda yüksek olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun en yüksek açısal ivme değerinin ise grafiğin genelinde olduğu gibi diğer yöntemlerden daha düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Ara noktadaki açısal hız ve açısal ivme değerlerini optimize etmenin hareketin tamamındaki açısal hız ve açısal ivme değerini düşürdüğü görülmektedir. Enerji tüketiminin diğerlerinden daha düşük olacağı buradan da yorumlanabilmektedir.



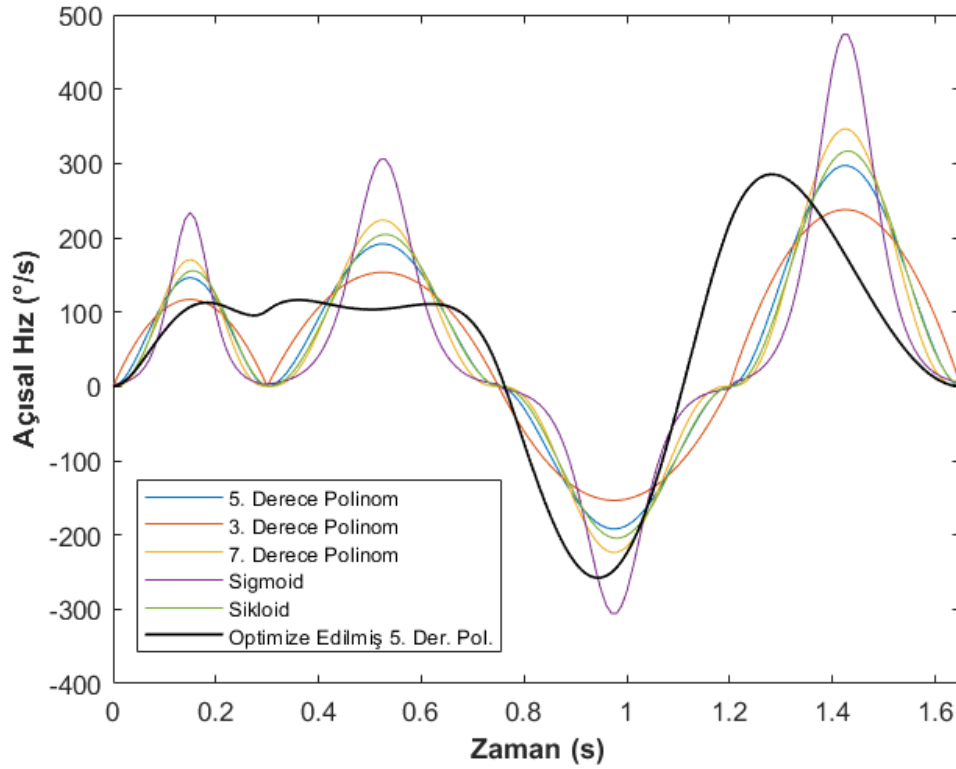
Şekil 5.6. Birinci eklem için karşılaştırılmalı açısal ivme grafiği

İkinci eklem için açısal konum, açısal hız ve açısal ivme grafiği sırasıyla Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmiştir. Açısal konum grafiği incelendiğinde, optimize edilmiş beşinci derece polinom haricindeki yörünge planlamalarının benzer hareketler sergilediği görülmektedir. Ancak hareket biçimleri benzer olsa bile fonksiyonların açısal

hız ve açısal ivme değerlerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Şekil 5.8'e bakıldığında en yüksek açısal hız değerinin beşinci derece polinom için $296^\circ/\text{s}$, üçüncü derece polinom için $237^\circ/\text{s}$, yedinci derece polinom için $346^\circ/\text{s}$, sigmoid fonksiyon için $473^\circ/\text{s}$, sikloid fonksiyon için $316^\circ/\text{s}$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $285^\circ/\text{s}$ olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun en yüksek açısal hız değeri üçüncü derece polinomdan büyük olsa da grafiğin önemli bir kısmında dalgalanma olmaksızın yatay ilerlediği görülmektedir. Açısal hız grafiğinin bu şekilde yatay ilerlemesi enerji tüketimi açısından önemlidir.

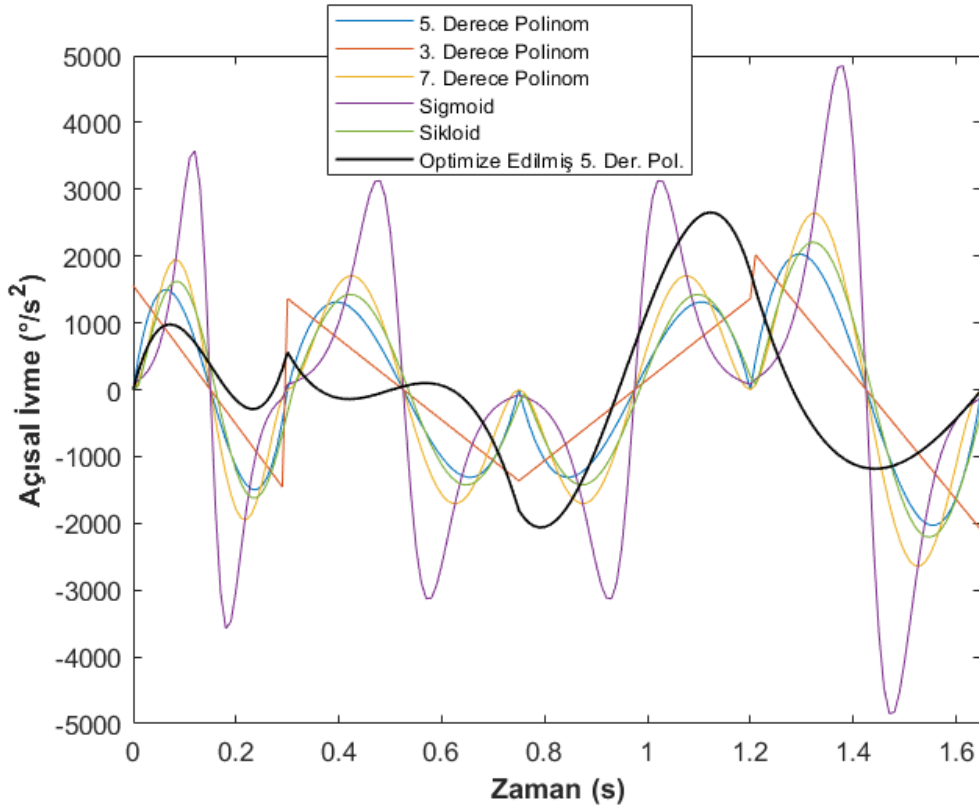


Şekil 5.7. İkinci eklemin karşılaştırılmalı açısal konum grafiği



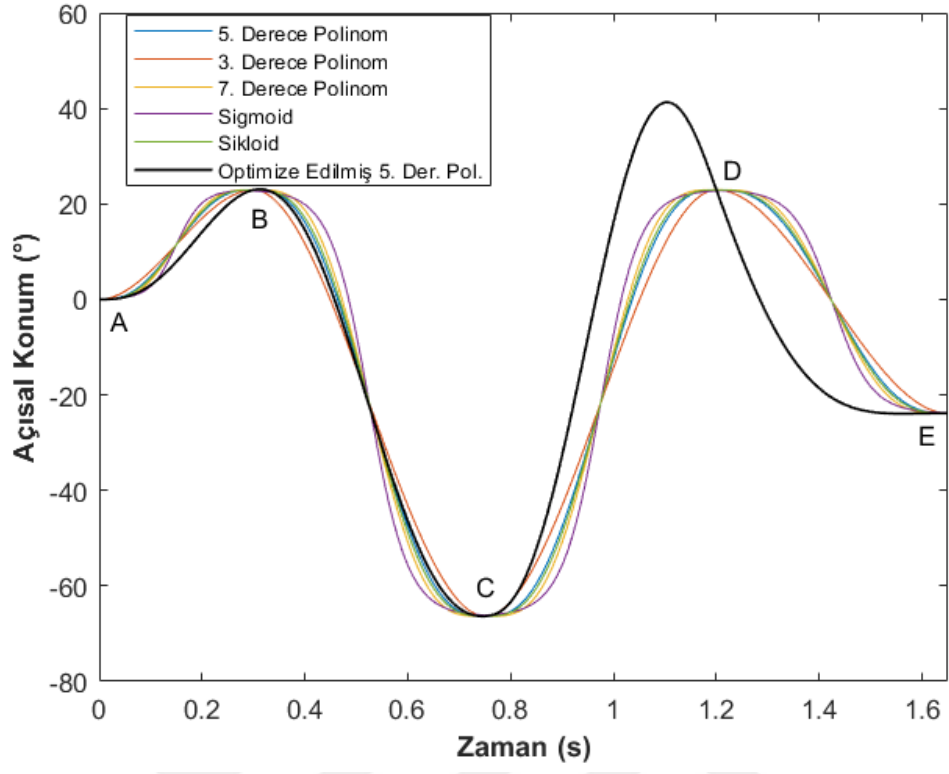
Şekil 5.8. İkinci eklem için karşılaştırılmalı açısal hız grafiği

Şekil 5.9’da verilen açısal ivme grafiğine bakıldığında ise en yüksek açısal ivme değerlerinin beşinci derece polinom için $2029^{\circ}/s^2$, üçüncü derece polinom için $2113^{\circ}/s^2$, yedinci derece polinom için $2640^{\circ}/s^2$, sigmoid fonksiyon için $4845^{\circ}/s^2$, sikloid fonksiyon için $2208^{\circ}/s^2$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $2653^{\circ}/s^2$ olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun en yüksek açısal ivme değeri diğer yöntemlerin bazılarında büyük olsa da grafiğin genelinde açısal ivme değerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Enerji tüketiminin diğerlerinden daha düşük olabileceği buradan da yorumlanabilmektedir.

