



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ENDÜSTRİYEL ROBOT KOLLARININ TASARIMINDAN KAYNAKLANAN
ÖLÜ YÜKLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE OPTİMİZE EDİLMESİ
VE İŞLETME MALİYETLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa BUĞDAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran - 2018

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa BUĞDAY tarafından hazırlanan ”*ENDÜSTRİYEL ROBOT KOLLARININ TASARIMINDAN KAYNAKLANAN ÖLÜ YÜKLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE OPTİMİZE EDİLMESİ VE İŞLETME MALİYETLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ*” adlı tez çalışması 04/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

Danışman

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Üye

Dr. Öğr Üyesi Ahmad Partovi MERAN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARALI

FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Mustafa BUĞDAY

Tarih: 04/06/2018

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENDÜSTRİYEL ROBOT KOLLARININ TASARIMINDAN KAYNAKLANAN ÖLÜ YÜKLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE OPTİMİZE EDİLMESİ VE İŞLETME MALİYETLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mustafa BUĞDAY

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KARALI

2018, 66 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Partovi MERAN

Endüstriyel robotlarda erişim mesafesinin uzamasına ve taşıma kapasitesinin artmasına bağlı olarak ön görülen tork artmaktadır. Bu durum özellikle 2. Eksende daha güçlü motorların seçimini zorunlu kılmaktadır. Robottan beklenen konumlama hassasiyeti arttıkça da kol rijitliği önem kazandığından elastisitesi düşük malzemelerin kullanılmaktadır. Bu durumda, işletme şartlarında motorun sarf ettiği enerjinin yaklaşık %70'i âtil yüklerle harcanmaktadır. Bu çalışmada model olarak seçilen 5 farklı markaya ait robot kolları üzerinde öncelikle Ansys programı kullanılarak statik analizler yapılmıştır. Kollarda oluşan gerilme ve yer değiştirmeler bölge ve miktar bağlamında incelenmiş ve alternatif tasarımlar öngörülerek tekrar analiz edilip karşılaştırmalar yapılmıştır. Ansys Shape Optimizasyon modülü kullanılarak alternatif tasarımda geometri değişimi yapılmıştır. Robot kolun malzeme özelliği değiştirilerek analizler tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı konumlama hassasiyetinde (sehim miktarlarını artırmadan) âtil yüklerin azaltılması üzerine

alışılmıştır. Çalışma sonucunda âtil yüklerden %13'lk, motor maliyetinden ise % 10'luk bir tasarruf sağlanmıştır. İşletme maliyeti de dahil edildiği zaman bu çalışmadan % 24'lk bir tasarruf elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel Robot, Robot Kol Optimizasyon, Sonlu Elemanlar Yöntemi, ANSYS



ABSTRACT

M.S. THESIS

OPTIMIZATION OF MOTOR DEAD LOADS OF INDUSTRIAL ROBOT ARMS ORIGINATED FROM THEIR DESIGN WITH FINITE ELEMENT METHOD AND EXAMINATION OF ITS IMPACT ON OPERATING COSTS

Mustafa BUĞDAY

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED
SCIENCE OF NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet KARALI

2018, 66 Pages

Jury

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Assoc. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

Dr. Ahmad Partovi MERAN

In industrial robots, projected torque is increasing depending on the extending reach length and payload. This requires selection of powerful engines particularly on the second axis. Since arm's rigidity becomes more important as the expected positioning precision increases, less flexible materials are used. Therefore, during operation conditions, 70 % of engine's energy is used for inert payloads. In this study, first, static analyses conducted on five different robotic arms belong to different brands by using Ansys. Arm's stress and deformation in terms of region and quantity are inspected, and alternative designs are analysed and compared with each other. Geometric changes are introduced into alternative design by employing Ansys Shape Optimization modul. Analysis are repeated and compared with

others by changing material properties of robot arm. In this way, inert payloads are minimized (without increasing the allocation quantity) at the same positioning precision. This study achieved 13 % decrease in inert payloads and 10 % decrease in engine cost. This study found that 24 % annual return to business is possible.

Key Words: Robot arm optimization, Industrial robot, Finite Elements Method, ANSYS



ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince yardımlarını benden esirgemeyen saygıdeğer hocam ve danışmanım Prof. Dr. Mehmet KARALI' ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi desteğini benden hiç esirgemeyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mustafa BUĞDAY
KONYA-04/06/2018



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Robotik Kavramı	3
2.2. Endüstriyel Robotların Gelişim Tarihçesi	3
2.3. Robotların Önemi.....	7
2.4. Endüstriyel Robotların Sınıflandırılması	8
2.4.1. Manipülâtörün yapısına göre	8
2.4.1.1. Kartezyen manipülâtör	8
2.4.1.2. Silindirik manipülâtör	9
2.4.1.3. Küresel manipülâtör	9
2.4.1.4. Scara manipülâtör	10
2.4.1.5. Mafsallı manipülâtör	11
2.5. Endüstriyel Robot Seçimindeki Kriterler	12
2.5.1. Yük taşıma kapasitesi.....	12
2.5.2. Hassasiyet	13
2.5.3. Hız	14
2.5.4. Çalışma alanı.....	14
2.5.5. Kontrol sistemi	15
2.5.6. Serbestlik derecesinin sayısı	16
2.5.7. Maliyet	16
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	18
4. MATERYAL VE METOT	26
4.1. Materyal.....	26

4.2. Taban Şasesi	27
4.3. Döner Tabla	27
4.4. Bağlantı Kolu	28
4.5. Ön Kol	28
4.6. Bilek.....	29
4.6.1. Uç elemanlar	30
4.6.2. Kuka Kr 6'nın teknik özellikleri	32
4.7. Metot.....	33
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	37
5.1. Robotun Statik Analizi	40
5.2. Doğal Frekans Analizi.....	43
5.3. Rijit Dinamik Analiz	45
5.4. Optimizasyon Çalışması	46
5.4.1. Şekil optimizasyonu	48
5.4.2. Analitik hesaplamalar	53
5.4.2.1. Tork hesabı.....	53
5.4.2.2. Güç hesabı	56
5.4.3. Motor seçimi	57
5.4.3.1. Maliyet hesabı	58
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Unimate Robot	4
2.2 Rancho Robot	4
2.3 Stanford Kolu	5
2.4 T3 Robot Kol	5
2.5 Kuka Robot Kol	6
2.6 Puma Robot	6
2.7 Altınay Robot	7
2.8 Kartezyen Robotun Karakteristik Özellikleri	9
2.9 Silindirik Robotun Karakteristik Özellikleri	9
2.10 Küresel Robotun Karakteristik Özellikleri	10
2.11 Scara Robotun Karakteristik Özellikleri	11
2.12 Mafsallı Robotun Karakteristik Özellikleri	12
2.13 Mutlak (Doğruluk) ve Tekrarlanabilirlik Hassasiyeti	14
2.14 Çalışma Alanı	15
2.15 Açık Devre Kontrol Sistemi Akış Şeması	16
2.16 Kapalı Devre Kontrol Sistemi Akış Şeması	16
3.1 Kurnool ve Arkadaşlarının Tasarlamış Oldukları Robot Kolları	18
3.2 Zhou ve Arkadaşlarının Tasarlamış Oldukları Robot Kolun Pozisyonları	19
3.3 Prasad ve Arkadaşlarının Tasarlamış Oldukları Robot Kolları	19
3.4 Ali'nin Tasarlamış Olduğu Robot Kolları	20
3.5 Mobil Robot Kolu	22
3.6 Kartezyen Robot Tasarımı	22
3.7 Scara Robot Tasarımı	23
3.8 İki Eksenli Robot Kol ve Kontrol Paneli	24
4.1 Kuka Robotun Temel Bileşenleri	27
4.2 Taban Şasesi	27
4.3 Döner Tabla	28
4.4 Bağlantı Kolu	28
4.5 Ön Kol	29
4.6 Bilek Koordinat Düzlemi	30
4.7 Robot Kolu Bileği	31

