

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA KOL GEOMETRİK PARAMETRELERİNİN
ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ**

AHMET ERDEM ÖNER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ TAMER KEPCELER**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA KOL GEOMETRİK PARAMETRELERİNİN
ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ

Ahmet Erdem ÖNER tarafından hazırlanan tez çalışması 31.10.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Tamer KEPCELER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Tamer KEPCELER
Yıldız Teknik Üniversitesi



Doç. Dr. Cihan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Hikmet KOCABAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamı gerçekleştirmem süresince hafta sonlarını çalışmalarımıza ayıran, fikir ve önerileriyle yanımda olan, yapıcı eleştirileriyle bana yol gösteren, tecrübelerinden faydalandığım değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tamer KEPCELER'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarımı gerçekleştirmem konusunda beni teşvik ederek destekleri ile yanımda olan Toyotetsu Otomotiv A.Ş. çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamızda referans olarak kullandığımız, tıkandığımız noktalarda başvurduğumuz doktora çalışmasından ötürü Prof. Dr. Özgür TURHAN'a teşekkürlerini sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Özden AĞRA başta olmak üzere bütün hocalarımıza teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her anında bana destek olan, tüm olumsuz koşullarda anlayışları ile beni yüreklendiren, motivasyonumun daima yüksek olmasını sağlayan çok kıymetli annem, babam, ablalarım ve biricik eşime sonsuz saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Ekim, 2019

Ahmet Erdem ÖNER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	Vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	6

BÖLÜM 2

ROBOTLAR.....	7
2.1 Endüstriyel Robotların Tarihsel Gelişimi	9
2.2 Klasik Endüstriyel Robot Türleri Ve Kullanım Yerleri	16
2.2.1 Kartezyen robotlar	16
2.2.2 Silindirik (Cylindrical) robotlar	16
2.2.3 Küresel (Spherical) Robotlar	17
2.2.4 Scara Robotlar	17
2.2.5 Mafsallı (Vertical articulated) Robotlar	18
2.3 Yeni Nesil Endüstriyel Robotlar	19
2.3.1 Mobil robotlar	19
2.3.1.1 İnsansı robotlar	19
2.3.1.2 Çoklu robotlar	19
2.3.1.3 Sürü robotları	19
2.3.1.4 Mikro-Nano robotlar	20
2.3.1.5 Biyolojik-ilhamlı robotlar	20

2.3.1.6	İşbirlikçi ve etkileşimli robotlar	20
2.3.2	Haptik sistemler	20
2.4	Robotlarda Enerji Harcaması	21
BÖLÜM 3		
İŞBİRLİKÇİ ROBOTLAR		24
3.1	İnsan-Robot İşbirliğinde Güvenlik	23
3.1.1	AB Direktifleri	23
3.1.2	Genel Gösterge Standartları	24
3.1.3	Robot Standartları	24
3.1.4	Güvenlikle ilgili kontrol sistemi performansı	24
3.1.5	Robot Durdurma İşlevleri	25
3.1.6	Hız Kontrolü	25
3.1.7	Ortak çalışma gereksinimleri	25
3.1.8	Kontrol sistemi ile güç ve kuvvet sınırlaması	25
3.1.9	Sınırlı Robot Hareketi	25
3.1.10	Minimum ayırma mesafesinin belirlenmesi	26
3.1.11	Çarpışma tespiti	26
3.1.12	Potansiyel çarpışmayı önleme	26
3.1.13	Teknolojik ve ergonomik gereklilikler	26
BÖLÜM 4		
ROBOT KİNEMATİĞİ		27
4.1	İleri (Düz) Kinematik	28
4.1.1	Denavit-Hartenberg Yöntemi	29
4.1.2	Koordinat Sistemlerinin Eklemlere Yerleştirilmesi	31
4.1.3	Ters (Inverse) Kinematik	33
4.1.4	Eklem Uzayında Yörünge Planlaması	34
4.1.5	Yüksek Dereceli Polinomlar	37
BÖLÜM 5		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		38
5.1	Kullanılan Bilgisayar Programları	38
5.2	DeneySEL Yöntem	38
5.2.1	Homojen Dönüşüm Matrisi Yöntemi ile Kinematik Denklemlerin Çıkarılması	39
5.2.2	Yörünge Planlaması	46
5.2.3	Yörünge Planlamaları için Robot Kolunun Enerji Harcaması	47
5.3	Robot Kol Oranları Değişiminin Enerji Sarfiyatına Etkisinin İncelenmesi ..	53
5.4	Robota Uç Kütle İlave Edildiğinde Kol Oranları Değişiminin Enerji Sarfiyatına Etkisinin İncelenmesi	61
5.5	Değişken Kesitli Kol Kütlelerinin Enerji Sarfiyatına Etkisi	67
SONUÇ VE ÖNERİLER		72
KAYNAKLAR		79

ÖZGEÇMİŞ	83
----------------	----

SİMGE LİSTESİ

a_{i-1}	2 komşu eksen arasındaki uzuv uzunluğu,
d_i	Üst üste çakışan eksenler arasındaki eklem kayması (kaçıklığı),
h_1	1. Eksen ile 2. Eksen arasındaki yükseklik farkı
L_1	2. Eksen kol boyu
L_2	3. Eksen kol boyu
m	1. Eksene etkiyen robotun ve iş parçasının kütlesi
m_1	2. Eksen kütlesi
m_2	3. Eksen kütlesi
M_{kuttle}	4-5-6. Eksen mafsallarının kütleleri ile iş parçasının kütlesi
P^{i-1}	Konum (yer değiştirme) vektörü,
T_{i-1}^i	(i-1). Eksene göre Dönüşüm matrisi,
$[T_T]_{i-1}^i$	(i-1). Eksene göre Öteleme matrisi,
$[T_R]_{i-1}^i$	(i-1). Eksene göre Dönme matrisi,
T	Kinetik Enerji
U	Potansiyel Enerji
V_p	Çizgisel hız
α_{i-1}	2 komşu eksen arasındaki eksen açısı,
θ_{i-1}	2 komşu uzuv arasındaki eklem açısı,
θ_1	1. Eksen dönme açısı
θ_2	2. Eksen dönme açısı,
θ_3	3. Eksen dönme açısı

KISALTMA LİSTESİ

Cobot	Collaborative Robot
PUMA	Programmable Universal Machine for Assembly
SCARA	Selective Compliant Articulated Robot for Assembly
SSRMS	Space Station Remote Manipulator System
TCP	Tool Center Point

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Abdest için kullanılan tavus teknesi, el yıkama otomatı..... 10
Şekil 2.2	UNIMATE, ilk endüstriyel robot 11
Şekil 2.3	Tentacle arm 11
Şekil 2.4	Stanford kolunun ilk tasarımı 12
Şekil 2.5	Cincinnati Milacron T3 12
Şekil 2.6	Silver arm 13
Şekil 2.7	Programlanabilir evrensel manipülasyon kolu (PUMA)..... 13
Şekil 2.8	Seçici uyumlu mafsallı robot (SCARA)14
Şekil 2.9	Honda'nın yeni nesil insansı robotları olan ASIMO15
Şekil 2.10	Uzay istasyonu uzaktan manipülatör sistemi (SSRMS) 15
Şekil 2.11	Motoman ve Kuka'nın hafif robot (LWR) uygulamaları 15
Şekil 2.12	Kartezyen koordinatlı robot kolu 16
Şekil 2.13	Silindirik robot kolu 17
Şekil 2.14	Küresel robot kolu..... 17
Şekil 2.15	SCARA robot kolu 18
Şekil 2.16	Mafsallı robot kolu 18
Şekil 3.1	Robot ve insan ortak görev ve çalışma alanı..... 22
Şekil 4.1	Prizmatik ve dönel eklemler 27
Şekil 4.2	İleri (Düz) ve ters kinematik 28
Şekil 4.3	Dönme eksenlerinin belirlenmesi 29
Şekil 4.4	Dönme eksenlerine x, y ve z eksenlerinin yerleştirilmesi 30
Şekil 4.5	a_{i-1} uzuv uzunluğu..... 30
Şekil 4.6	d_i eklem kaçıklığı 30
Şekil 4.7	α_{i-1} eksen açısı 31
Şekil 4.8	θ_i eklem açısı..... 31
Şekil 4.9	Zamana bağlı açı, hız ve ivme değişimleri 35
Şekil 4.10	Ara nokta içeren yörünge 36
Şekil 5.1	UNIVERSAL firmasının UR10 tipi işbirlikçi robotu 39
Şekil 5.2	6 eksen için eklemlere koordinat sisteminin yerleştirilmesi..... 40
Şekil 5.3	3 eksen için eklemlere koordinat sisteminin yerleştirilmesi..... 40
Şekil 5.4	Robot eksen açıları..... 46
Şekil 5.5	1. Konum enerji değişimi 54
Şekil 5.6	2. Konum enerji değişimi 55
Şekil 5.7	3. Konum enerji değişimi 56
Şekil 5.8	4. Konum enerji değişimi 57

Şekil 5.9	Örnek bir robot çalışma alanı.....	60
Şekil 5.10	0,45-0,55 Kol oranı enerji değişim değerleri.....	60
Şekil 5.11	1. Konum enerji değişim değerleri (uç kütleli).....	62
Şekil 5.12	2. Konum enerji değişim değerleri (uç kütleli).....	63
Şekil 5.13	3. Konum enerji değişim değerleri (uç kütleli).....	64
Şekil 5.14	4. Konum enerji değişim değerleri (uç kütleli).....	65
Şekil 5.15	Uç kütle değişiminin enerji sarfiyatındaki değişime etkisi.....	67
Şekil 5.16	$D_1^2 / D_2^2 = 3$ oranı enerji sarfiyat grafiği	68
Şekil 5.17	$D_1^2 / D_2^2 = 1$ oranı enerji sarfiyat grafiği	69
Şekil 5.18	$D_1^2 / D_2^2 = 0,33$ oranı enerji sarfiyat grafiği	70
Şekil 5.19	M=5 kg. uç kütleline göre çap oranları değişiminin enerji sarfiyatına etkisi grafiği.....	71

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 İmalat san çalışan 10.000 kişi başına düşen end. Robot sayısı.....	9
Çizelge 4.1 Denavit-Hartenberg değişkenleri.....	32
Çizelge 5.1 1 numaralı yörünge planlaması.....	46
Çizelge 5.2 2 numaralı yörünge planlaması.....	47
Çizelge 5.3 3 numaralı yörünge planlaması.....	47
Çizelge 5.4 4 numaralı yörünge planlaması.....	47
Çizelge 5.5 Robot kol uzunluk oranları ve ağırlıkları.....	53
Çizelge 5.6 Robot kol konumları.....	54
Çizelge 5.7 1. konum değerleri.....	55
Çizelge 5.8 2. konum değerleri.....	56
Çizelge 5.9 3. konum değerleri.....	57
Çizelge 5.10 4. konum değerleri.....	58
Çizelge 5.11 Endüstride kullanılan robot kol oranları.....	59
Çizelge 5.12 Uç kütleli robot kol konumları.....	61
Çizelge 5.13 1. Konum değerleri (uç kütleli).....	62
Çizelge 5.14 2. Konum değerleri (uç kütleli).....	63
Çizelge 5.15 3. Konum değerleri (uç kütleli).....	65
Çizelge 5.16 4. Konum değerleri (uç kütleli).....	66
Çizelge 5.17 Uç kütle değişiminin enerji sarfiyatındaki değişimi.....	67
Çizelge 5.18 Robot kolu çap oranları ve ağırlıkları.....	68
Çizelge 5.19 $D_1^2 / D_2^2 = 3$ oranı enerji sarfiyat değerleri.....	69
Çizelge 5.20 $D_1^2 / D_2^2 = 1$ oranı enerji sarfiyat değerleri.....	69
Çizelge 5.21 $D_1^2 / D_2^2 = 0,33$ oranı enerji sarfiyat değerleri.....	70
Çizelge 5.22 Çap oranlarına göre enerji sarfiyat değerleri.....	70
Çizelge 5.23 M=5 kg. uç kütlesine göre çap oranları değ. enerji sarf. değerleri.....	71

ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA KOL GEOMETRİK PARAMETRELERİNİN ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ

Ahmet Erdem ÖNER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Tamer KEPCELER

Endüstriyel robotlar yaklaşık yarım asırdır üretimde kullanılmakta ve Ürün Kalitesi, Üretim Verimliliği konularında insanlara göre işletmelere büyük kazançlar sağlamakta, bu sayede üretim maliyetlerini aşağı çekmektedir. Gelişen teknoloji ve Endüstri 4.0 kavramı ile birlikte işletmelerde insanlarla birlikte çalışacak robotlara ihtiyaç duyulması “İşbirlikçi Robotlar”ı ortaya çıkarmış, gerek kurulum kolaylığı gerekse de daha az emniyet ekipmanı ve yer ihtiyacı nedeniyle endüstride kullanım oranları artmıştır. Çalışmamızda Universal firmasının 10 kg. taşıma kapasiteli UR10 model İşbirlikçi Robotu kullanılarak kol geometrik parametrelerinin enerji tüketimine etkileri araştırılmıştır. İşlem kolaylığı açısından 6 eksenli UR10 model İşbirlikçi robot 3 eksene indirgenmiş, Homojen dönüşüm matrisi yöntemi ile Lagrange denklemleri elde edilmiş ve Lagrange denklemleri yardımıyla her bir eksene ait Moment denklemleri çıkarılmıştır. Daha sonra Matlab programı yardımıyla her bir eksenin ilk ve son konumlarına göre hız ve ivme katsayıları belirlenmiştir. Bulunan katsayılar ile her bir eksen için Moment, Güç ve Enerji formülasyonu elde edilmiştir. Kol uzunluk ve çap değerleri değiştirilerek formüller tekrarlanmış ve değişkenlere göre enerji değerleri ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: İşbirlikçi robot, enerji tüketimi, homojen dönüşüm matris yöntemi

**THE EFFECT OF ARM GEOMETRIC PARAMETERS ON ENERGY
CONSUMPTION IN INDUSTRIALS ROBOTS**

Ahmet Erdem ÖNER

Department of Mechanical Engineering
MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Tamer KEPCELER

Industrial robots have been used in production for nearly half a century and they bring big profits to businesses in terms of product quality, production efficiency and thus lower production costs. With the developing technology and Industry 4.0 concept, the need for robots to work together with the people in the enterprises has revealed Collaborative robots (Cobot) and the rate of usage in the industry has increased due to ease of installation and less safety equipment and space requirement. In our study, the effect of arm geometric parameters on energy consumption was investigated by using UR10 model Cobot from Universal company. In terms of ease operation, the 6 axis cobot was reduced to 3 axis, kinematics of the robot was determined by Homogeneous transformation matrix method and the moment equations of each axis were extracted with Lagrange equation. Speed and acceleration coefficients were determined according to the first and last positions of each axis with the help of Matlab program. Moment, Power and Energy formulation was obtained for each axis with the coefficients found. Arm length and diameter values were changed, formulas were repeated and energy values were obtained according to the variables.

Keywords: Cobot, energy consumption, homogeneous transformation matrix method

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

1.1 Literatür Özeti

Malzemeleri, parçaları, takımları bir yerden bir yere iletmek, taşımak, onlara şekil vermek, çeşitli özel işleri icra etmek için tasarlanmış, programlanabilir çok fonksiyonlu makinelere Robot denir. Güç gerektiren işlerde, sıcak, soğuk ve tehlikeli ortamlarda kolayca çalışabilmeleri, hızlı, emniyetli, seri, hassas ve ekonomik olmaları, çalışan elemanlar gibi sağlık, emniyet, mola gibi çeşitli ihtiyaçlarının olmayışları, tekrarlı ve monoton işlerin niteliğini değiştirme özellikleri gelişen endüstride robotların etkinliklerini arttırmıştır. Robotların kullanım alanları daha çok seri üretim gerektiren sahalar, montaj işleri ve nükleer reaktör çekirdekleri gibi insanların çalışmasının mümkün olmadığı veya çok riskli olduğu yerlerdir. Bunların dışında günümüzde; evlerde, ofislerde, bankalarda, restoranlarda ve yaşamın her sahasında kullanım alanları bulunmaktadır [1].

Fabrika otomasyonunda endüstriyel haberleşme ve kontrol sistemlerindeki gelişmeler, gelişen görüntü işleme ve yapay görme teknolojileri, ileri seviye yapay zeka algoritmaları ve veri toplama sistemleri ile malzeme seçiminde etkin rol oynayan imal usulleri ve katmanlı imalat teknolojisinin gelişmesi Endüstri 4.0 konseptini ortaya çıkarmıştır [2]. Bu yapı içerisinde esnek üretim sağlayabilmek için işbirlikçi robotların esnek üretim proseslerinde kullanılması zorunlu hale gelmiştir [3]. Bununla birlikte, gelişen bu durum, daha yüksek seviyeli riskler içerdiğinden dolayı emniyet ve güvenlik parametrelerini ön plana çıkarmaktadır. Belirlenen amaçlara göre risk faktörlerinin çıkarılarak güvenlik önlemlerini kapsayacak ana standartlara uygunlaştırılması gerekmektedir. Endüstriyel robotların emniyeti ile ilgili ISO 10218-1-2 ve işbirlikçi

robotlara ait ISO TS 15066 standartlarına uyulması gerekir. Yeni nesil endüstriyel robot sistemleri olan işbirlikçi robotların temel belirleyici özellikleri; operatörün teması ile durma, robot yörüngesini operatör tarafından elle yönlendirerek çalıştırma, robotun güç, kuvvet ve hızının sınırlayarak çalıştırma işlemlerini kapsar. İnsan-robot etkileşimi alanında yapılan ilk detaylı araştırmalar insansı ve sosyal robotlar alanında olmuştur. Bunu takip eden süreçte akıllı fabrikalardaki esnek üretim ihtiyacı işbirlikçi endüstriyel robotları ortaya çıkarmıştır [4].

Robot kol, dönel veya kayar eklemlerle birbirine bağlanmış “uzuv” adı verilen eğilmez cisimlerden meydana gelen açık kinematik zincire sahip mekanizmalardır. Çevrimin bir ucu bir desteğe (temele) bağlanmış, diğer ucu ise serbesttir. Eklemler birbirine bağlı uzuvların izafi hareketine izin vermektedir. Bu hareketlerin çözümü için robot kinematikinden yararlanılır [1].

Kinematik kavramı robot biliminin temelini oluşturmaktadır. Robot kol kinematik hesabında iki farklı yol izlenmektedir. Birinci yöntem, sabit ağırlıktan (en altta yer alan sabitleme kütlesi) başlayarak en uç noktaya ulaşmaya çalışmaktır. Bu işleme ileri kinematik hesaplama yöntemi adı verilir. İkinci yöntemde ise en uç noktadan başlayarak sabite ulaşmaya çalışılmaktadır. Bu yöntem ise ters kinematik hesaplama yöntemi adı verilir [5].

Denavit-Hartenberg algoritmasına dayalı ileri kinematik çözüm algoritması matrisel bir algoritmadır. Burada, giriş eklem açısı değerlerine bağlı robot kolunun koordinat sisteminde ulaşacağı xyz noktası hesaplanmaktadır. Bu algoritma 4x4 matrisel bir algoritmadır ve robot kolun eklem açısı ile doğru orantıda artar [1].

Robot kol geometrisi üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde; Gutierrez, Zotovic ve diğerleri, “Hafif Robot Kol Prototipi Tasarımı ve Üretimi” isimli çalışmalarında bilgisayar ortamında robot kolu tasarlamışlar ve 3-boyutlu yazıcı teknolojisi ile liflerle takviye edilmiş plastik malzeme kullanarak üretmişlerdir. Bu robotun motorları, aktarma organları ve harmonik tahrikli redüktörleri yapılan simülasyonlar ile teyit edildikten sonra kullanılmış ve bu parçalara – gerektiğinde değişim için – erişebilmek için gövde üretimi parçalı şekilde tasarlanmıştır. Çalışmaları ile prototip robot kol üretimi ile gerçek robot tasarım ve üretim sürelerinin azaldığını iddia etmişlerdir [6].

Raza, Khan ve Abbas, “Endüstriyel Robot Kolun Kinematik Analizi ve Geometrik Olarak İyileştirilmesi” isimli çalışmalarında optimum bir robot kol tasarımı için Parametrik CAD modelleme ve Sonlu Elemanlar Analizi gibi farklı alanlardan araçların entegre edilmesini araştırmışlardır. Ters kinematik analiz için, robotik kolun optimum pozisyonunu ve yönünü belirleme yeteneğine sahip olan Robo-Analyzer programını kullanmışlar, farklı tasarımların yapısal analizini Ansys simülasyonunu kullanarak yaptıktan sonra, SolidWorks programını kullanarak optimum kol tasarımı elde etmek için meta modelleme yapmışlardır. Çalışma sonunda, mühendisleri, robotik endüstrisinde daha da ileriye götürecek zaman alıcı ve tekrarlı çalışmalardan kurtaracak Sonlu Elemanlar Analizinin alternatif yolunu sunmuşlardır [7].

Shanmugasundar ve diğerleri, “Sonlu Elemanlar Analizi Kullanarak Beş Serbestlik Dereceli (T-3R-T) Robot manipülatörün yapısal optimizasyonu” isimli çalışmalarında 5-DOF (Beş serbestlik dereceli) kaynak robotunu araştırma objesi olarak alarak yapısını anlatmışlar ve sonlu elemanlar analizi için robotun sonlu elemanlar (FE) modelini geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, sonlu elemanlar analizini kullanarak toplam robot manipülatör kütlesinin azaltılabileceğini göstermişlerdir [8].

Chittawadigi, Prakash ve Patwardhan, “Nex Dexter Robot Manipülatörü için Simülasyon Yazılımının Kinematik Analizi ve Geliştirilmesi” isimli çalışmalarında ilk olarak Nex Dexter isimli robot kolunun bütün parçalarının CAD dosyalarını oluşturmuşlardır. Sonra çıkarılan Denavit-Hartenberg parametreleri ve kinematik formülasyonu kullanarak simülasyon yazılımı gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede fiziksel robotlarda on-line ve off-line simülasyon yapma imkanına ulaşmışlardır [9].

Shaik, Tlale ve Bright, “Sabit Motorlu ve Seri Robot Tip Çalışma Alanlı 2 Mafsallı Robot Tasarımında Enerji Kullanımı Simülasyonu” isimli çalışmalarında Pozzi ve Bisiach (PB modeli) isimli 2 patentli, içi boş ve dolu koaksiyel mil ile eşmerkezli dişli mekanizmalara sahip robot tasarımlarının, konvansiyonel bir robot tasarımı ile enerji harcamalarını karşılaştırmış ve PB modeli tasarımın daha az enerji harcadığını tespit etmişlerdir [10].

Uhlmann, Reinkober ve Hollerbach, “İşleme proseslerinde endüstriyel robotların enerji verimli kullanımı” isimli çalışmalarında bir freze robot sisteminin toplam enerji performansını araştırmışlardır. Robotun soğutma ve hareket hızının enerji tüketimi üzerinde büyük etkisi olduğunu kanıtlamışlar. Robot güdümlü işleme konusuna olan

ilgisinin artmasıyla birlikte, işleme doğruluğunun yanı sıra statik ve dinamik sertlikte bir iyileşme meydana geleceğini, ayrıca robot freze sistemlerinde enerji verimliliğinde artışa neden olan daha verimli proses parametreleri de kullanılabileceğini iddia etmişlerdir [11].

Buğday ve Karali, “Karşı ağırlığı en aza indirmek için endüstriyel robot kolunun tasarım optimizasyonu” isimli çalışmalarında 5 farklı markanın robotlarını incelemişlerdir. Yaptıkları statik analiz ve modal analizi sonucu optimizasyon çalışmaları ile ikinci ekseninde % 10 oranında malzeme azalmasına rağmen, elastik deformasyon değerlerinde herhangi bir artış olmadığını göstermişlerdir [12].

Paryanto, Brossog, Kohl ve diğerleri, “Bir montaj sisteminde altı eksenli bir endüstriyel robotun enerji tüketimi ve dinamik davranış analizi” isimli çalışmalarında birkaç çalışma koşulunda altı eksenli bir endüstriyel robotun güç tüketimi ve dinamik davranış analizini ele almışlardır. İlk olarak, güç tüketimini ve dinamik davranışı analiz etmek için Modelica dilini temel alan simülasyon aracı kullanmışlar, daha sonra da bu modeli gerçek bir robottan toplanan deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çıkan sonuçlar, hız ve yük taşıma gibi robot çalışma parametrelerinin, güç tüketimini ve endüstriyel robotların dinamik davranışını güçlü bir şekilde etkilediğini göstermiştir. Daha yüksek taşıma kapasitesi ve hızın, bir robotun ihtiyaç duyduğu gücü arttırdığını belirtmişlerdir. Yüksek hızlı işlem; yüksek verimlilik ve kısa işlem süresi sunduğundan, bu parametrelerin optimizasyona ihtiyaç duyduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışma, güç tüketimini analiz etmek için hem simülasyon hem de deneysel yöntemlerin kullanılabileceğini göstermiş, simülasyon yöntemi sayesinde robot çalışma parametreleri ile güç tüketimi arasında güçlü bir ilişki olduğu bulunmuştur [13].

Sinaga, Paryanto ve diğerleri, “Endüstriyel robotlarda yerçekimi yükünün enerji tüketimine etkisinin analizi” isimli çalışmalarında bir büyük, bir de küçük 2 adet endüstriyel robotun mekatronik modellerini çıkarmışlardır. Yerçekimi yükünün yüksek kütleli endüstriyel robotlarda enerji tüketimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermişler, bu nedenle robotun kurulum pozisyonunun enerji tüketimi üzerinde büyük etkisi olduğunu, dikey pozisyonun yatay pozisyona göre daha enerji verimli olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Aynı zamanda durma pozisyonunda robotun eksen konumunu korumak ve yerçekimi yüküne karşı koymak için büyük miktarda enerjiye

ihtiyaç duyduğunu, bu nedenle robotun çalışmadığı zamanlarda küçük çekim kuvveti gerektiren bir durma konumu seçilmesini önermişlerdir. Bununla birlikte, endüstriyel robotlarda yerçekimi yükünün, robot kolları aşağı doğru bir hareket gerçekleştirirken motor sürücüsünün yükünü azaltmak için kullanılabildiğini ve bu sayede bir miktar enerji geri kazanıldığını aktarmışlardır [14].

Pellegrinelli, Borgia ve diğerleri, “Tek robotlu görevler için hareket planlamada enerji tüketiminin en aza indirilmesi” isimli çalışmalarında toplama ve boşaltma operasyonlarında robot enerji tüketiminin azaltılmasını incelemişler, enerji tüketimini en aza indiren ve robot döngü sürelerine bakarak çarpışmayan yörüngelerin otomatik olarak üretilmesi için bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu sayede, sadece döngü süresini en aza indiren yaklaşıma kıyasla, çalışma döngüsünde kullanılan enerjinin % 12 oranında azaldığını tespit etmişlerdir [15].