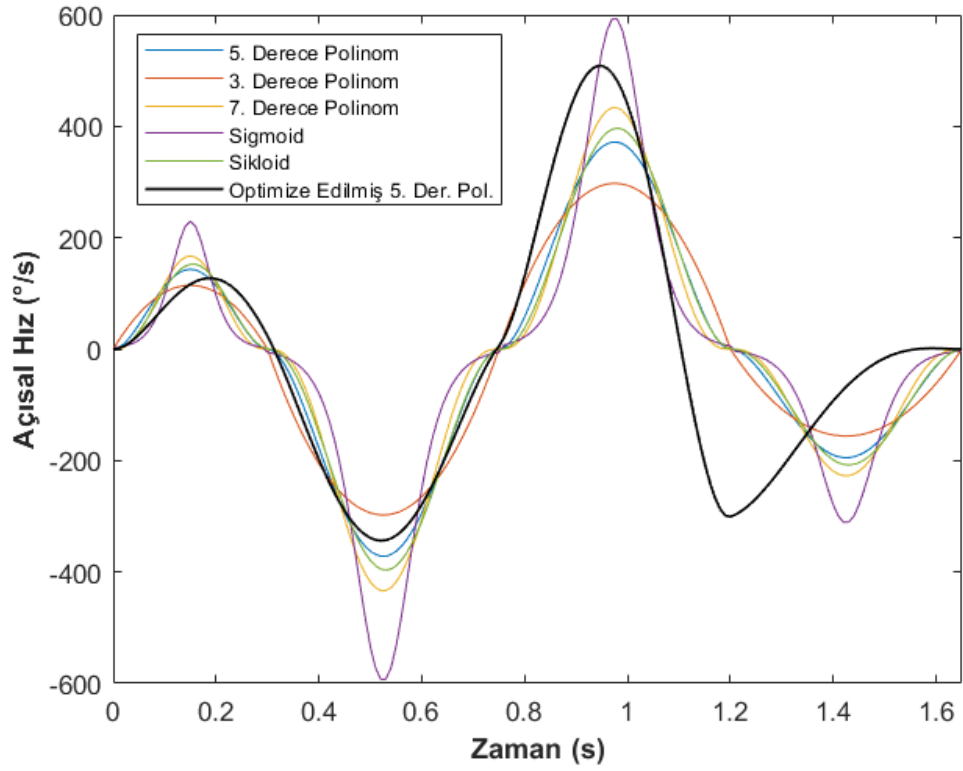


Şekil 5.9. İkinci eklem için karşılaştırılmalı açısal ivme grafiği

Üçüncü eklem için açısal konum, açısal hız ve açısal ivme grafiği sırasıyla Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir. Açısal konum grafiği incelendiğinde, optimize edilmiş beşinci derece polinom haricindeki yörünge planlamalarının benzer hareketler sergilediği görülmektedir. Ancak hareket biçimleri benzer olsa bile fonksiyonların açısal hız ve açısal ivme değerlerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Şekil 5.11’e bakıldığında en yüksek açısal hız değerinin beşinci derece polinom için $371^{\circ}/s$, üçüncü derece polinom için $297^{\circ}/s$, yedinci derece polinom için $433^{\circ}/s$, sigmoid fonksiyon için $592^{\circ}/s$, sikloid fonksiyon için $396^{\circ}/s$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $508^{\circ}/s$ olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun en yüksek açısal hız değeri diğer yöntemlerin bazılarından büyük olsa da grafiğin genelinde diğer yöntemlere göre düşük açısal hız değerlerine sahiptir.

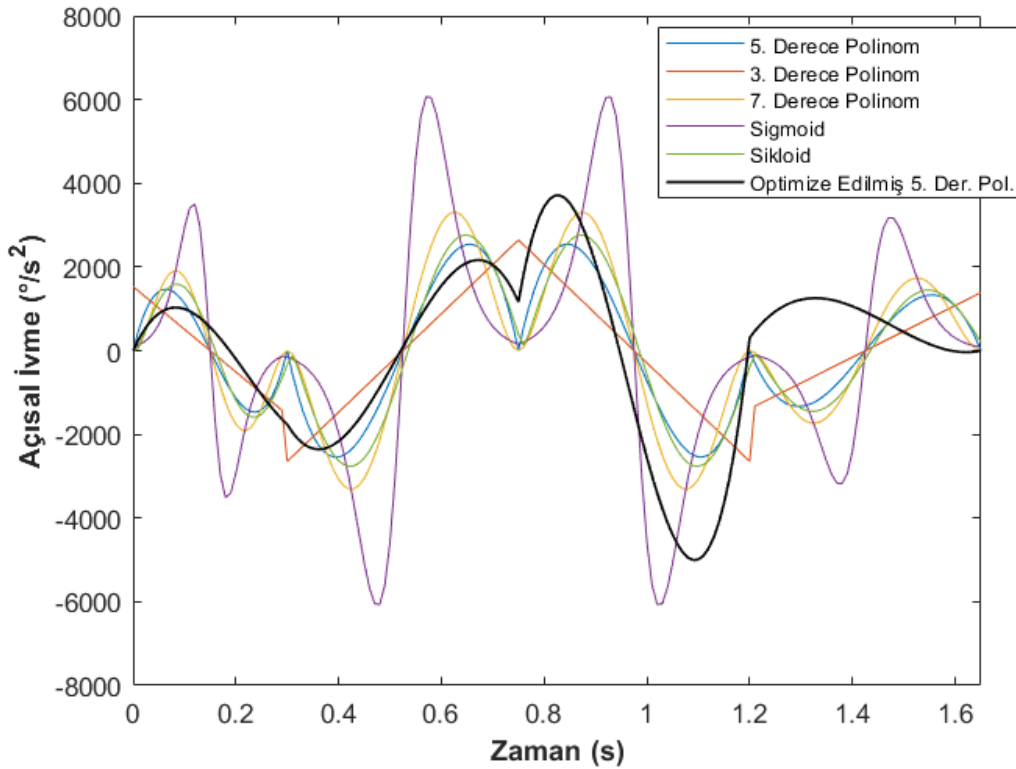


Şekil 5.10. Üçüncü eklemin karşılaştırılmalı açısal konum grafiği



Şekil 5.11. Üçüncü eklemin karşılaştırılmalı açısal hız grafiği

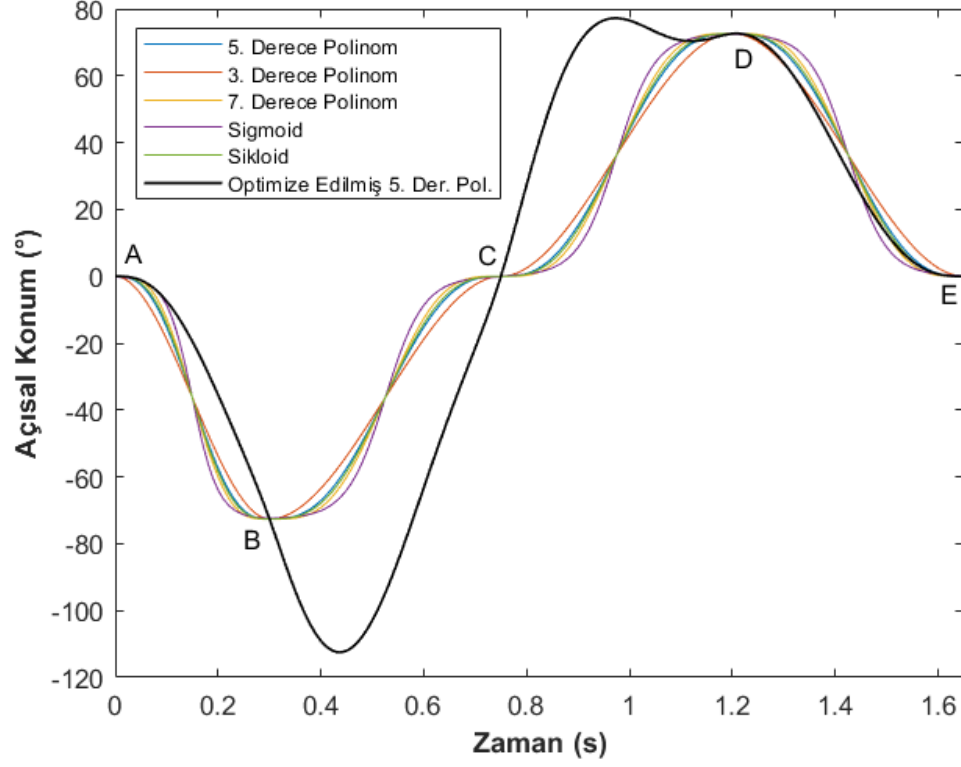
Şekil 5.12’de verilen açısal ivme grafiğine bakıldığında ise en yüksek açısal ivme değerlerinin beşinci derece polinom için $2540^{\circ}/s^2$, üçüncü derece polinom için $2645^{\circ}/s^2$, yedinci derece polinom için $3305^{\circ}/s^2$, sigmoid fonksiyon için $6066^{\circ}/s^2$, sikloid fonksiyon için $2764^{\circ}/s^2$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $5005^{\circ}/s^2$ olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun en yüksek açısal ivme değeri diğer yöntemlerin bazılarından büyük olsa da diğer yöntemlere göre daha az tepe değeri oluşturması enerji tüketimi açısından önemlidir.



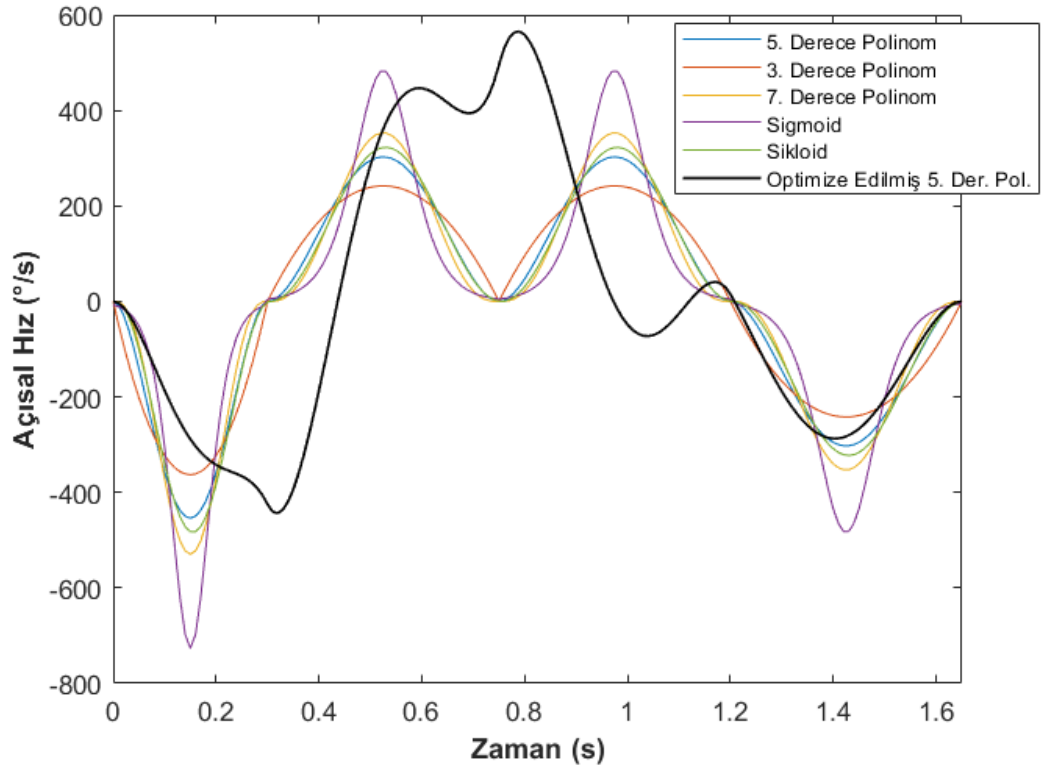
Şekil 5.12. Üçüncü eklem için karşılaştırılmalı açısal ivme grafiği

Dördüncü eklem için açısal konum, açısal hız ve açısal ivme grafiği sırasıyla Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’te verilmiştir. Açısal konum grafiği incelendiğinde, optimize edilmiş beşinci derece polinom haricindeki yörünge planlamalarının benzer hareketler sergilediği görülmektedir. Ancak hareket biçimleri benzer olsa bile fonksiyonların açısal hız ve açısal ivme değerlerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Şekil 5.14’e bakıldığında en yüksek açısal hız değerinin beşinci derece polinom için $453^{\circ}/s$, üçüncü derece polinom için $363^{\circ}/s$, yedinci derece polinom

için $529^\circ/\text{s}$, sigmoid fonksiyon için $726^\circ/\text{s}$, sikloid fonksiyon için $482^\circ/\text{s}$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $565^\circ/\text{s}$ olduğu görülmektedir.