4.8	Uç Elemanlar	32
4.9	Genel amaçlı kullanılan iki parmaklı tutucu	32
4.10	Tutucu Çeşitleri	33
4.11	6 Eksenli Robotun Şematik Gösterimi	34
5.1	Üç Düğüm Noktalı Üçgen Eleman Tipi	38
5.2	Analitik Hesaplama	40
5.3	Robotun Sınır Şartları	42
5.4	İkinci Eksene Atılan Mesh	42
5.5	Toplam Yer Değiştirme (Total Deformation)	43
5.6	Von Mises Gerilme Dağılımı	43
5.7	Doğal Frekans Analizi	44
5.8	Sınır Şartları	46
5.9	Analiz Sonucu Robot Kolun Son Hali	46
5.10	Optimizasyon Teknikleri a) Tasarım b) Şekil c) Topoloji	47
5.11	Shape Optimization Analiz Sonucu	49
5.12	Beş Farklı Tasarımın Analiz Sonuçları	50
5.13	Gerilme Değerlerindeki Değişim	51
5.14	Kol Ağırlıklarındaki Değişim	52
5.15	Yer Değiştirme Miktarları	52
5.16	Tasarım 4 Genel Gösterim	53
5.17	Tork Hesabı	54
5.18	Güç Hesabı	56

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Teknik Özellikler	33
4.2 Robotlardaki Toplam Yer Değişirme Miktarları δ ve Mak. Gerilmeler σ_u	35
5.1 Dökme Paslanmaz Çeliğin Malzeme Özellikleri	37
5.2 Alüminyum 1060 Alaşımın Malzeme Özellikleri	38
5.3 Karbon/Epoksi Kompozit Sheet' in Malzeme Özellikleri	38
5.4 Frekans Değerleri	45
5.5 İkinci Eksen İçin Hesaplanan Tork Değerlerinin Karşılaştırılması	56
5.6 Robot Kolun İkinci Ekseni İçin Yapılan Güç Hesabı	58
5.7 Robot Kolun İkinci Ekseni İçin Seçilen Motor Güçleri ve Fiyatları	58
5.8 Robot Kolun İkinci Ekseni İçin Seçilen Motorların Maliyet Hesabı	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

AC : Alternatif Akım

F : Kuvvet

Hz : Hertz

kg : Kilogram

KW : KiloWatt

M : Moment

MPa : Megapascal

σ_{es} : Von Misess Akma Kriteri

P : Düzlemsel Hareket

R : Eksenel Hareket

RPM : Dakikadaki Devir Sayısı

SCARA : Selective Compliance Assembly Robotic Arm

V : Volt

w : Açısai Hız

1. GİRİŞ

Sanayi devriminden sonra insan gücü yerini yavaş yavaş makine gücüne bırakmıştır. Özellikle insanların çalışmasının zor veya imkânsız olduğu yerlerde daha kaliteli ürünler üretmek, üretim süresini kısaltmak ve maliyeti azaltabilmek için son yıllarda işletmelerin robot teknolojilerine yönelmeleri bir zorunluluk haline gelmiştir.

Robot teknolojilerin bu kadar gelişim göstermesinin altında yatan en büyük etken bilgisayar destekli üretimlerdir. Bu tür teknolojiler başta otomotiv sektörü olmak üzere endüstride farklı alanlarda (imalat endüstrisi, boyama, delme, kesme, taşıma, paketlenme, kaynak vb) kullanılabilirlerdir.

Endüstride kullanılan robotlarda hassas konum kontrolünü ve kararlılığı en üst düzeyde tutulabilmek için genellikle aksel hareketler servo motorlar ile sağlanmaktadır. Servo motorların maliyetleri ise ürettikleri tork ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Örneğin 5 ile 7 kg arasında taşıma kapasitesine sahip bir robotun ortalama ağırlığı 300 kg' a kadar ulaşmaktadır. Özellikle 2. eksen için tahsis edilen motor, robotun toplam ağırlığının yaklaşık %70-75' ini hareket ettirmeye çalışmaktadır. Robot kollarının yüksek ivmelenme özellikleri de dikkate alındığında seçilecek olan motordan beklenen güç artacaktır. Aynı mukavemet özelliğine sahip farklı bir malzeme seçimi yapılırsa ya da aynı malzeme üzerinde yapılacak bir takım geometrik değişimlerle motor yükü hafifletilebilirse daha yüksek bir performans ya da daha ekonomik bir tasarım ortaya çıkacağından bu çalışma önem kazanmaktadır.

Endüstriyel robotun günlük yaptığı işin yıllık maliyeti hesaplandığında ortaya çıkan rakam ciddi boyutlara ulaşabilmektedir. Tam da bu noktada çalışmamız önemli bir boyut kazanmaktadır. Robot üzerinde yapılan değişik optimizasyon çalışmaları ile robotun işletmeye olan maliyeti daha makul değerlere indirgenebilmektedir.

Bu çalışmada, en büyük yüklemeye maruz kalan 2. Eksene ait kolda makul bir kanal açılarak hem robottan malzeme eksilmesi yapıldığı için kolun ağırlığı azaltılmış hem de kütle ataletinin azaltılmasına bağlı olarak maksimum dayanımın artmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmayı daha önceden yapılan

Çalışmalardan kısmen ya da tamamen ayıran özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz;

1. Yeni bir robot kolu tasarımı yerine bilindik markalara ait mevcut kollar üzerinde optimizasyon çalışması yapılmıştır.
2. Motor yükleri de dikkate alınarak mafsallı (articulated) bir robot referans alınmıştır.
3. Yöntem olarak, âtil yüklerden kurtulmak için malzeme azaltılması yapacak şekilde kanalların açılması ngrlmş ve bu bölgeler Ansys Shape Optimization modülü kullanılarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümünü giriş kısmı oluşturmaktadır. İkinci bölümde endüstriyel robotlar için yapılan genel bilgilere ve tanımlamalara yer verilmiştir. nc bölümde kaynak taraması yapılmıştır. Dördüncü bölümde tez de kullanılan materyaller tanıtılmış ve hangi metodun kullanılacağı açıklanmıştır. Beşinci bölümde robot kolu üzerinde yapılan analizler sonucu ortaya çıkan sonuçlara yer verilmiştir. Son olarak altıncı bölümde ise sonuç ve öneriler kısmı ile tez sonlandırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Robotik Kavramı

Robotlar, farklı disiplinlerin (Makine, Elektrik ve Elektronik, Bilgisayar mühendisliği vs.) ortak çalışma alanına girmektedir. Robotlar için başlıca yapılan tanımlamalar iki tanedir.

Bunlardan ilki Amerikan Robot Enstitüsü tarafından yapılmış olup şu şekildedir: “Çeşitli işleri yapabilmek için programlanmış hareketlerle malzeme, parça, alet veya özel cihazları taşımak için tasarlanmış çok işlevli, tekrar programlanabilir düzenektir.”

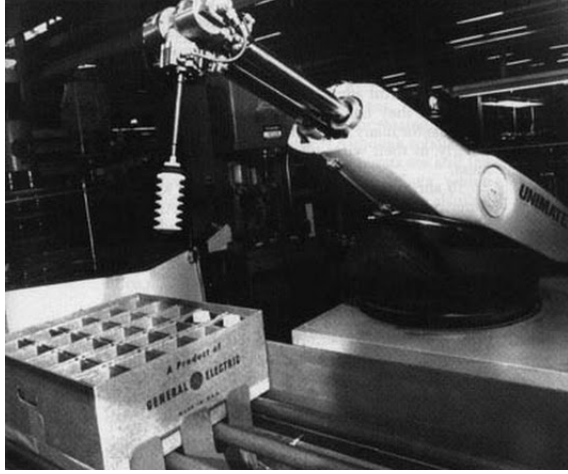
Robotların belki de bilinen en kapsamlı tanımı ve sınıflandırması ISO 8373 standartlarında yer almaktadır. Bu standarda göre: “Üç veya daha fazla programlanabilir eksenli olan, otomatik kontrollü, programlanabilir, çok amaçlı, bir yerde sabit duran veya tekerlekleri olan, ortamdaki topladığı verileri çevresi hakkında sahip olduğu bilgiyle sentezleyerek, anlamlı ve amaçlarına yönelik hareket edebilen, endüstriyel uygulamalarda kullanılan manipulatördür [1].”