Literatür araştırmasına göre robot kol geometrisi üzerine yapılan çalışmaların az olduğu ve genelde parçaların yapısal analizleri üzerine araştırmaların yapıldığı görülmektedir. Bunun dışında çalışmaların genellikle optimum yörünge belirleme üzerinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

Tez çalışmamızda irdelediğimiz robot kol geometrik parametreleri üzerine daha önce yapılmış bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

1.2 Tezin Amacı

Endüstride enerji tasarrufu, artan enerji maliyetleri de göz önüne alındığında daima güncelliğini koruyan bir konudur. Robotlar konusunda da enerji tasarrufu adı altında, yörünge analizi başta olmak üzere çeşitli araştırmalar ve çalışmalar yapılmaktadır.

Enerji tasarrufunda en etkili yöntem, harcama yapılmadan önce tedbirlerin alınmasıdır. Enerji harcadıktan sonra alınacak tedbirlerin etkisi, harcama yapılmadan evvel alınan tedbirlerin yanında az kalmaktadır. Daha az enerji harcayan sistemlerin varolmasıyla enerji sarfiyatları azaltılabilmektedir. Günümüz beyaz eşya sektöründe üretilen enerji tasarruflu ürünler ile eski tip beyaz eşyaların enerji sarfiyatlarının karşılaştırılması buna en iyi örnektir.

Tez çalışmamızda da amacımız robotlarda enerji tasarrufunu sağlayabilmek için tasarım aşamasında kol geometrik parametrelerinin nasıl olması gerektiğini saptamak ve endüstriyel robotlar ile karşılaştırmasını yapmaktır.

Endüstride son yıllarda kullanımı artan işbirlikçi robotun kol geometrik parametrelerinin değişiminin enerji tüketimine etkileri araştırılacaktır. Bu amaçla 6 eksenli robot -bilekten sonraki 3 eksenin kol uzunluklarının enerji sarfiyatına etkisinin az olmasından ötürü- 3 eksene indirgenerek hesaplamalar yapılacaktır. Hesaplamalarda Lagrange denklemi ile enerji ifadesi çıkarılacak, sonrasında MATLAB programı vasıtasıyla Moment, Güç değerleri ile Enerji harcamaları takip edilecektir.

1.3 Hipotez

Endüstriyel robotlarda kol geometrik parametrelerinin enerji sarfiyatına etkisi tasarım aşamasında alınacak tedbirlerle azaltılabilir.

BÖLÜM 2

ROBOTLAR

ISO 8373 standartında, “Endüstriyel uygulamalarda kullanılan, sabit veya hareketli olabilen, üç veya daha fazla programlanabilir eksene sahip, otomatik kontrollü, tekrardan programlanabilir çok amaçlı manipülatör” olarak robot tanımı yapılmıştır. Buradaki tekrardan programlanabilir ifadesi, fiziki değişimler olmaksızın programlaması yapılmış hareketleri veya yardımcı fonksiyonları değiştirilebilir anlamına gelirken, çok amaçlı olması fiziksel değişikliklerle farklı uygulamalara adapte edilebilme yeteneğini de ifade etmektedir [16].

Robotlar genel olarak bir yazılım aracı üzerinden kontrol edilerek yararlı amaç için iş üreten karmaşık cihazlardır.

Robotlar, programlanarak, taşıma veya yer ve yön değiştirme işlemlerini gerçekleştirebilen sistemlerdir. Taşıma görevi, gövde boyutlarına kıyasla başka bir mesafeye hareket olarak ifade edilir. Manipülasyon ise, gövdenin pozisyonunda meydana gelen değişiktir. Manipülatör, bir dizi eklemin birbirine bağlandığı bir dizi rijit kol içerir. Eklemlere motorlar takılmıştır. Robotlar, askeri alanda olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır [17].

Robotların tipik uygulamaları arasında tümü yüksek dayanıklılık, hız ve hassasiyetle elde edilen kaynak, boya, ütü, montaj, toplama ve yerleştirme, paketleme ve paletleme, parça inceleme ve kontrol sayılabilir [18].

Bir manipülatörün doğruluğu, manipülatörün çalışma alanı içinde belirli bir noktaya ne kadar yaklaşabileceğinin bir ölçüsüdür. Tekrarlanabilirlik, bir manipülatörün daha önce öğretilmiş bir noktaya ne kadar yakın dönebileceğinin bir ölçüsüdür. Günümüzdeki

manipülatörlerin çoğu yüksek oranda tekrarlanabilir ancak çok doğru değildir. Çoğu durumda konumlandırma hatalarını algılamanın birincil yöntemi, eklemi harekete geçiren motor şaftı üzerinde veya eklemi kendisinde eklemlerin üzerinde bulunan konum kodlayıcılarıdır. Tipik olarak son uç pozisyonu ve oryantasyonu için doğrudan bir ölçüm yoktur. Manipülatörün varsayılan geometrisine ve ölçülen eklem açılarından son konum pozisyonunu elde etmek (yani hesaplamak) için sağlamlığına güvenmek gerekir. Doğruluk hesaplanan hatalardan, manipülatörün yapısındaki işleme hassasiyetinden, yerçekimi ve diğer yükler altındaki bağlantıların bükülmesi, dişli geri tepmesi ve diğer statik ve dinamik etkilerin bir barındırıcısı gibi esneklikten etkilenir. Öncelikle bu sebepten dolayı robotlar son derece sağlam bir şekilde tasarlanmışlardır. Yüksek rijitlik olmadan, doğruluk ancak son konumun doğrudan algılanması ile geliştirilebilir.

Özetle robotlar, hayatımızın bir çok alanında yer edinmiş ve ihtiyaçlarımıza göre tasarlanmıştır. Gündelik hayatımızdaki makinelere robot diyebilmemiz için çevresi ile ısı, ışık, dokunma vs. bir algılama olması gerekmektedir. Bir robotun algılama yapabilmesi için robota özel olarak dizayn edilmiş algılayıcılar (sensörler) vardır. Bu sensörler sayesinde robot çevresinde olan biten herşeyden haberdar olmakta ve dış etkenlere göre karar alarak, bu karar doğrultusunda hareket edebilmektedir.

Robotların avantajları şu şekilde ifade edilebilir.

- Robotlar, insan gücünün yapamayacağı zorluktaki işleri yaparlar.
- İşçilik maliyetini düşürürler.
- Tehlikeli veya çalışmaya elverişli olmayan yerlerde çalışırlar.
- Tekrarlı işlerde standart oluşturarak ürünler üzerinde aynı işlemleri yaparlar.
- Geri bildirimli veya geri bildirimsiz mekanik olarak çalışmaya devam ederler.
- İlk yatırım ve bakım maliyetleri nispeten yüksek olmasına rağmen en az işletme maliyetine sahiptirler.
- Yorulma ve dikkat dağınıklığı oluşmaz.
- Hem uzaktan hem de operatör tarafından kontrol edilebilirler.
- Tehlike anında koruma sağlayabilirler.
- Zaman alıcı ve basit işleri hızlı bir şekilde yaparak zaman tasarrufu sağlarlar.

Robotların dezavantajlarını ise şu şekilde ifade edebiliriz:

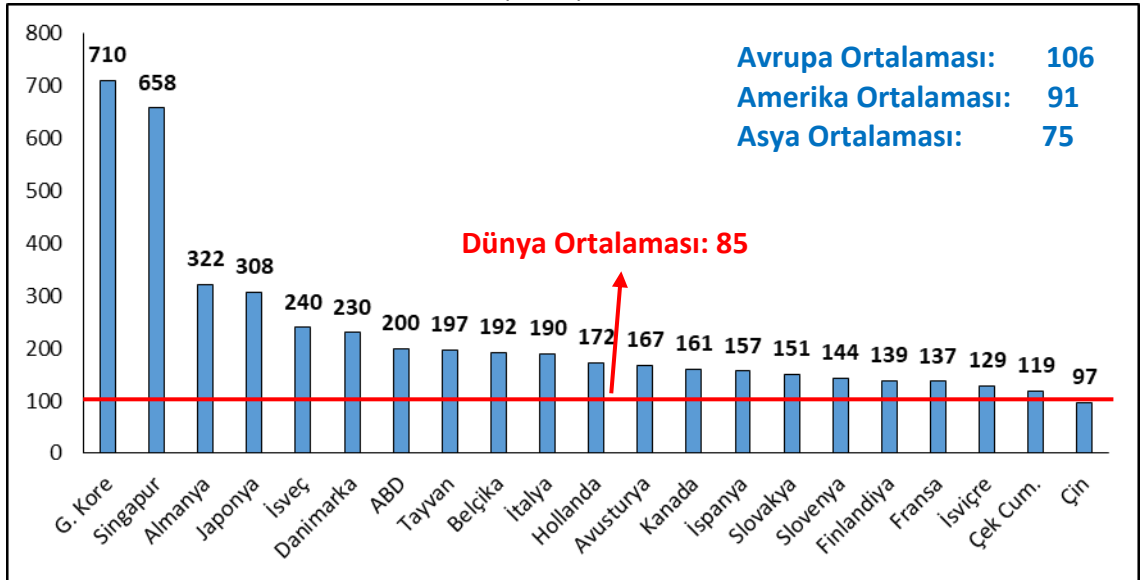
- İlk kurulum maliyetleri yüksektir.

- Programlamanın dışına çıkamazlar.
- Bakım ve onarım olduğunda duruşlar oluşur [19].

2017 yılında dünyada kurulumu tamamlanan endüstriyel robot sayısı 387.000 adettir. 2017 yılı itibariyle dünyada imalat sanayinde çalışan on bin kişiye düşen endüstriyel robot sayısının ortalaması 85’dir. Bu orana bölgelere göre bakıldığında ise Avrupa 106, Amerika 91 ve Asya 75 adet olarak göze çarpmaktadır.

Ülkemizde ise 2016 rakamlarına göre imalat sanayinde çalışan on bin kişiye düşen 23 adet endüstriyel robot ile dünyada 34. sıradadır [20].

Çizelge 2.1 İmalat sanayiinde çalışan 10.000 kişi başına düşen endüstriyel robot sayısı (2017) [20]



2.1 Endüstriyel Robotların Tarihsel Gelişimi

1136-1206 yılları arasında yaşayan, sibernetik alanında ilk adımları atan ve ilk robotu yaparak çalıştıran El Cezeri’dir [21]. 1452-1519 yılları arasında yaşayan Leonardo Da Vinci “Da Vinci Robotik Cerrahi Platformu cihaz tasarımı yaparken El Cezeri’den ilham almıştır.

El Cezeri tarafından abdest için kullanılan tavus teknesi yapıldı. Robot çocuk ise abdestten sonra havlu vermek için tasarlandı [21].

1801’de Marie Jacquard numerik olarak kontrol edilen ilk makine [22], 1805’de Maillartet’in geliştirdiği yaylar vasıtasıyla çalışan, İngilizce ve Fransızca yazabilen otomatı olarak kabul edilmektedir [23]. 1953 yılında Grey Walter duyumsal

uyarlamayla hareket eden biyolojik sistemlerin beyin nöronları doğrultusu ile ilk otonom robotu geliştirmiştir. Bu robot ufak noktasal ışık kaynaklarının yerleştirildiği karanlık bir odada ışık dedektörleriyle ışığı algılayıp, ışık şiddetine bağlı olarak ışık kaynağına yönelmekte ve kaynaktan uzaklaşmaktaydı [24].



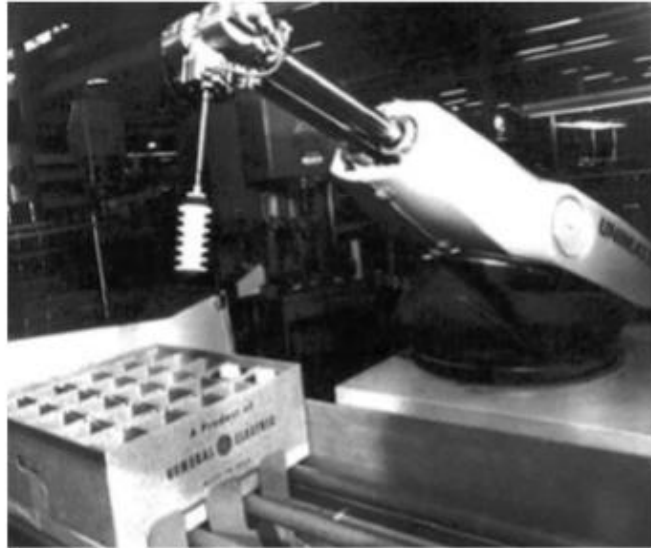
Şekil 2.1 (A) Abdest için kullanılan tavus teknesi (B-C) el yıkama otomatı [21]

Robot kelimesi Slavca'da zorunlu iş, angarya ve işçi kelimelerinden türetilmiştir (Robata ve Robotnik birleşerek İngilizce "Robotic" haline gelmiştir.). İsmen ilk defa Çekoslovak oyun yazarı Karel Capek tarafından yazılan "Rossum'un Evrensel Robotları" (1921) isimli oyunda geçmiştir [17].

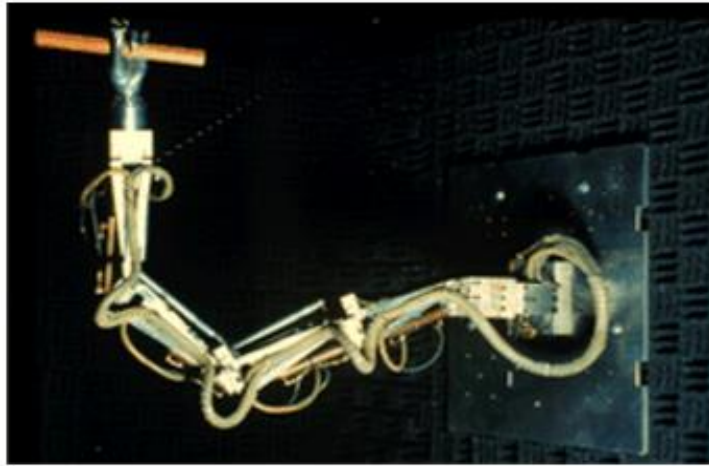
George Devol 1954'te ilk robot patenti için başvurdu (1961'de patent aldı). Bir robot üreten ilk firma 1956'da George Devol ve Joseph F. Engelberger tarafından kurulan ve Devol'un orijinal patentlerine dayanan Unimation'dı. Unimation robotlarına "programlanabilir transfer makineleri" de deniyordu çünkü ilk kullanımda nesneleri bir noktadan diğerine, bir düzine fitten daha kısa bir mesafeden başka bir yere aktarmaktı. İlk endüstriyel robot Unimate, Şekil 2.2'de görülmektedir. Robotları hidrolik aktüatörler kullandılar ve ortak koordinatlarda programlandı, yani çeşitli eklemlerin açıları bir öğretim aşamasında saklandı ve operasyonda tekrarlandı. 1 / 10.000 inç içinde doğruydular. Unimation sırasıyla Japonya ve İngiltere'de Unimates üreten teknolojilerini Kawasaki Heavy Industries ve Guest-Nettlefolds'a lisansladı. Bir süre Unimation'ın tek rakibi Ohio Cincinnati Milacron Inc. oldu. Bu durum, 1970'lerin sonlarında birkaç büyük Japon holdinginin benzer endüstriyel robot üretimine başladığı dönemde köklü bir şekilde değişti.

Ahtapot benzeri duvara monte tentacle kolu, 1968'de Marvin Minsky tarafından geliştirildi. On iki eklemi, kolun köşelerden geçmesini sağladı. Bir PDP-6 bilgisayarı kolu hidrolik sıvılarla çalışan kontrol eder. Kol bir kişinin ağırlığını kaldırabilir. Robot kolu Şekil 2.3'de görülmektedir.

Stanford Yapay Zeka Laboratuvarında (SAIL) çalışan bir makine mühendisliği öğrencisi olan Victor Scheinman, 1969'da Stanford Kolunu yarattı. Şekil 2.4, Stanford Kolunun ilk tasarımını göstermektedir. Kolun tasarımı standart hale gelmiş ve bugün hala robot kolların tasarımını etkilemektedir. Stanford Kolu doğrudan ticari üretime öncülük etti. Scheinman, otomobil montajı ve diğer endüstriyel işler için kullanılan PUMA Unimation endüstriyel robotlarını tasarlamaya devam etti.



Şekil 2.2 UNIMATE, ilk endüstriyel robot [18]



Şekil 2.3 Tentacle Arm [18]



Şekil 2.4 Stanford kolunun ilk tasarımı [18]

Cincinnati Milacron Corporation, T3'ü 1973'te piyasaya sunulan ilk bilgisayar kontrollü endüstriyel robot (Richard Hohn tarafından tasarlanan) (Şekil 2.5'te görüldüğü gibi) piyasaya sürdü.



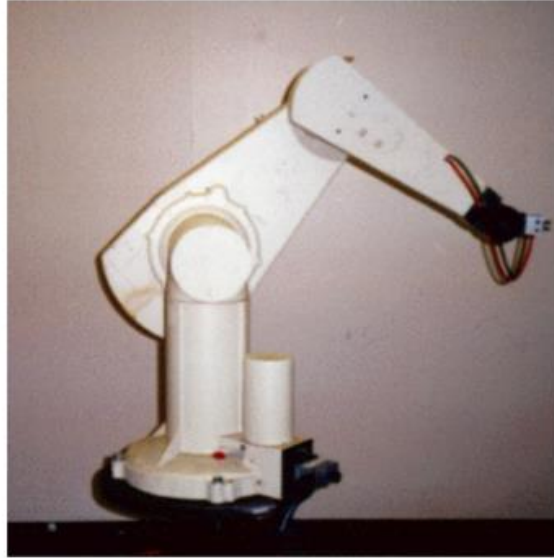
Şekil 2.5 Cincinnati Milacron T3 [18]

Victor Scheinman kendi şirketini kurdu ve 1974 yılında Silver Arm'ı pazarlamaya başladı. Dokunma ve basınç sensörlerinden gelen geri bildirimleri kullanarak küçük parçaları bir araya getirme yeteneğine sahipti. Şekil 2.6'da görülmektedir.

Yaygın olarak endüstriyel robotlar olarak kullanılan Programlanabilir Evrensel Manipülasyon Kolunu (PUMA) geliştirdi. PUMA, Şekil 2.7'de görülmektedir. Unimation, 1977'de Vicarm Inc.'i satın aldı ve Vicarm'ın teknolojisini kullanarak, 1979'da pazarlanacak PUMA robotunu geliştirdiler.



Şekil 2.6 Silver Arm [18]



Şekil 2.7 Programlanabilir evrensel manipölasyon kolu (PUMA) [18]

Sankyo ve IBM, Japonya'daki Yamanashi Üniversitesi'nde geliştirilen SCARA'yı (Seçici Uyumlu Eklemlili Robot Kolu) pazarladı. İlk SCARA robotu Şekil 2.8'de görölmektedir.

1981'de Takeo Kanade doğrudan tahrik kolunu inşa etti. Motorları doğrudan kol bağlantılarına monte eden ilk robottur. Bu gelişme, eklemleri önceki robot kollarından daha hızlı ve daha hassas hale getirdi.



Şekil 2.8 Seçici uyumlu eklemli robot kolu (SCARA) [18]

Japan Fanuc ve General Motors, 1983 yılında GM Fanuc ortak girişimini kurdu. Yeni şirket, Kuzey Amerika'da robot pazarlamaya başladı.

1986 yılında Honda, robotun “bir insanın yapamadıklarını yaparak ve sonunda topluma fayda sağlamak için hareketlilikte yeni bir boyut geliştirerek” birlikte yaşaması ve işbirliği yapması gerektiği öncülüyle başlayan bir robot araştırma programına başladı.

MIT’de Rodney Brooks ve A.M. Flynn, 1989’da İngiliz Gezegenlerarası Toplum Dergisi’nde “Hızlı, Ucuz ve Kontrolden Çıkmış: Güneş Sisteminin Robot Salgını” başlıklı bildiri yayınladı. Bildiri, gezici araştırmalarını büyük, pahalı bir robot inşa etmekten, ucuz ve çok sayıda küçük üretmeye doğru değiştirdi. Bildiri ayrıca, ortalama bir insan için biraz daha erişilebilir bir robot yapma fikrini ortaya koydu. Akademisyenler, simüle edilmiş insanlardan ziyade küçük, akıllı, kullanışlı robotlara yoğunlaşmaya başladı.

İsviçreli ABB, 1990 yılında Cincinnati Milacron'u (PUMA'nın yaratıcısı) devraldı.

Honda, 2000 yılında insansı robot serisinin yeni nesli olan yeni bir insansı robot ASIMO'yu piyasaya sürdü. ASIMO, Şekil 2.9'de görülmektedir.

Ekim 2000’de, BM dünya çapında kullanılan 742.500 endüstriyel robot olduğunu tahmin etmiştir. Bunların yarısından fazlası Japonya'da kullanılmaktadır. Kanada MD Robotics tarafından inşa edilen Uzay İstasyonu Uzak Manipülör Sistemi (SSRMS) başarıyla yörüngeye getirilmiş ve Uluslararası Uzay İstasyonunun 2001 yılında

montajını tamamlamak için faaliyete başlamıştır. SSRMS, Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Son yıllarda, robot üreticileri Motoman ve Kuka gibi hafif robotlar üzerinde araştırma faaliyetlerini arttırmıştır. Şekil 2.11'de Motoman'ın hafif robotu SDR10 ve Kuka'nın hafif araştırma robotu gösterilmektedir [18].



Şekil 2.9 Honda'nın yeni nesil insansı robotları olan ASIMO [18]



Şekil 2.10 Uzay istasyonu uzaktan manipulatör sistemi (SSRMS) [18]



Şekil 2.11 Motoman ve Kuka'nın hafif robot (LWR) uygulamaları [18]

2.2 Klasik Endüstriyel Robot Türleri ve Kullanım Yerleri

Endüstriyel alanda kullanılan robot kollarının sınıflandırılması aşağıdaki şekilde yapılabilir.

2.2.1 Kartezyen robotlar

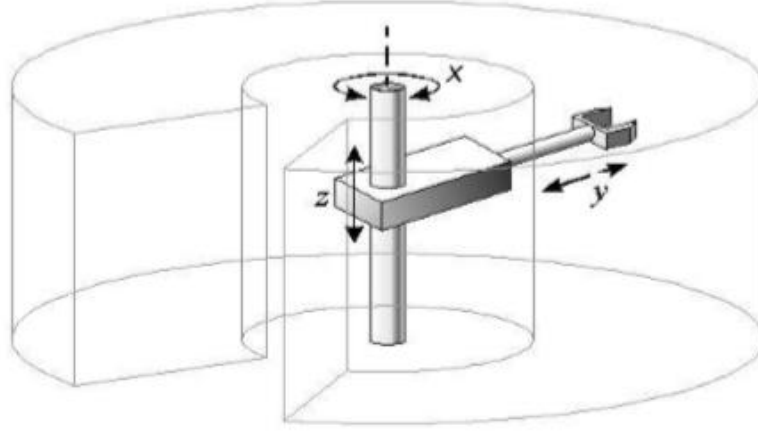
Bu robotlar endüstride tutma ve taşıma işlerinde kullanılmakta, ayrıca X, Y, Z eksenlerinde doğrusal olarak hareket etme yeteneğine sahiptirler. Beklenebileceği gibi, bu manipülatörün kinematik açıklaması tüm konfigürasyonların en basitidir ve bu sayesinde hareket planlamaları kolaydır. X, Y ve Z ekseninde hareketlerini gerçekleştirirler. Eğilme ve bükülme hareketlerini yapamadıkları için diğer robotlara göre daha fazla yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Kartezyen robotlar nemli, rutubetli ve yağ her bölgede kullanılabilir. Küçük yük taşıma işlemlerinde pnömomatik tahrikli robot kolları kullanılırken, ağır yüklerde hidrolik tahrike sahip robot kolları tercih edilmektedir. Kartezyen robotlar, masa üstü montaj uygulamaları ve portal robotlar olarak malzeme ya da kargo transferi için kullanışlıdır [19].



Şekil 2.12 Kartezyen koordinatlı robot kolu [19]

2.2.2 Silindirik (Cylindrical) robotlar

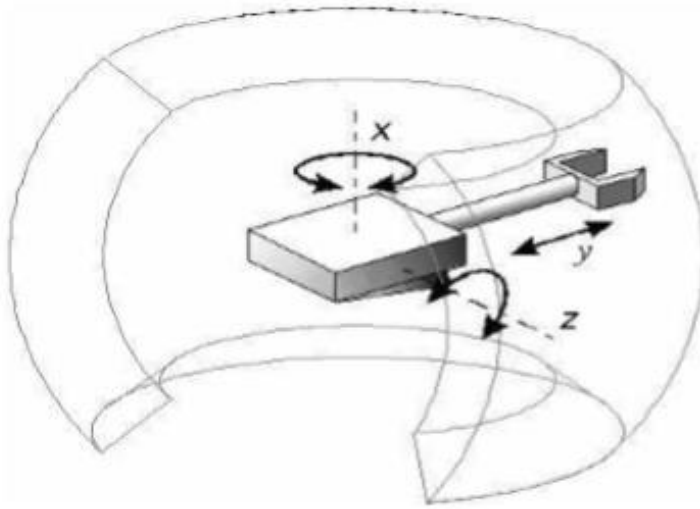
Bu tip robot kolunda ilk eklem taban etrafında döner, ikinci ve üçüncü eklemler ise prizmatiktir. Bu robotlar da mekanik yönden sağlamdır fakat bilek kısmındaki konum doğruluğu yatay harekete bağlı olarak azdır. Bu robotlar büyük boyutlu nesnelerin taşınmasında kullanılırlar. Hidrolik motorları tercih edilir [25].



Şekil 2.13 Silindirik robot kolu [25]

2.2.3 Küresel (Spherical) Robotlar

Bu tip robot kolu iki döner ve bir kayar tip eklemden oluşur. Bu tip robotlar mekanik olarak yukarıda anlatılan diğer iki robot tipinden daha zayıf, fakat mekanik yönden daha karmaşıktır. Çoğunlukla makine montajlarında kullanılırlar. Bu tip robotlarda elektrik motorları tercih edilir [25].



Şekil 2.14 Küresel robot kolu [25]

2.2.4 Scara Robotlar

SCARA (for Selective Compliant Articulated Robot for Assembly - Montaj İçin Seçici Uyumlu Mafsallı Robot) robot kolları; yüksek hız ve iş kapasitesinin yanında montaj kolaylığı ve az yer kaplamasından ötürü endüstride kullanıcılarına avantaj

sağlamaktadır. Scara robot kolları iki eklem yerinde elektrik motoru ve aşağı yukarı hareketini sağlayan pnömatik koldan oluşur. Robot koldaki elektrik motorlarının amacı, kolun kendi eksenini etrafında dönmesini sağlamaktır. Bu özellikler robot kola esneklik tanımaktadır. SCARA robotlar montaj işlemleri için özel olarak tasarlanmıştır ve Scara robot kol elektronik montaj sanayiinde, elektronik kartlara malzemelerin monte edilmesi amacıyla kullanılmaktadır [19].