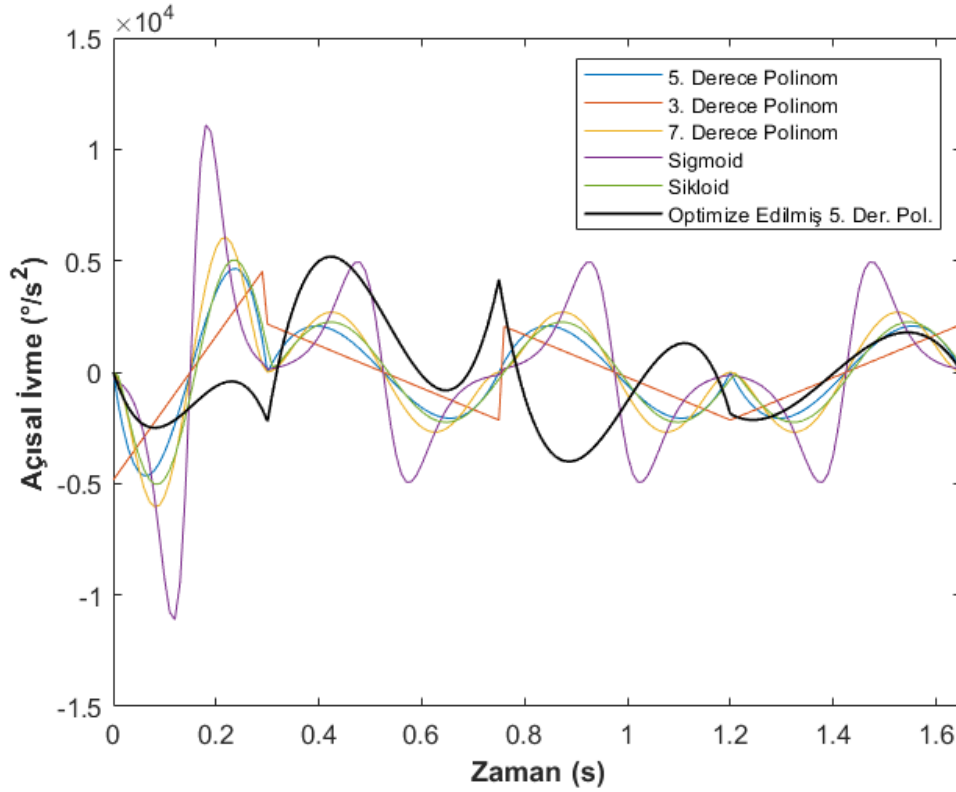


Şekil 5.13. Dördüncü eklemin karşılaştırılmalı açısal konum grafiği



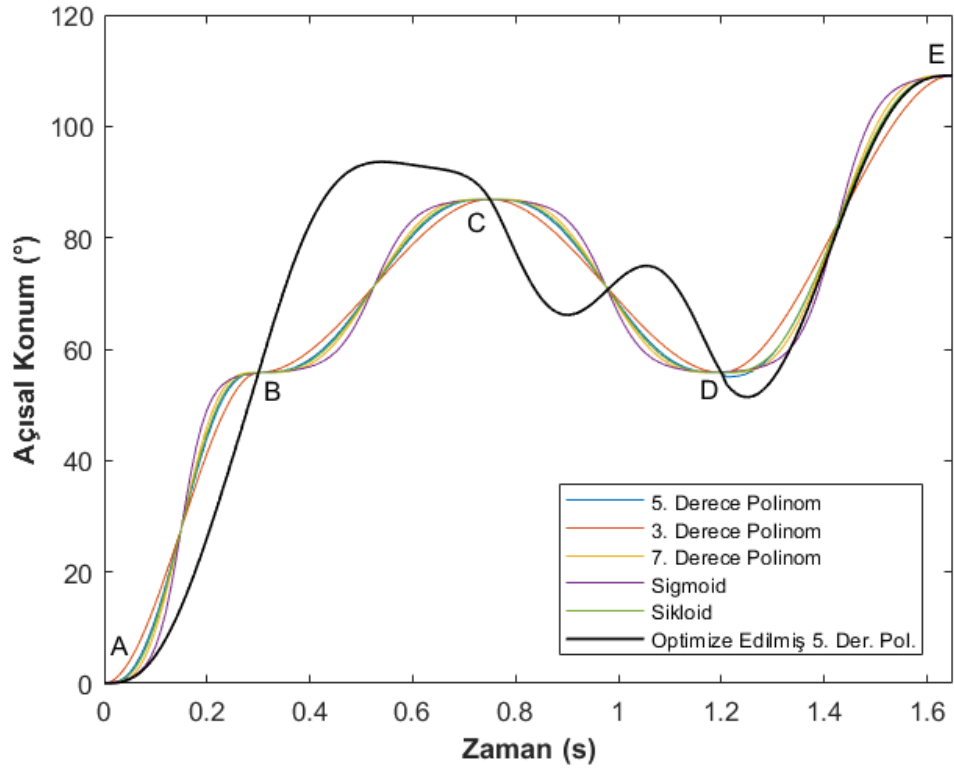
Şekil 5.14. Dördüncü eklem için karşılaştırılmalı açısal hız grafiği

Şekil 5.15’de verilen açısal ivme grafiğine bakıldığında ise en yüksek açısal ivme değerlerinin beşinci derece polinom için $4647^{\circ}/s^2$, üçüncü derece polinom için $4841^{\circ}/s^2$, yedinci derece polinom için $6048^{\circ}/s^2$, sigmoid fonksiyon için $11100^{\circ}/s^2$, sikloid fonksiyon için $5023^{\circ}/s^2$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $5183^{\circ}/s^2$ olduğu görülmektedir.

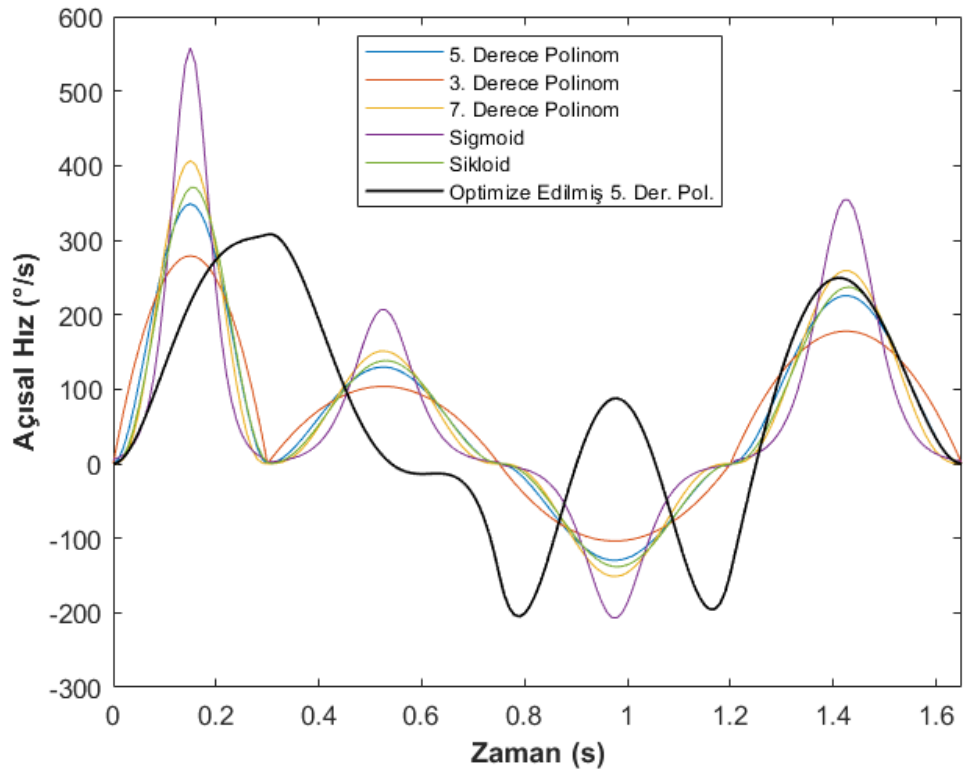


Şekil 5.15. Dördüncü eklem için karşılaştırılmalı açısal ivme grafiği

Beşinci eklem için açısal konum, açısal hız ve açısal ivme grafiği sırasıyla Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de verilmiştir. Açısal konum grafiği incelendiğinde, optimize edilmiş beşinci derece polinom haricindeki yörünge planlamalarının benzer hareketler sergilediği anlaşılmaktadır. Ancak hareket biçimleri benzer olsa bile fonksiyonların açısal hız ve açısal ivme değerlerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Şekil 5.17’ye bakıldığında en yüksek açısal hız değerinin beşinci derece polinom için 348°/s, üçüncü derece polinom için 278°/s, yedinci derece polinom için 406°/s, sigmoid fonksiyon için 557°/s, sikloid fonksiyon için 370°/s ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 307°/s olduğu görülmektedir.