Endüstriyel robotlar yukardaki tanımlamaların bir alt başlığıdır ve tez çalışmasının ana konusunu oluşturmaktadır.

2.2. Endüstriyel Robotların Gelişim Tarihçesi

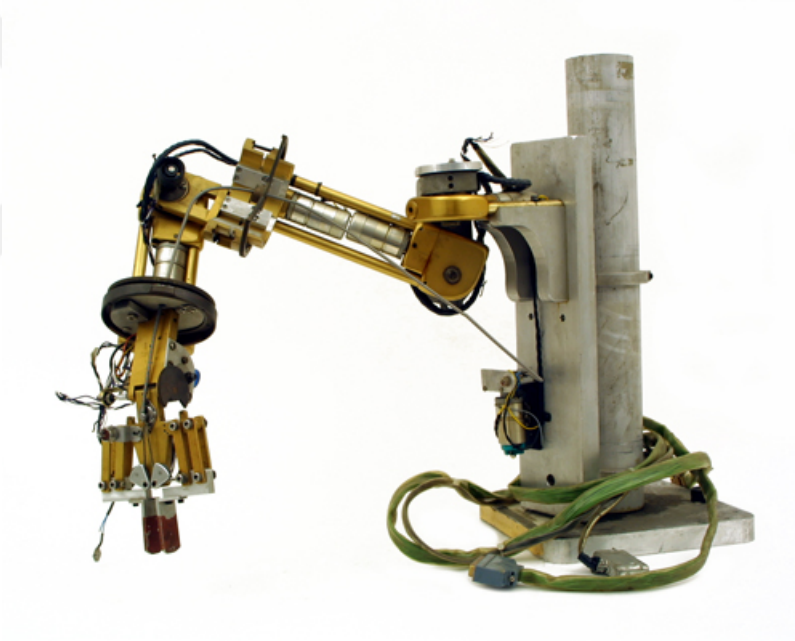
1954 yılında George Devol ilk defa uzaktan bilgisayar ile kontrol edilebilen endüstriyel bir robot tasarladı. Bu robotun patentini alarak Joseph Engleberger ile birlikte Unimation şirketini kurarak ilk üretime başladılar.

1962 yılında General Motor firması “Unimate” adında ilk endüstriyel robotunu üretti. Bu robotu, sıcak parçaların döküm makinasından alınarak istiflemek için üretmişlerdir. Şekil 2.1’de Unimate adlı robot gösterilmiştir [2].



Şekil 2.1. Unimate Robot

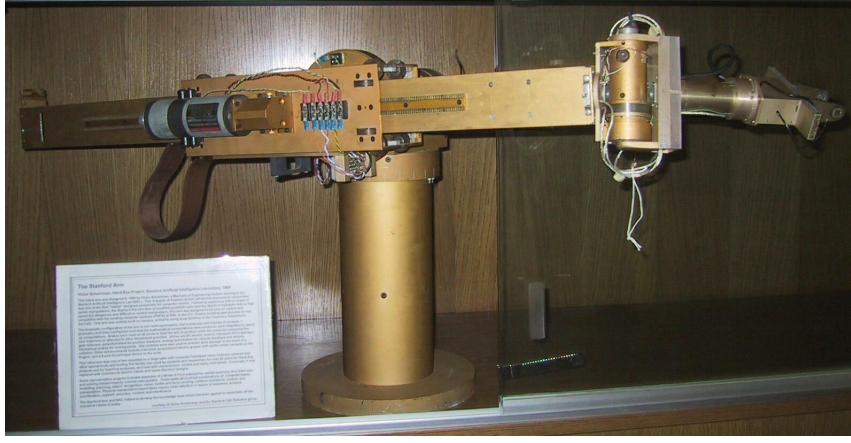
1963’de literatüre Rancho kolu olarak geçen altı serbestlik derecesine sahip bir robot geliştirdi. Şekil 2.2’de Rancho robot gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Rancho Robot

1966’da nokta kaynağı yapabilen bir robot geliştirildi.

1970’de Stanford Üniversitesi tarafından bir robot kolu geliştirilmiştir. Bu kol literatüre “Stanford Kolu” olarak geçmiştir. Şekil 2.3’de Stanford Kolu gösterilmiştir [2].



Şekil 2.3. Stanford Kolu

1973 yılında Richard Hohn adındaki bir araştırmacı Cincinnati Milacron Corporation adında ilk mini bilgisayar denetimli robot geliştirdi. Bu robota T3 (The Tomorrow Tool) adını verdi. Şekil 2.4’de Richard Hohn tarafından geliştirilen T3 robotuna yer verilmiştir [2].



Şekil 2.4. T3 Robot Kol

1973 yılında Kuka adlı Alman mühendisler tarafından geliştirilen robot, elektro manyetik kollara sahipti ve kendi alanında (hidrolik olmayan) ilk endüstriyel robot ünvanının sahibi oldu. Şekil 2.5’de Kuka firmasının üretmiş olduğu robot gösterilmiştir.



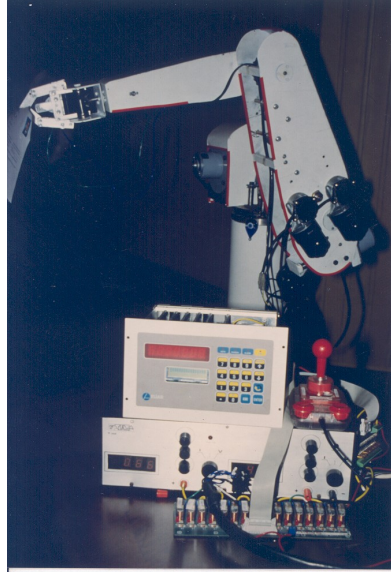
Şekil 2.5. Kuka Robot Kol

1978 yılında PUMA isimli bir robot üretildi. Şekil 2.6’da PUMA robota yer verilmiştir [2].



Şekil 2.6. Puma Robot

1990’lı yıllara gelindiğinde bir Türk firması olan Altınay Robotik, altı serbestlik derecesine sahip bir robot üretti. Altınay firması Türkiye’de ilk endüstriyel robotu ürettiği için yüksek teknoloji ödülünü aldı. Şekil 2.7’de Altınay firmasının ürettiği robota yer verilmiştir.



Şekil 2.7. Altınay Robot

2.3. Robotların Önemi

Günümüz çalışma şartları ve ortamı göz önüne alındığında yapılan işin maliyeti ve kalitesi büyük önem kazandığı görülmektedir. Araştırma şirketlerinin yapmış olduğu verilere bakıldığında zaman endüstride son 100 yıl içerisinde üretim yaklaşık 25 kat artmıştır.

Robot teknolojilerin birçok avantajının olmasının yanı sıra dezavantajı da vardır. Robotların avantajlarını ve dezavantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

Avantajlar

1. İnsan gücüyle yapılması zor işleri kolaylıkla yapabilirler.
2. Tehlikeli iş koşullarında çalışabilirler.
3. Sürekli tekrar eden işlerde aynı kaliteye sahip ürünler çıkartırlar.
4. Robotlar yapımı ve bakımı maliyetli olmasına rağmen en ucuz işgücüdür.
5. Uzaktan yönetilmeye elverişlidirler.
6. Yorulmadan sürekli çalışabilirler.
7. Robotlar çok az geri bildirimle mekanik olarak çalışmalarını sürdürürler.
8. Üretimi çok zaman alan ürünlerde bazı basit işleri hızlıca yaparak zamandan kazanç sağlarlar.