Şekil 2.15 Scara robot kolu [19]

2.2.5 Mafsallı (Vertical articulated) Robotlar

Mafsallı robot kolları, hareket kabiliyeti en yüksek robot kollarıdır. Robot kolun her bir mafsalında kontrol edilebilir servo motorlar bulunmaktadır. Diğer robot kollarına göre daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu için programlanması da zordur. Mafsallar program içerisinde sınırlandırılabilir olduğundan belirtilen alan içerisinde hareket edebilir [19]. Bu tip robot kolları tüm eklemleri döner olduğundan çalışma uzayındaki en yetenekli robot kolları olarak tanımlanırlar. Endüstride geniş kullanıma sahiptirler. (Boya, kaynak, montaj işlemleri, yüzey temizleme vs.) [26].



Şekil 2.16 Mafsallı robot kolu

2.3 Yeni Nesil Endüstriyel Robotlar

2.3.1 Mobil robotlar

Klasik endüstriyel robot kolları; tanımlanmış sınırlı alanda çalışabilen, sürekli aynı işleri tekrarlayan sistemlerdir. Günümüzde gelişen teknolojiler, bu yapıların daha etkin çalışmasını sağlamış, bunun dışında kendi alanlarının dışına çıkmasını ve kendi kendine karar verme yeteneklerine sahip, hareket kabiliyetleri yüksek ve yapılacak işlerde pratiklik, kolaylık ve esneklik sağlayan mobil robotların gelişmesini sağlamıştır [27]. Aşağıda Mobil robotların tipleri ve görev alanları anlatılmaktadır.

2.3.1.1 İnsansı robotlar

İnsan gibi düşünen, konuşan, yürüyen, tepki ve kararlar verebilen akıllı robot fikri 1990'lı yıllardaki elektronik ve mekatronik sistemlerdeki gelişmelerle birlikte hayal olmaktan çıkmıştır [28]. Özellikle dengede kalma problemi, insan gibi karar verme, konuşma, ortam algılama, kendini bilme gibi konular üzerinde durulmuş ve bunların birçoğunda büyük çaplı ilerlemeler kaydedilmiştir [29].

2.3.1.2 Çoklu robotlar

Robot sistemlerinin yapısal olarak küçülmesi, düşük maliyetlerde ve ulaşılabilir hale gelmesi tek robot sistemlerin görevlerini birden fazla robotun ortak veya görev paylaşımlı yapabileceği çoklu robot sistemlerin doğmasına sebep olmuştur [30]. Çoklu robotların, birbirleriyle haberleşerek, koordineli bir şekilde kısmi ya da tam otonom olarak verilen karmaşık görevleri yapabilme yetenekleri basit, sağlam, güvenilir yapılar olması, üstünlükleri olarak ortaya çıkmıştır. Arama kurtarma, keşif, ortamdan bilgi alma, girilmesi zor tehlikeli ortamlara girme, felaket alanlarında haritalama gibi işlerde kullanılmaya başlanmıştır [31].

2.3.1.3 Sürü robotları

Çoklu robotlarda birden fazla robotun istenilen görevi yapması üzerine yapılan çalışmalarda doğada sürü halinde hareket eden canlıların bir araya geldiklerinde yapmış oldukları koordineli ve gelişmiş davranışların homojen robotlarla ortak bir akıl

üzerinde yapılabileceği fikri sürü robot mantığını ortaya koymuştur [30]. Çoklu robotlarla kıyaslandığında homojen olması, çalışılan sürünün özelliklerinin, çalışma yapısının, iletişim ve ortam bilgisinin dikkate alınması sağlamlık, ölçeklenebilirlik ve güvenilirlik noktasında sürünün karşılaştığı benzer problemlerin çözümünde benzer çözümler sunabilmesi farklılıkları olarak gözlenmiştir [31].

2.3.1.4 Mikro-Nano robotlar

Mikro nano robotlar nanometre boyutlarında oluşturulması hedeflenen robotiğin yeni bir araştırma alanıdır. Özellikle son zamanlarda tıp alanında insanın organlarında dolaşarak çeşitli görevler icra edebileceği düşüncesi bu alandaki çalışmaların artmasını sağlamıştır [32].

2.3.1.5 Biyolojik-ilhamlı robotlar

Mobil robotlarla ilgili son dönemlerde yer alan konularından biri de doğadaki canlıları taklit eden ve onlar gibi özellikler sergileyen biyolojik ilhamlı robotlardır. Bu robotların diğerlerinden farkı ilham alınan canlıların kendi doğalarında yapmış oldukları özellikleri yapabilmesi, aynı veya benzer ortamlara uyum sağlayabilmesi ve donanımsal olarak modellenen canlıya benzer yapılar olmasıdır [33].

2.3.1.6 İşbirlikçi ve etkileşimli robotlar

Robotlarla ilgili ilk çalışmalar sanayi ortamlarında ağır yükleri taşımak, iletmek, yerleştirmek veya bazı basit kaba görevleri yapma üzerineyken sonraki dönemlerde sağlanan gelişmeler, robotların tepkilerinin geliştirilebilmesine olanak sağlamış ve insanlarla aynı ortamları paylaşacak robotları ortaya çıkarmıştır. Günümüzde insanlarla ortak çalışabilen, insanlara yardımcı olan ve aynı ortamları güvenli bir şekilde paylaşabilen, tepkisel ve geniş görev yüzeyinde çalışabilen bu robotlara işbirlikçi robotlar denmektedir [34, 35]. İlerleyen bölümlerde daha geniş bilgi verilecektir.

2.3.2 Haptik sistemler

Haptik sistemler; insan bilgisayar etkileşimin duyularla sağlandığı, geliştirilmiş 3 boyutlu sanal ortamların veya sisteme bağlı aygıtların çeşitli arayüz aygıtlarıyla

manipüle edildiği robot teknolojisidir. Sanal ortamın veya aygıtın dokunduğu noktaların hissedilmesi üzerine yapılan çalışmalardır. Boyama, askeri ve tıbbi uygulamalar, heykeltraşlık, eğitim, oyun gibi birçok alanda kullanım imkanı bulmaktadır [36].

2.4 Robotlarda Enerji Harcaması

Endüstriyel robotlar, enerji açısından oldukça yoğundur ve endüstriyel robotların enerji tasarruflu kullanımı, üretim maliyeti üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [37, 38]. Örneğin, endüstriyel robotların enerji tüketimi, üretim süreçlerinde tüketilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık % 8'idir [39]. Ek olarak, robotlarda enerjinin optimal kullanımı, bir ürünün yaşam döngüsünün üretim aşamasında CO_2 emisyonunu en aza indirmede önemli bir rol oynar. Endüstriyel robotlar genellikle yüksek düzeyde enerji tüketimi gerektiren sürdürülebilir olmayan ekipman olarak görülür. Bu nedenle, endüstriyel robotların enerji tüketimindeki azalma, üretim sistemlerinin verimliliğini artırmak için önemlidir. Endüstriyel robotlar için enerji tüketiminin azaltılması farklı aşamalarda sağlanabilir: üretim planlama, rota belirleme ve optimizasyon aşaması. Optimizasyon aşamasında, enerji tasarruflu hareket planlama algoritması geliştirmek, endüstriyel robot işletim parametrelerini optimize etmek ve işlem programları, endüstriyel robotların enerji tüketimini azaltmak için kullanılan üç ana yöntemdir. Verimli bir yörünge planının elde edilmesi sadece yörünge elde edilmesine yardımcı olmak için kullanılan enterpolasyon işlevine değil, aynı zamanda yumuşak robot hareketini sağlayan robot aktüatörlerine de bağlıdır. Ek olarak, yörünge planlama algoritmalarının etkinliği, hem yörüngeyi robot tarafından gerçekleştirmek için gereken zaman hem de robotun fiziksel sınırlamaları ile sınırlıdır.

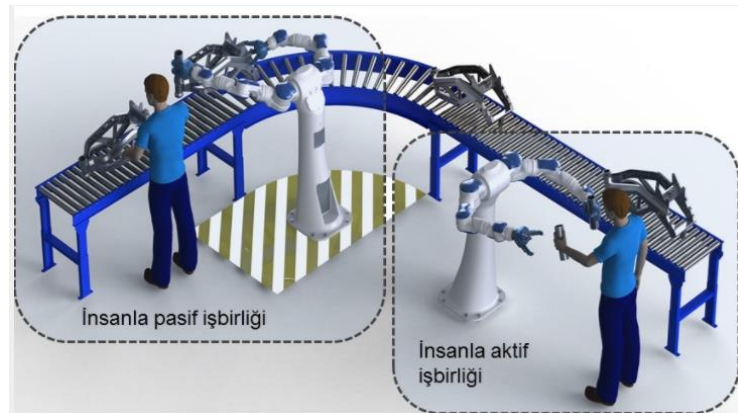
Bununla birlikte, bu yaklaşımlar, bir robotun hareket zamanını en aza indirmeye büyük öncelik vermiştir, mutlak enerji tüketiminin en aza indirilmesini sağlamıştır. Robot tarafından tüketilen toplam enerji genellikle her bir eklem için gereken torktan ve her bir bağlantının atalet tensörlerinden etkilenir. Yukarıda belirtilen çabalara rağmen, robotik enerji tüketimini en aza indirmek, sorun olmaya devam etmekte ve daha fazla araştırma gerektirmektedir [40].

BÖLÜM 3

İŞBİRLİKÇİ ROBOTLAR

İşbirlikçi-Kolloboratif Robot (Cobot) konsepti GM'in başını çektiği bir araştırma projesinin parçası olarak 1995 yılında ortaya çıkmıştır. Kolloboratif kelimesi, İngilizce "işbirliği" anlamına gelen "collaboration" kelimesinden gelmektedir. Cobotların en basit tanımı; insanlarla birlikte hatasız bir şekilde çalışabilen ve onlarla maksimum derecede etkileşime girebilen robotlardır [41]. ISO / TS 15066, işbirliğine dayalı bir çalışmayı, bilinçli tasarlanmış bir robot sisteminin ve bir operatörün işbirliğine dayalı bir çalışma alanında çalıştığı durum olarak tanımlar [42].

Üretim sahalarında daha önceleri sadece insanların çalıştığı alanlara gün geçtikçe daha fazla robotik sistemler girmeye başlamıştır. Üretimde insanların ve robotların farklı güçlü yanlarından yararlanmak ve robotları iş gücüne dahil etmek ihtiyaç haline gelmiştir. İnsan ile Robot arasındaki etkileşimdeki gelişmeler, endüstriyel üretim hattında ve ayrıca insan stresinde ve iş yükünde azalma için daha fazla verimlilik, esneklik ve üretkenlik ihtiyacından kaynaklanmaktadır [43].



Şekil 3.1 Robot ve insan ortak görev ve çalışma alanı

İşbirliği entegrasyonu yapılmak istenildiğinde kişinin robot ile birlikte çalışması ve onun alanına girmesi istenir. Sistemler, fonksiyonlarına bağlı olarak “çalışma alanı paylaşımı” veya “çalışma alanı ve zaman paylaşımı” olarak kategorize edilir [44]. Bununla birlikte, her iki kategoride de insan ve robotlar, tek veya işbirlikçi görevler gerçekleştirebilir. İlk kategoride, robot ve insan ortak bir görev ve çalışma alanına veya ortak bir göreve ve ayrı bir çalışma alanına sahip olabilir (Şekil 3.1). İkinci kategoride, insan ve robot görev ve çalışma alanını paylaştığında, aralarındaki ilişki ayrıktır.

Günümüzde, çeşitli imalat sanayileri yukarıda belirtilen kategorileri kılavuz olarak kullanarak işbirlikçi robotları üretim hatlarına sokmayı hedeflemektedir.

Robot, insanlarla yakın işbirliği içinde çalışır ve montaj işlemlerinde asistan olarak görev yapar. Bununla birlikte, yukarıda belirtilen vakalarda, operatörlerin robot etrafında hareket etmelerine ve ortak çalışma alanlarını paylaşmalarına izin verilmesine rağmen, robotla olan işbirliği aslında sınırlıdır. Ek olarak, robotların çoğu hafiftir ve düşük bir yüke sahiptir, bu nedenle güç artırma, son derece hassas konumlandırma vb. gibi işlevselliklere izin vermez. Son araştırma eğilimleri, insanların endüstriyel robotlarla etkileşimini öngörmektedir. Amaç, yüksek güçlü makinelerle güvenli bir işbirliği sağlayarak doğrudan insan-robot işbirliğini mümkün kılacak çözümler sunmaktır [45].

3.1 İnsan-robot işbirliğinde güvenlik

İnsan güvenliğinin sağlanabilmesi için son yıllarda farklı stratejiler geliştirildi. Bu doğrultuda sistem entegratörlerinin güvenliği, sistemlerine entegre etmelerini sağlamak için ulusal ve uluslararası standartlar, direktifler ve yasalar getirilmiştir. İşbirlikçi bir çalışma alanının sadece insanı ve robotu değil aynı zamanda diğer yardımcı cihazları (örneğin elektrikli tornavidalar, elektrikli sıkma cihazları vb.) içerdiğini de göz önünde bulundurarak, her hücre güvenliği sağlanması gereken risklere sahiptir.

Halen, yaklaşık 30 aktif AB talimatı ve emniyetle ilgili yaklaşık 600 farklı standart bulunmaktadır. Spesifik olarak, robotik hücreler için, aşağıdaki ilk üç standart, güvenliği sağlamak için bir çok farklı stratejiyi öngörmektedir.

3.1.1 AB Direktifleri

2006/42/EC Makine Direktifi (MD)

2009/104/EC Ekipman Kullanım Direktifi

89/654/EC İş yeri Direktifi

2001/95/EC Ürün Güvenlik Direktifi

2006/95/EC Düşük Akım-Voltaj Direktifi (LVD)

2004/108/EC Elektromanyetik Uyumluluk Direktifi (EMC)

3.1.2 Genel Gösterge Standartları

EN ISO 12100 Makine Emniyeti – Genel Tasarım Prensipleri – Risk Değerlendirmesi ve Risk Azaltımı

EN ISO 13849-1/2 Makine Emniyeti - Kontrol sistemlerinin Emniyetle ilgili kısımları - Bölüm 1: Genel Tasarım Prensipleri, Part 2: Onaylama

EN 60204-1 Makine Emniyeti – Makinelerin Elektrik Ekipmanları - Part 1: Genel Gereksinimler

IEC 62061 Makine Emniyeti – Elektrik, Elektronik ve Programlanabilir elektronik kontrol sistemlerinin işlevsel güvenliği ile ilgili

3.1.3 Robot Standartları

EN ISO 10218-1 Robotlar and robotik cihazlar – Endüstriyel robotların güvenlik gereksinimleri - Bölüm 1: Robotlar

EN ISO 10218-2 Robotlar and robotik cihazlar – Endüstriyel robotların güvenlik gereksinimleri - Bölüm 2: Robot sistemleri ve entegrasyon

ISO/PDTS 15066 Robotlar and robotik cihazlar – İşbirlikçi Robotlar

Yukarıda sayılan 3 standart aşağıdaki konuları içerir:

3.1.4 Güvenlikle ilgili kontrol sistemi performansı

Kontrol sistemlerinin emniyetle ilgili kısımları, güvenlikten ödün vermeden her arızalada toleransın sağlanabilmesini sağlamalıdır.

3.1.5 Robot Durdurma İşlevleri

Her robotun bağımsız durdurma işlevinin yanı sıra koruyucu durdurma işlevi olması gerekir. Ayrıca harici güvenlik ekipmanlarına bağlantı sağlamalıdır.

3.1.6 Hız Kontrolü

Robot uç efektörünün ve takım merkez noktasının (TCP) hızının kontrol edilebilir olması gerekir. Özellikle işbirlikçi işyerlerinde TCP'nin hızı 250 mm/s'yi geçmemelidir.

3.1.7 Ortak çalışma gereksinimleri

Ortak çalışma için tasarlanan robotlar, robot bir ortak çalışma halindeyken görsel bir gösterge sağlamalıdır. Aşağıdaki gereklilikler geçerlidir:

- Emniyetli İzlenen Durdurma: Bir insan işbirlikçi çalışma alanındayken robotun durması gerekir ve insan elinden çıktığında otomatik çalışmaya devam edebilir.
- El rehberliği: El rehberliği ekipmanı, bir acil durdurma ve bir etkinleştirme aygıtı içermelidir. Bu işlem sırasında, robotun hızı güvenlik sertifikalı bir şekilde izlenmelidir. Empedans veya rijitlik kontrolü gibi çeşitli teknolojiler insan tarafından el rehberliğini sağlamak için kullanılabilir.
- Hız ve konum izleme: Robot, operatörden, entegre özellikler veya harici girişlerin bir kombinasyonu ile izlenen bir ayırma mesafesi sağlamalıdır.
- İçsel tasarımıyla güç ve kuvvet sınırlamaları: Güç / kuvvet sınırlama fonksiyonları standartların belirlediği sınırlara uymalı ve aşıldığı takdirde bir durdurma yapılmalıdır.

3.1.8 Kontrol sistemi ile güç ve kuvvet sınırlaması

Bu, maksimum güç ve kuvvet değerlerinin aşılmaması için bir kontrol fonksiyonunun kullanılmasını öngörür.

3.1.9 Sınırlı Robot Hareketi

Maksimum çalışma alanı boyutunda korunan alan, gereksiz yere geniş bir alanın çevrilmesine neden olabilir. Robotun hareketinin sınırlandırılması, robotun bütünleşik sistemleri (örneğin güvenlik dereceli yumuşak eksen ve alan sınırlaması veya zor

durmalar), harici sınırlama aygıtları veya her ikisinin bir kombinasyonu ile sağlanabilir. Robotun hareketini daha da sınırlandırmak için kontrol cihazlarında (anahtarlar, ışık perdeleri vb.) dinamik sınırlama kullanılabilir.

3.1.10 Minimum ayırma mesafesinin belirlenmesi

Uygulamaya bağlı olarak, robot ile belirlenecek olan operatör arasındaki minimum ayırma mesafesini sağlamak için kullanılan bir risk değerlendirmesi vardır. Değerlendirme şunları dikkate alır: a) Son efektör ve sahip olabileceği parçalarla ilgili tehlikeler, b) çalışma alanı düzeni c) operatörlerin görevleri ve d) sistemin kullanılabilirliği

3.1.11 Çarpışma tespiti

Güvenlik fonksiyonunun mevcut pozisyonların olup olmadığını belirlemesi gerekir ve hem robotun hem de insanın hızları, ayırma mesafesinin minimum değer altına düşmesine neden olabilir (çarpışma).

3.1.12 Potansiyel çarpışmayı önleme

Bu fonksiyon, robotun aşağıdakileri yaparak olası bir çarpışmayı önlemesini sağlar: a) Hızını yavaşlatma veya duraklatma; b) Yolu boyunca parkurun tersine çevrilmesi; c) Başka bir güvenli yolun yapılması

3.1.13 Teknolojik ve ergonomik gereklilikler

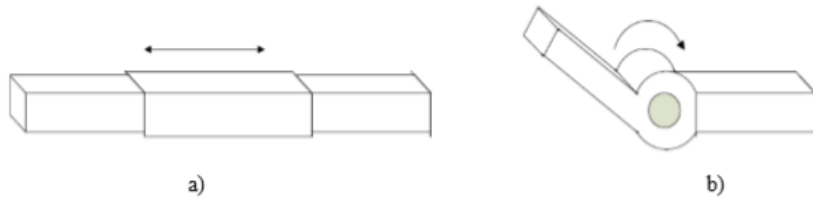
Bir insan ile bir robot arasında olası bir çarpışma durumunda, temas bölgesinde keskin, sivri uçlu, kesici kenarlar veya pürüzlü yüzeyler bulunmamasını sağlamak için dikkatli olunmalıdır. Ayrıca, bir kişinin ortak bir robotla çarpışabileceği ortam çalışma alanının, kullanıcıya dolaşması için yeterli alan sağlayacak şekilde tasarlanması gerekir, böylece sıkma durumlarından kaçınılır.

Bu işlevler, üst üste binmeden farklı güvenlik yönlerini kontrol etmek için standardizasyon kuruluşları tarafından belirlenmiştir. Bununla birlikte, her bir uygulamanın kişiselleştirme sürecinde çakışma olabilir ve işlevsel güvenlik gerekliliklerinin kapsamının eksiksiz olduğu konusunda gözden geçirilmelidir [45].

ROBOT KİNEMATİĞİ

Robotikte kinematik, hareket inceleme bilimine verilen isimdir. Robot uzuvları referans koordinat sistemine göre dönebilir veya ötelenebilir. Denavit ve Hartenberg tarafından geliştirilen sistematik ve genel bir yaklaşım robotun uç noktası ile robot uzuvlarının toplam yer değiştirmeleri arasındaki ilişkiyi kurmuştur. Uzuvlar arasındaki açısal ve doğrusal yer değiştirmeler mafsalsal koordinatları olarak adlandırılır ve uzuv değişkenleri tarafından tanımlanır. Robot tabanından başlayarak, her bir bağlantıya bir çerçeve atanmıştır. Mafsalsal dönüşünün her zaman atanan çerçevenin z eksenine çevresinde olduğu göz önüne alınarak elde edilir. Uç noktasının referans koordinat sistemine göre dönme ve öteleme miktarını belirlemek için, her uzuv dönme ve öteleme miktarlarını gösteren A matrisleri sırayla birbiriyle çarpılır. Uç noktasının koordinatlarının verilmesi durumunda, geriye doğru gidilerek uzuv değişkenleri elde edilebilir. Bu işlemler ileri ve ters kinematik olarak isimlendirilir [46].

Robotlar genelde bir dizi eklemin birbirine bağladığı bir dizi rijit kol içerir. Robot kollarını birbirine bağlamak için genelde döner, prizmatik, helisel, silindirik, küresel ve düzlemsel eklemler kullanılır. Robotikte en çok kullanılanlar, döner ve prizmatik eklemlerdir [17].



Şekil 4.1 Prizmatik ve dönel eklemler a) Prizmatik eklemler b) Dönel eklemler

Kinematik bilimi zaman içerisinde konum değişimini yani devinimle ilgilenen bir hareket bilimidir. Robot kinematiği ile robotun hız, kuvvet ve ivme analizleri yapılır. Eklem ve hareket eksenleri bağlantı noktaları arasındaki ilişkileri tanımlar. Dönme hareketiyle gerçekleşen yer değiştirmeye eklem açısı, bağlar arasında yer değiştirmeden dolayı oluşan ötelemeye ise eklem kayması denir.

Üç boyutlu uzayda bir nesnenin yönelimini ve konumunu tanımlamak için o nesnenin merkezine bir koordinat sistemi yerleştirilir. Robotlarda da robotun eklemlerine ve çalışma alanındaki nesnelere koordinat sistemleri eklenir. Eklenen bu koordinat sistemleri vasıtasıyla robotla çalışma alanındaki nesneler arasında yönelim ve konum ilişkisi tanımlanır [47].

Robotlarda kinematik analiz iki şekilde tanımlanır : 1) İleri kinematik 2) Ters kinematik



Şekil 4.2 İleri (Düz) ve ters kinematik

4.1 İleri (Düz) Kinematik

Bir robot ana çevresinden araç çevresine doğru birbirine prizmatik veya döner eklemlerle bağlanmış seri uzuvlardan meydana gelir. İki uzuv arasındaki ilişki bir homojen dönüşüm matrisiyle tanımlanır. Eklem dönüşüm matrislerinin ard arda çarpılmasıyla ana çevre ile araç çevresi arasındaki ilişki tanımlanır. Bu ilişki robot kolun araç çevresinin konumunu ve yönelimini ana çevreye göre belirtir. Kısaca ileri yön kinematiği eklem değişkenleri ile uç işlevcisinin konumu ve yönelimini ana çevreye göre hesaplar diyebiliriz [48].

Her bir ekleme bir koordinat sistemi yerleştirilirse komşu iki eklem arasındaki ilişki bir T_i^{i-1} dönüşüm matrisi elde edilir. İlk ekleme ait dönüşüm matrisi ilk eklem ile ana çevre arasındaki ilişkiyi tanımlamaya yararken, son ekleme ait dönüşüm matrisi uç işlevcisi ile son eklem arasındaki ilişkiyi tarif eder. Arka arkaya sıralanan bu eklem dönüşüm

matrisleriyle ana çevre ile araç çevresi arasındaki ilişki tanımlanmış olur. Bu ilişkiye de ileri kinematik adı verilir. Ana çevre ile araç çevresi arasındaki ilişki;

$$T_N^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_N^{N-1} \quad \text{şeklindedir [49].}$$

Kinematik problemlerin çözümü için birçok yöntemler mevcuttur. Fakat çoğunlukla ileri kinematik problemlerinde çözüm yöntemi kolay olduğu için homojen dönüşüm yöntemi kullanılır. Bu tezde de bu yönteme dayanarak çözüme gidilmiştir.

4.1.1 Denavit-Hartenberg Yöntemi

Bu yöntemde dört ana değişken kullanılarak robot kinematiği çıkarılır. Bu değişkenler; iki eksen arasındaki uzuv uzunluğu a_{i-1} ,

iki komşu eksen arasındaki eksen açısı α_{i-1} ,

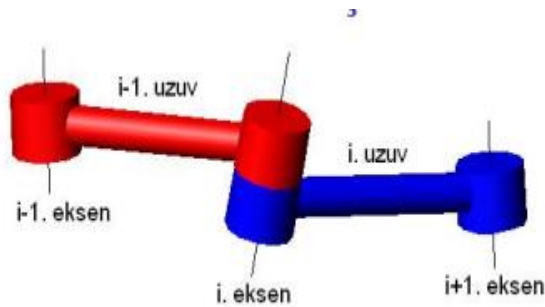
üst üste çakışan eksenler arasındaki eklem kayması (kaçıklığı) d_i ve

iki komşu uzuv arasındaki eklem açısı θ_{i-1} 'dir.

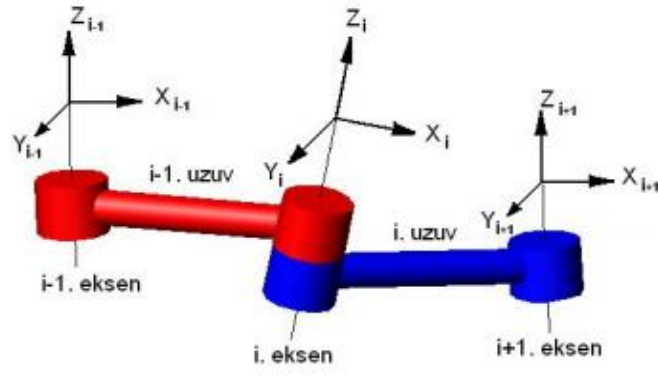
Bu dört değişkende Denavit-Hartenberg değişkenidir. Bu değişkenleri belirlemek için öncelikli olarak Şekil 4.3'deki resimden de görüldüğü üzere robotun dönme eksenleri tanımlanır ve dönme eksenleri uzuvlardan bir fazla olacak şekilde numara verilir.