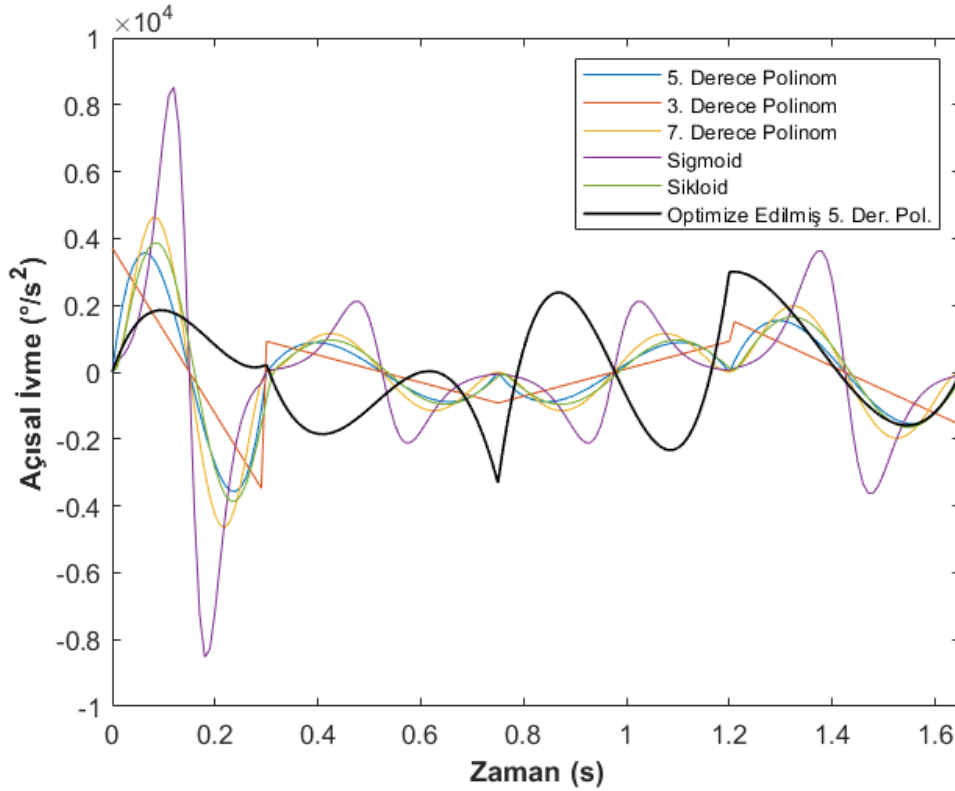


Şekil 5.16. Beşinci eklemin karşılaştırılmalı açısal konum grafiği



Şekil 5.17. Beşinci eklemin karşılaştırılmalı açısal hız grafiği

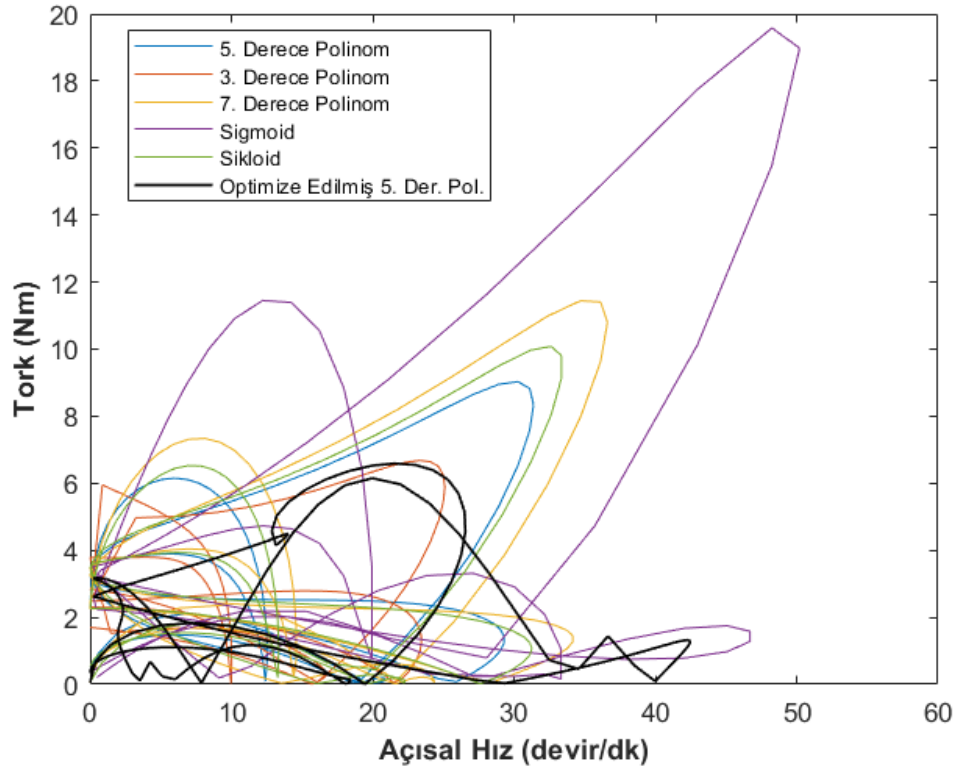
Şekil 5.18’de verilen açısal ivme grafiğine bakıldığında ise en yüksek açısal ivme değerlerinin beşinci derece polinom için $3570^{\circ}/s^2$, üçüncü derece polinom için $3719^{\circ}/s^2$, yedinci derece polinom için $4646^{\circ}/s^2$, sigmoid fonksiyon için $8527^{\circ}/s^2$, sikloid fonksiyon için $3859^{\circ}/s^2$ ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için $3313^{\circ}/s^2$ olduğu görülmektedir.



Şekil 5.18. Beşinci eklemin karşılaştırmalı açısal ivme grafiği

Birinci eklemin tork - dönüş hızı grafiği Şekil 5.19’da verilmiştir. Şekil 5.19’a bakıldığında en yüksek tork değerlerinin beşinci derece polinom için 9,02 Nm, üçüncü derece polinom için 6,68 Nm, yedinci derece polinom için 11,44 Nm, sigmoid fonksiyon için 19,58 Nm, sikloid fonksiyon için 10,08 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 6,59 Nm olduğu görülmektedir. En yüksek dönüş hızı değerlerinin ise beşinci derece polinom için 31,38 devir/dk, üçüncü derece polinom için 25,11 devir/dk, yedinci derece polinom için 36,61 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 50,21 devir/dk, sikloid fonksiyon için 33,35 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 42,49 devir/dk olduğu görülmektedir.

Grafiğe bakıldığında en yüksek tork ve dönüş hızı değerlerinin sigmoid fonksiyonun olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun tork ihtiyacının diğer yöntemlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Tork ihtiyacındaki değişim enerji tüketimiyle doğrudan bağlantılıdır. Sonuç olarak grafiklere bakarak sigmoid fonksiyon en çok enerji tüketen olmak üzere yörünge planlama fonksiyonlarının hepsinin sıralamasıyla ilgili yorum geliştirmek mümkündür. Ayrıca tork - dönüş hızı grafiğini kullanarak her bir yörünge planlama fonksiyonunu gerçekleştirmek için gerekli motor seçimi hakkında bilgi edinilebilir.

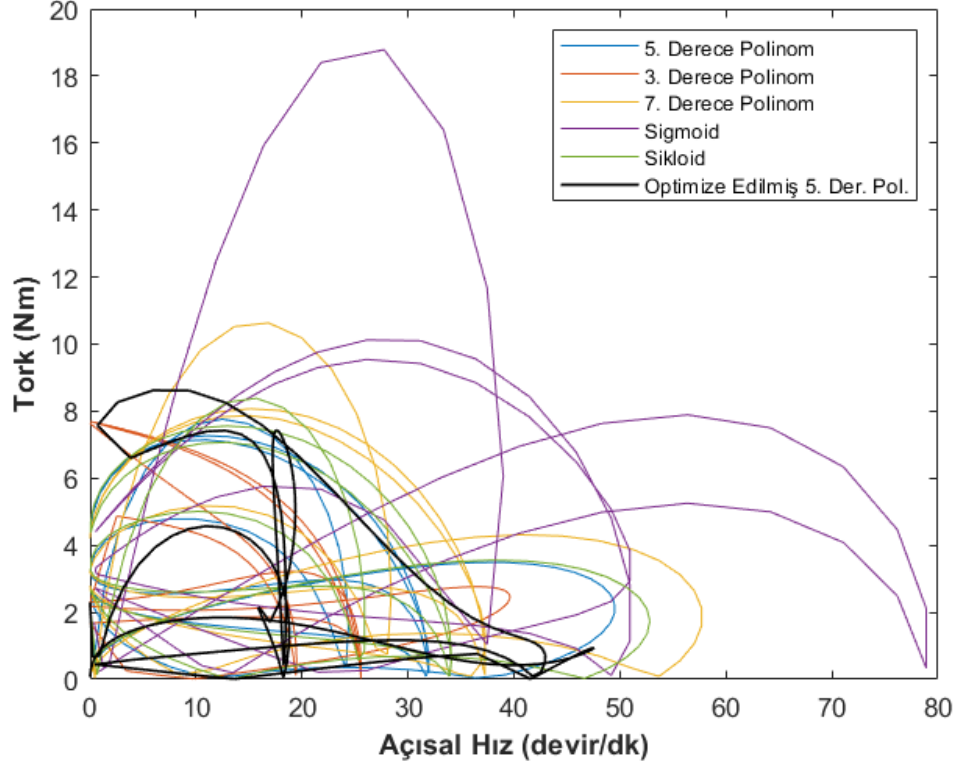


Şekil 5.19. Birinci eklemin karşılaştırmalı tork – dönüş hızı grafiği

İkinci eklemin tork - dönüş hızı grafiği Şekil 5.20’de verilmiştir. Şekil 5.20’ye bakıldığında en yüksek tork değerinin beşinci derece polinom için 7,76 Nm, üçüncü derece polinom için 7,69 Nm, yedinci derece polinom için 10,63 Nm, sigmoid fonksiyon için 18,78 Nm, sikloid fonksiyon için 8,38 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 8,62 Nm olduğu görülmektedir. En yüksek dönüş hızı değerlerinin ise beşinci derece polinom için 49,48 devir/dk, üçüncü derece polinom için 39,60 devir/dk, yedinci derece polinom için 57,70 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 78,90 devir/dk,

sikloid fonksiyon için 52,81 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 47,56 devir/dk olduğu görülmektedir.

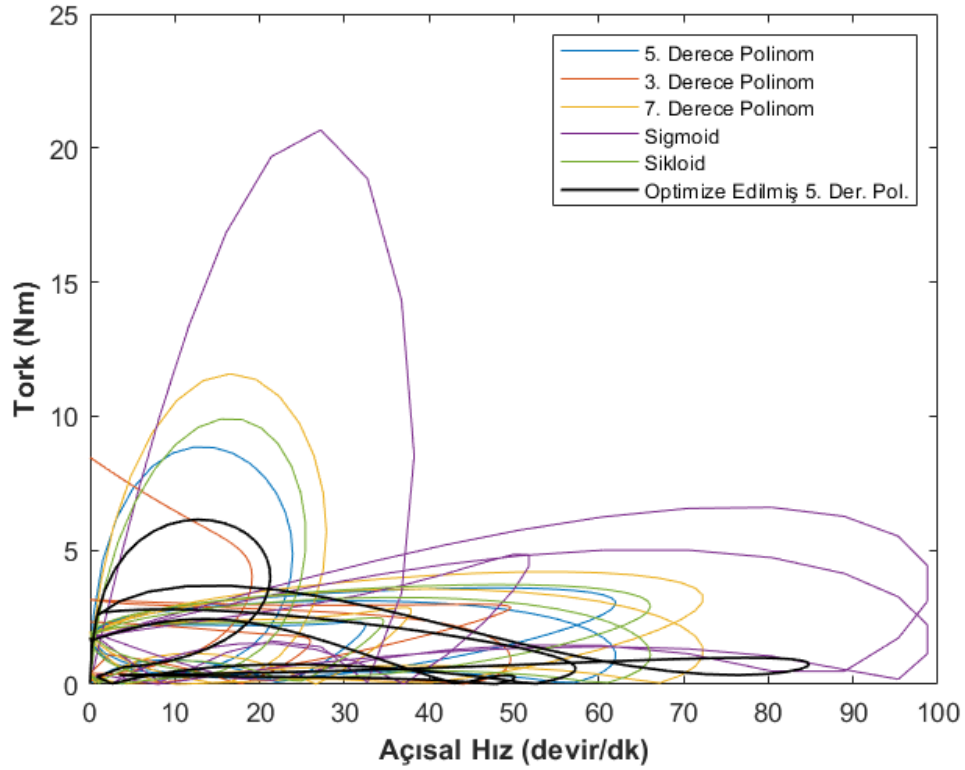
Grafiğe bakıldığında en yüksek tork ve dönüş hızı değerlerinin sigmoid fonksiyonun olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun tork ve dönüş hızı değerlerinin düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.20. İkinci eklemin karşılaştırmalı tork – dönüş hızı grafiği

Üçüncü eklemin tork - dönüş hızı grafiği Şekil 5.21’de verilmiştir. Şekil 5.21’e bakıldığında en yüksek tork değerinin beşinci derece polinom için 8,84 Nm, üçüncü derece polinom için 8,46 Nm, yedinci derece polinom için 11,58 Nm, sigmoid fonksiyon için 20,67 Nm, sikloid fonksiyon için 9,89 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 6,14 Nm olduğu görülmektedir. En yüksek dönüş hızı değerlerinin ise beşinci derece polinom için 61,94 devir/dk, üçüncü derece polinom için 49,57 devir/dk, yedinci derece polinom için 72,23 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 98,76 devir/dk, sikloid fonksiyon için 66,11 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 84,78 devir/dk olduğu görülmektedir.