9. Savunma sanayisinde bazı önemli işlerde askerlerin yerini alarak ordu da insana olan ihtiyacı azaltırlar.

Dezavantajlar

1. Robotlar sayesinde işgücü çok ucuzladığı için insanların işsiz kalmasına sebep olabilir.
2. Robotlar az geribildirimle çalışırken eğer bir hatayla karşılaşırsa bu hatanın geribildirimini de yavaş olmaktadır.
3. Sürekli yapılan işlerde eğer yanlış bir veri varsa hatalı ürünlerin üretilmesine sebep olacaktır.
4. Yanlış programlandıkları zaman insanlar için tehlikeli olabilirler.
5. Belirli periyotlarda bakımlarının yapılması gerekir.
6. Teknik açıdan donanımları oldukça fazladır [3].

2.4. Endüstriyel Robotların Sınıflandırılması

Günümüzde endüstriyel robotları farklı şekillerde sınıflandırabilmek mümkündür. Ancak bu çalışmada manipülatör yapılarına göre sınıflandırma yapılacaktır.

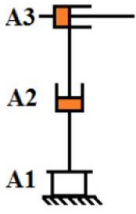
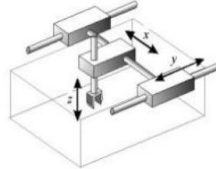

2.4.1. Manipülatörün yapısına göre

Endüstriyel robotlar, manipülatör yapısına göre; Kartezyen, Silindirik, Küresel, Scara ve Mafsallı manipülatörler olarak sınıflandırılır.

2.4.1.1. Kartezyen manipülatör

Bu tür robotlar endüstride sadece tutma ve taşıma işlerinin yapıldığı yerlerde kullanılır. X, Y, Z eksenlerinde doğrusal olarak hareket edebilirler. Kartezyen robotlar basit bir yapıya sahip olmalarından dolayı rijitlikleri yüksek ve kendi sınıfındaki

robotlara göre daha hızlı bir yapıya sahiptirler. Şekil 2.8’de endüstride kullanılan kartezyen bir robotun karakteristik özelliklerine yer verilmiştir.

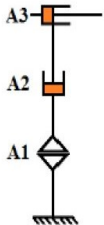
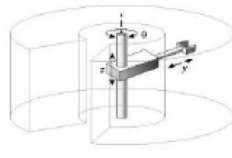

Major Eksen Tipi	Kinematik Yapı	Çalışma Alanı	Uygulama Örneği
P-P-P (3P)			

Şekil 2.8. Kartezyen Robotun Karakteristik Özellikleri

Kartezyen robotlar özellikle fabrikaların tavanına veya yüzeyine monte edilerek malzeme taşınması işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

2.4.1.2. Silindirik manipülatör

Silindirik robot kolu kendi eksenini etrafında dönebilen bir yatak üzerine oturtulmuştur. Döner eksenin üzerinde bulunan diğer aksamaları ise X, Y, Z eksenlerinde doğrusal hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Kartezyen robota göre çalışma alanı daha geniştir. Silindirik robotun çalışma alanı robot kollarının uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Silindirik robotun hareket kabiliyetinin az olmasından dolayı kolay programlanabilir. Şekil 2.9’da bir silindirik robotun karakteristik özellikleri gösterilmiştir.

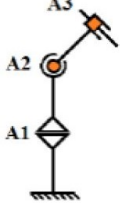
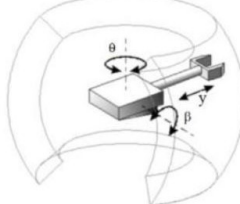

Major Eksen Tipi	Kinematik Yapı	Çalışma Alanı	Uygulama Örneği
R-P-P (R2P)			

Şekil 2.9. Silindirik Robotun Karakteristik Özellikleri

Silindirik robotlar nemli, tozlu, ortamlarda, deniz altında, uzay gözlem araçları, montaj işleri gibi çeşitli iş ve sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4.1.3. Küresel manipülatör

Küresel robotlar iki tane dairesel ve bir de doğrusal eksen olmak üzere üç eksenenden oluşur. Dairesel eksenler kendi etrafında dönme hareketi yaparken, doğrusal ekseninde ise robot kolunda uzama ve kısalma hareketi yapar. Şekil 2.10'da küresel bir robotun karakteristik özellikleri gösterilmiştir.

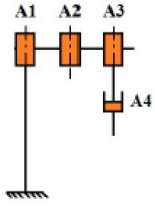
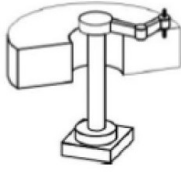

Major Eksen Tipi	Kinematik Yapı	Çalışma Alanı	Uygulama Örneği
R-R-P (2RP)			

Şekil 2.10. Küresel Robotun Karakteristik Özellikleri

Küresel robotların yapıları kartezyen ve silindirik robotlara göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Karmaşık yapısından dolayı programlanabilirliği ve kontrol edilebilirliği daha zordur. Küresel robotlar eğme, bükme işlerinde, kameralı izleme, kaynak ve zamlama işlerinde kullanılırlar.

2.4.1.4. Scara manipülatör

Scara, Selective Compliance Assembly Robotic Arm kelimelerinin baş harflerinin birleşmesiyle oluşmuştur. Scara robot iki eklemde elektrik robotu diğer eklemi ise yukarı ve aşağıya hareket edebilen pnömatik bir koldan oluşmuştur. Elektrik motorları Scara robotu kendi eksenini etrafında dönebilmesini sağlar. Tutucu ağzın bulunduğu kol ise robotu Z ekseninde hareket etme kabiliyeti kazandırır. Şekil 2.11'de Scara robotun karakteristik özellikleri gösterilmiştir.

Major Eksen Tipi	Kinematik Yapı	Çalışma Alanı	Uygulama Örneği
R-R-R-P (3RP)			

Şekil 2.11. Scara Robotun Karakteristik Özellikleri

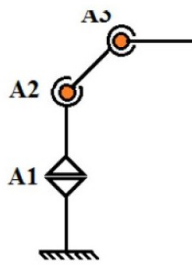
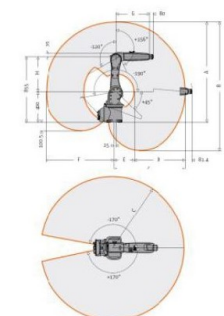

Scara robotlar endüstride kullanım alanlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Dizme
2. Yerleştirme
3. Taşıma
4. Paketleme
5. Silikon Çekme
6. Delme, Kesme
7. Yükleme ve Boşaltma

2.4.1.5. Mafsallı manipülatör

Mafsallı robotlar insan kolundan ilham alınarak tasarlanmıştır. Bu tür robotlar insan kolunun sahip olduğu bütün hassasiyet ve esnekliği yaklaşık olarak taşımaktadır.

Mafsallı robotların her ekseninde servo motorlar bulunur. Bu motorlar 12 – 24 V gerilim ile beslenmektedir. Diğer robot türlerine göre hareket esneklikleri daha gelişmiştir. Karmaşık bir yapıya sahip olduğu için programlanabilirliği ve kontrol edilebilirliği zordur. Şekil 2.12’de Mafsallı robotun karakteristik özellikleri gösterilmiştir.