Daha sonra bu eksenlerin her birine bir koordinat sistemi yerleştirilir ve kol dönme eksenini Şekil 4.4'de görüldüğü üzere koordinat sisteminin Z eksenini olarak tanımlanır.

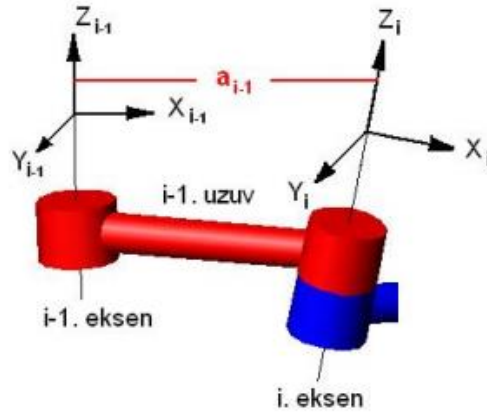
Şekil 4.5'de görüldüğü üzere X_{i-1} yönünde uzanan Z_{i-1} ile Z_i eksenleri arasındaki dik uzaklığa a_{i-1} uzuv uzunluğu adı verilir [50].



Şekil 4.3 Dönme eksenlerinin belirlenmesi

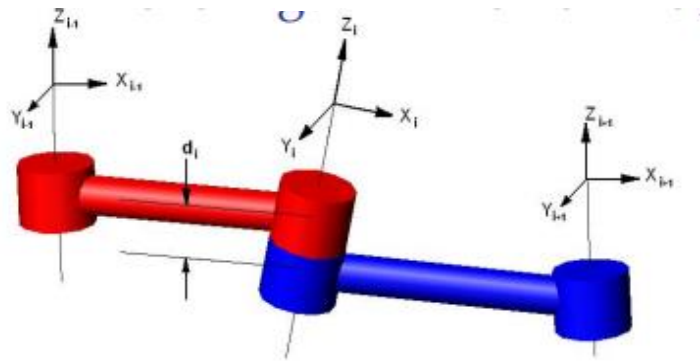


Şekil 4.4 Dönme eksenlerine x, y ve z eksenlerinin yerleştirilmesi



Şekil 4.5 a_{i-1} uzuv uzunluğu

Şekil 4.6'da gösterilen Z_i yönünde uzanan X_{i-1} ile X_i eksenleri arasındaki dik uzaklığa d_i eklem kaçıklığı adı verilir.



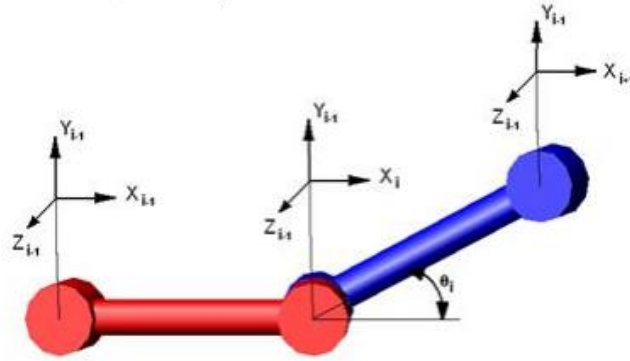
Şekil 4.6 d_i eklem kaçıklığı

Şekil 4.7'de gösterildiği gibi Z_{i-1} eksenini ile Z_i eksenini arasındaki X_i boyunca ölçülen açiya α_{i-1} Eksen Açısı adı verilir.



Şekil 4.7 α_{i-1} eksen açısı

Şekil 4.8’de gösterilen X_{i-1} eksenini ile X_i eksenini arasındaki Z_i boyunca ölçülen açısı θ_i eklem açısı adı verilir [50].



Şekil 4.8 θ_i eklem açısı

4.1.2 Koordinat Sistemlerinin Eklemlere Yerleştirilmesi

Koordinat sistemleri eklemlere yerleştirilirken sırasıyla aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir. Öncelikle eklem eksenlerinin dönme ve kayma yönleri belirlenerek bu eksene paralel bir doğru çizilir. Eklem eksenleri döner eklemler için dönme yönü Z, prizmatik eklemler için kayma yönü Z eksenini olarak tanımlanır. Z eksenine dik ve uzuv boyunca uzanan eksen X eksenini olarak adlandırılır. Z ve X eksenleri belirlendikten sonra Y eksenini sağ el kuralına göre tanımlanır. Arka arkaya gelen iki eklemin dönme ve kayma yönleri aynı ise Z eksenini tanımlandıktan sonra kol boyunca X eksenini tanımlanır ve sağ el kuralına göre Y eksenini tanımlanır. Sıfır ve birinci eksenlerin üst üste geldiği kabul edilir.

Bir robotun eklemlerine koordinat sistemleri yerleştirilirken birinci eksenin dönme yönü Z eksenini olarak belirlendikten sonra bu ekleme X eksenini döndürüldüğünde komşu iki Z eksenini üst üste çıkışacak şekilde bir X eksenini yerleştirilir. Koordinat sistemleri eklemlere yerleştirildikten sonra Denavit-Hartenberg değişkenleri bulunur ve tabloya yazılır [49].

a_{i-1} : İki eksen arasındaki bağ uzunluğu

α_{i-1} : (i-1) ile i eksenleri arasındaki bağ açısı

θ_{i-1} : İki bağ arasındaki eklem açısı

d_{i-1} : Üst üste çıkışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığıdır.

Çizelge 4.1 Denavit-Hartenberg değişkenleri

Eksen No	D-H Değişkenleri				Eklem Değişkeni
	2 komşu eksen açısı	Uzuv Uzunluğu	Eklem Kaçıklığı	Eklem açısı	
i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	d_i veya θ_i
1	α_0	a_0	d_1	θ_1	d_1 veya θ_1
2	α_1	a_1	d_2	θ_2	d_2 veya θ_2
3	α_2	a_2	d_3	θ_3	d_3 veya θ_3
4	α_3	a_3	d_4	θ_4	d_4 veya θ_4

Çizelgede verilen değişkenlerin oluşturduğu matrislerin çarpımından yararlanarak n serbestlik derecesine sahip robotun bir ekleme ait denklem 4.1'deki dönüşüm matrisi elde edilir.

$$T_i^{i-1} = R_x(\alpha_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Bu yöntem kullanarak her bir ekleme ait transformasyon matrisi elde edilir. Bu matrisin tanımı aşağıdaki denklem 4.4'te gösterilmiştir.

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & P_{xyz} \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Bu matristeki dönme matrisi “R” ve öteleme vektörü “ P_{xyz} ” ise sırasıyla; Dönme olayı X yönünde dönme gerçekleşiyorsa;

$$R_{x_i}^{i-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_i & -s\theta_i \\ 0 & s\theta_i & c\theta_i \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Y yönünde dönme gerçekleşiyorsa;

$$R_{y_i}^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & 0 & -s\theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta_i & 0 & c\theta_i \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Z yönünde dönme gerçekleşiyorsa;

$$R_{z_i}^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Öteleme vektörü “ P_{xyz} ” ise;

$$P_{xyz} = \begin{bmatrix} x'te_öteleme \\ y'de_öteleme \\ z'de_öteleme \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Denklem 4.5, 4.6 ve 4.7’de görüldüğü gibi dönme matrisi 3x3’lük bir matristen, denklem 4.8’de görüldüğü gibi öteleme vektörü ise 3x1’lik matristen oluşmaktadır. N serbestlik derecesine sahip bir robotun ileri(düz) kinematik matrisi her bir ekleme ait dönüşüm matrisin çarpımı ile oluşur.

$$T_n^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_n^{n-1} \quad (4.7)$$

4.1.3 Ters (Inverse) Kinematik

Ters kinematik robot kontrolünün en önemli kısımlarını oluşturmaktadır. Ters kinematik çözümü ileri kinematik çözümü gibi belli bir sisteme göre yapılamaz. Tasarlanan robotun şekline ve robot eksen sayısına göre çözüm yöntemin zorluğu ve çözümü değişmektedir. Bu nedenle şimdiye kadar daha çok 6 serbestlik derecesine sahip endüstriyel robotlar üzerinde durulmuştur. Son üç eksen bir noktada kesiştiğinde çözüm kolaylaşırken bunun aksi durumun çözüm bir o kadar zorlaşmaktadır. Robotun

uç işlevcisinin ana çevreye göre konumu ve yönelimi verildiğinde robot kolunun bu konuma ve yönelime gelebilmesi için gerekli eklem değişkenlerinin bulunmasıdır [50].

4.1.4 Eklem Uzayında Yörünge Planlaması

Eklem uzayında yörünge planlaması yapılırken üç veya daha yüksek dereceli polinomlar kullanılır. Uç işlevcisi, başlangıç noktasından istenilen noktaya belirli bir zamanda gider. Önce uç işlevcinin başlangıç ve hedef noktalarının konumu ve yönelimi eklem açıları cinsinden ters kinematik ile hesaplanır [49]. Daha sonra eklemler için geçiş noktalarından geçip hedef noktasında son bulan düzgün bir fonksiyon bulunur. Eklemlerin hareket süreleri aynıdır, her eklem geçiş noktalarına aynı anda ulaşır. Bütün eklemler için aynı süre belirlendiğinden belirli bir eklem için istenilen eklem açısı fonksiyonunun belirlenmesi diğer eklem fonksiyonlarından bağımsız olur [49]. Uç işlevcisinin t_0 anındaki başlangıç konumu $\theta(0) = \theta_0$ ve t_f anındaki hedef konumu $\theta(t_f) = \theta_f$ olsun. t_0 ile t_f arası üçüncü dereceden bir polinom vasıtasıyla n tane noktaya bölünür. Bu iki koşula ek olarak başlangıç ve bitiş hızları $\dot{\theta}(t_f) = 0$ ve $\dot{\theta}(0) = 0$ eklenir [49].

$$\begin{aligned}\theta(0) &= \theta_0 \\ \theta(t_f) &= \theta_f \\ \dot{\theta}(t_f) &= 0 \\ \dot{\theta}(0) &= 0\end{aligned}\tag{4.8}$$

Yukarıdaki dört koşul, üçüncü dereceden bir polinomun katsayılarını bulmak için yeterlidir. Bu koşullar, zamana bağlı kübik bir yörünge oluşturan üçüncü dereceden polinom olarak denklem 4.9'daki gibi ifade edilir [49].

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3\tag{4.9}$$

Bu yörüngedeki, eklem hızları ve ivmeleri Eşitlik 4.9'un birinci ve ikinci dereceden türevleri alınarak bulunur [49].

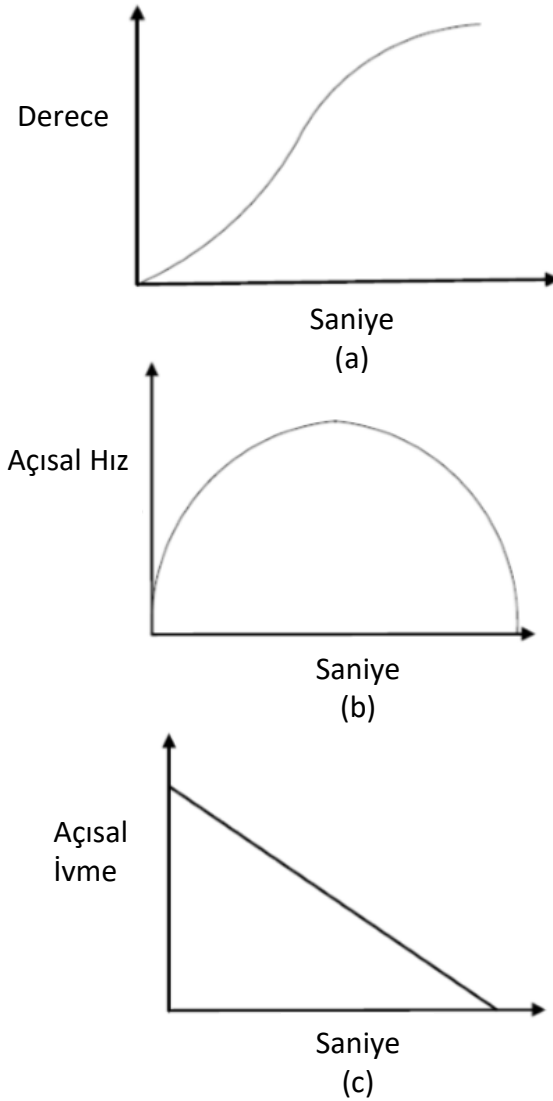
$$\begin{aligned}\dot{\theta}(t) &= a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \\ \ddot{\theta}(t) &= 2a_2 + 6a_3t\end{aligned}\tag{4.10}$$

Buradan denklemler arasında eşitlikler yazılarak katsayılar aşağıdaki gibi çıkartılabilir.

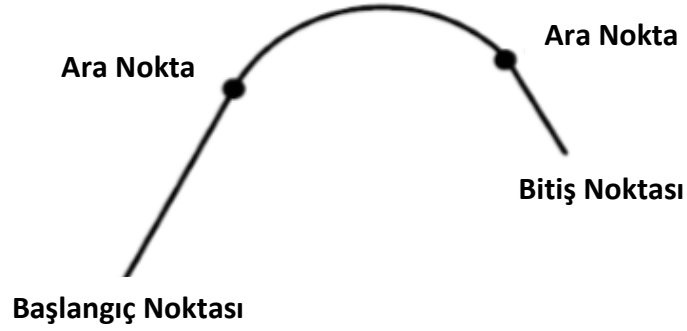
$$\begin{aligned} a_0 &= \theta_0 \\ a_1 &= 0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) \\ a_3 &= \frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Bu katsayılardan faydalanarak hesaplanan, başlangıç ve bitiş noktaları sıfır olan üçüncü dereceden kübik bir yörüngeye ait konum, hız ve ivme grafikleri şekilsel olarak Şekil 4.9 a,b,c'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Zamana bağlı açı, hız ve ivme değişimleri a) Derece-zaman değişimi b) Hız-zaman değişimi c) ivme zaman değişimi [49]



Şekil 4.10 Ara nokta içeren yörünge [49]

Eğer, robot kolu istenilen her geçiş noktasında duracaksa farklı bir uygulamaya gerek duyulmadan yukarıda verilen polinomlar kullanılarak yörünge planlaması yapılabilir. Ancak, robot kolunun bu noktalardan durmadan geçmesi isteniyorsa kübik polinomun yol sınırlamalarına uyacağı genel bir metot bulunmalıdır. Tek hedef noktası bulunması durumunda olduğu gibi, her geçiş noktası, genellikle uç çerçevenin temel çerçeveye dayalı pozisyonu ve hızı olarak belirlenir. Ters kinematik çözümler uygulanarak bu geçiş noktaları istenilen eklem açıları kümesine dönüştürülür. Şimdi her eklem için geçiş noktalarını düzgün bir şekilde bağlayan kübik polinomu bulmaya çalışalım [49].

Burada geçiş noktalarındaki hız sıfır değil bilinen başka bir değerdir.

$$\begin{aligned}\theta'(0) &= \theta'_0 \\ \theta'(t_f) &= \theta'_f\end{aligned}\tag{4.13}$$

Bu veriler ışığında kübik polinomu tanımlayan dört eşitlik aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned}\theta(0) &= a_0 \\ \theta_f &= a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \\ \theta'_0 &= a_1 \\ \theta'_f &= a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2\end{aligned}\tag{4.14}$$

Bu eşitliklerdeki katsayıların değerlerini bulmak istersek;

$$\begin{aligned}a_0 &= \theta_0 \\ a_1 &= \theta'_0 \\ a_2 &= \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) - \frac{2}{t_f}\theta'_0 - \frac{1}{t_f}\theta'_f \\ a_3 &= \frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) + \frac{1}{t_f^2}(\theta'_f + \theta'_0)\end{aligned}\tag{4.15}$$

Eğer bütün geçiş noktalarındaki hızları biliyorsak gerekli kübiği bulmak için yukarıdaki dört eşitliği her eklem için uygulayabiliriz.

4.1.5 Yüksek Dereceli Polinomlar

Bazı durumlarda yüksek dereceden polinomlar kullanılır. Örneğin beşinci dereceden bir polinom pozisyonun, hızın ve ivmenin sürekli olmasını sağlar. Bu genel polinomu başlangıç ve bitiş açıları için incelersek aşağıdaki eşitliği elde ederiz;

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (4.16)$$

Burada sınırlamalar aşağıdaki gibi verilir;

$$\begin{aligned} \theta_0 &= a_0 \\ \theta_f &= a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5 \\ \theta_0' &= a_1 \\ \theta_f' &= a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 + 4a_4 t_f^3 + 5a_5 t_f^4 \\ \theta_0'' &= 2a_2 \\ \theta_f'' &= 2a_2 + 6a_3 t_f + 12a_4 t_f^2 + 20a_5 t_f^3 \end{aligned} \quad (4.17)$$

Bu sınırlamalar altı bilinmeyenli altı denklem oluşturur. Bu denklemlerin çözümü sonucu aşağıdaki ifadeler bulunur.

$$\begin{aligned} a_0 &= \theta_0 \\ a_1 &= \theta_0' \\ a_2 &= \frac{\theta_0''}{2} \\ a_3 &= \frac{20\theta_f' - 20\theta_0' - (8\theta_f'' + 12\theta_0'')t_f - (3\theta_0'' - \theta_f'')t_f^2}{2t_f^3} \\ a_4 &= \frac{30\theta_0' - 30\theta_f' + (14\theta_f'' + 16\theta_0'')t_f - (3\theta_0'' - 2\theta_f'')t_f^2}{2t_f^4} \\ a_5 &= \frac{12\theta_0' - 12\theta_f' - (6\theta_f'' + 6\theta_0'')t_f + (3\theta_0'' - \theta_f'')t_f^2}{2t_f^5} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Hareket bir başlangıç ve son noktası arasında gerçekleşecek ise hızın ve ivmenin, başlangıç ve son değerleri sıfır alınır. Eğer geçiş noktaları tanımlanırsa hız, daha önce bahsedildiği gibi seçilir. İvmenin sürekliliği için başlangıç, ara ve son ivme değerleri sıfır alınabilir [49].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan bilgisayar programları hakkında bilgi verilecek ve deneysel yöntemler anlatılacaktır.

1.1 Kullanılan Bilgisayar Programları

Bu çalışmada Wolfram Mathematica 11.0 programı ile MATLAB R2015a programı kullanılmıştır. Wolfram Mathematica programı, 3 eksene indirgenmiş endüstriyel robotun kinematik denklemlerini çıkarmak ve sadeleştirmek için, MATLAB programı ise endüstriyel robotun her bir eksen için moment, güç ve enerji miktarlarını hesaplamak ve yorumlamak için kullanılmıştır.

5.2 Deneysel Yöntem

Mevcut tez çalışması kapsamında; UNIVERSAL firmasının UR10 tipi İşbirlikçi Robotu incelenmiştir. Gerek yenilikçi bir robot olması, gerekse de kol geometrisinin silindirik şekilde olmasından ötürü belirtilen robot tipi tez çalışması için tercih edilmiştir. Bu sayede hesaplamalar daha kolay olacaktır.

6 eksene sahip robot, 10 kg'lık yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bütün mafsalları 360° döneabilen robotun toplam ağırlığı 28,9 kg'dır ve yapı çapı 1300 mm olan küresel bir çalışma alanına sahiptir. Bu verilere çalışmanın hesaplama ve analiz aşamalarında değinilecektir.

Şekil 5.1'de Universal marka UR10 tipi bir işbirlikçi robot görünmektedir.



Şekil 5.1 UNIVERSAL firmasının UR10 tipi işbirlikçi robotu

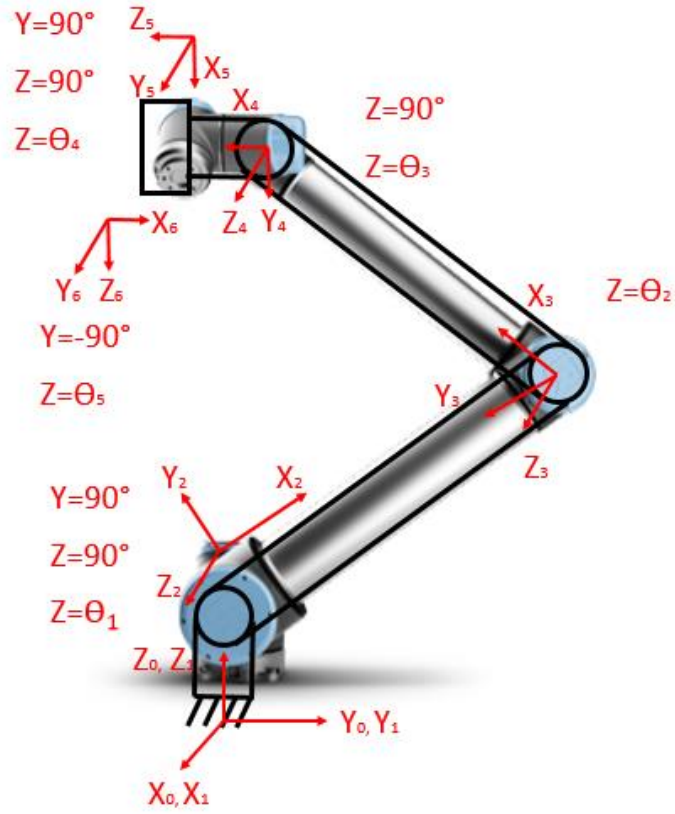
5.2.1 Homojen Dönüşüm Matrisi Yöntemi ile Kinematik Denklemlerin Çıkarılması

Deneysel çalışmalar kapsamında Şekil 5.2’de görülen şekilde Homojen Dönüşüm Matrisi yöntemi ile robotun 6 eksen için eklemlere koordinat sistemi yerleştirilmiş ve eklemler dönüşüm matrisleri ile robot kinematik denklemler çıkarılmıştır. Çıkarılan denklemlerin sadeleştirilmesi için Wolfram Mathematica programı kullanılmış, fakat denklemlerin çok uzun olması nedeniyle program yetersiz kalmıştır. Bu sebeple çalışmaya robotun ilk 3 eksenine dikkate alınarak, 4-5 ve 6. eksen ile çalışma ağırlığının 4. eksende toplanarak modellenmesine karar verilmiştir.

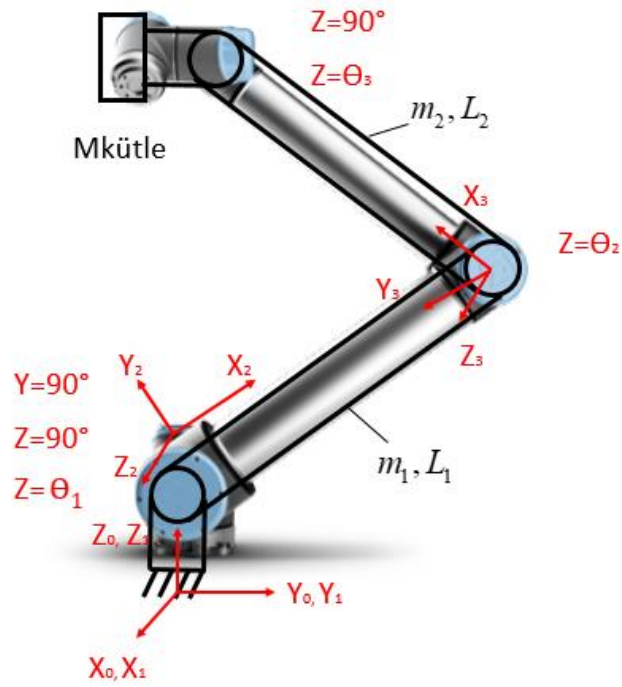
3 eksenli modelleme çalışmaları hızlandırmıştır. Şekil 5.3’te 3 eksene indirgenmiş robot yapısının gösterimi bulunmaktadır.

1. Eksen için θ_1 dönme açısı, 2. Eksen için θ_2 dönme açısı ve 3. Eksen için θ_3 dönme açısı verilmiştir.

Bunun dışında 1. Eksen, 0. Eksen ile çakışık olarak alındığından Homojen Öteleme Matrisleri olmayacaktır. 2. Eksende önce y-ekseninde 90° , sonra z-yönünde 90° ve θ_2 kadar dönme oluşmuş ve dönme matrisleri oluşturulmuş, 3. Eksende z-yönünde θ_3 kadar dönme oluşmuş ve dönme matrisleri oluşturulmuştur. 2. Eksen (S) ve 3. Eksen (R) ağırlıkları da ağırlık merkezine indirgenerek hesaplamalara benzer şekilde dahil edilmiştir.



Şekil 5.2 6 eksen için eklemlere koordinat sisteminin yerleştirilmesi



Şekil 5.3 3 eksen için eklemlere koordinat sisteminin yerleştirilmesi

$$P^0 = T_0^3 P^3$$

$$T_0^3 = T_0^1 T_1^2 T_2^3$$

$$T_0^1 = [T_T]_0^1 [T_R]_0^1 \quad [T_R]_0^1 = [T_0^1]_{Z=\theta_1}$$

$$[T_R]_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1^2 = [T_T]_1^2 [T_R]_1^2$$

$$[T_R]_1^2 = [T_1^2]_{Y=90^0} [T_1^2]_{Z=90^0} [T_1^2]_{Z=\theta_2}$$

$$[T_R]_1^2 = \begin{bmatrix} \cos 90^0 & 0 & \sin 90^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin 90^0 & 0 & \cos 90^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 90^0 & -\sin 90^0 & 0 & 0 \\ \sin 90^0 & \cos 90^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[T_R]_1^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^3 = [T_T]_2^3 [T_R]_2^3 \quad [T_R]_2^3 = [T_2^3]_{Z=\theta_3}$$

$$[T_R]_2^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_1 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^3 = T_0^1 T_1^2 T_2^3$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_1 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 & \cos \theta_1 & -L_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_1 \sin \theta_3 & -\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 & \sin \theta_1 & L_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3 & -\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3 & 0 & L_1 \sin \theta_2 + h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P^0 = \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 & \cos \theta_1 & -L_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_1 \sin \theta_3 & -\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 & \sin \theta_1 & L_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3 & -\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3 & 0 & L_1 \sin \theta_2 + h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$P^0 = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 (-L_1 \cos \theta_2 - L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ \cos \theta_1 (L_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ h_1 + L_1 \sin \theta_2 + L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki işlemler sonucu robot kolunun uç noktasının konumu bulunmuştur.