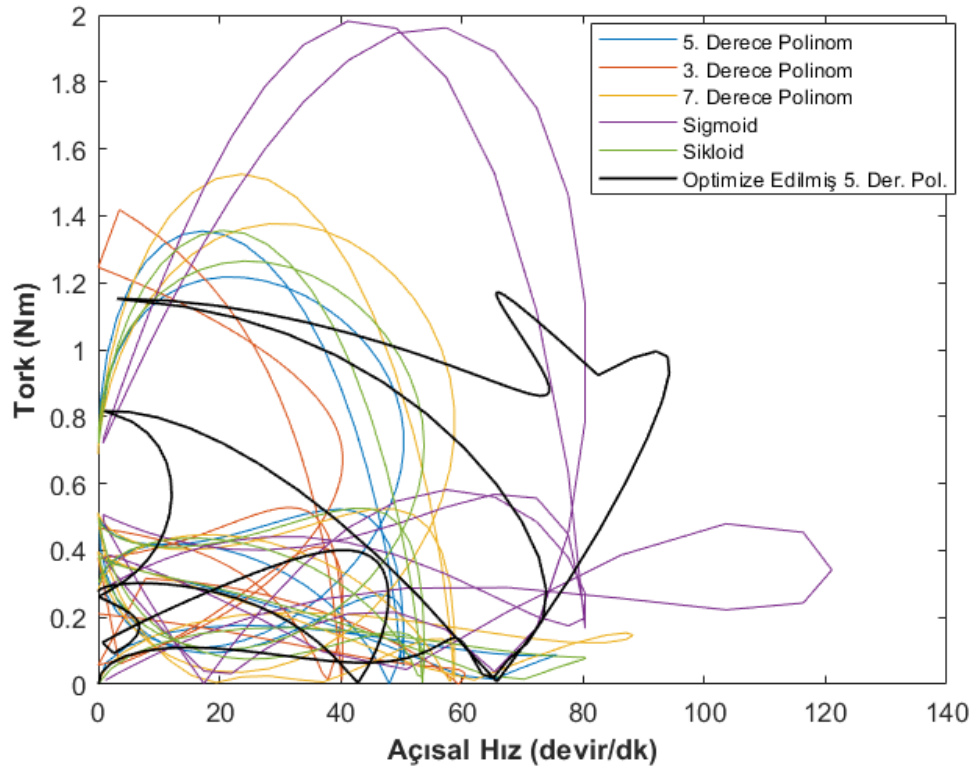
Grafiğe bakıldığında en yüksek tork ve dönüş hızı değerlerinin sigmoid fonksiyonun olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun tork ihtiyacının diğer yöntemlerden daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.21. Üçüncü eklemin karşılaştırmalı tork – dönüş hızı grafiği

Dördüncü eklemin tork - dönüş hızı grafiği Şekil 5.22’de verilmiştir. Şekil 5.22’ye bakıldığında en yüksek tork değerinin beşinci derece polinom için 1,35 Nm, üçüncü derece polinom için 1,42 Nm, yedinci derece polinom için 1,52 Nm, sigmoid fonksiyon için 1,98 Nm, sikloid fonksiyon için 1,36 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 1,17 Nm olduğu görülmektedir. En yüksek dönüş hızı değerlerinin ise beşinci derece polinom için 75,64 devir/dk, üçüncü derece polinom için 60,51 devir/dk, yedinci derece polinom için 88,24 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 121,03 devir/dk, sikloid fonksiyon için 80,39 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 94,20 devir/dk olduğu görülmektedir.

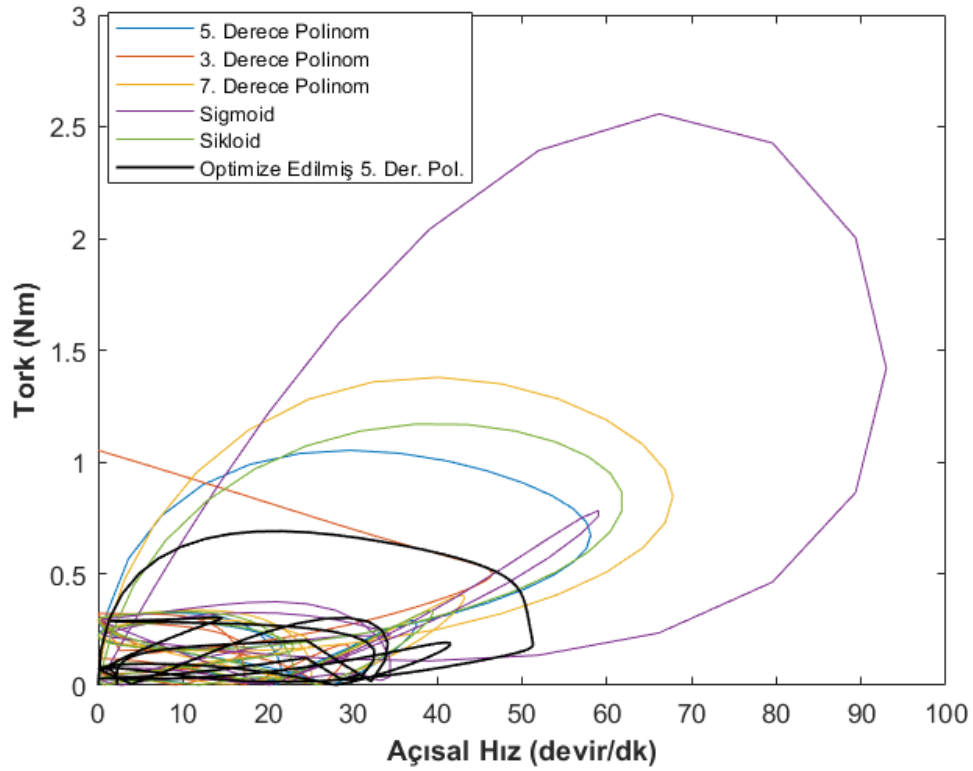
Grafiğe bakıldığında en yüksek tork ve dönüş hızı değerlerinin sigmoid fonksiyonun olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun tork ihtiyacının diğer yöntemlerden daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.22. Dördüncü eklem için karşılaştırılmalı tork – dönüş hızı grafiği

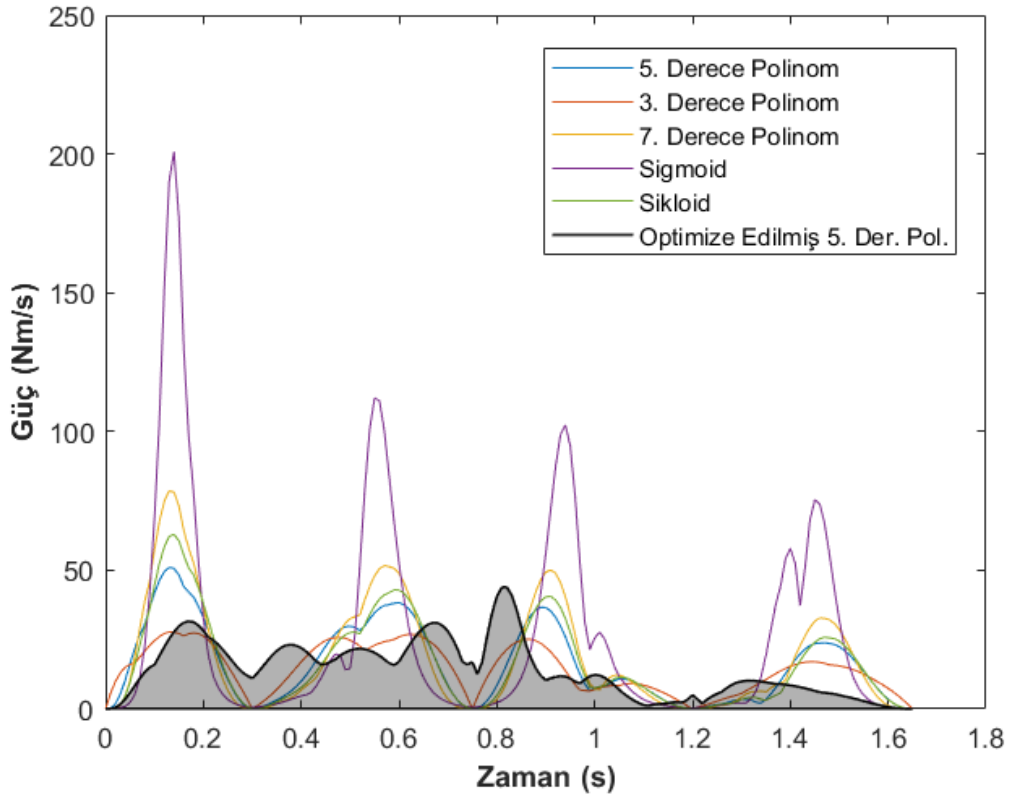
Beşinci eklem için tork - dönüş hızı grafiği Şekil 5.23'te verilmiştir. Şekil 5.23'e bakıldığında en yüksek tork değerinin beşinci derece polinom için 1,05 Nm, üçüncü derece polinom için 1,05 Nm, yedinci derece polinom için 1,38 Nm, sigmoid fonksiyon için 2,56 Nm, sikloid fonksiyon için 1,17 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 0,69 Nm olduğu görülmektedir. En yüksek dönüş hızı değerlerinin ise beşinci derece polinom için 58,11 devir/dk, üçüncü derece polinom için 46,48 devir/dk, yedinci derece polinom için 67,79 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 92,97 devir/dk, sikloid fonksiyon için 61,75 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 51,29 devir/dk olduğu görülmektedir.