Major Eksen Tipi	Kinematik Yapı	Çalışma Alanı	Uygulama Örneği
R-R-R (3R)			

Şekil 2.12. Mafsallı Robotun Karakteristik Özellikleri

Mafsallı robotların kullanım alanlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Makinelerin yükleme ve boşaltılması
2. İstifleme
3. Paketleme
4. Yapıştırma
5. Kaynak
6. Montaj
7. Boyama

2.5. Endüstriyel Robot Seçimindeki Kriterler

Endüstriyel robot seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı kriterler vardır. Bu kriterleri şu şekilde sıralayabiliriz: Yük taşıma kapasitesi, Hassasiyet (Doğruluk, Çözünürlük, Tekrarlanabilirlik), Hız, Çalışma alanı, Kontrol sistemi, Serbestlik derecesinin sayısı ve Maliyettir .

2.5.1. Yük taşıma kapasitesi

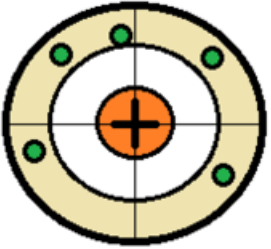
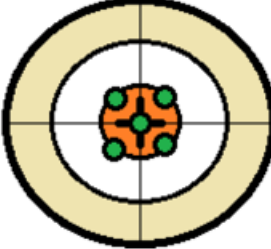
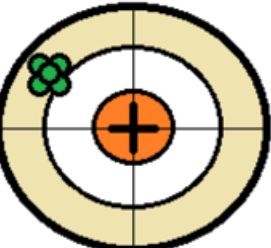
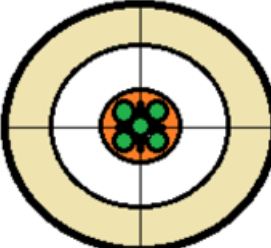
Yük taşıma kapasitesi; robotların sistem tasarımına, büyüklüğüne, koordinatlarına ve sürücü sistemleri gibi parametrelere bağlı olduğu kadar taşınan yükün

ağırlığı ve boyutlarına da bağlıdır. Robotun kaldırabileceği yük gövdeye ne kadar yaklaştırılırsa (Moment etkisine bağlı olarak) kolun kaldırabileceği maksimum yük miktarı da orantılı bir şekilde artmış olur. Bu yüzden ağır işlerin yapıldığı yerlerde yüksek kapasiteli robot tercih edilmesi daha doğru olacaktır [4].

2.5.2. Hassasiyet

Robotta hassasiyet, yapısında meydana gelebilecek en küçük değişim olarak ifade edilebilir. Robot seçim kriterleri arasında belki de en önemli performans göstergesidir. Hassasiyet kendi arasında üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar: Doğruluk, Çözünürlük ve Tekrarlanabilirliktir. Şekil 2.13'de Mutlak ve Tekrarlanabilirlik hassasiyeti gösterilmeye çalışılmıştır [4].

1. **Doğruluk:** Robot kolu üzerinde yapılan ölçümlerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu gösterir. Doğruluğun net bir şekilde belirlenebilmesi için sistem üzerinde yapılan ölçümlerin ve bu ölçümler sırasında meydana gelen hataların iyi belirlenmesi gerekir.
2. **Çözünürlük:** Eksenlerin hareket adım aralığı ile ilgilidir. Aralarında ters bir ilişki vardır. Yani eksen hareket adım aralığı azaldıkça robotun çözünürlüğü de artmaktadır.
3. **Tekrarlanabilirlik:** Robotun çalışma alanı içerisinde daha önceden belirlenen bir noktaya ulaşmasına denmektedir. Robotun tekrar eden hareketleri sonucu daha önceden belirlenen nokta arasındaki maksimum hata miktarı olarak ölçülür. Robottan beklenen maksimum hata miktarları çalıştıkları alanlara göre değişim gösterebilmektedir. Örneğin hassas işlerde robottan beklenen tekrarlanabilirlik aralığı 0,02 mm olurken, orta düzeyli işlerde bu aralık 0,05 mm ile 0,1 mm arasında olması kafidir.

		Mutlak (Doğruluk) Hassasiyeti	
		Düşük	Yüksek
Tekrarlanabilirlik Hassasiyeti	Düşük		
	Yüksek		

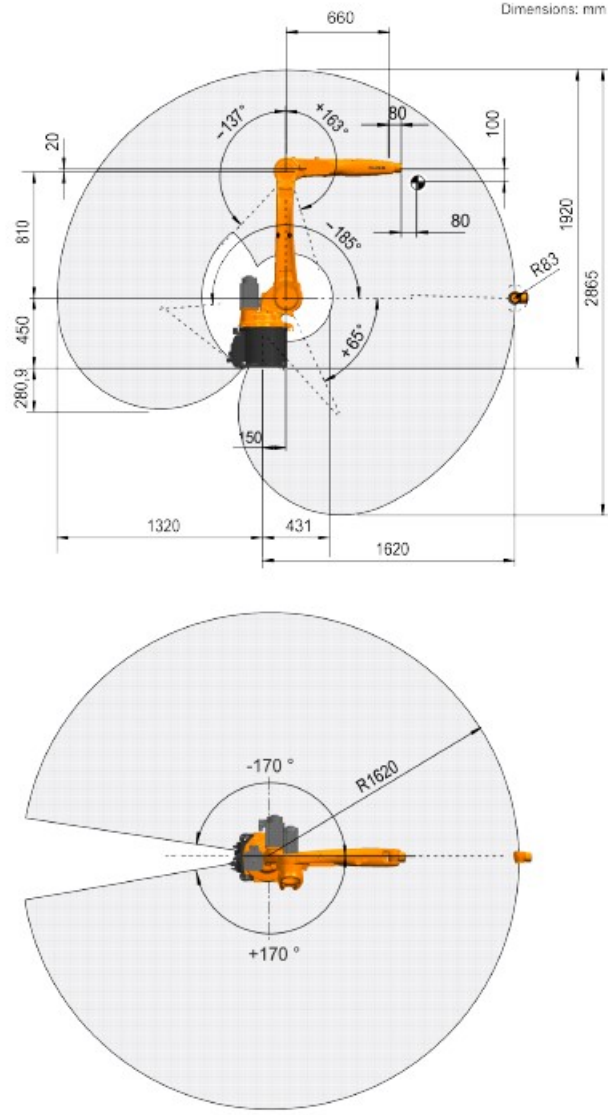
Şekil 2.13. Mutlak (Doğruluk) ve Tekrarlanabilirlik Hassasiyeti

2.5.3. Hız

İşletmeler yapılacak işin süresine uygun çalışma hızına sahip robotlar seçmelidir. Bu sayede hem zamandan hem de maliyetten kazanç sağlayabilirler. Buradaki hız kavramı her bir eksen için farklıdır. Ama bizim için asıl olan robot kolun uç noktasındaki hızıdır. Genellikle robot kolunda kullanılan hız, açısal hızdır. Birimi ise rad/s'dir [4].

2.5.4. Çalışma alanı

Çalışma alanı robotun mekanik hareket kabiliyetine bağlı olarak çevresinde erişebileceği tüm noktaları kapsayan uzaydır. Çalışma alanı robotun serbestlik derecesine ve eksenlerin tasarımına göre değişim gösterebilmektedir. Şekil 2.14'de Kuka firmasına ait bir robotun çalışma alanı gösterilmiştir [4, 5].