Konumun zamana göre türevi hızı verdiği için P^0 noktasının türevi alınmıştır.

$$P^0 = \begin{bmatrix} (L_1 (-\cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \theta_1' + \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] \theta_2') + L_2 (\sin[\theta_2 + \theta_3] \sin[\theta_1] (\theta_2' + \theta_3') - \theta_1' \cos[\theta_1] \cos[\theta_2 + \theta_3])) \\ (L_1 (-\sin[\theta_1] \cos[\theta_2] \theta_1' - \cos[\theta_1] \sin[\theta_2] \theta_2') - L_2 (\sin[\theta_2 + \theta_3] \cos[\theta_1] (\theta_2' + \theta_3') + \theta_1' \sin[\theta_1] \cos[\theta_2 + \theta_3])) \\ \cos[\theta_2] L_1 \theta_2' + \cos[\theta_2 + \theta_3] L_2 (\theta_2' + \theta_3') \\ 0 \end{bmatrix}$$

R (3. Eksen) için benzer hesaplama yapıldığında aşağıdaki sonuçlar çıkar:

$$R^0 = T_0^3 R^3$$

$$R^0 = \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 & \cos \theta_1 & -L_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_1 \sin \theta_3 & -\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 & \sin \theta_1 & L_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3 & -\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3 & 0 & L_1 \sin \theta_2 + h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_2 / 2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$R^0 = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 (-L_1 \cos \theta_2 - (L_2 / 2) \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ \cos \theta_1 (L_1 \cos \theta_2 + (L_2 / 2) \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ h_1 + L_1 \sin \theta_2 + (L_2 / 2) \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 1 \end{bmatrix}$$

R (3. Eksen) ağırlık merkezinin yukarıda konumu bulunmuştur. Konumun zamana göre türevi R^0 noktasının hızını verecektir.

$$R^0 = \begin{bmatrix} \left(L_1 (-\cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \theta'_1 + \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] \theta'_2) + (L_2 / 2) (\sin[\theta_2 + \theta_3] \sin[\theta_1] (\theta'_2 + \theta'_3) - \theta'_1 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2 + \theta_3]) \right) \\ \left(L_1 (-\sin[\theta_1] \cos[\theta_2] \theta'_1 - \cos[\theta_1] \sin[\theta_2] \theta'_2) - (L_2 / 2) (\sin[\theta_2 + \theta_3] \cos[\theta_1] (\theta'_2 + \theta'_3) + \theta'_1 \sin[\theta_1] \cos[\theta_2 + \theta_3]) \right) \\ \cos[\theta_2] L_1 \theta'_2 + \cos[\theta_2 + \theta_3] (L_2 / 2) (\theta'_2 + \theta'_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

S (2. Eksen) için benzer hesaplama yapıldığında aşağıdaki sonuçlar çıkar:

$$S^0 = T_0^2 S^2$$

$$S^0 = \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \sin \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 & 0 \\ \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 / 2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$S^0 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 (L_1 / 2) \cos \theta_2 \\ \cos \theta_1 (L_1 / 2) \cos \theta_2 \\ h_1 + (L_1 / 2) \sin \theta_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

S (2. Eksen) ağırlık merkezinin yukarıda konumu bulunmuştur. Konumun zamana göre türevi S^0 noktasının hızını verecektir.

$$S^0 = \begin{bmatrix} \left((L_1 / 2) (-\cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \theta'_1 + \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] \theta'_2) \right) \\ \left((L_1 / 2) (-\sin[\theta_1] \cos[\theta_2] \theta'_1 - \cos[\theta_1] \sin[\theta_2] \theta'_2) \right) \\ \cos[\theta_2] (L_1 / 2) \theta'_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu aşamadan sonra Lagrange Denklemleri ile her bir eksen için Moment Denklemleri hesap edilecektir. Lagrange Denklemlerinde Kinetik Enerji kullanıldığı için matris olan yukarıdaki ifadenin transpozesi alınıp yine kendisi ile çarpılmıştır.

$$T = \frac{1}{2} M_{kutle} V_{P^0}^2 + \frac{1}{2} m_2 V_{R^0}^2 + \frac{1}{2} m_1 V_{S^0}^2$$

$$V_{P^0}^2 = P^0 * P^{0T}$$

$$V_{R^0}^2 = R^0 * R^{0T}$$

$$V_{S^0}^2 = S^0 * S^{0T}$$

$$P^{02} = V_{P^0}^2 = L_1^2 \left((\theta')_2^2 + \cos[\theta_2]^2 (\theta')_1^2 \right) + 2L_1 L_2 \left(\cos[\theta_3] \theta'_2 (\theta'_2 + \theta'_3) + \cos[\theta_2] \cos[\theta_2 + \theta_3] (\theta')_1^2 \right) +$$

$$L_2^2 \left((\theta'_2 + \theta'_3)^2 + \cos[\theta_2 + \theta_3]^2 (\theta')_1^2 \right)$$

$$R^{02} = V_{R^0}^2 = L_1^2 \left((\theta')_2^2 + \cos[\theta_2]^2 (\theta')_1^2 \right) + L_1 L_2 \left(\cos[\theta_3] \theta'_2 (\theta'_2 + \theta'_3) + \cos[\theta_2] \cos[\theta_2 + \theta_3] (\theta')_1^2 \right) +$$

$$(L_2^2 / 4) \left((\theta'_2 + \theta'_3)^2 + \cos[\theta_2 + \theta_3]^2 (\theta')_1^2 \right)$$

$$S^{02} = V_{S^0}^2 = (L_1^2 / 4) \left((\theta')_2^2 + \cos[\theta_2]^2 (\theta')_1^2 \right)$$

$$T = \frac{1}{8} (L_1^2 (m_1 + 4(M_{kutle} + m_2))) \left((\theta')_2^2 + \cos[\theta_2]^2 (\theta')_1^2 \right)$$

$$+ 4L_1 L_2 (2M_{kutle} + m_2) \left(\cos[\theta_3] \theta'_2 (\theta'_2 + \theta'_3) + \cos[\theta_2] \cos[\theta_2 + \theta_3] (\theta')_1^2 \right)$$

$$+ L_2^2 (4M_{kutle} + m_2) \left((\theta'_2 + \theta'_3)^2 + \cos[\theta_2 + \theta_3]^2 (\theta')_1^2 \right)$$

$$U = m * g * h = M_{kutle} * g^T * P^0 + m_2 * g^T * R^0 + m_1 * g^T * S^0$$

$$U = M_{kutle} \begin{bmatrix} 0 & 0 & g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 (-L_1 \cos \theta_2 - L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ \cos \theta_1 (L_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ h_1 + L_1 \sin \theta_2 + L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 1 \end{bmatrix} +$$

$$m_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 (-L_1 \cos \theta_2 - (L_2 / 2) \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ \cos \theta_1 (L_1 \cos \theta_2 + (L_2 / 2) \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ h_1 + L_1 \sin \theta_2 + (L_2 / 2) \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 1 \end{bmatrix} +$$

$$m_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 & g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 (L_1 / 2) \cos \theta_2 \\ \cos \theta_1 (L_1 / 2) \cos \theta_2 \\ h_1 + (L_1 / 2) \sin \theta_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$U = (1/2)g(\cos[\theta_1 + \theta_2]L_2(2M_{kutle} + m_2) + h_1(m + 2M_{kutle} + 2m_1 + 2m_2) + [L_1 \sin \theta_1(m_1 + 2(M_{kutle} + m_2))])$$

Her bir θ_1, θ_2 ve θ_3 açıları için ayrı ayrı Lagrange denklemleri ile Moment ifadeleri bulunmuştur.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_1} + \frac{\partial U}{\partial \theta_1} = M_{\theta_1}$$

$$\begin{aligned} M_{\theta_1} = & (1/4)(-L_1^2(m_1 + 4(m_2 + M_{kutle}))) (\sin[2\theta_2] \theta_1' \theta_2' - \cos[\theta_2]^2 \theta_1'') \\ & - 4L_1 L_2 (m_2 + 2M_{kutle}) (\theta_1' (\sin[2\theta_2 + \theta_3] \theta_2' + \cos[\theta_2] \sin[\theta_2 + \theta_3] \theta_3') \\ & - \cos[\theta_2] \cos[\theta_2 + \theta_3] \theta_1'') + \\ & + (m_2 + 4M_{kutle}) L_2^2 (-\sin[2(\theta_2 + \theta_3)] \theta_1' (\theta_2' + \theta_3') + \cos[\theta_2 + \theta_3]^2 \theta_1'') \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_2} + \frac{\partial U}{\partial \theta_2} = M_{\theta_2}$$

$$\begin{aligned} M_{\theta_2} = & (1/8)(4g(\cos[\theta_2 + \theta_3](m_2 + 2M_{kutle})L_2 + \cos[\theta_2]L_1(m_1 + 2(M_{kutle} + m_2)))) \\ & + (4\sin[2\theta_2 + \theta_3]L_1 L_2 (2M_{kutle} + m_2) + \sin[2(\theta_2 + \theta_3)]L_2^2 (4M_{kutle} + m_2) \\ & + \sin[2\theta_2]L_1^2 (m_1 + 4(M_{kutle} + m_2))) (\theta_1')^2 + 2(L_1^2 (m_1 + 4(M_{kutle} + m_2)) \theta_2' \\ & + L_2^2 (4M_{kutle} + m_2) (\theta_2'' + \theta_3'') - 2L_1 L_2 (2M_{kutle} + m_2) (\sin[\theta_3] \theta_3' (2\theta_2' + \theta_3') \\ & - \cos[\theta_3] (2\theta_2'' + \theta_3''))) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_3} + \frac{\partial U}{\partial \theta_3} = M_{\theta_3}$$

$$\begin{aligned} M_{\theta_3} = & (1/8)L_2 (4g \cos[\theta_2 + \theta_3] (m_2 + 2M_{kutle}) + \sin[2(\theta_2 + \theta_3)]L_2 (m_2 + 4M_{kutle}) (\theta_1')^2 \\ & + 4L_1 (m_2 + 2M_{kutle}) (\cos[\theta_2] \sin[\theta_2 + \theta_3] (\theta_1')^2 + \sin[\theta_3] \theta_2' (\theta_2' + \theta_3')) \\ & + 2(-2L_1 (m_2 + 2M_{kutle}) (\sin[\theta_3] \theta_2' \theta_3' - \cos[\theta_3] \theta_2'') + L_2 (m_2 + 4M_{kutle}) (\theta_2'' + \theta_3''))) \end{aligned}$$

Eşitliklerde geçen terimler ve açılar aşağıda tanımlanmıştır:

m ; 1. Eksene etkiyen robotun ve iş parçasının kütlesi

m_1 ; 2. Eksen kütlesi

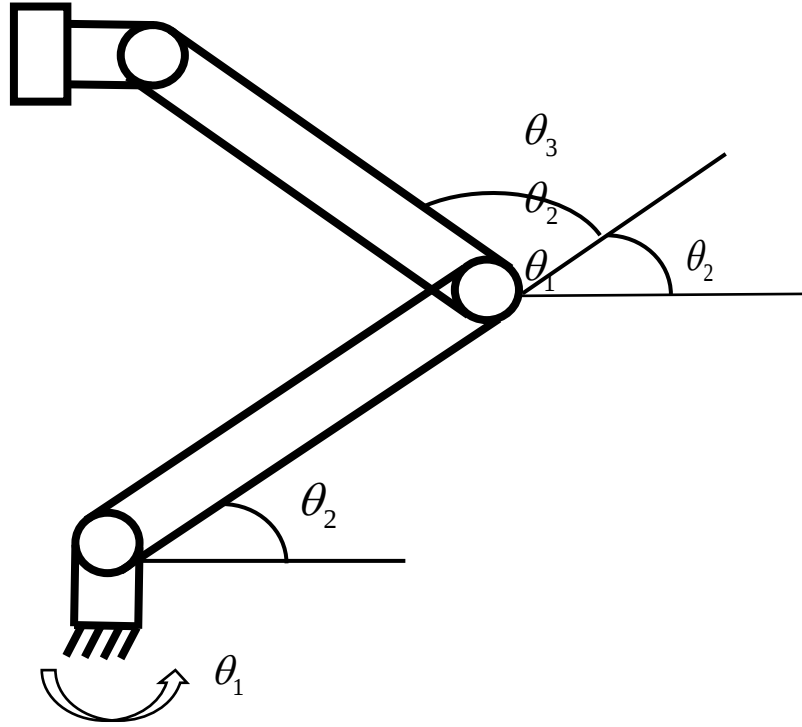
m_2 ; 3. Eksen kütlesi

M_{kutle} ; 4-5-6. Eksen ile iş parçasının kütlesi

L_1 ; 2. Eksen kol boyu

L_2 ; 3. Eksen kol boyu

h_1 ; 1. Eksen ile 2. Eksen arasındaki yükseklik farkı



Şekil 5.4 Robot eksen açıları

5.2.2 Yörünge Planlaması

Çalışmada robotun 4 farklı yörüngeye göre eklem açıları verilerek enerji harcaması hesaplanacaktır. Her yörüngeyedeki ilk ve son konumların hız ve ivmeleri sıfır alınacaktır.

5. Dereceden polinomlar kullanılarak katsayılar hesap edilecektir.

Çizelge 5.1 1 numaralı yörünge planlaması

1 Numaralı Yörünge Planlaması		
Açılar	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	0°
θ_2	30°	60°
θ_3	0°	0°

Çizelge 5.2 2 numaralı yörünge planlaması

2 Numaralı Yörünge Planlaması		
Açılar	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	0°
θ_2	45°	75°
θ_3	135°	0°

Çizelge 5.3 3 numaralı yörünge planlaması

3 Numaralı Yörünge Planlaması		
Açılar	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	90°
θ_2	45°	105°
θ_3	0°	0°

Çizelge 5.4 4 numaralı yörünge planlaması

4 Numaralı Yörünge Planlaması		
Açılar	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	90°
θ_2	60°	90°
θ_3	135°	0°

5.2.3 Yörünge Planlamaları için Robot Kolunun Enerji Harcaması

$$\theta_1 \text{ için; } [K] \cdot [A1] = [B1]$$

$$\theta_2 \text{ için; } [K] \cdot [A2] = [B2]$$

$$\theta_3 \text{ için; } [K] \cdot [A3] = [B3]$$

$$[A1] = [K]^{-1} [B1]$$

$$[A2] = [K]^{-1} [B2]$$

$$[A3] = [K]^{-1} [B3]$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & T & T^2 & T^3 & T^4 & T^5 \\ 0 & 1 & 2T & 3T^2 & 4T^3 & 5T^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6T & 12T^2 & 20T^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A1_0 \\ A1_1 \\ A1_2 \\ A1_3 \\ A1_4 \\ A1_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{1b} \\ \theta'_{1b} \\ \theta''_{1b} \\ \theta_{1s} \\ \theta'_{1s} \\ \theta''_{1s} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & T & T^2 & T^3 & T^4 & T^5 \\ 0 & 1 & 2T & 3T^2 & 4T^3 & 5T^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6T & 12T^2 & 20T^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A2_0 \\ A2_1 \\ A2_2 \\ A2_3 \\ A2_4 \\ A2_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{2b} \\ \theta'_{2b} \\ \theta''_{2b} \\ \theta_{2s} \\ \theta'_{2s} \\ \theta''_{2s} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & T & T^2 & T^3 & T^4 & T^5 \\ 0 & 1 & 2T & 3T^2 & 4T^3 & 5T^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6T & 12T^2 & 20T^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A3_0 \\ A3_1 \\ A3_2 \\ A3_3 \\ A3_4 \\ A3_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{3b} \\ \theta'_{3b} \\ \theta''_{3b} \\ \theta_{3s} \\ \theta'_{3s} \\ \theta''_{3s} \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki denklem ve matrislerin MATLAB'te çözümü yapılarak moment değerleri bulunur. Moment değerinin açısal hız ile çarpımı $(\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3)$ belirtilen mafsalda harcanan gücü, birim zamanda harcanan güçlerin toplamı da (gücün zamana göre integrali) mafsalda harcanan enerjiyi vermektedir.

Çalışmamızda birim zamanda harcanan gücü bulmak için motorların çektiği akım ve gerilim ifadeleri kullanılmıştır. Robot kollarında kullanılan servo motorlar, yerçekimi ivmesine aksi yönde hareket edilirken akım çekerler, fakat yerçekimi ivmesi ile aynı yönde hareket edilirken jeneratör vazifesi görürler ve sisteme enerji üretirler. Bu durum dikkate alınmazsa enerji değerlerinde sapmalar ve yanlışlıklar meydana gelmektedir. Bu sebeple aşağıdaki işlemler yapılmış ve hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu sayede daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir.

$$I_{\theta_1} = M_{\theta_1} / (K_{t_1} * N_1)$$

$$I_{\theta_2} = M_{\theta_2} / (K_{t_2} * N_2)$$

$$I_{\theta_3} = M_{\theta_3} / (K_{t_3} * N_3)$$

$$U_{\theta_1} = R_1 * I_{\theta_1} + K_{e_1} * N_1 * \theta'_1$$

$$U_{\theta_2} = R_2 * I_{\theta_2} + K_{e_2} * N_2 * \theta'_2$$

$$U_{\theta_3} = R_3 * I_{\theta_3} + K_{e_3} * N_3 * \theta'_3$$

Formüllerdeki K_t , K_e , R ve N değerleri, servo motorlarda sırasıyla Akım Sabiti, Gerilim Sabiti, Direnç ve Sarım Sayılarını ifade etmektedir ve her bir motor için farklı değerlerdedir.

Enerji ifadesi de aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$E_{\theta_1} = U_{\theta_1} * I_{\theta_1}$$

$$E_{\theta_2} = U_{\theta_2} * I_{\theta_2}$$

$$E_{\theta_3} = U_{\theta_3} * I_{\theta_3}$$

$$E_{Toplam} = E_{\theta_1} + E_{\theta_2} + E_{\theta_3}$$

Aşağıdaki formüllerde yukarıda anlatılanların MATLAB formülasyonu yer almaktadır.

```
function [a,b]=min_enerji_zaman(E,TT)
[c,d]=size(E);
for i=1:c
    a(i)=min(E(i,:));
end

for j=1:c
for k=1:d-1
    if E(j,k)-E(j,k+1)>0
        b(j)=TT(k+1);
    end
end
end

function
[E]=Enerji_Hareket_Suresi_Son(t1b,t2b,t3b,t1s,t2s,t3s,T,L2,L3,m,m2,m3,
MU)
g=9.81;

M=MU;
a2=L2/2;
a3=L3/2;

% Zaman Dizisi
dt=0.01;
t=0:dt:T;

% Katsayılar Matrisi
K=[1 0 0 0 0 0;
0 1 0 0 0 0;
0 0 2 0 0 0;
1 T T^2 T^3 T^4 T^5;
0 1 2*T 3*T^2 4*T^3 5*T^4;
0 0 2 6*T 12*T^2 20*T^3];
```

```

B1=[t1b(1) t1b(2) t1b(3) t1s(1) t1s(2) t1s(3)];
A1=inv(K)*B1';
B2=[t2b(1) t2b(2) t2b(3) t2s(1) t2s(2) t2s(3)];
A2=inv(K)*B2';
B3=[t3b(1) t3b(2) t3b(3) t3s(1) t3s(2) t3s(3)];
A3=inv(K)*B3';

for i=1:length(t)

t1(i)=A1(1)+A1(2)*t(i)+A1(3)*t(i)^2+A1(4)*t(i)^3+A1(5)*t(i)^4+A1(6)*t(i)^5;

t2(i)=A2(1)+A2(2)*t(i)+A2(3)*t(i)^2+A2(4)*t(i)^3+A2(5)*t(i)^4+A2(6)*t(i)^5;

t3(i)=A3(1)+A3(2)*t(i)+A3(3)*t(i)^2+A3(4)*t(i)^3+A3(5)*t(i)^4+A3(6)*t(i)^5;

t1h(i)=A1(2)+2*A1(3)*t(i)+3*A1(4)*t(i)^2+4*A1(5)*t(i)^3+5*A1(6)*t(i)^4;
;

t2h(i)=A2(2)+2*A2(3)*t(i)+3*A2(4)*t(i)^2+4*A2(5)*t(i)^3+5*A2(6)*t(i)^4;
;

t3h(i)=A3(2)+2*A3(3)*t(i)+3*A3(4)*t(i)^2+4*A3(5)*t(i)^3+5*A3(6)*t(i)^4;
;
    t1i(i)=2*A1(3)+6*A1(4)*t(i)+12*A1(5)*t(i)^2+20*A1(6)*t(i)^3;
    t2i(i)=2*A2(3)+6*A2(4)*t(i)+12*A2(5)*t(i)^2+20*A2(6)*t(i)^3;
    t3i(i)=2*A3(3)+6*A3(4)*t(i)+12*A3(5)*t(i)^2+20*A3(6)*t(i)^3;
end

%I13=1.68;
I13=0;
%I21=0.035;
I21=0;
%I23=0.0040;
I23=0;
%I31=0.005;
I31=0;
%I33=0.0007;
I33=0;
%I32=1.555;
I32=0;
%I22=3.305;
I22=0;

d1=0;
d2=0;
d3=0;
% d1=1.2;
% d2=1.2;
% d3=1.4;

% DC Motor Sabitleri
Kt=[0.180 0.154 0.142];
Ke=[0.243 0.208 0.348];
R=[8.10 8.54 15.12];
N=[50 60 50];

```

```

for j=1:length(t)
% Robot Kolunda Uç Kütlesinin Dahil Olmadığı Durum
M1(j)=(I13+(m2*a2^2+I21+m3*L2^2)*(sin(t2(j)))^2+I23*(cos(t2(j)))^2+(m3*
a3^2+I31)*(sin(t2(j)+t3(j)))^2+I33*(cos(t2(j)+t3(j)))^2+2*m3*L2*a3*si
n(t2(j))*sin(t2(j)+t3(j)))*t1i(j)+2*((m2*a2^2+m3*L2^2+I21-
I23)*sin(t2(j))*cos(t2(j))+(m3*a3^2+I31-I33)*sin(t2(j)+t3(j))*
cos(t2(j)+t3(j))+m3*L2*a3*(sin(t2(j))*cos(t2(j)+t3(j))+cos(t2(j))*sin(
t2(j)+t3(j))))*t2h(j)+((m3*a3^2+I31-
I33)*sin(t2(j)+t3(j))*cos(t2(j)+t3(j))+m3*L2*a3*cos((t2(j)+t3(j))))*t3
h(j)+0.5*d1)*t1h(j);

M2(j)=(m2*a2^2+m3*(L2^2+a3^2+2*L2*a3*cos(t3(j)))+I22+I32)*t2i(j)+(m3*a
3*(a3+L2*cos(t3(j)))+I32)*t3i(j)-((m2*a2^2+m3*L2^2+I21-
I23)*sin(t2(j))*cos(t2(j))+(m3*a3^2+I31-
I33)*sin(t2(j)+t3(j))*cos(t2(j)+t3(j))+m3*L2*a3*(cos(t2(j))*sin(t2(j)+
t3(j))+sin(t2(j))*cos(t2(j)+t3(j))))*t1h(j)^2-
m3*a3*L2*sin(t3(j))*t3h(j)^2-m2*g*a2*sin(t2(j))-
m3*g*(L2*sin(t2(j))+a3*sin(t2(j)+t3(j)))+(d2-
2*m3*L2*a3*sin(t3(j))*t3h(j)^2)*t2h(j);

M3(j)=(m3*a3*(a3+L2*cos(t3(j)))+I32)*t2i(j)+(m3*a3^2+I32)*t3i(j)-
((m3*a3^2+I31-
I33)*sin(t2(j)+t3(j))*cos(t2(j)+t3(j))+m3*L2*a3*sin(t2(j))*cos(t2(j)+t
3(j)))*t1h(j)^2+m3*L2*a3*sin(t3(j))*t2h(j)^2+d3*t3h(j)-
m3*g*a3*sin(t2(j)+t3(j));

% Robot Kolunda Uç Kütlesinin Dahil Olduğu Durum

MM1(j)=(I13+(m2*a2^2+I21+m3*L2^2+M*L2^2)*(sin(t2(j)))^2+I23*(cos(t2(j)
))^2+(m3*a3^2+I31+M*L3^2)*(sin(t2(j)+t3(j)))^2+I33*(cos(t2(j)+t3(j)))^
2+2*m3*L2*a3*sin(t2(j))*sin(t2(j)+t3(j))+2*M*L2*L3*sin(t2(j))*sin(t2(j)
)+t3(j))*t1i(j)+2*((m2*a2^2+m3*L2^2+M*L2^2+I21-
I23)*sin(t2(j))*cos(t2(j))+(m3*a3^2+M*L3^2+I31-I33)*sin(t2(j)+t3(j))*
cos(t2(j)+t3(j))+m3*L2*a3*(sin(t2(j))*cos(t2(j)+t3(j))+cos(t2(j))*sin(
t2(j)+t3(j)))+
M*L2*L3*(sin(t2(j))*cos(t2(j)+t3(j))+cos(t2(j))*sin(t2(j)+t3(j))))*t2h
(j)+((m3*a3^2+M*L3^2+I31-
I33)*sin(t2(j)+t3(j))*cos(t2(j)+t3(j))+m3*L2*a3*cos((t2(j)+t3(j)))+
M*L2*L3*cos((t2(j)+t3(j))))*t3h(j)+0.5*d1)*t1h(j);

MM2(j)=(m2*a2^2+m3*(L2^2+a3^2+2*L2*a3*cos(t3(j)))+
M*(L2^2+L3^2+2*L2*L3*cos(t3(j)))+I22+I32)*t2i(j)+(m3*a3*(a3+L2*cos(t3(
j)))+M*L3*(L3+L2*cos(t3(j)))+I32)*t3i(j)-
((m2*a2^2+m3*L2^2+M*L2^2+I21-
I23)*sin(t2(j))*cos(t2(j))+(m3*a3^2+M*L3^2+I31-
I33)*sin(t2(j)+t3(j))*cos(t2(j)+t3(j))+m3*L2*a3*(cos(t2(j))*sin(t2(j)+
t3(j))+sin(t2(j))*cos(t2(j)+t3(j))))*t1h
(j)^2-m3*a3*L2*sin(t3(j))*t3h(j)^2-M*L3*L2*sin(t3(j))*t3h(j)^2-
m2*g*a2*sin(t2(j))-m3*g*(L2*sin(t2(j))+a3*sin(t2(j)+t3(j)))-
M*g*(L2*sin(t2(j))+L3*sin(t2(j)+t3(j)))+(d2-
2*m3*L2*a3*sin(t3(j))*t3h(j)^2-2*M*L2*L3*sin(t3(j))*t3h(j)^2)*t2h(j);

MM3(j)=(m3*a3*(a3+L2*cos(t3(j)))+
M*L3*(L3+L2*cos(t3(j)))+I32)*t2i(j)+(m3*a3^2+M*L3^2+I32)*t3i(j)-
((m3*a3^2+M*L3^2+I31-
I33)*sin(t2(j)+t3(j))*cos(t2(j)+t3(j))+m3*L2*a3*sin(t2(j))*cos(t2(j)+t
3(j))+M*L2*L3*sin(t2(j))*cos(t2(j)+t3(j)))*t1h(j)^2+m3*L2*a3*sin(t3(j)
)*t2h(j)^2+M*L2*L3*sin(t3(j))*t2h(j)^2+d3*t3h(j)-
m3*g*a3*sin(t2(j)+t3(j))-M*g*L3*sin(t2(j)+t3(j));
end

```

```

for jj=1:length(t)
    i1(jj)=MM1(jj)/(Kt(1)*N(1));
    i2(jj)=MM2(jj)/(Kt(2)*N(2));
    i3(jj)=MM3(jj)/(Kt(3)*N(3));
    u1(jj)=R(1)*i1(jj)+Ke(1)*N(1)*t1h(jj);
    u2(jj)=R(2)*i2(jj)+Ke(2)*N(2)*t2h(jj);
    u3(jj)=R(3)*i3(jj)+Ke(3)*N(3)*t3h(jj);
end

for k=1:length(t)
    E1(k)=u1(k)*i1(k)*dt;
    E2(k)=u2(k)*i2(k)*dt;
    E3(k)=u3(k)*i3(k)*dt;
end

E=sum(E1)+sum(E2)+sum(E3);

% Başlangıç Şartları
clear
% Uzuvarların Başlangış Şartları
t1b=[0*pi/180 0 0];
t2b=[30*pi/180 0 0];
t3b=[0*pi/180 0 0];
% Uzuvarların Son Şartları
t1s=[0*pi/180 0 0];
t2s=[60*pi/180 0 0];
t3s=[0*pi/180 0 0];

TT=0.01:0.01:1.5;
L2L3=0.5;
MU=[5];
m=2;
m2=1,5;
m3=0,5;

for i=1:length(L2L3)
    L3=1/(1+L2L3(i));
    L2=1-L3;

for j=1:length(TT)
    T=TT(j);
    E1(i,j)=enerji_hareket_suresi_son(t1b,t2b,t3b,t1s,t2s,t3s,T,L2,L3,m,m2,
    m3,MU(1));

end
end

m2=1,0;
m3=1,0;

for i=1:length(L2L3)
    L3=1/(1+L2L3(i));
    L2=1-L3;

for j=1:length(TT)
    T=TT(j);

```

```

E2(i,j)=enerji_hareket_suresi_son(t1b,t2b,t3b,t1s,t2s,t3s,T,L2,L3,m,m2
,m3,MU(1));

end
end

m2=0,33;
m3=1,67;

for i=1:length(L2L3)
    L3=1/(1+L2L3(i));
    L2=1-L3;

for j=1:length(TT)
    T=TT(j);

E3(i,j)=enerji_hareket_suresi_son(t1b,t2b,t3b,t1s,t2s,t3s,T,L2,L3,m,m2
,m3,MU(1));
end
end
plot(TT,E1,TT,E2,TT,E3)
axis([0.1 1.9 0 1000])
legend('D1^2/D2^2=3','D1^2/D2^2=1','D1^2/D2^2=1/3')

```

5.3 Robot Kol Oranları Değişiminin Enerji Sarfiyatına Etkisinin İncelenmesi

Tez çalışmamızda robot kolunun 2. ve 3. eksen uzuvlarının geometrileri üzerinde çalışılacaktır. İlk bölümde 2. ve 3. eksen uzuvlarının çapları ve birim uzunluk başına kütleleri aynı kabul edilecektir. Bu kısımda eksenlerin birbirine göre boylarının ve buna bağlı ağırlıklarının değişimi gözönüne alınacaktır. 2. ve 3. eksen uzunlukları sırasıyla L_1 ve L_2 olarak tanımlanmıştır. Robot kolunun 4 farklı konumu için 5 farklı $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının değişimleri gözlemlenecektir.