Grafiğe bakıldığında en yüksek tork ve dönüş hızı değerlerinin sigmoid fonksiyonun olduğu görülmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece polinomun tork ihtiyacının diğer yöntemlerden daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.23. Beşinci eklem için karşılaştırılmalı tork – dönüş hızı grafiği

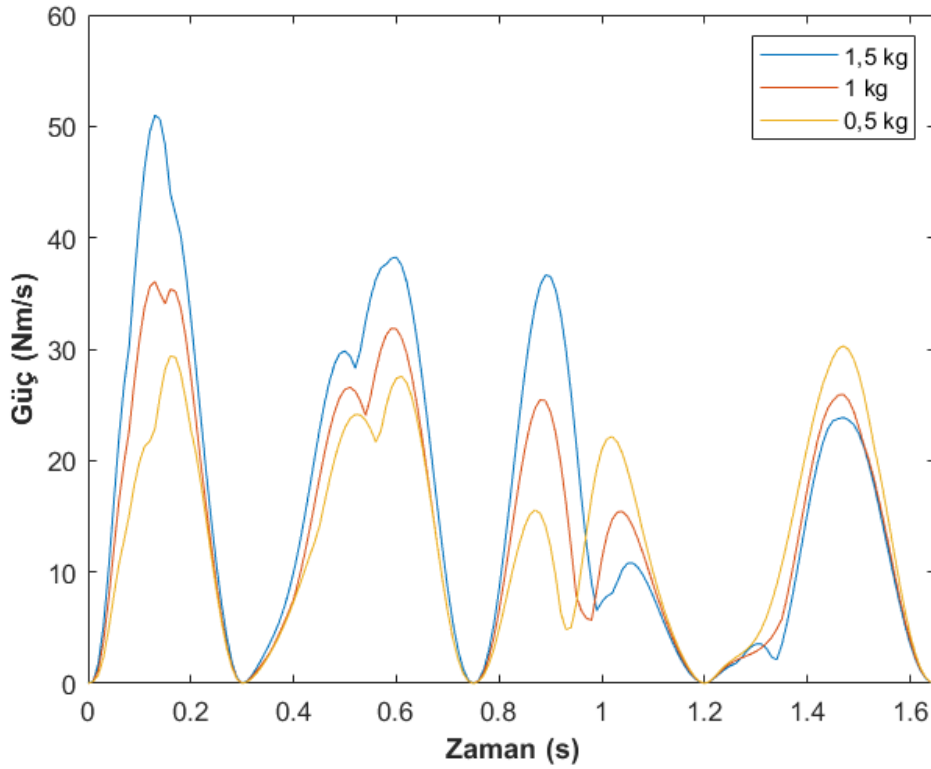
Eklemelerin toplam güç gereksinimi karşılaştırmalı olarak Şekil 5.24'te verilmiştir. Toplam güç grafiği Çizelge 5.1'de verilen toplam enerji tüketimi değerine göre daha detaylı olarak inceleme ve yörünge planlama fonksiyonlarını daha detaylı karşılaştırma imkanı vermektedir. Planlanan hareketin her anındaki güç gereksinimini yani anlık enerji tüketimini görmemizi sağlamaktadır. Grafikte de görüldüğü gibi sigmoid fonksiyon bazı anlarda diğer yöntemlere göre daha az güç gerektirse de tepe değerleri diğerlerine göre daha yüksek güç ihtiyacı oluşturmaktadır. Bu da toplam enerji tüketimini çok fazla yükseltmektedir. Optimize edilmiş beşinci derece yörünge planlama fonksiyonu ise anlık güç gereksinimi yönünden daha dengeli gözükmemektedir. Diğerleri kadar düşük anlık değerler vermese de tepe değerlerinin daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum da ortalamasının diğerlerinden düşük olduğu ve anlık güç gereksinimi dalgalanmalarının olmadığını göstermektedir.



Şekil 5.24. Karşılaştırmalı güç grafiği

Sayısal uygulama bölümünde bu kısma kadar verilen şekiller ve çizelgelerde robot manipülâtörün uç kısmına 1,5 kg'lık yük bağlanarak sonuçlar elde edilmiş ve yörünge planlama fonksiyonları bu eşit koşulda kıyaslanmıştır. Ancak robot manipülâtörlerde enerji tüketiminin farklı yükler bağlandığında ki değişimi de incelenmek istenmiştir. Şekil 5.25'te beşinci derece polinom için farklı yüklerle hareketi yaptığında ki eklemlerin toplam güç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda 0,5 kg, 1 kg ve 1,5 kg'lık yükler kullanılmıştır. En yüksek anlık güç değerlerinin 0,5 kg yük uygulandığında 30,28 Nm/s, 1 kg anlık yük uygulandığında 36,06 Nm/s ve 1,5 kg yük uygulandığında 51,01 Nm/s olduğu görülmektedir.

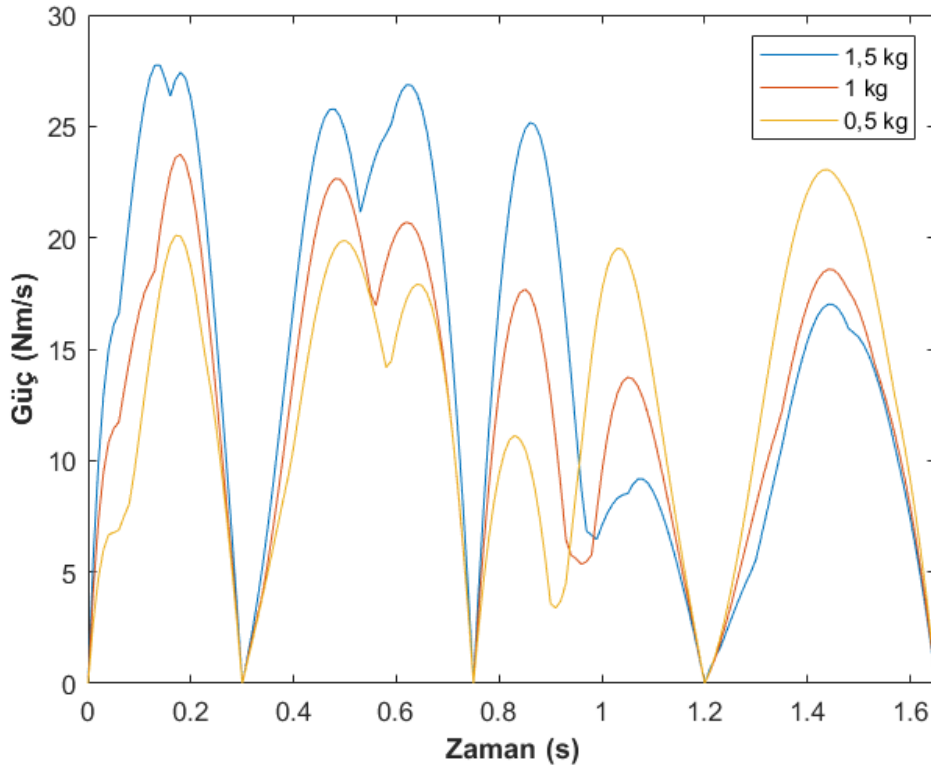
Grafikler incelendiğinde genel olarak robot manipülâtörün uç kısmına bağlanan yük azaldıkça güç gereksiniminin azaldığı görülmektedir. Bazı noktalarda yerçekimi gibi faktörlerin etkisiyle yük, güç gereksinimini azaltsa da bu durum toplam değere bakıldığında sonucu değiştirmemektedir.



Şekil 5.25. Beşinci derece polinom güç - zaman grafiği

Şekil 5.26’da üçüncü derece polinom için farklı yüklerle hareketi yaptığında ki eklemlerin toplam güç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda 0,5 kg, 1 kg ve 1,5 kg’lık yükler kullanılmıştır. En yüksek anlık güç değerlerinin 0,5 kg yük uygulandığında 23,05 Nm/s, 1 kg anlık yük uygulandığında 23,75 Nm/s ve 1,5 kg yük uygulandığında 27,74 Nm/s olduğu görülmektedir.

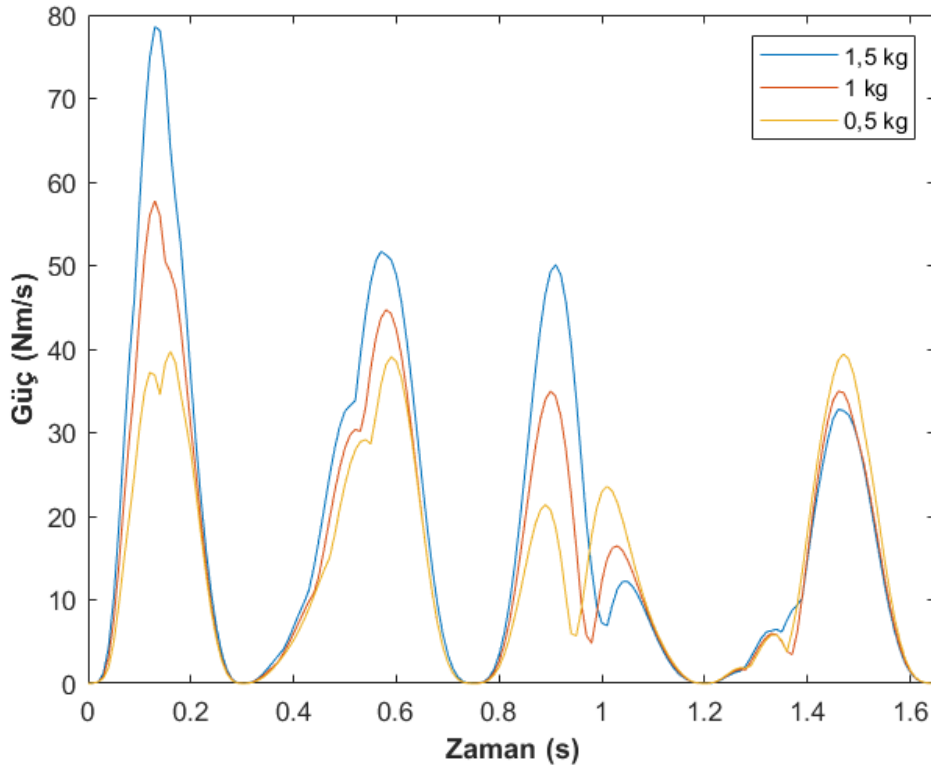
Grafikler incelendiğinde genel olarak robot manipülatörün uç kısmına bağlanan yük azaldıkça güç gereksiniminin azaldığı görülmektedir. Bazı noktalarda yerçekimi gibi faktörlerin etkisiyle yük, güç gereksinimini azaltsa da bu durum toplam değere bakıldığında sonucu değiştirmemektedir.



Şekil 5.26. Üçüncü derece polinom güç - zaman grafiği

Şekil 5.27’de yedinci derece polinom için farklı yüklerle hareketi yaptığında ki eklemlerin toplam güç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda 0,5 kg, 1 kg ve 1,5 kg’lık yükler kullanılmıştır. En yüksek anlık güç değerlerinin 0,5 kg yük uygulandığında 39,74 Nm/s, 1 kg anlık yük uygulandığında 57,75 Nm/s ve 1,5 kg yük uygulandığında 78,61 Nm/s olduğu görülmektedir.

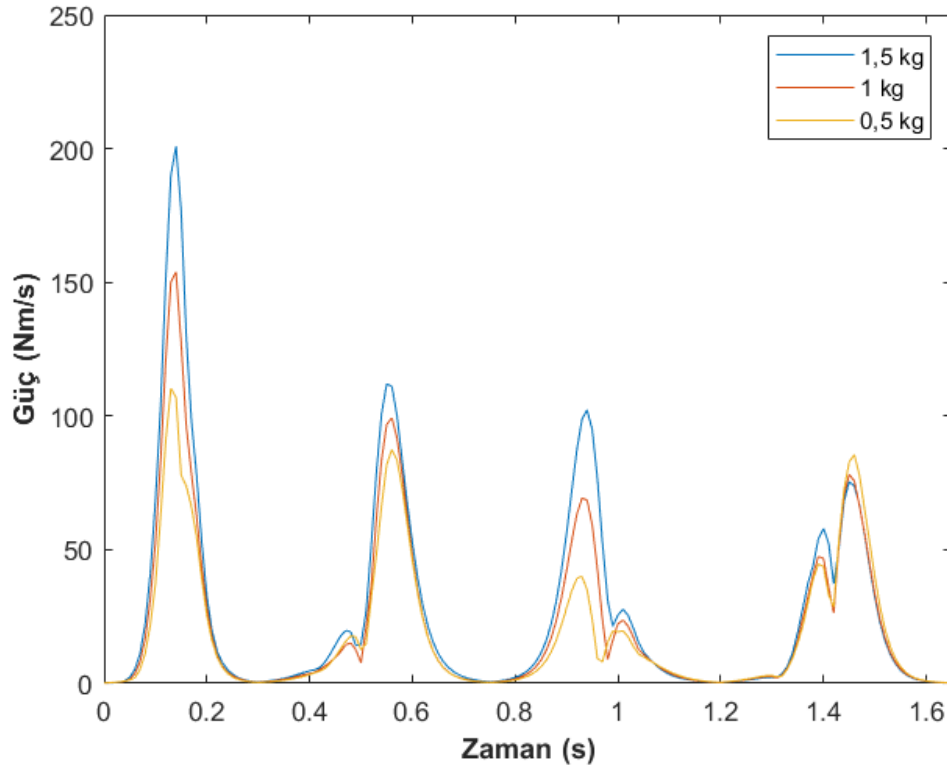
Grafikler incelendiğinde genel olarak robot manipülâtörün uç kısmına bağlanan yük azaldıkça güç gereksiniminin azaldığı görülmektedir. Bazı noktalarda yerçekimi gibi faktörlerin etkisiyle yük, güç gereksinimini azaltsa da bu durum toplam değere bakıldığında sonucu değiştirmemektedir.