Şekil 2.14. Çalışma Alanı

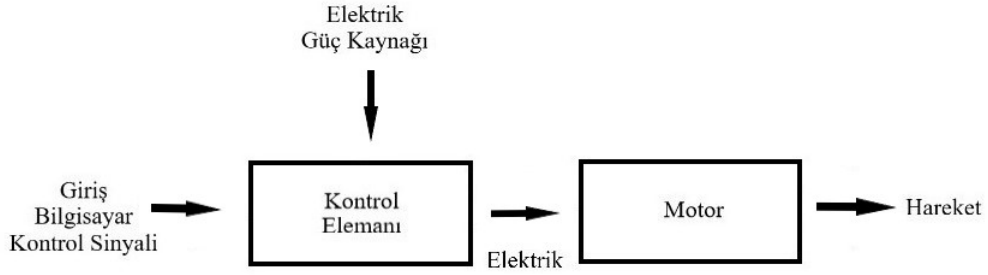
2.5.5. Kontrol sistemi

Robottan istenilen hareketlerin tam ve doğru bir şekilde yerine getirebilmesi için kontrol ünitelerinin ve programlama şekillerinin doğru seçilmesi gerekmektedir. Robotlarda kontrol temelde iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar:

1. Açık Devre Kontrol Sistemleri
2. Kapalı Devre Kontrol Sistemleridir.

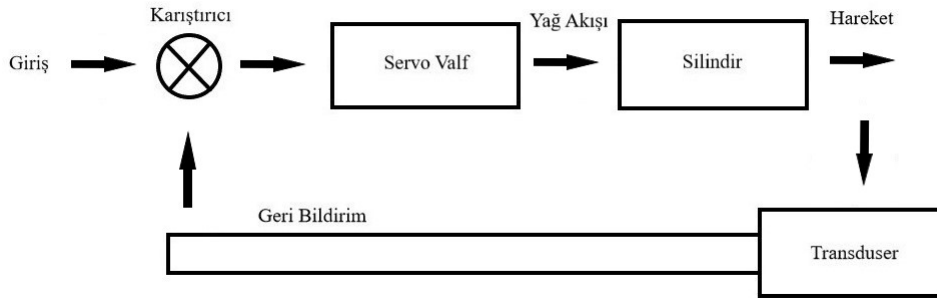
Açık devre kontrol sistemlerinde, çıktı hareketinin miktarını algılayacak herhangi bir kontrol birimi yoktur. Endüstride sıklıkla tercih edilen kontrol sistemidir. Şekil

2.15’de Açık devre kontrol sisteminin akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.15. Açık Devre Kontrol Sistemi Akış Şeması

Kapalı devre kontrol sistemi, açık kontrol sisteminden farkı içerisinde konum ölçü devresinin bulunmasıdır. Hareket miktarını sistem içerisinde algılayarak sürücülere kumanda edilmesi esasına göre çalışır. Örneğin bir hidrolik silindire konum ölçüm devresi eklenerek robot kolun hareketleri kontrol edilebilir. Şekil 2.16’da kapalı devre kontrol sisteminin akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Kapalı Devre Kontrol Sistemi Akış Şeması

2.5.6. Serbestlik derecesinin sayısı

Endüstriyel robotlarda serbestlik derecesinin sayısı arttıkça, robotun maliyeti de artmaktadır. Bundan dolayı en uygun serbestlik derecesine sahip robotu kullanmak daha doğru olacaktır. Mesela montaj hattında kullanılmak için dört eksenli bir robot yeterli olurken, Ark kaynağı işiyle uğraşılacak bir işletmede daha hassas ve kaliteli kaynak yapılabilmesi için altı serbestlik derecesine sahip bir robot seçilmesi daha uygun olabilmektedir [4].

2.5.7. Maliyet

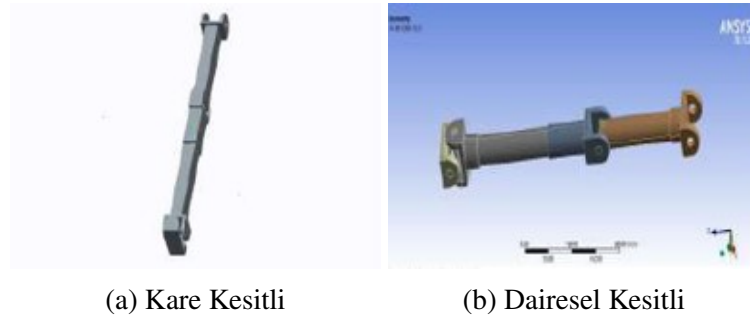
Endüstride kullanılan robotlar sayesinde, üretim sırasında insan faktörünün etkisinden dolayı oluşan hataların minimuma inmesi ve daha az enerji harcanarak üretimin gerçekleşmesi mümkün hale gelebilmektedir. Bu sayede işletmeler önemli ölçüde maliyetten kazanç sağlayabilmektedir [4, 5].



3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Pupaza ve arkadaşları (2014) Kuka robot firmasının yapmış olduğu endüstriyel bir robot üzerinde ANSYS paket programı kullanarak öncelikle yapının hassas bölgelerini tespit edebilmek için statik, modal ve rigid dinamik analizler yapmış ve robot kolunun ikinci ekseninde meydana gelen değişimleri kaydetmişlerdir. Elde ettikleri bu sonuçlara göre Ansys Shape optimization modülünü kullanarak en ideal parça eksiltebilecekleri yerleri belirlemişler ve buralardan kütle azaltması yapmışlardır. Sonuçta motora düşen yükü azaltarak sistemi daha kararlı hale getirmişlerdir [6].

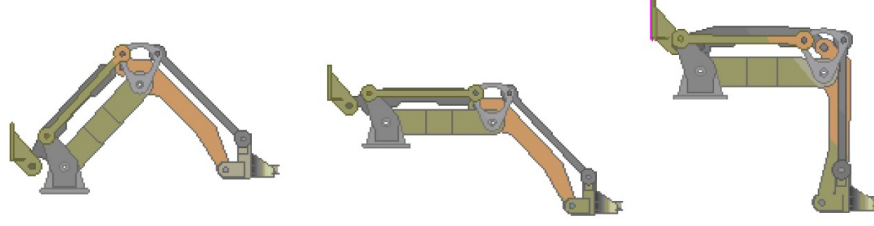
Kurnool ve arkadaşları (2016) çalışmalarında dairesel ve kare kesitli iki farklı robot kolu üzerinde farklı malzemeler (çelik, Al-356 ve Aramid epoksi) kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile statik analizler yapmışlardır. Her iki robot kolun farklı malzeme tiplerine göre üzerlerinde oluşan deformasyon ve gerilme değerlerini belirleyerek hangi tür (dairesele veya kare) robot ve malzemede çalışmanın daha avantajlı olabileceğini belirlemişlerdir. Şekil 3.1’de analizi yapılan robot kolları gösterilmiştir [7].



Şekil 3.1. Kurnool ve Arkadaşlarının Tasarlamış Oldukları Robot Kolları

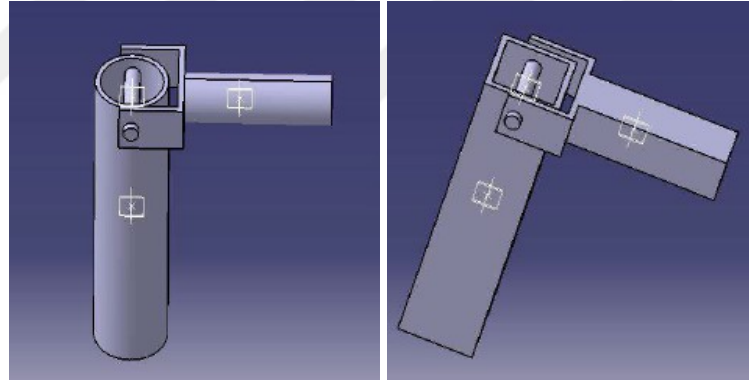
Zhou ve arkadaşları (2014) tarım sektöründe kullanılan bir robot kolu üzerinde çalışma yapmışlardır. Ansys paket programına robot kolu üç değişik açıyla (45° , 90° ve 135°) tanıtmışlardır. Şekil 3.2’de analizleri yapılan robot kolların pozisyonları gösterilmiştir. Robot kolu üzerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanarak modal, dinamik ve statik analizler yapmış ve sistemin en hassas bölgeleri tespit etmeye çalışmışlardır. Gerekli yerlerde optimizasyon işlemleri uygulayarak yapıyı en ideal

hale getirmek için uğraşmışlardır [8] .