$L_1 / (L_1 + L_2)$ oranı olarak; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 alınacaktır. Kol uzunluk oranına göre kol ağırlıklarındaki değişim aynı oranda olacaktır. Hesaplamalarda kol kütleleri toplamı 2 kg olarak alınmıştır ve kol uzunluk oranlarına göre bu ağırlık dağıtılmıştır.

Çizelge 5.5 Robot kol uzunluk oranları ve ağırlıkları

Kol Uzunluk Oranı		Kol Ağırlıkları (kg)	
L_1	L_2	L_1	L_2
0,1	0,9	0,2	1,8
0,3	0,7	0,6	1,4
0,5	0,5	1	1
0,7	0,3	1,4	0,6
0,9	0,1	1,8	0,2

Robot kol konumları ise aşağıda çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 5.6 Robot kol konumları

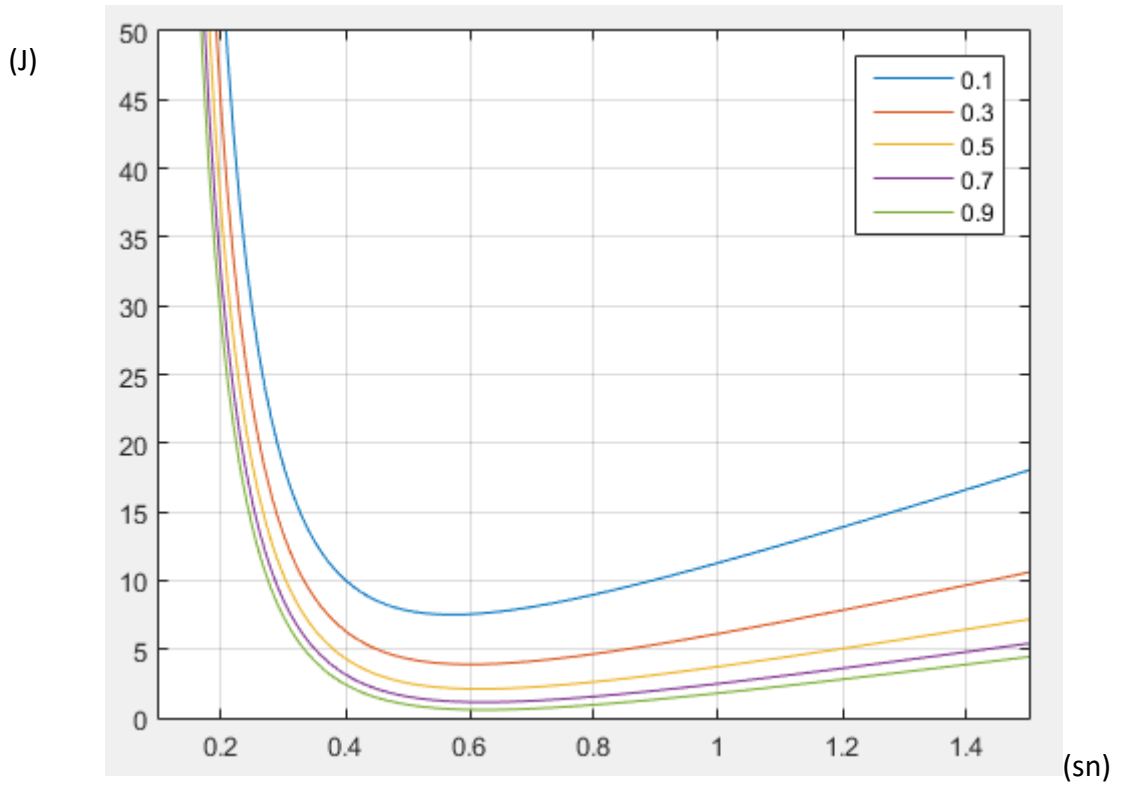
1. Konum		
	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	0°
θ_2	30°	60°
θ_3	0°	0°

2. Konum		
	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	0°
θ_2	45°	75°
θ_3	135°	0°

3. Konum		
	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	90°
θ_2	45°	105°
θ_3	0°	0°

4. Konum		
	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	90°
θ_2	60°	90°
θ_3	135°	0°

İlk Konum değerlerine göre denklemlerimizi Matlab programında koşturduğumuzda aşağıdaki enerji grafiği elde edilmiştir.



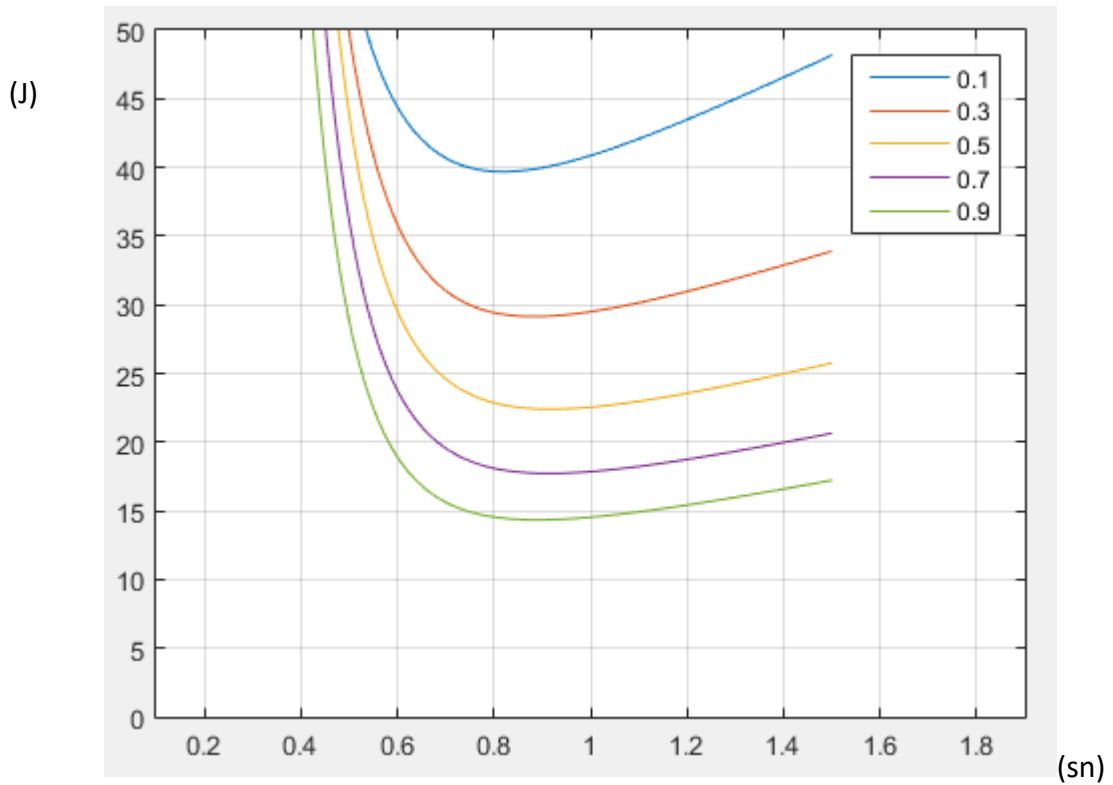
Şekil 5.5 1. konum enerji değişimi

Çizelge 5.7 1. konum değerleri

Kol Oranları	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Enerji değerleri (J)	18	10,5	7	5,5	4,5
Enerjinin min. olduğu süreler (sn)	0,57	0,60	0,62	0,62	0,62

İlk konumda $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranı 0,1'den 0,9'a doğru gidildikçe enerji sarfiyatının azaldığı görülmektedir. Değer olarak incelendiğinde; $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının 0,5-0,9 arasındaki azalışının, 0,1-0,5 arasına göre daha az olduğu görülmektedir. Enerji sarfiyatının min. olduğu süreler incelendiğinde de yine en kısa sürenin 0,1 oranında gerçekleştiği, 0,5 oranından sonra ise sabit kaldığı görülmektedir.

İkinci Konum değerlerine göre denklemlerimizi Matlab programında koşturduğumuzda aşağıdaki enerji grafiği elde edilmiştir.



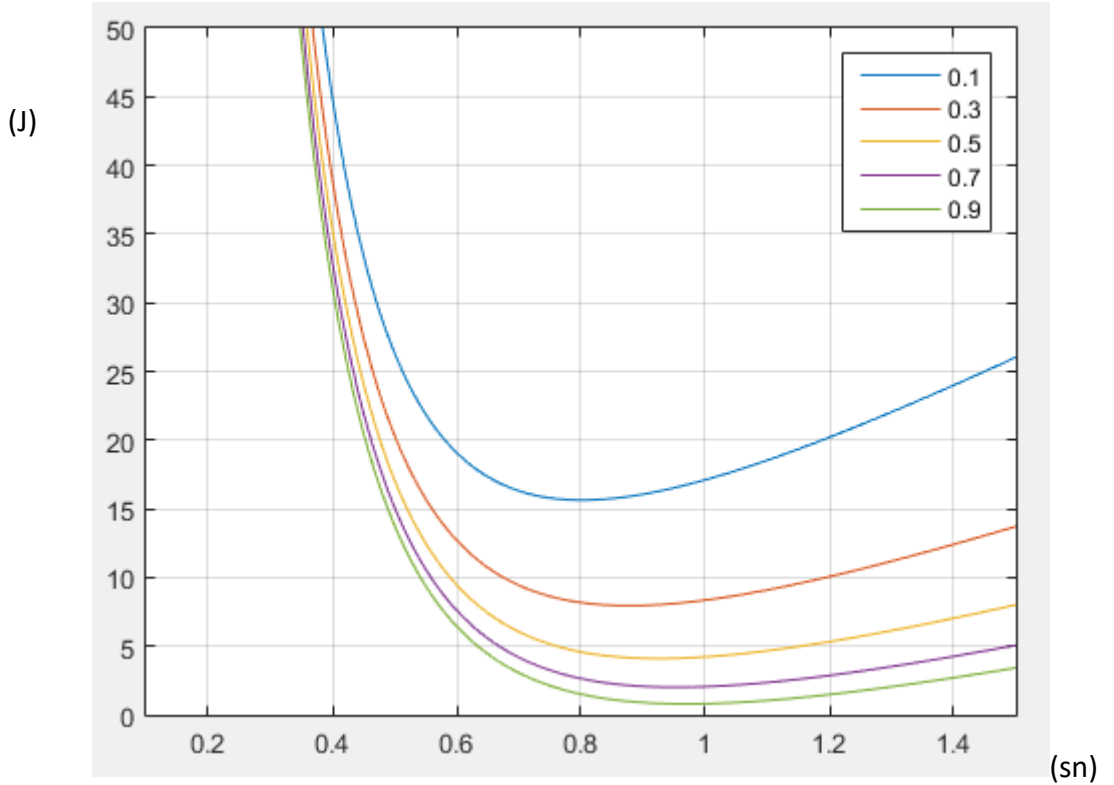
Şekil 5.6 2. konum enerji değişimi

Çizelge 5.8 2. konum değerleri

Kol Oranları	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Enerji değerleri (J)	48	34	26	20,5	17
Enerjinin min. olduğu süreler (sn)	0,82	0,88	0,92	0,91	0,89

İkinci konumda da $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranı 0,1'den 0,9'a doğru gidildikçe enerji sarfiyatının azaldığı görülmektedir. Değer olarak incelendiğinde; $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının 0,5-0,9 arasındaki azalışının, 0,1-0,5 arasına göre daha az olduğu görülmektedir. Enerji sarfiyatının min. olduğu süreler incelendiğinde de yine en kısa sürenin 0,1 oranında gerçekleştiği, 0,5 oranından sonra ise az olsa kısaldığı görülmektedir.

Üçüncü Konum değerlerine göre denklemlerimizi Matlab programında koşturduğumuzda aşağıdaki enerji grafiği elde edilmiştir.



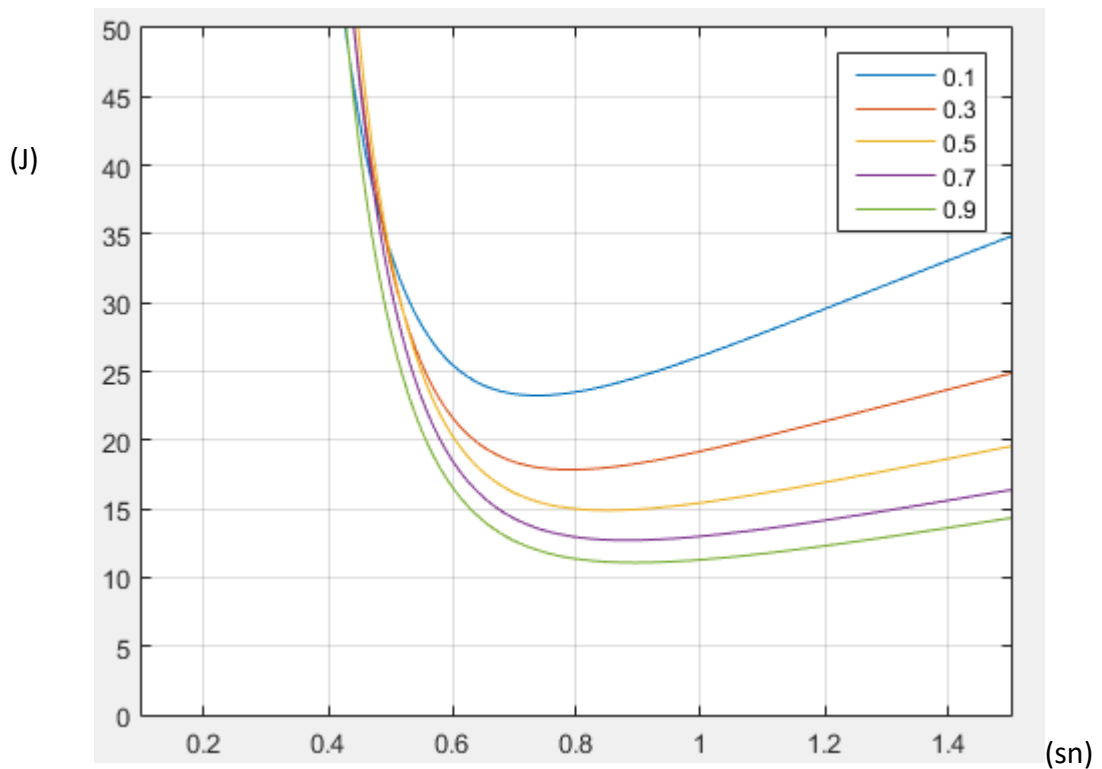
Şekil 5.7 3. konum enerji değişimi

Çizelge 5.9 3. konum değerleri

Kol Oranları	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Enerji değerleri (J)	26	13,5	7,5	5	3,5
Enerjinin min. olduğu süreler (sn)	0,80	0,88	0,92	0,95	0,97

Üçüncü konumda da $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranı 0,1'den 0,9'a doğru gidildikçe enerji sarfiyatının azaldığı görülmektedir. Değer olarak incelendiğinde; $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının 0,5-0,9 arasındaki azalışının, 0,1-0,5 arasına göre daha az olduğu görülmektedir. Enerji sarfiyatının min. olduğu süreler incelendiğinde de yine en kısa sürenin 0,1 oranında gerçekleştiği, 0,9'a kadar artarak devam ettiği görülmektedir.

Dördüncü Konum değerlerine göre denklemlerimizi Matlab programında koşturduğumuzda aşağıdaki enerji grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.8 4. konum enerji değişimi

Çizelge 5.10 4. konum değerleri

Kol Oranları	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Enerji değerleri (J)	35	25	19,5	16,5	14,5
Enerjinin min. olduğu süreler (sn)	0,74	0,79	0,85	0,88	0,89

Dördüncü konumda da $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranı 0,1'den 0,9'a doğru gidildikçe enerji sarfiyatının azaldığı görülmektedir. Değer olarak incelendiğinde; $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının 0,5-0,9 arasındaki azalışının, 0,1-0,5 arasına göre daha az olduğu görülmektedir. Enerji sarfiyatının min. olduğu süreler incelendiğinde de yine en kısa sürenin 0,1 oranında gerçekleştiği, 0,9'a kadar da artarak devam ettiği görülmektedir.

Her 4 konum içinde genel değerlendirme yapıldığında enerji sarfiyatının en çok ikinci konumda olduğu, en az da birinci konumda gerçekleştiği görülmektedir. Seçilen konumlarda yapılan işler hep yerçekimine karşı yapıldığı için robot hareketi sırasında en yüksek açı farklılıkları enerji sarfiyatında da artışa neden olmaktadır. Yerçekimi ile aynı yönde yapılan hareketlerde enerji sarfiyatının azaldığı ve sistemde kullanılan motorlar enerji üretimine başladığı için çalışmamızda yer almamıştır.

Her 4 konumda da en çok enerji sarfiyatı $L_1 / (L_1 + L_2)$ kol oranı 0,1 olduğunda gerçekleşmiş, en az değerler ise 0,9 oranında gerçekleşmiştir. 0,5 değerine kadar enerji sarfiyatındaki azalış yüksek iken, 0,5 oranından sonra azalış miktarında azalmalar görülmektedir. Enerji sarfiyatı en az 0,9 oranında gerçekleşse de, 0,5 ile 0,9 arasında optimizasyon çalışmalarının yapılabileceği ortaya çıkmaktadır.

Enerjinin min. olduğu sürelerin de 0,1'den 0,9'a kadar artarak devam etmesi yukarıda anlatılanları doğrular niteliktedir.

Aşağıdaki çizelgede endüstride kullanılan bazı robotların $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranları gösterilmiştir.

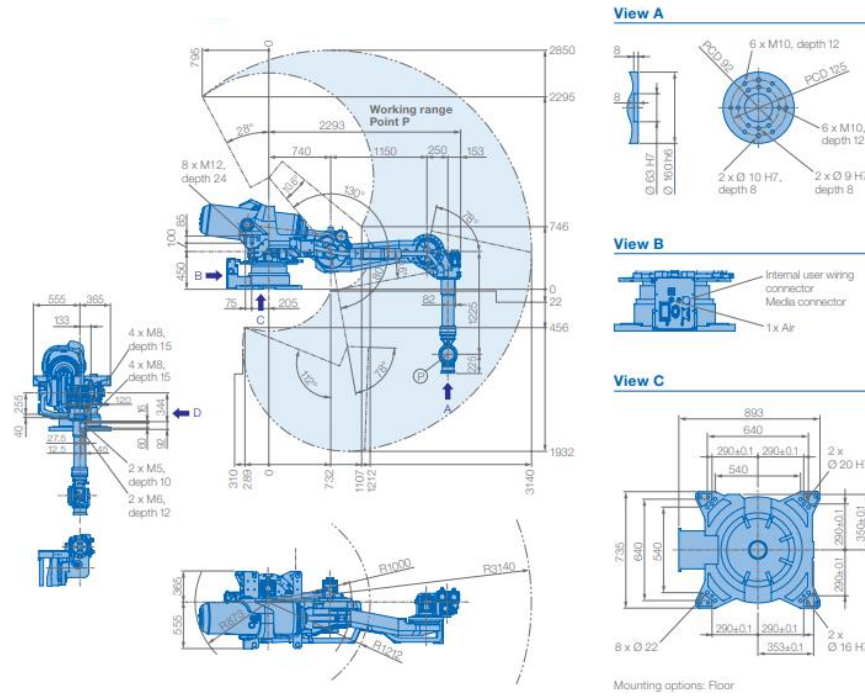
Çizelge 5.11 Endüstride kullanılan robot kol oranları

Endüstriyel Robot Modelleri	Robot Kol Uzunlukları (mm)		$L_1 / (L_1 + L_2)$ Oranı
	L_1	L_2	
Motoman GP 165R	1150	1225	0,48
Motoman GP 200R	1150	1225	0,48
Motoman GP 400R	1100	1996	0,36
Motoman ES 165 RDII	1150	1225	0,48
Motoman ES 200 RDII	1150	1225	0,48
Motoman MA 1440	614	640	0,49
Motoman MA 2010	760	1082	0,41
Motoman MH55 II	310	305	0,50
Motoman AR 1440	614	640	0,49
Motoman AR 1730	760	795	0,49
Motoman AR 700	345	340	0,50
ABB IRB 6620	975	887	0,52

Çizelge incelendiğinde kol oranlarının uygulamaya göre değiştiği, fakat standart endüstriyel robotlarda $L_1 / (L_1 + L_2)$ kol oranlarının 0,5 değerine yakın olduğu görülmektedir. Buradaki amacın robot çalışma uzayının genişletilmesi ve çalışabilirliğinin artırılması olduğu anlaşılmaktadır.

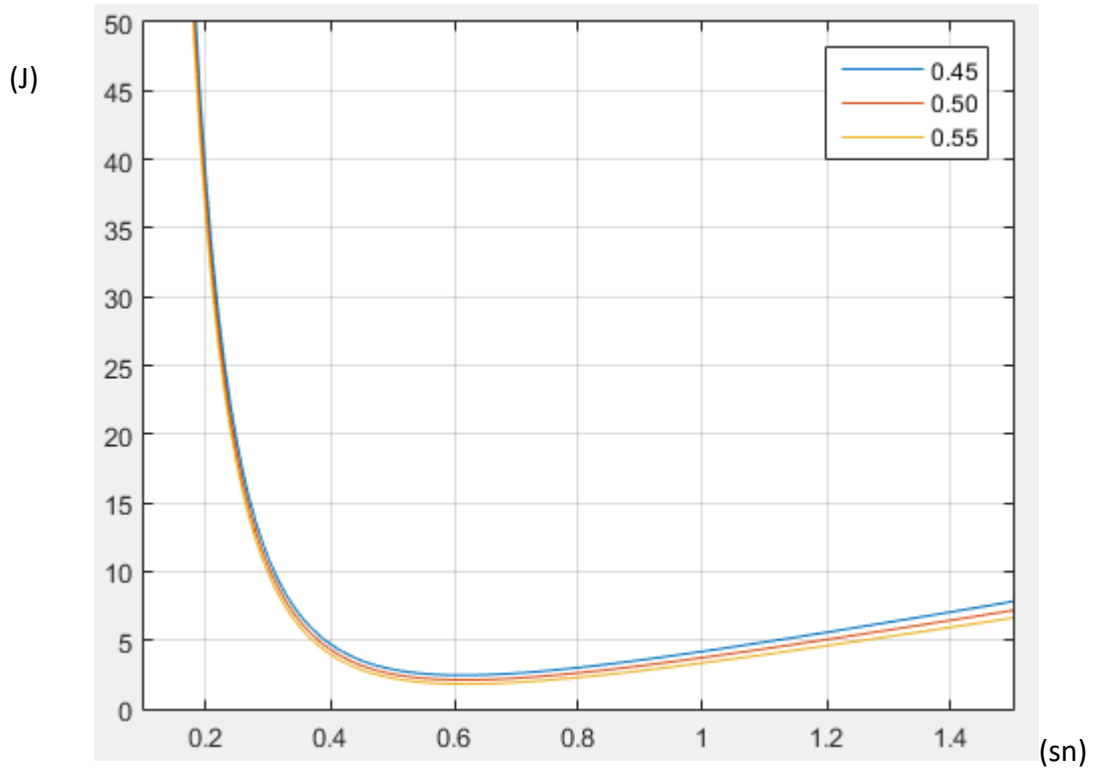
$L_1 / (L_1 + L_2)$ 'nin 0,9 oranında olduğu durumda enerji sarfiyatı azalmaktadır, fakat bu durum robotun çalışma uzayındaki bir çok noktaya ulaşamamasına neden olmaktadır. Bu sebeple robot üreticileri 0,5 gibi bir oran üzerinde çalışmaktadır.