Şekil 5.27. Yedinci derece polinom güç - zaman grafiği

Şekil 5.28’de sigmoid fonksiyon için farklı yüklerle hareketi yaptığında ki eklemlerin toplam güç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda 0,5 kg, 1 kg ve 1,5 kg’lık yükler kullanılmıştır. En yüksek anlık güç değerlerinin 0,5 kg yük uygulandığında 110,30 Nm/s, 1 kg anlık yük uygulandığında 153,88 Nm/s ve 1,5 kg yük uygulandığında 200,82 Nm/s olduğu görülmektedir.

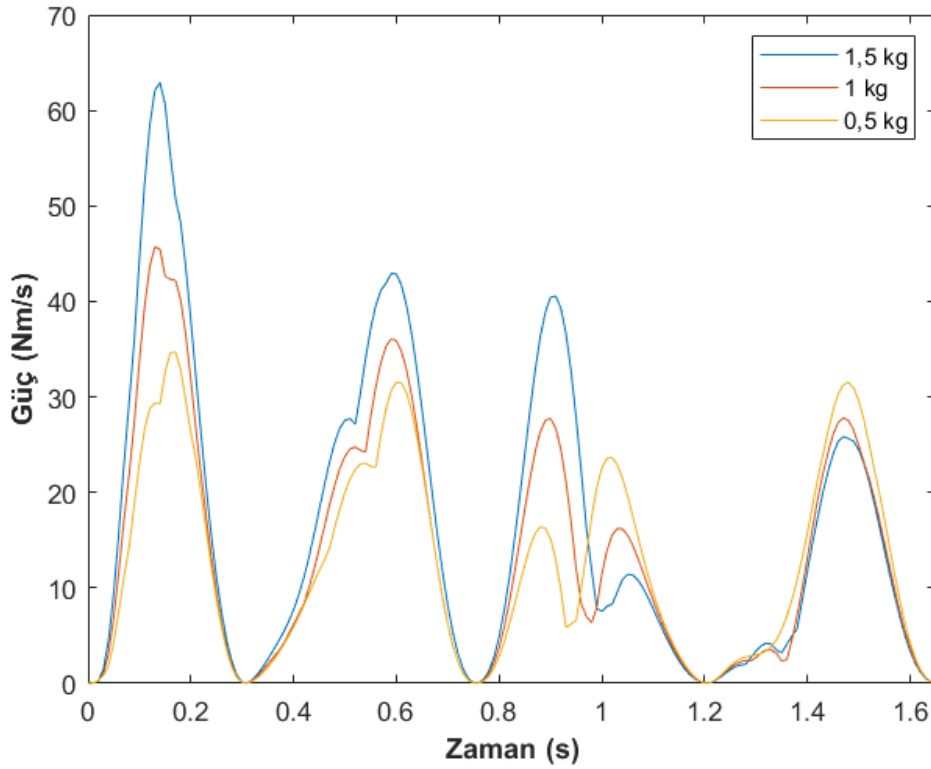
Grafikler incelendiğinde genel olarak robot manipülatörün uç kısmına bağlanan yük azaldıkça güç gereksiniminin azaldığı görülmektedir. Bazı noktalarda yerçekimi gibi faktörlerin etkisiyle yük, güç gereksinimini azaltsa da bu durum toplam değere bakıldığında sonucu değiştirmemektedir.



Şekil 5.28. Sigmoid güç - zaman grafiği

Şekil 5.29'da sikloid fonksiyon için farklı yüklerle hareketi yaptığında ki eklemlerin toplam güç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda 0,5 kg, 1 kg ve 1,5 kg'lık yükler kullanılmıştır. En yüksek anlık güç değerlerinin 0,5 kg yük uygulandığında 34,68 Nm/s, 1 kg anlık yük uygulandığında 45,73 Nm/s ve 1,5 kg yük uygulandığında 62,91 Nm/s olduğu görülmektedir.

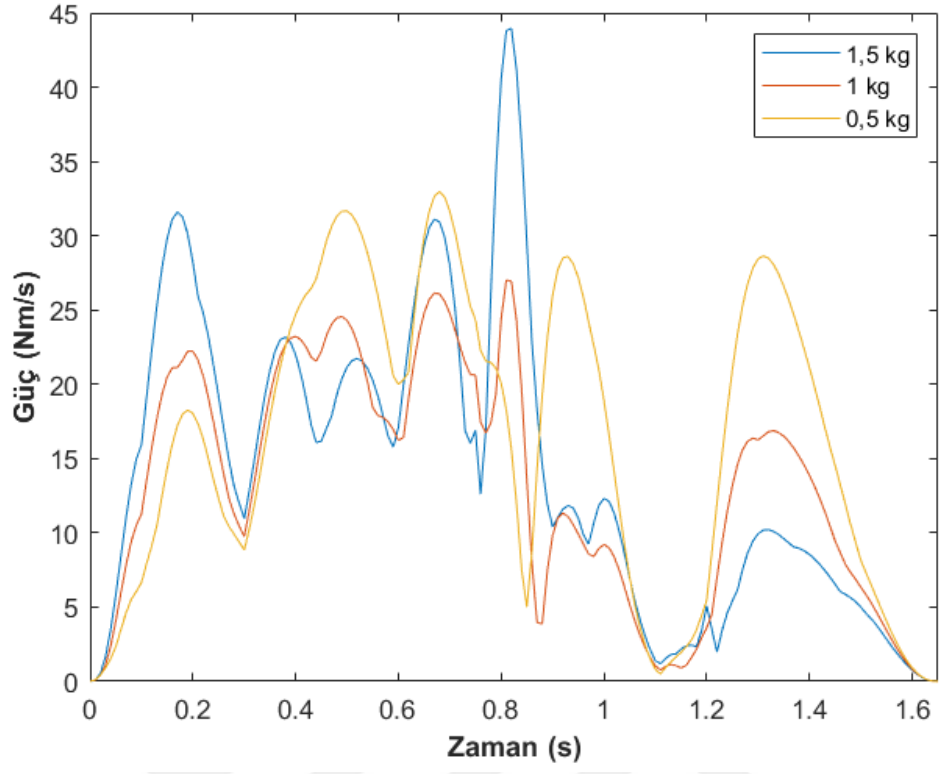
Grafikler incelendiğinde genel olarak robot manipülatörün uç kısmına bağlanan yük azaldıkça güç gereksiniminin azaldığı görülmektedir. Bazı noktalarda yerçekimi gibi faktörlerin etkisiyle yük, güç gereksinimini azaltsa da bu durum toplam değere bakıldığında sonucu değiştirmemektedir.



Şekil 5.29. Sikloid güç - zaman grafiği

Şekil 5.30'da optimize edilmiş beşinci derece polinom için farklı yüklerle hareketi yaptığında ki eklemlerin toplam güç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda 0,5 kg, 1 kg ve 1,5 kg'lık yükler kullanılmıştır. En yüksek anlık güç değerlerinin 0,5 kg yük uygulandığında 27,025 Nm/s, 1 kg anlık yük uygulandığında 32,97 Nm/s ve 1,5 kg yük uygulandığında 43,95 Nm/s olduğu görülmektedir.

Optimize edilmiş beşinci derece polinom 1,5 kg yükün bağlı olduğu duruma göre optimize edilmiştir. Dolayısıyla grafikte ki yüke bağlı güç gereksiniminin diğer yöntemlere göre farklı değiştiği görülmektedir. Robot manipülatöre 1 kg ve 1,5 kg'lık yüklerin bağlı olduğu durumlar daha birbirine yakın güç gereksinimi oluşturmuştur. En iyi sonucu 1 kg yükün bağlı olduğu durum verirken en yüksek güç gereksinimi 0,5 kg'lık yük bağlı iken elde edilmiştir.



Şekil 5. 30 Optimize edilmiş beşinci derece polinpm güç - zaman grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, altı serbestlik dereceli ABB IRB 1010 robot manipülatör üzerinde optimum enerji tüketimi sağlamak amacıyla yörünge planlaması yapılmıştır. Çalışmanın ilk adımı olarak, D-H yöntemi kullanılarak robotun eklem değişkenleri belirlenmiştir. Bu değişkenlerin belirlenmesi, robotun geometrik yapısını ve eklemler arasındaki ilişkileri matematiksel olarak tanımlamayı sağlamıştır. Daha sonra, bu değişkenler kullanılarak robotun ileri ve ters kinematik hesaplamaları yapılmıştır. Yörünge planlama aşamasında ise farklı yörünge planlama fonksiyonları kullanılarak robotun başlangıç konumu, üç ara konum ve bitiş konumu üzerinde hareket etmesi sağlanmıştır. Bu fonksiyonlar kullanılarak robotun belirli bir hareketi gerçekleştirmesi sırasında eklemlerde oluşacak tork gereksinimleri ve enerji tüketimleri dinamik hesaplamalarla belirlenmiştir. Özellikle beşinci derece polinom gibi karmaşık yörünge planlama fonksiyonu seçilerek bu fonksiyon üzerinde enerji tüketimini azaltmak için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon için uç işlevcinin geçeceği beş konumdan ara konum olan üç tanesindeki hız ve ivme değerleri değişken olarak Arı Algoritmasına tanıtılmıştır. Bu değerleri verilen aralıkta değiştirerek enerji tüketimini en aza indirecek şekilde optimize etmek için iteratif hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Durdurma kriteri, eklemlerin toplam enerji tüketimi 23,50 joule'ün altına inmesi olarak belirlenmiştir. Bu değer en düşük enerji tüketimi olan üçüncü derece polinom yörünge planlamasının enerji tüketiminden daha düşük bir değer elde etmek amaçlanarak belirlenmiştir. Arı Algoritması 2861 iterasyon gerçekleştirerek optimizasyon işlemini başarıyla tamamlamıştır.

Optimizasyon sonucu elde edilen ve diğer beş yörünge planlaması sonucu elde edilen enerji tüketim değerleri karşılaştırıldığında en fazla enerji tüketiminin sigmoid yörünge planlamasında olduğu görülmüştür. Yörünge planlama yöntemlerinin toplam enerji tüketimleri aşağıdaki gibidir:

- Sigmoid yörünge planlamasının toplam enerji tüketimi 44,24 joule'dür.
- Yedinci derece polinom yörünge planlamasının toplam enerji tüketimi 30,24 joule'dür.
- Sikloid yörünge planlamasının toplam enerji tüketimi 27,31 joule'dür.
- Beşinci derece polinom yörünge planlamasının toplam enerji tüketimi 26,53 joule'dür.