Şekil 3.2. Zhou ve Arkadaşlarının Tasarlamış Oldukları Robot Kolun Pozisyonları

Prasad ve arkadaşları (2017) yapmış oldukları çalışmayı endüstride ambalajlama ve taşıma işlemlerinde kullanılan robot kolları üzerine yapmışlardır. Catia çizim programı yardımıyla robot kollarını öncelikle kare ve silindirik kesitli şekilde tasarlamışlardır. Şekil 3.3’de robot kolları gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (Ansys) kullanarak bu kollar üzerinde hem geometrik şekli değiştirerek hem de malzeme türünü (Magnezyum, Alüminyum, Çinko ve Çelik) değiştirerek statik analizler yapmışlardır. Analiz’ e göre magnezyum alaşımli kare kesitli robot kolunun en ideal sonucu verdiğini tespit etmişlerdir [9].



(a) Dairesel Kesitli

(b) Kare Kesitli

Şekil 3.3. Prasad ve Arkadaşlarının Tasarlamış Oldukları Robot Kolları

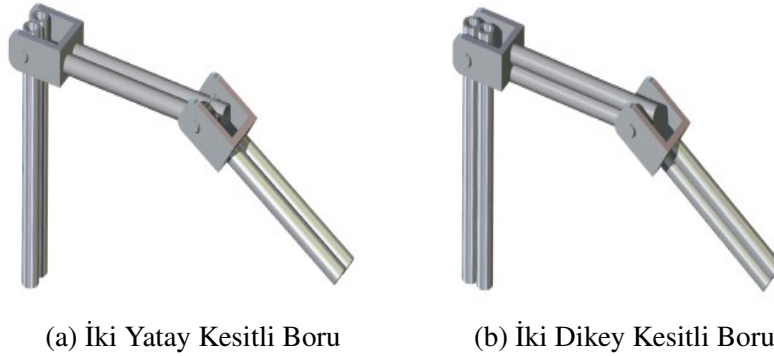
Sahu ve arkadaşları (2017) çalışmalarında altı eksene sahip bir Aristo marka endüstriyel robot kullanmışlardır. Robotun tasarımını Catia çizim programıyla yaparken, analizleri ise Ansys ile yapmışlardır. Robot kolunun tutucu kısmından (altıncı eksen) farklı büyüklüğe sahip yükler (0.5 N - 125 N arası) uygulamışlar ve yapıda oluşan Deformasyon, Shear Stres ve Shear Elastic Strain değerlerini sonlu elemanlar yöntemi (Ansys) ile belirlemişlerdir. Bulunan bu sonuçlara göre yapının zayıf noktalarını belirlemişler ve o kısımlarda iyileştirmeler yapmışlardır [10].

Jeevan ve arkadaşları (2015) yapmış oldukları çalışmada dairesel ve kare kesitli robot kolları kullanmışlardır. Robot kolları üzerinde sonlu elemanlar yöntemi

(Ansys) kullanılarak birtakım analizler (Statik, Modal) yapılmıştır. Modal analiz sonucu dairesel kesitli robot kolunun kare kesitliye göre daha avantajlı olduğunu belirlemişlerdir. Statik analizle ise dairesel kesitli robot kolunun daha az gerilmeye ve deformasyona maruz kaldığını tespit etmişlerdir [11].

Ghiorghe (2010) çalışmasında Fanuc LR Mate 100 tipi bir endüstriyel robot kullanmıştır. Bu robot üzerinde sonlu elemanlar metodunu (Ansys 10.0) kullanarak statik ve modal (doğal frekansını ve titreşim modlarını bulabilmek için) analizler yapmıştır. İlk durumda malzeme türünü çelik olarak seçerken sonrasında alüminyum olarak değiştirerek robot kolunun ağırlığını azaltıp rijitliğini artırmayı hedeflemiştir. Bulmuş olduğu her iki sonucu da (stres ve deformasyon değerlerini) karşılaştırıp yorumlayarak çalışmasını bitirmiştir [12].

Ali (2010) çalışmasında robot kolun ikinci eksenine yoğunlaşmıştır. Bu eksen farklı geometrik şekillerde (kare kesitli, üç boru kesitli, iki dik boru kesitli, iki yatay boru kesitli ve tek boru kesitli) tasarlayarak önce teorik olarak gerilme hesabı yapmış (sadece kare kesitli ve tek boru kesitli yapıda hesaplamıştır) daha sonra sonlu elemanlar yöntemi (Ansys) kullanarak bulduğu sonuçlarla karşılaştırmıştır. Şekil 3.4'de Ali' nin çalışmasında kullandığı iki yatay ve dikey boru kesitli robot kolları gösterilmiştir [13].



Şekil 3.4. Ali'nin Tasarlamış Olduğu Robot Kolları

Vadhadiya ve arkadaşları (2015) nükleer reaktör tesisinde kullanılan beş serbestlik derecesine sahip bir endüstriyel robot üzerinde çalışma yapmışlardır. Robot kolunun kaldırabileceği maksimum yükü 5 kg ve emniyet faktörünü de 2 olarak belirlemişlerdir. Robot koluna bu yükü uygulayarak Ansys'de statik analizler yapmışlar ve her bir kolun üzerinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ve deformasyon miktarlarını ölçerek bir Tablo haline getirmişlerdir. Güvenlik faktörü de düşünüldüğü zaman bulunan sonuçlar sınır değerinin çok altında olduğunu görmüş-

lerdir. Buna göre aynı yük altında veya farklı yükler altında kütle optimizasyonu yaparak sistemi daha hafif hale getirebilecekleri kanısına varmışlardır [14].

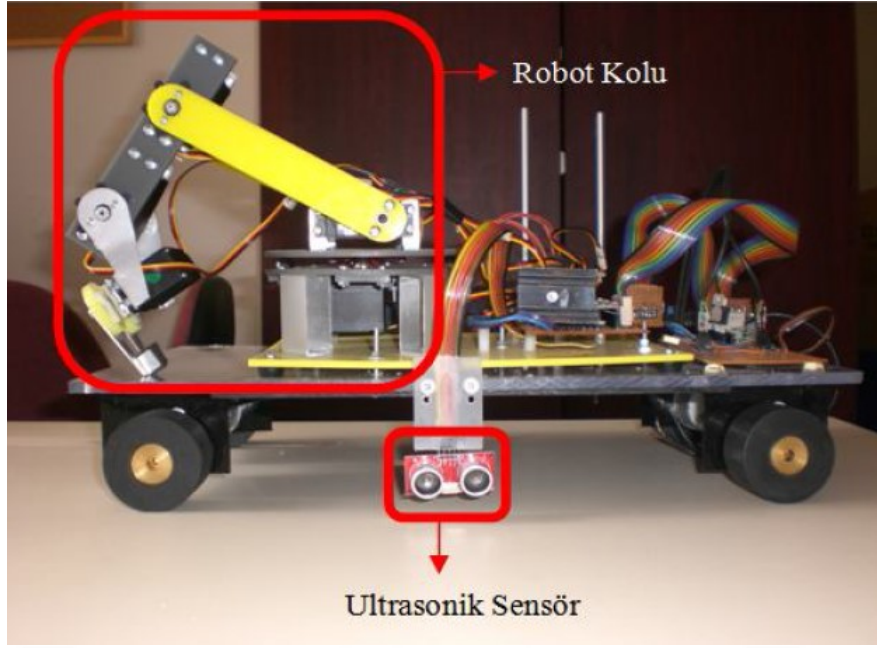
Singh ve arkadaşları (2017) çalışmalarını endüstride sıklıkla kullanılan pick and place robotları üzerine yapmışlardır. Bu robotun katı çizimlerini hazır almışlar. Robot üzerinde yapılan gerilme analizlerini (güvenlik faktörü de dahil edilerek) ise Ansys paket programıyla yapmışlardır. Buldukları sonuçlara göre robot kolunun kaldırabileceği maksimum yükü 2500 N olarak belirlemişlerdir.