Ek olarak; 0,5 ile 0,9 kol oranlarındaki enerji sarfiyatının az olduğu görülmektedir. Bu durumda kol oranının 0,5 ile 0,9 arasındaki değişiminin enerji sarfiyatına etkisinin az olduğu yorumunda bulunulabilir. Bu sebeple çalışmamızın geri kalanında bu oran üzerinden devam edilecektir.



Şekil 5.9 Örnek bir robot çalışma alanı

Kol uzunluğunun optimum oranını bulmak için $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranı aşağıda 0,45-0,55 aralığında incelenmiş ve aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.10 0,45-0,55 Kol oranı enerji değişim değerleri

Grafik incelendiğinde 0,45-0,5 ve 0,55 oranlarının birbiri ardına ve aynı oranda sıralandığı görülmüştür. $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranı arttıkça enerji sarfiyatının azaldığı tekrarlanmıştır. 0,45-0,55 aralığı içinde enerji sarfiyatında büyük bir değişim görülmediği için çalışmamızın ilerleyen kısımlarında $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranını 0,5 olarak kullanacağız.

5.4 Robota Uç Kütle İlave Edildiğinde Kol Oranları Değişiminin Enerji Sarfiyatına Etkisinin İncelenmesi

Endüstriyel robotlar kaynak, boya, taşıma vs. çeşitli amaçlarla endüstride kullanılırlar. Hangi amaçla olursa olsun robotlar uç kısımlarında daima belirli bir ağırlık taşırlar. Çalışmamızın bu bölümünde robota 5 kg.'lık uç kütlesi ilave edildiğinde Bölüm 1'de çalışılan kol oranlarının enerji sarfiyatına etkileri araştırılacaktır.

5 kg'lık uç kütlesi "M" ile gösterilecek ve L_2 uzvunun ucuna monte edildiği kabul edilecektir.

Robot kolunun yine aşağıdaki çizelgede verilen 4 farklı konumu için 5 farklı $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının değişimleri gözlemlenecektir.

$L_1 / (L_1 + L_2)$ oranı olarak; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 alınacaktır.

Çizelge 5.12 Uç kütleli robot kol konumları

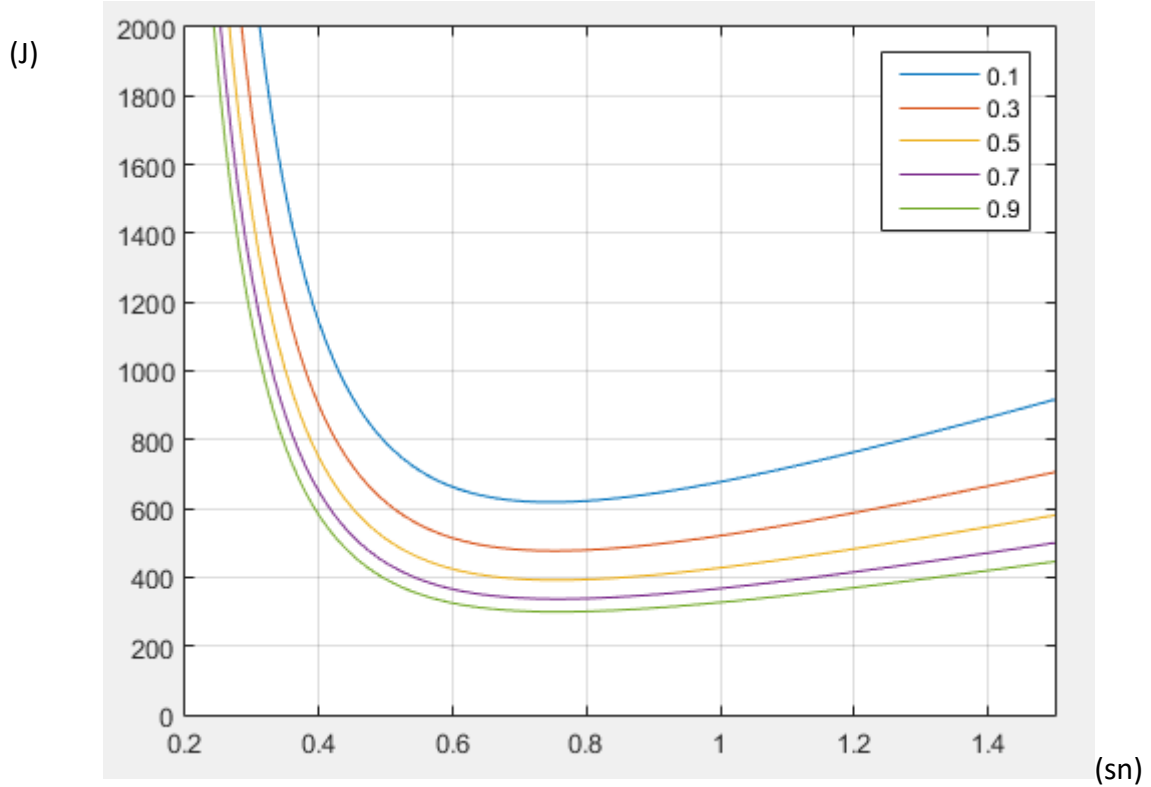
1. Konum		
	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	0°
θ_2	30°	60°
θ_3	0°	0°

2. Konum		
	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	0°
θ_2	45°	75°
θ_3	135°	0°

3. Konum		
	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	90°
θ_2	45°	105°
θ_3	0°	0°

4. Konum		
	İlk Konum	Son Konum
θ_1	0°	90°
θ_2	60°	90°
θ_3	135°	0°

İlk Konum değerlerine göre denklemlerimizi Matlab programında koşturduğumuzda aşağıdaki enerji grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.11 1. Konum enerji değişim değerleri (uç kütleli)

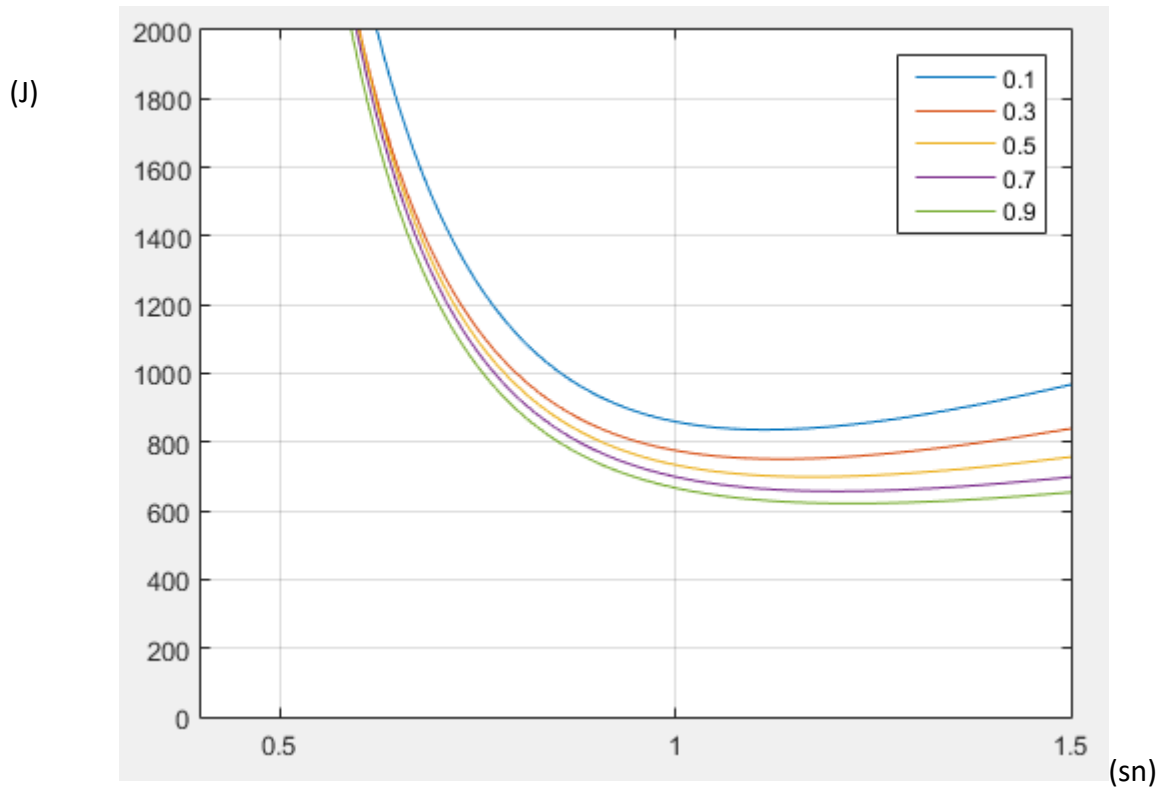
Çizelge 5.13 1. Konum değerleri (uç kütleli)

Kol Oranları	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Enerji değerleri (J)	920	710	580	500	445
Enerji değerleri – Kütlesiz (J)	18	10,5	7	5,5	4,5
Enerjinin min. olduğu zamanlar(sn)	0,75	0,75	0,75	0,76	0,76

Matlab çıktıları incelendiğinde ilk etapta 1. Bölümde elde edilen çıktılarına benzer olarak enerji sarfiyat değerlerinin 0,1-0,9 oranları arasında azaldığı görülmektedir. 1. Konum değerleri için sırasıyla 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 olan kol oranları için grafiklerin min. noktalarının, başka bir ifade ile enerji sarfiyatının min olduğu noktaların sırasıyla 0,75; 0,75; 0,75; 0,76; 0,76 saniyelerde vuku bulduğu ve neredeyse aynı zamanlarda meydana geldiği görülmektedir.

Değer olarak incelendiğinde; $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının 0,5-0,9 arasındaki enerji sarfiyatındaki azalışın, 0,1-0,5 arasına göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra bir önceki bölümde aynı konumda kütle olmadan yapılan enerji sarfiyatının, kütle olduğu durum ile arasında büyük farklar olduğu görülmektedir. Kütle ilavesi, enerji sarfiyatını 50 ile 100 misli arasında arttırmaktadır.

İkinci Konum değerlerine göre denklemlerimizi Matlab programında koşturduğumuzda aşağıdaki enerji grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.12 2. Konum enerji değişim değerleri (uç kütleli)

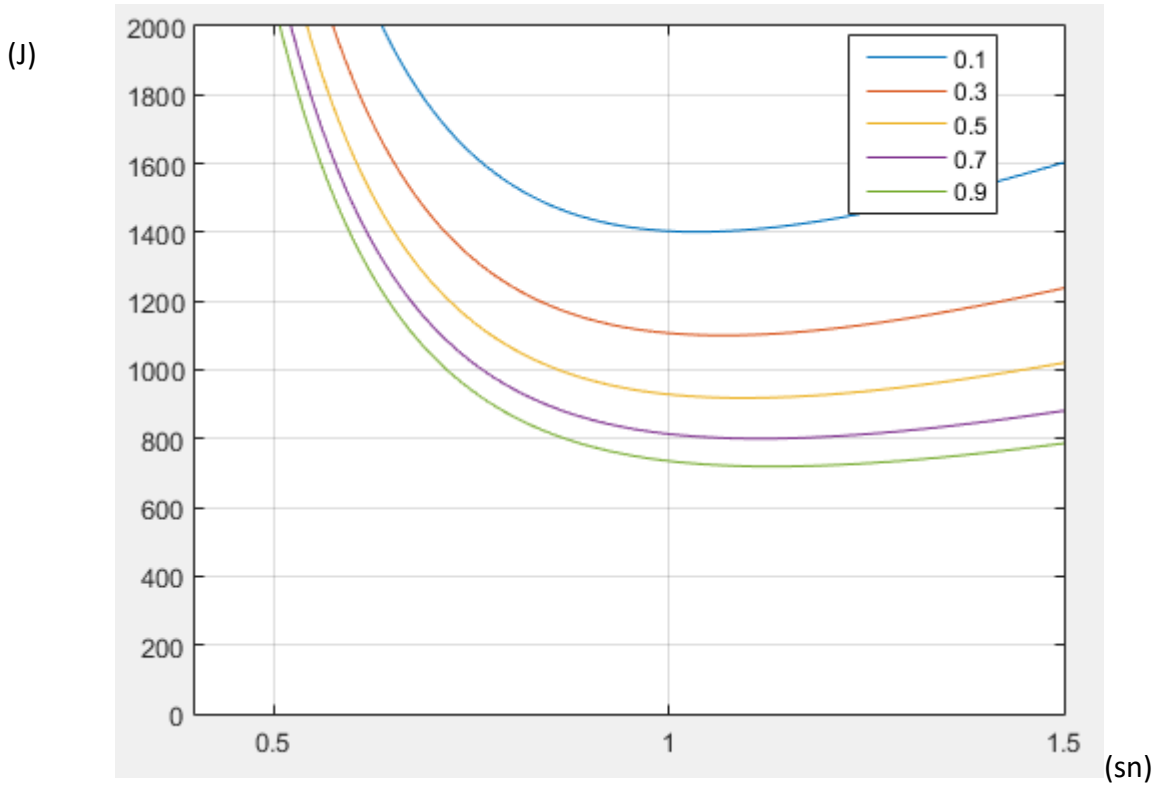
Çizelge 5.14 2. Konum değerleri (uç kütleli)

Kol Oranları	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Enerji değerleri (J)	965	840	760	700	655
Enerji değerleri – Kütlesiz (J)	48	34	26	20,5	17
Enerjinin min. olduğu zamanlar (sn)	1,11	1,13	1,17	1,2	1,22

Eğriler incelendiğinde enerji sarfiyatının 0,1-0,9 aralığında büyükten küçüğe doğru sıralandığı görülmektedir. Matlab çıktıları incelendiğinde ilk etapta 1. Bölümde elde edilen çıktılarına benzer olarak enerji sarfiyat değerlerinin 0,1-0,9 oranları arasında azaldığı ve enerji sarfiyatının min. olduğu sürelerinde arttığı görülmektedir.

Değer olarak incelendiğinde; $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının 0,5-0,9 arasındaki enerji sarfiyatındaki azalışın, 0,1-0,5 arasına göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun yanısıra bir önceki bölümde aynı konumda kütle olmadan yapılan enerji sarfiyatının, kütle olduğu durum ile arasında büyük farklar olduğu görülmektedir. Kütle ilavesi, enerji sarfiyatını 2. Konumda 20 ile 40 misli arasında arttırmaktadır.

Üçüncü Konum değerlerine göre denklemlerimizi Matlab programında koşturduğumuzda aşağıdaki enerji grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.13 3. Konum enerji değişim değerleri (uç kütleli)

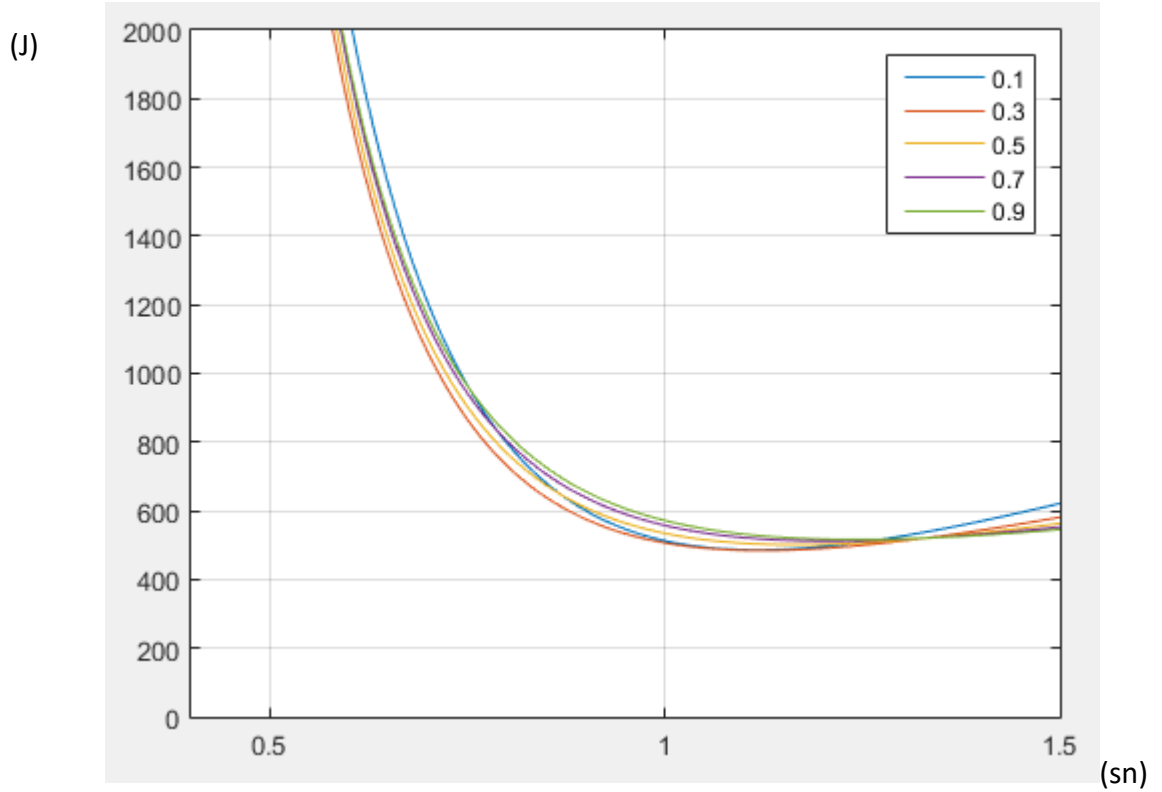
Üçüncü konumda da diğer konumlara benzer şekilde; enerji sarfiyatının 0,1-0,9 aralığında büyükten küçüğe doğru sıralandığı, enerji sarfiyat değerlerinin 0,1-0,9 oranları arasında azaldığı ve enerji sarfiyatının min. olduğu sürelerinde arttığı görülmektedir.

Çizelge 5.15 3. Konum değerleri (uç kütleli)

Kol Oranları	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Enerji değerleri (J)	1600	1240	1020	880	790
Enerji değerleri – Kütlesiz (J)	26	13,5	7,5	5	3,5
Enerjinin min. olduğu zamanlar (sn)	1,04	1,07	1,09	1,11	1,13

Değer olarak incelendiğinde; $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının 0,5-0,9 arasındaki enerji sarfiyatındaki azalışın, 0,1-0,5 arasına göre daha az olduğu ve kütle ilavesinin, enerji sarfiyatını 3. Konumda 60 ile 225 misli arasında arttırdığı görülmektedir.

Dördüncü Konum değerlerine göre denklemlerimizi Matlab programında koşturduğumuzda aşağıdaki enerji grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.14 4. Konum enerji değişim değerleri (uç kütleli)

Dördüncü konumda da diğer konumlara benzer şekilde; enerji sarfiyatının 0,1-0,9 aralığında büyükten küçüğe doğru sıralandığı, enerji sarfiyat değerlerinin 0,1-0,9 oranları arasında azaldığı ve enerji sarfiyatının min. olduğu sürelerin de arttığı görülmektedir.

Çizelge 5.16 4. Konum değerleri (uç kütleli)

Kol Oranları	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Enerji değerleri (J)	620	580	560	550	545
Enerji değerleri – Kütlesiz (J)	35	25	19,5	16,5	14,5
Enerjinin min. olduğu zamanlar (sn)	1,12	1,12	1,17	1,21	1,24

Değer olarak incelendiğinde; $L_1 / (L_1 + L_2)$ oranının 0,5-0,9 arasındaki enerji sarfiyatındaki azalışın, 0,1-0,5 arasına göre daha az olduğu ve kütle ilavesinin, enerji sarfiyatını 4. Konumda 18 ile 38 misli arasında arttırdığı görülmektedir.

4 ayrı konum için elde edilen grafikler incelendiğinde;

- Uç kütleli modeldeki enerji sarfiyatının, uç kütlenin olmadığı duruma göre 18 ile 225 kat arttığı,
- Uç kütleli modelde meydana gelen min enerji sürelerinin, uç kütlenin olmadığı duruma göre daha uzadığı görülmüştür.

Bu çıktılar ışığında 1. Bölümde belirlenen 0,5 oranında 5 kg'lık uç kütlesinin değerinde değişim yapıldığında enerji sarfiyatındaki değişimler incelenecektir.

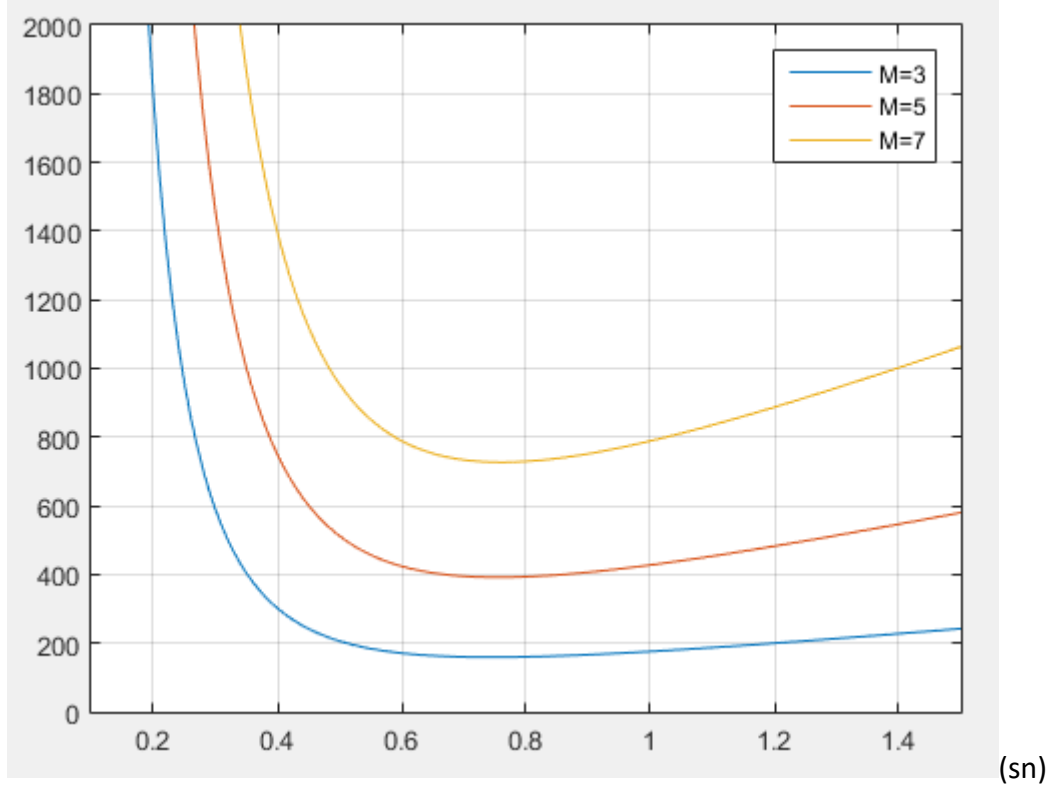
Bunun için Uç kütlesi 3, 5, 7 kg. ve 1. Konuma göre değerler alınarak test edilecektir.

Sonuçları daha iyi yorumlayabilmek için aşağıdaki grafikte 3, 5, 7 kg'lık yüklerin enerji harcamasına etkisi bir arada görülmektedir.

Kol oranı 0,5 kabulüne göre kütle artışı gerçekleştiğinde meydana gelen enerji sarfiyatının kütle artışı ile paralel oranda arttığı ve min enerji sürelerinin de kütle artışı ile birlikte arttığı görülmüştür.

Uç kütlesinin olmadığı durumda robot uzuvlarının sadece 7 Joule enerji sarfiyatı gerçekleştirdiğini ve enerjinin min. olduğu sürenin 0,62 saniye olduğunu hatırlarsak, uç kütlenin enerji sarfiyatına olan etkisini açıkça görmüş oluruz.

(J)



Şekil 5.15 Uç kütle değişiminin enerji sarfiyatındaki değişime etkisi

Çizelge 5.17 Uç kütle değişiminin enerji sarfiyatındaki değişimi

Uç Kütlesi (kg)	3	5	7
Enerji değerleri (J)	240	580	1060
Enerjinin min. olduğu zamanlar (sn)	0,74	0,75	0,76

Buradan kütle artışının enerji sarfiyatını arttırdığı ve min hareket sürelerini de arttırdığı sonucuna varılmaktadır.

5.5 Değişken Kesitli Kol Kütlelerinin Enerji Sarfiyatına Etkisi

Bu bölüme kadarki çalışmalarda kol kütlelerinin eşit kesitli olduğu kabul edilmiş ve sadece kol uzunluğu değişimine bağlı olarak enerji sarfiyatı incelenmiştir.

Bu bölümde kol kütlelerinin değişken kesitli olduğu durumlar dikkate alınacak ve buna bağlı olarak kol ağırlıklarının değişimine göre enerji sarfiyatı incelenecektir.

Hesaplamalarda kol çaplarının birbirine oranları göz önüne alınarak, çapların karesinin değişimine göre hesaplamalar yapılacaktır.

Çalışmamızda D_1^2 / D_2^2 oranlarının sırasıyla 3; 1 ve 1/3 olduğu durumlar dikkate alınmış ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

Önceki bölümlerde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında; $L_1 / (L_1 + L_2) = 0,5$ ve uç kütlesi M sırasıyla 3, 5, 7 kg. olarak bu bölümdeki hesaplamalarda kullanılacaktır.

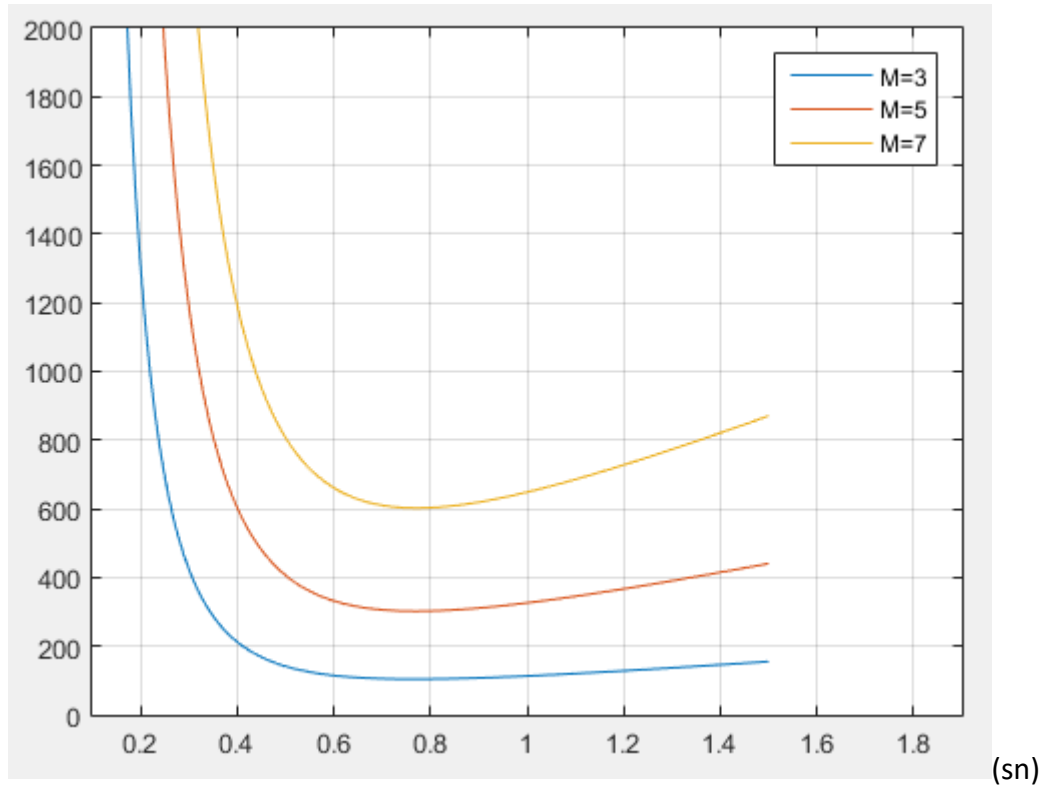
Çap oranlarına göre kütle ağırlıkları da aynı oranda dağıtılmıştır.