- Üçüncü derece polinom yörünge planlamasının toplam enerji tüketimi 23,76 joule'dür.
- Optimize edilmiş beşinci derece polinom yörünge planlamasının toplam enerji tüketimi 23,49 joule'dür.

Sigmoid yörünge planlamasına göre yedinci derece polinom yörünge planlamasının %31,64, sikloid yörünge planlamasının %38,26, beşinci derece polinom yörünge planlamasının %40,03, üçüncü derece polinom yörünge planlamasının %46,30 ve optimize edilmiş beşinci derece polinom yörünge planlamasının %47,26 daha az enerji tükettiği tespit edilmiştir.

Sayısal uygulamalar kısmında verilen tork – dönüş hızı grafikleri incelendiğinde robot manipülatörün eklemlerini hareket ettirecek motor seçiminin de kullanılacak yörünge planlama fonksiyonuna göre değişiklik gösterdiği görülmüştür. Yörünge planlama yöntemlerinin en yüksek tork değerleri aşağıdaki gibidir:

- **Birinci eklem:** En yüksek tork değeri beşinci derece polinom için 9,02 Nm, üçüncü derece polinom için 6,68 Nm, yedinci derece polinom için 11,44 Nm, sigmoid fonksiyon için 19,58 Nm, sikloid fonksiyon için 10,08 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 6,59 Nm olarak hesaplanmıştır.
- **İkinci eklem:** En yüksek tork değeri beşinci derece polinom için 7,76 Nm, üçüncü derece polinom için 7,69 Nm, yedinci derece polinom için 10,63 Nm, sigmoid fonksiyon için 18,78 Nm, sikloid fonksiyon için 8,38 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 8,62 Nm olarak hesaplanmıştır.
- **Üçüncü eklem:** En yüksek tork değeri beşinci derece polinom için 8,84 Nm, üçüncü derece polinom için 8,46 Nm, yedinci derece polinom için 11,58 Nm, sigmoid fonksiyon için 20,67 Nm, sikloid fonksiyon için 9,89 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 6,14 Nm olarak hesaplanmıştır.
- **Dördüncü eklem:** En yüksek tork değeri beşinci derece polinom için 1,35 Nm, üçüncü derece polinom için 1,42 Nm, yedinci derece polinom için 1,52 Nm, sigmoid fonksiyon için 1,98 Nm, sikloid fonksiyon için 1,36 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 1,17 Nm olarak hesaplanmıştır.

- **Beşinci eklem:** En yüksek tork değeri beşinci derece polinom için 1,05 Nm, üçüncü derece polinom için 1,05 Nm, yedinci derece polinom için 1,38 Nm, sigmoid fonksiyon için 2,56 Nm, sikloid fonksiyon için 1,17 Nm ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 0,69 Nm olarak hesaplanmıştır.

Yörünge planlama yöntemlerinin en yüksek dönüş hızı değerleri aşağıdaki gibidir:

- **Birinci eklem:** En yüksek dönüş hızı değeri beşinci derece polinom için 31,38 devir/dk, üçüncü derece polinom için 25,11 devir/dk, yedinci derece polinom için 36,61 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 50,21 devir/dk, sikloid fonksiyon için 33,35 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 42,49 devir/dk olarak hesaplanmıştır.
- **İkinci eklem:** En yüksek dönüş hızı değeri beşinci derece polinom için 49,48 devir/dk, üçüncü derece polinom için 39,60 devir/dk, yedinci derece polinom için 57,70 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 78,90 devir/dk, sikloid fonksiyon için 52,81 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 47,56 devir/dk olarak hesaplanmıştır.
- **Üçüncü eklem:** En yüksek dönüş hızı değeri beşinci derece polinom için 61,94 devir/dk, üçüncü derece polinom için 49,57 devir/dk, yedinci derece polinom için 72,23 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 98,76 devir/dk, sikloid fonksiyon için 66,11 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 84,78 devir/dk olarak hesaplanmıştır.
- **Dördüncü eklem:** En yüksek dönüş hızı değeri beşinci derece polinom için 75,64 devir/dk, üçüncü derece polinom için 60,51 devir/dk, yedinci derece polinom için 88,24 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 121,03 devir/dk, sikloid fonksiyon için 80,39 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 94,20 devir/dk olarak hesaplanmıştır.
- **Beşinci eklem:** En yüksek dönüş hızı değeri beşinci derece polinom için 58,11 devir/dk, üçüncü derece polinom için 46,48 devir/dk, yedinci derece polinom için 67,79 devir/dk, sigmoid fonksiyon için 92,97 devir/dk, sikloid fonksiyon için 61,75 devir/dk ve optimize edilmiş beşinci derece polinom için 51,29 devir/dk olduğu görülmektedir.

Ayrıca uç işlevciye bağlanan yükün de enerji tüketimi açısından etkisi açıkça görülmektedir. Bağlanan yükün ağırlığı artırıldıkça yer çekimi etkisiyle bölgesel olarak değişiklikler meydana gelse de toplam enerji tüketimi artmaktadır.

Yörünge planlamada kullanılan fonksiyonun enerji tüketimi için ne kadar önemli olduğu sonuçlar incelendiğinde görülmüştür. Uç işlevcinin hareketine grafik üzerinde baktığımızda çok benzer olduğu görülse de fonksiyonların eklem hız ve ivmeleri üzerindeki değişikliği enerji tüketiminin değişmesine sebep olmaktadır. Arı Algoritması da ara konumlardaki hız ve ivme değerlerini değiştirerek enerji tüketimini başarılı bir şekilde azaltmıştır. Arı Algoritmasında kullanılan ara konumlardaki hız ve ivme için verilen aralığın daraltılması algoritmanın daha hızlı sonuç vermesini sağlayacaktır. Ayrıca iterasyon sayısının artırılması enerji tüketimini daha fazla düşürmeye olanak sağlayacaktır.

Yörünge planlama fonksiyonlarının enerji tüketimini önemli miktarda değiştirebildiği görülmüştür. Arı Algoritması kullanılarak yörünge planlama fonksiyonunu optimize etmek enerji tüketimini düşürmekte başarılı olmuştur.

KAYNAKLAR

- ABB, 2022a, *IRB 1010* [online], <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108467A3570&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, [Ziyaret Tarihi: 20 Ocak 2022a].
- ABB, 2022b, *Product Specification IRB 1010* [online], <https://library.e.abb.com/public/ea1e0c68e82d40c1902e5ae5f99770e4/3HAC081966%20PS%20IRB%201010-en.pdf?xsign=YN/bBpoBzBciM6kUb2w1sH1aV6WFog1lhDoiDeTIjRZUU2oe/HiQ1/sHqRD5NQeA>, [Ziyaret Tarihi: 13 Şubat 2022b].
- Bailon, W. P., Cardiel, E. B., Campos, I. J., and Paz, A. R., 2010, Mechanical energy optimization in trajectory planning for six DOF robot manipulators based on eighth-degree polynomial functions and a genetic algorithm, 2010 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control, 446-451.
- Bingöl, Z., ve Küçük, S., 2017, Robot dinamiği ve Kontrolü, *Umuttepe Yayınları*, Kocaeli.
- Bingöl, Z., ve Küçük, S., 2021, Robot kinematiği, *Umuttepe Yayınları*, Kocaeli.
- Chemnitz, M., Schreck, G., and Krüger, J., 2011, Analyzing energy consumption of industrial robots, ETFA2011, 1-4.
- Das, S. D., Bain, V., and Rakshit, P., 2018, Energy optimized robot arm path planning using differential evolution in dynamic environment, 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 1267-1272.
- Duan, Y., and Zhang, T., 2022, Energy optimal trajectory algorithm for a robotic manipulator, 2022 International Conference on Artificial Intelligence and Autonomous Robot Systems (AIARS), 187-191.
- Erdemir, A., and Kalyoncu, M., 2023a, Comparison of energy consumptions of input trajectory functions in impedance controlled 2r planar robot manipulator, International Euroasia Congress on Scientific Researches and Recent Trends, 10, 312-325.
- Erdemir, A., and Kalyoncu, M., 2023b, Energy consumption evaluation of 3 dof impedance-controlled robots using sinusoidal and sigmoid input trajectory functions, Tokyo 7th International Innovative Studies & Contemporary Scientific Research Congress, 365-379.
- Jiang, W., Ye, G. C., Zou, D., Zhang, A., Zuo, G., Yan, Y., and Li, H., 2021, Dynamic model based energy consumption optimal motion planning for high-voltage transmission line mobile robot manipulator, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 235(1), 93-105.

- Li, X., Lan, Y., Jiang, P., Cao, H., and Zhou, J., 2021, An efficient computation for energy optimization of robot trajectory, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(11), 11436-11446.
- Mahdavian, M., Shariat-Panahi, M., Yousefi-Koma, A., and Ghasemi-Toudeshki, A., 2015, Optimal trajectory generation for energy consumption minimization and moving obstacle avoidance of a 4DOF robot arm, 2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), 353-358.
- Mohammed, A., Schmidt, B., Wang, L., and Gao, L., 2014, Minimizing energy consumption for robot arm movement, *Procedia Cirp*, 25, 400-405.
- Nilakantan, J. M., Huang, G. Q., and Ponnambalam, S. G., 2015, An investigation on minimizing cycle time and total energy consumption in robotic assembly line systems, *Journal of Cleaner Production*, 90, 311-325.
- Pham, D., Castellani, M., and Fahmy, A., 2008, Learning the inverse kinematics of a robot manipulator using the bees algorithm, 2008 6th IEEE international conference on industrial informatics, 493-498.
- Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., and Zaidi, M., 2006, The bees algorithm—a novel tool for complex optimisation problems, In *Intelligent production machines and systems* (pp. 454-459). Elsevier.
- Sengupta, A., Chakraborti, T., Konar, A., and Nagar, A., 2011, Energy efficient trajectory planning by a robot arm using invasive weed optimization technique, 2011 Third world congress on nature and biologically inspired computing, 311-316.
- Stephan, R., Mercorelli, P., and Belda, K., 2021, Energy optimization in motion planning of a two-link manipulator using Bernstein polynomials, 2021 22nd international carpathian control conference (ICCC), 1-6.
- Stuhlenmiller, F., Clever, D., Rinderknecht, S., Lutter, M., and Peters, J., 2021, Trajectory optimization of energy consumption and expected service life of a robotic system, 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 842-847.
- Tonbul, T., ve SARITAŞ, M., 2013, Beş eksenli bir edubot robot kolunda ters kinematik hesaplamalar ve yörünge planlaması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(1).
- Uzuner, S., Akkuş, N., ve Metin, T., 2017, 5 eksenli manipulatörün eklem uzayında yörünge planlaması, *Politeknik Dergisi*, 20(1), 151-157.
- Yin, S., Ji, W., and Wang, L., 2019, A machine learning based energy efficient trajectory planning approach for industrial robots, *Procedia Cirp*, 81, 429-434.
- Zhang, X., and Ming, Z., 2019, Trajectory planning and optimization for a Par4 parallel robot based on energy consumption, *Applied Sciences*, 9(13), 2770.