Çizelge 5.18 Robot kolu çap oranları ve ağırlıkları

Çap Oranı		Kol Ağırlıkları (kg)	
D_1^2	D_2^2	L_1	L_2
3	1	1,5	0,5
1	1	1	1
1	3	0,5	1,5

İlk olarak $D_1^2 / D_2^2 = 3$ oranı incelenmiştir ve aşağıdaki grafik elde edilmiştir.

(J)



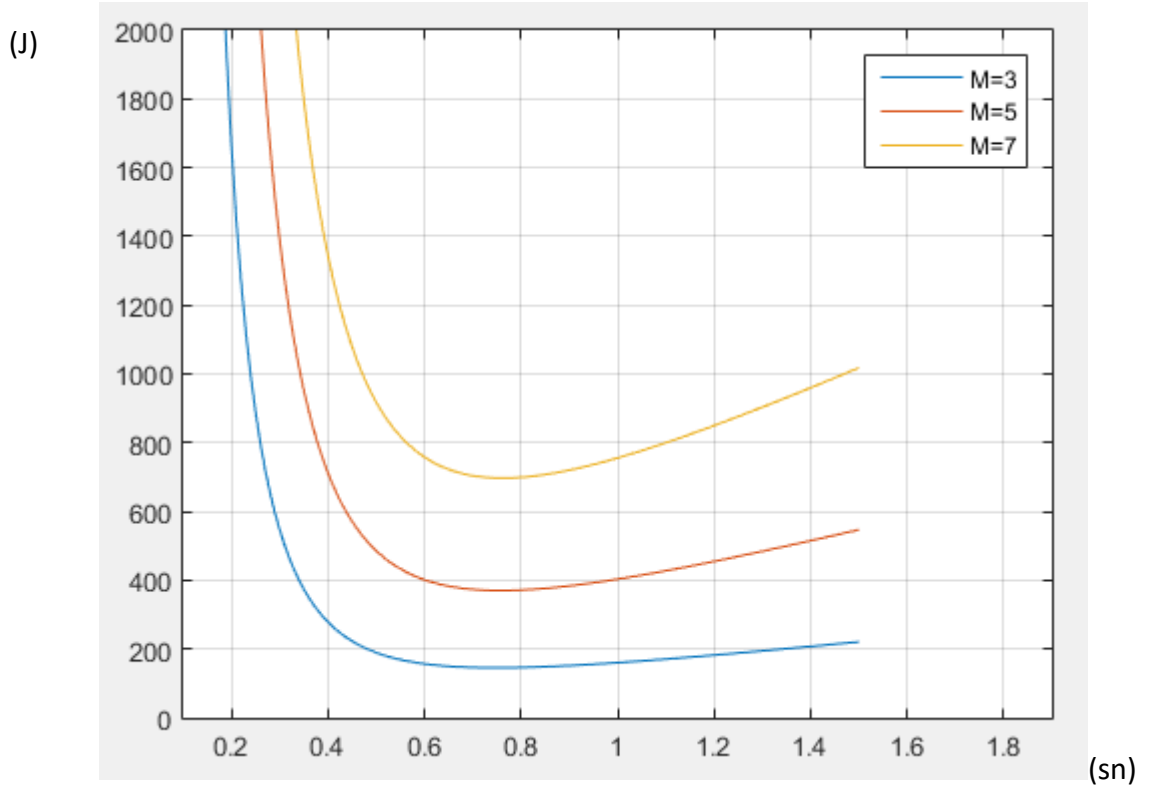
Şekil 5.16 $D_1^2 / D_2^2 = 3$ oranı enerji sarfiyat grafiği

Çizelge 5.19 $D_1^2 / D_2^2 = 3$ oranı enerji sarfiyat değerleri

Uç Kütlesi (kg)	3	5	7
Enerji değerleri (J)	155	440	870

Grafik incelendiğinde min. enerji sarfiyatının uç kütlesine bağlı olarak arttığı görülmektedir.

İkinci olarak $D_1^2 / D_2^2 = 1$ oranı incelenmiştir ve aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.17 $D_1^2 / D_2^2 = 1$ oranı enerji sarfiyat grafiği

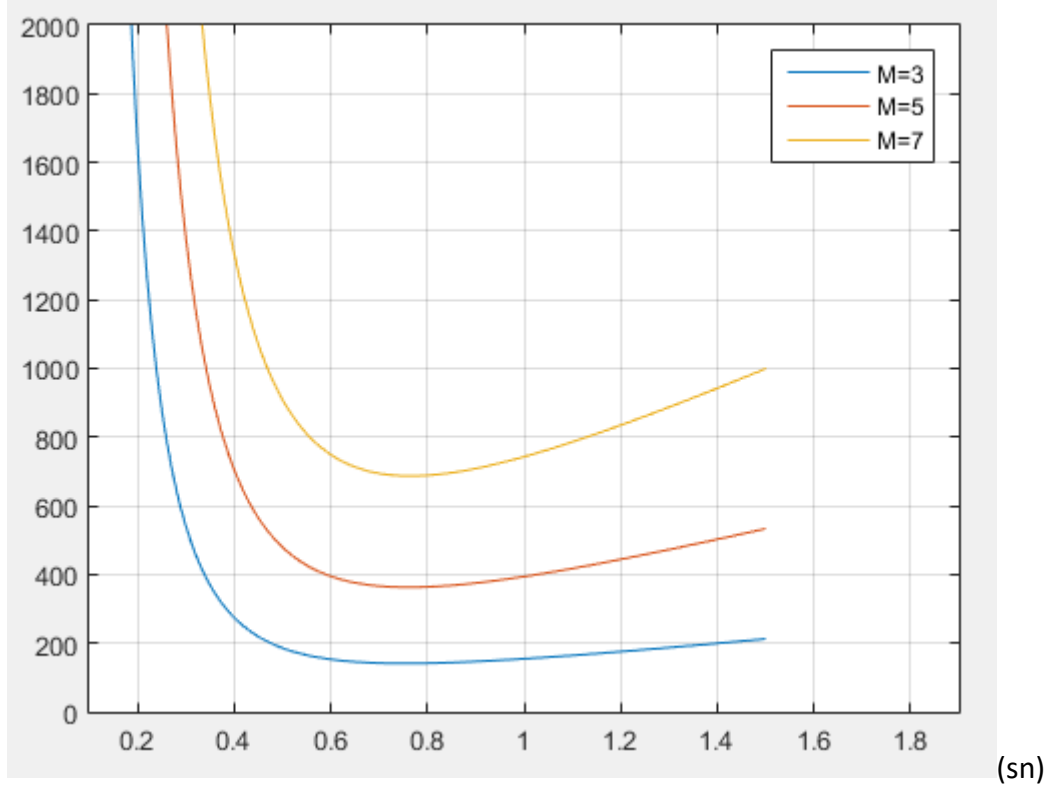
Çizelge 5.20 $D_1^2 / D_2^2 = 1$ oranı enerji sarfiyat değerleri

Uç Kütlesi (kg)	3	5	7
Enerji değerleri (J)	220	545	1020

Grafik incelendiğinde min enerji sarfiyatının uç kütlesine bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Son olarak $D_1^2 / D_2^2 = 0,33$ oranı incelenmiştir ve aşağıdaki grafik elde edilmiştir.

(J)



Şekil 5.18 $D_1^2 / D_2^2 = 0,33$ oranı enerji sarfiyat grafiği

Çizelge 5.21 $D_1^2 / D_2^2 = 0,33$ oranı enerji sarfiyat değerleri

Uç Kütlesi (kg)	3	5	7
Enerji değerleri (J)	210	530	1000

Grafik incelendiğinde bu oranda da min. enerji sarfiyatının uç kütlesine bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Aşağıdaki tabloda her 3 çap oranı için elde edilen değerler birarada görülebilmektedir.

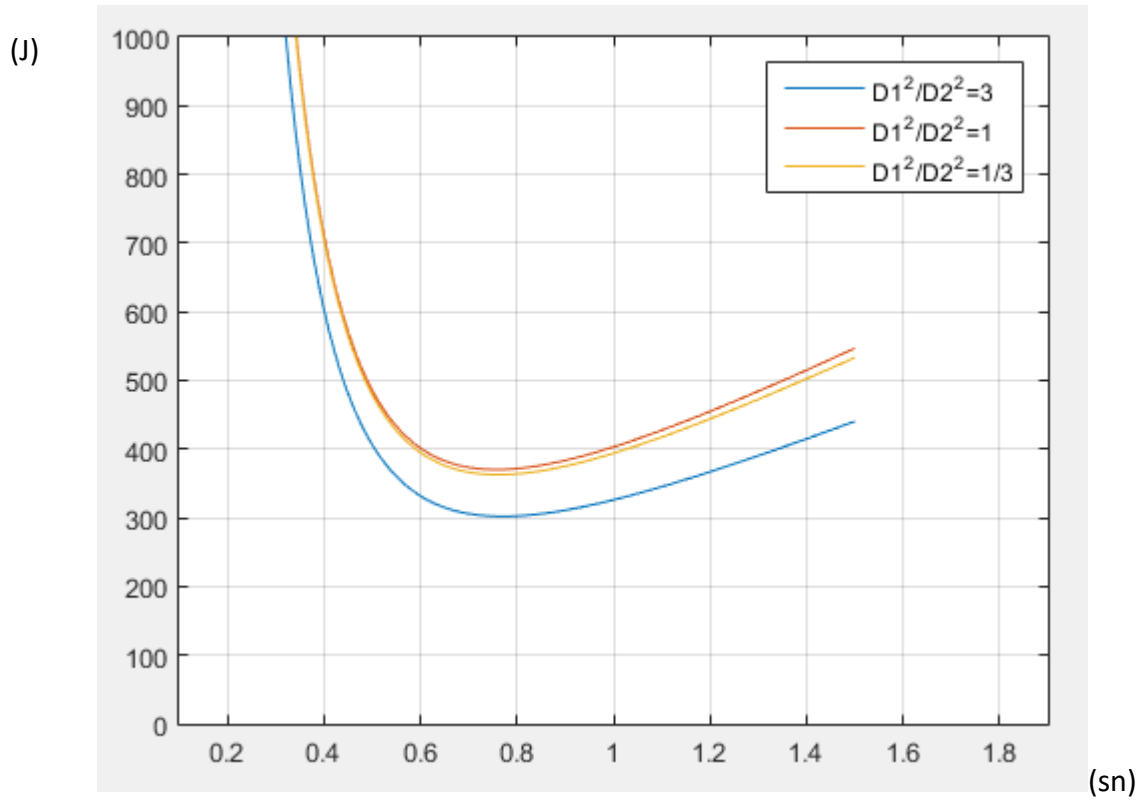
Çizelge 5.22 Çap oranlarına göre enerji sarfiyat değerleri

Uç Kütlesi (kg)	3	5	7
Enerji değeri (Çap oranı=3) (J)	155	440	870
Enerji değeri (Çap oranı=1) (J)	220	545	1020
Enerji değeri (Çap oranı=1/3) (J)	210	530	1000

Sonuçlara göre; D_1^2 / D_2^2 çap değerlerinin değişimi enerji sarfiyatını etkilemektedir. D_1 çapının D_2 'den büyük olduğu durum enerji sarfiyatının en az olduğu durumu ifade

etmektedir. Burada D_1 çapının D_2 çapından büyük olması durumunda enerji sarfiyatının az olacağını anlamaktayız.

Son olarak yukarıdaki sonuçları teyit etmek amacıyla uç kütlesi $M=5$ kg. olan bir robotun D_1^2 / D_2^2 oranı değişiminin enerji sarfiyatına olan etkisinin grafiği verilmiştir.



Şekil 5.19 $M=5$ kg. uç kütlesine göre çap oranları değişiminin enerji sarfiyatına etkisi grafiği

Çizelge 5.23 $M=5$ kg. uç kütlesine göre çap oranları değişiminin enerji sarfiyat değerleri

Uç Kütlesi (kg)	5
Enerji değeri (Çap oranı=3) (J)	440
Enerji değeri (Çap oranı=1) (J)	545
Enerji değeri (Çap oranı=1/3) (J)	530

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yukarıda aktarılan çalışmalarda endüstriyel robotlarda kol geometrik parametrelerinin değişimlerinin enerji sarfiyatına olan etkileri araştırılmıştır. Parametre olarak robot kol uzunlukları ve kol çapları üzerine yoğunlaşmış ve oranlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Buna göre; $L_1 / (L_1 + L_2)$ uzunluk oranının 0,1'den 0,9'a kadar enerji sarfiyatı üzerine olan etkisi incelenmiş ve 0,9 oranının enerji sarfiyatını en aza indirdiği tespit edilmiştir. Fakat bu orana sahip robot kollarının çalışma uzayının çok dar olacağı ve kullanım alanının da çok dar olacağı görülmüştür. Bu tür bir robotla yapılacak uygulamalar çok sınırlı olacaktır.

Endüstride yaygın olarak kullanılan robotların ortalama 0,5 uzunluk oranına sahip olduğu görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda 0,5 oranında da robotların 0,9 oranına yakın değerlerde az enerji harcadığı tespit edilmiştir. Tez çalışmamızda endüstride kullanılan modellere yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmamızın diğer parametresi olan kol çapları üzerinde de D_1^2 / D_2^2 oranı üzerinde çalışılmış ve 3; 1 ve 1/3 oranları üzerine hesaplamalar yapılmıştır.

Burada da kol çaplarında D_1^2 / D_2^2 oranı 3 olduğunda en az enerji sarfiyatı olduğu tespit edilmiş, diğer oranların ise birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Bunun dışında robotun sadece kol kütlesi vasıtasıyla sarf ettiği enerji ile uç kütlesi eklendiğinde sarf ettiği enerji değerleri de araştırılmıştır. Buna göre sırasıyla 3, 5 ve 7 kg.'lık uç kütleleri robot koluna eklendiğinde, enerji sarfiyatının yörüngeye bağlı olarak 18 ile 225 kat daha fazla harcandığı tespit edilmiştir. Uç kütlesinin hafifletilmesi robotun daha az enerji harcamasına neden olacaktır.

Uç kütlesinin değeri arttıkça robotun min. hareket sürelerinin uzadığı ve buna bağlı olarak enerji sarfiyatının arttığı tespit edilmiştir.

İleriki dönemlerde robot kollarına karşı ağırlık konarak enerji tasarrufu elde edilip edilemeyeceği bu çalışmanın bulguları ışığında araştırılabilir.

Bunun dışında kare ve dairesel kesitli robot kollarının enerji sarfiyatına etkileri ayrı ayrı araştırılıp, kesitler üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılabilir.

Ayrıca tez çalışmamızda çıkan sonuçlar ışığında, farklı işler yapan robot kolunun yaptığı işte ihtiyaç duyulan parametreye geçişinin yapılabilmesi enerji tasarrufu sağlayacaktır. Yapılan işe göre parametre değişimi yapılabilecek bir tasarım üzerine de çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Mühürçü, A. ve Durmuş, B., (2005). "5 Eklemlili Bir Robot Koluna Ait İleri Kinematik Hesaplama Yönteminin YSA ile Çözümü", III. Otomasyon Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 11-12 Kasım 2005, Denizli, 176-179.
 - [2] Krüger, J., Lien, T. K., Verl, A., (2009). "Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines", Manufacturing Technology, (58) 628-646.
 - [3] Michalosa, G., Makrisa, S., Tsarouchia, P., Guaschb, Kontovrakisa, T., Chrysosolourisa, D. G., (2015). "Design Considerations For Safe Human-Robot Collaborative Work Places", Procedia CIRP (37) 248 – 253.
 - [4] Makinatek Dergisi, "Endüstri 4.0 ve İşbirlikçi Robotlar", <http://makinatek.com.tr/uncategorized/164-endustri-40-ve-isbirlikci-robotlar/>, 30 Kasım 2017.
 - [5] Niku, S. B., (2001). "Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications", Prentice Hall, NJ 07458.
 - [6] Gutierrez, S.C., Zotovic, R., Navarro, M.D., Meseguer, M.D., (2017). "Design and Manufacturing of a Prototype of a Lightweight Robot Arm", Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28-30 June 2017, Vigo, Procedia Manufacturing 13, 283-290.
 - [7] Raza, K., Khan, T.A., Abbas, N., (2018). "Kinematic Analysis and Geometrical Improvement of an Industrial Robotic Arm", Journal of King Saud University – Engineering Sciences, (27 March 2018), Vol. 30, 218-223.
 - [8] Shanmugasundar, G., Sivaramakrishnan, R., Meganathan, S., Balasubramani, S., (2019). "Structural Optimization of an Five Degrees of Freedom (T-3R-T) Robot Manipulator Using Finite Element Analysis", Materialstoday: Proceedings, (8 August 2019), Vol. 16, part 2, 1325-1332.
 - [9] Chittawadigi, R.G., Prakash, A., Patwardhan, A., (2018). "Kinematic Analysis and Development of Simulation Software for Nex Dexter Robotic Manipulator", Procedia Computer Science, (2018), Vol. 133, 660–667.
 - [10] Shaik, A.A., Tlale, N., Bright, G., (2014). "Energy Usage Simulation for 2 Articulated Robot Designs Having Stationary Motors and a Serial Robot Type Workspace", Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control, 24-29 August 2014, Cape Town, 10225-10229.

- [11] Uhlmann, E., Reinkober, S., Hollerbach, T., (2016). "Energy Efficient Usage of Industrial Robots for Machining Processes", 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Procedia CIRP 48, 206 – 211.
- [12] Buğday, M., Karali, M., (2018). "Design Optimization of Industrial Robot Arm To Minimize Redundant Weight", Engineering Science and Technology, an International Journal, (8 December 2018), Vol.22, 346-352.
- [13] Paryanto, P., Brossog, M., Kohl, J., Merhof, J., Spreng, S., Franke, J., (2014). "Energy Consumption and Dynamic Behavior Analysis of a Six-axis Industrial Robot In an Assembly System", Conference on Assembly Technologies and Systems, Procedia CIRP 23, 131 – 136.
- [14] Sinaga, N., Paryanto, P., Widyanto, S.A., Rusnaldy, R., Hetzner, A., Franke, J., (2018). "An Analysis of the Effect of Gravitational Load on the Energy Consumption of Industrial Robots", 6th CIRP Global Web Conference, Procedia CIRP 78, 88-12.
- [15] Pellegrinelli, S., Borgia, S., Pedrocchia, N., Villagrossia, E., Bianchia, G., Tosattia, L.M., (2015). "Minimization of the energy consumption in motion planning for single-robot tasks", The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering, Procedia CIRP 29, 354 – 359.
- [16] Kurfess, T.R., (2005). "Robotics and Automation Handbook", CRC Press LLC, Florida, USA.
- [17] Uzuner, S., (2012). "5 Eksenli Manipülâtörün Hareket Planlaması ve Kontrol Programının Oluşturulması", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] Akdağ, M., (2008). "Design and Analysis of Robot Manipulators By Integrated CAE Procedures", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [19] Sarıaltın, E., (2017). "5 Eksenli Endüstriyel Robot Kol", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] Şaşmaz, A., "Endüstriyel Robotlar", <https://medium.com/@alperssmaz/endustriyel-robotlar-ead0a4e49f55>, 17 Eylül 2018.
- [21] Penbegul, N., Atar, M., Kendirci, M., Bozkurt, Y., Hatipoglu, N. K., Verit, A., Kadioglu, A., (2012). "Primitive Robotic Procedures: Automations for Medical Liquids in 12th Century Asia minor", (4-8 Sept. 2012) post. no:UP-473 , Istanbul, Turkey.
- [22] Moore, R., (2000). "Classical woollen and worsted cloth designs No. 21: Dobby or Jacquard woven?", Vol. 159, 56-57.
- [23] Brock, C.P., (2007). "Maillardet Automation", The Franklin Institute, <https://www.fi.edu/history-automaton>
- [24] Reeve, R.E., Webb, B.H., (2003). "New neural circuits for robot phonotaxis", Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 361, Issue 1811, 2245-2266.

- [25] Sciavicco, L., Siciliano, B., (1996). "Modeling and control of robot manipulators", The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- [26] Craig, J. J. , (2004). "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", Third Edition, Pearson Education Inc., USA.
- [27] Gürgüze, G. ve Türkoğlu, İ., (2019). "Kullanım Alanlarına Göre Robot Sistemlerinin Sınıflandırılması", Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 31(1), 53-66.
- [28] Acar M., (2007). "İki Ayaklı Yürüme Hareketinin Modellemesi ve Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] Christensensen, J. L. ve Nielsen, J., (2007). "Development Modeling and Control of A Humanoid Robot", Master's Thesis, Aalborg University, Aalborg.
- [30] Wang, T., Dang Q. ve Pan, P., (2013). A Multi-Robot System Based on A Hybrid Communication Approach, vol. 1, 91– 100.
- [31] Tuna G., (2012). "Çoklu Algılayıcı Füzyonunun Çoklu Robot Sistemlerinde Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama Proglemine Uygulanması", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] www.robotpark.com.tr/blog/tum-robot-tipleri/nano-robotlar. erişim: 01.06.2019.
- [33] Oh, H., Ramezan, A., Sun, C. ve Jin, Y, (2017). "Bio-inspired self-organising multi-robot pattern formation: A review", Rob. Auton. Syst., c. 91, 83–100.
- [34] Rozo, D., Silverio, L., Caldwell, J., (2016). "Learning Controllers for Reactive and Proactive Behaviors in Human – Robot", vol. June 2016, 1–11.
- [35] Wang, L., (2015). "Collaborative Robot Monitoring and Control for Enhanced sustainability", 2015, 1433–1445.
- [36] Popescu, N., Popescu, D., Cozma, A. ve Vaduva, A. J., (2014). "Hardware design and implementation of an Intelligent Haptic Robotic Glove", Proc. 2014 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng., EPE 2014, 174–177.
- [37] Paes, K., Dewulf, W., Vander Elst, K., Kellens, K. ve Slaets, P., (2014). "Energy Efficient Trajectories For an Industrial ABB Robot", Procedia Cirp, 15, 2014, 105-110.
- [38] Gregory, J., Olivares, A. ve Staffetti, E., (2014). "Energy-optimal Trajectory Planning For Robot Manipulators With Holonomic Constraints", Systems & Control Letters, 61(2), 2012, 279-291.
- [39] Engelmann, J., (2009). "Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung Energieeffizienter Fabriken", Doktora Tezi, TU Chemnitz.
- [40] Liu, S., Wang, Y., Wang, X. V. ve Wang, L., (2018). "Energy-efficient Trajectory Planning For an Industrial Robot Using a Multi-objective Optimisation Approach", 8th Swedish Production Symposium, SPS 2018, 16-18 May 2018, Stockholm, 517-525.
- [41] <https://www.endustri40.com/cobotlar-endustri-4-0-robotlari/> erişim: 02.06.2019.

- [42] Gopinatha, V., Oreb, F., Grahnd, S., Johansena, K., (2018). "Safety-Focussed Design of Collaborative Assembly Station with Large Industrial Robots", 8th Swedish Production Symposium, SPS 2018, 16-18 May 2018, Stockholm, 503-510.
- [43] Heyer, C., (2010). "Human-Robot Interaction and Future Industrial Robotics Applications", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 18-22 October 2010, Taipei, 4749-54.
- [44] Bannat, A., Gast, J., Rehrl, T., Rösel, W., Rigoll, G. ve Wallhof. F., (2009). "Multimodal Human-Robot-Interaction Scenario: Working Together with an Industrial Robot", In Jacko JA, editor, Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction, 19-24 July 2009, San Diego: Springer, 303-311
- [45] Michalosa, G., Makrisa, S., Tsarouchia, P., Guaschb, T., Kontovrakisa, D. ve Chryssolourisa, G., (2015). "Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces", CIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing, 29 Sept.-01 Oct., 248-253.
- [46] Eren İ., (2006). "Gereğinden Çok Serbestlik Dereceli Robot Kolu Kontrol Sistemi Tasarımı ve Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [47] Shahinpoor, M., Jamshidi, M. and Kim, Y. T., (1986). "Exact solution to the inverse kinematics problem of a standard 6-axis robot manipulator", Journal of Robotic Systems, Vol:3, 259-280
- [48] Wolovich, W. A., (1987). Robotics: Basic Analysis and Design, CBS College Publishing, USA.
- [49] Bingül, Z. ve Küçük, S., (2005). Robot Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [50] Çetinkaya, Ö., (2009). "Bir Kolun Hareketlerini Takip Eden Dört Dönel Mafsallı Robot Kolu Tasarımı ve Deneysel Araştırması", Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet Erdem ÖNER
Doğum Tarihi ve Yeri : 14/09/1980 - İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce – Almanca - Japonca
E-posta : ahmeterdem_oner@yahoo.com;
onera@toyotetsu.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İşletme Yönetimi	Yıldız Teknik Üniversitesi	2006
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2003
	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2002
Lise	Fen Matematik	Üsküdar Anadolu Lisesi	1998

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2007	Toyotetsu Otomotiv Parçaları A.Ş.	Ar-Ge ve Otomasyon / Proje Yönetimi Müdürü
2005	Atılım Makine A.Ş.	Makine Mühendisi

YAYINLARI**Bildiri**

1. Öner, A.E., Kepceler, T., (2019). “Endüstriyel Robotlarda Kol Geometrik Parametrelerinin Enerji Sarfiyatına Etkisi”, International Conference on Materials Science, Mechanical, Automotive Engineerings and Technology 2019, IMSMATEC 2019, 21-23 Haziran 2019, Nevşehir.

ÖDÜLLERİ

1. Ar-Ge Proje Pazarı (2012) **Ergonomi Dalında 2.’lik Ödülü**