Chitte ve arkadaşları (2016) altı eksenli Aristo marka bir endüstriyel robot üzerinde sonlu elemanlar yöntemiyle statik ve modal analizler yapmış ve robot kolunun kaldırabileceği maksimum yükü bulmaya çalışmışlardır. Sonuçta robot kolun kaldırabileceği maksimum yükü 10 kg olarak bulmuşlardır. Bu yük 12 kg uygulanacak olursa tutucu kısmın kırılıp yükü kaldıramayacağını analizler sonucu belirlemişlerdir [16].

Choong ve arkadaşları (2007) üç serbestlik derecesine sahip, 6 kg taşıma kapasiteli ve 1.3 m yarıçapında bir çalışma alanı olan endüstriyel robotun verimliliğini artırabilmek için çalışmışlardır. Ansys' te analiz yaparken malzeme türünü alaşımli çelik, alaşımli alüminyum ve dövülebilir dökme demir seçerek üç farklı şekilde statik analiz yapmışlardır. Çalışmaya ilk başlarken ki hedefledikleri 0,0705 mm' lik hassasiyete alaşımli çelik malzeme seçilirse ulaşabileceklerini yapılan analizler sonucu görmüşlerdir [17].

Çiçek (2006) çalışmasında renk hassasiyeti olan ve bu şekilde malzeme taşınması yapabilen beş eksenli bir robot kolu tasarımı yapmıştır. Uygulamada ise eklemleri daha hassas hale getirmeye çalışmıştır. Robot kolunun kontrolünü ise PIC mikro denetleyicisi ile gerçekleştirmiştir [18].

Karcı (2012) beş eksenli bir robotu mobil bir aracın üzerine monte etmişler. Bu robota önüne çıkan cisimleri tanıyabilmesi için ultrasonik sensörler koymuşlardır. Robot kolunun hareket kontrolünü VHDL programlama dili yardımı ile yaparken benzetimi ise Modelsim programı ile yapmışlardır. Literatürde bu çalışma ile bire bir örtüşen mobil robot kolu mekanizmasına rastlanmadığından bu alanda örnek teşkil etmektedir. Şekil 3.5'de Karcı' nın çalışmasında kullandığı mekanizma gösterilmiştir [19].



Şekil 3.5. Mobil Robot Kolu

Toraman (2008) çalışmasında kartezyen bir robotun tasarımını ve programlanmasını yapmıştır. Robot kolunun tutucu kısmına bir kalem entegre ederek bilgisayarda çizilen vektörel grafiklerin kâğıt üzerinde de çizmeyi amaçlamıştır. X, Y ve Z eksenlerinde robot kolunu hareket ettirebilmek için ise adım motorları kullanmıştır [20].

Özyalçın (2006) yüksek lisans tezinde açık sistem tasarım yapmış ve ortama göre esneklik sağlayabilen bir kartezyen robot imal etmiştir. Şekil 3.6'da Özyalçın'ın tasarlamış olduğu kartezyen robota yer verilmiştir [21].



Şekil 3.6. Kartezyen Robot Tasarımı

Demirci (2012) “Scara Robot ve Tasarımı” adlı yüksek lisans çalışmasında robotun tasarımını Solidworks programı ile tasarlamış analizlerini ise aynı programın eklentisi olan Motion study ve Simulation kısmı ile yapmıştır. Şekil 3.7’de Demirci’nin tasarlamış olduğu Scara robota yer verilmiştir [22].



Şekil 3.7. Scara Robot Tasarımı

Aydın yüksek lisans çalışmasında üç serbestlik derecesine sahip paralel robotun katı modelini Solidworks programı ile tasarlamıştır. Bulmuş olduğu ters ve düz kinematik çözümleri katı model üzerinde test etmiş ve robotun çalışma hacmini hesap etmiştir [23].

Toker (1999) çalışmasında altı serbestlik derecesine sahip endüstriyel bir robotun mekanik tasarımını yapmıştır. Robot parçaların katı modellerini çıkartmış ve bu parçaların CNC imalat kodlarını oluşturmuştur [24].

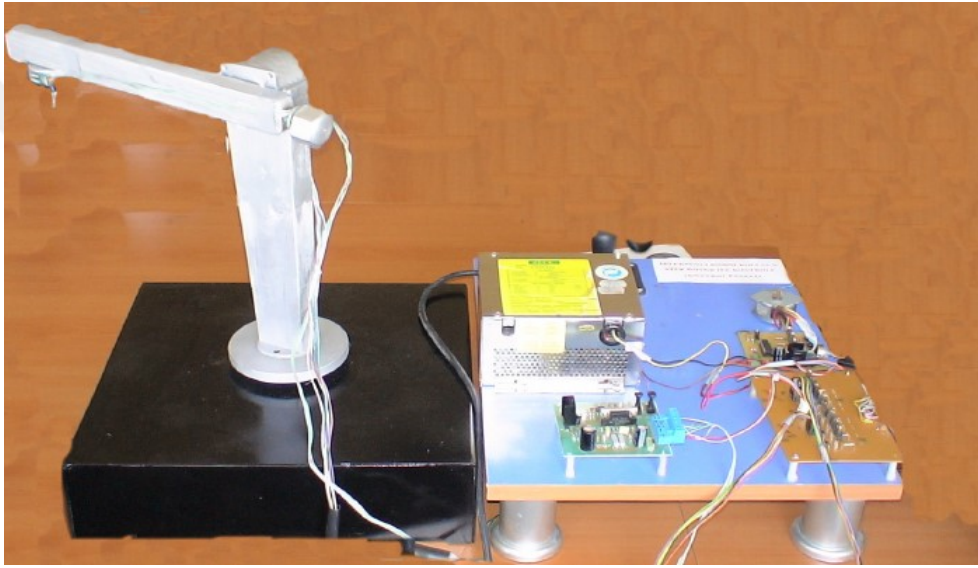
Yarım (2004) yüksek lisans tezinde mikro denetleyici bir elektronik kart tasarımı yaparak bunu internet üzerinden erişilebilecek hale getirmiştir. Devamında bu mikro denetleyiciyi bir robot koluna entegre ederek internet üzerinden kontrolünü sağlamıştır [25].

Şahin (2006) yüksek lisans tezinde bir robot manipülatörü kullanmış ve bunun üzerinde öğrenme kontrol metodu yardımıyla gerçek zamanlı kontrol ve simülasyon yapmıştır. Bu metod sayesinde geliştirilen denetleyici ile sistemde meydana gelen belirsizlikleri belirlemiş ve bu işlem her tekrar ettiğinde bir önceki değer-

lerden yaralanarak robot kolundaki hataları minimuma indirmeye çalışmıştır [26].

Kert (2006) yüksek lisans tezini kartezyen koordinatlı bir robot kolu üzerine yapmıştır. Bu robot kolunun kontrolünü paralel port üzerinden yapmış ve robotun izleyeceği yörüngeyi belirlemiştir. Hareket hassasiyetlerini ise adım motorlarıyla yapmıştır [27].

Yılmaz (2007) yüksek lisans tezinde iki eksenli bir robot kolu kullanmıştır. Eksenlerin hareketini adım motorlarıyla sağlamıştır. MATLAB programı yardımıyla kullanılan bu motorların benzetimini yapmıştır. Motorların kontrolünü ise PID kontrol ile sağlamıştır. Şekil 3.8'de Yılmaz'ın yapmış olduğu iki eksenli robot kol ve kontrol paneline yer verilmiştir [28].



Şekil 3.8. İki Eksenli Robot Kol ve Kontrol Paneli

Tonbul ve Sarıtaş (2003) çalışmalarında beş eksene sahip Edubot robot üzerinde Matlab programı kullanılarak ters kinematik hesaplamalar ve yörünge planlanması yapmışlardır. Robotun eklem açıları, açısal hızları ve açısal ivmelerin zamana göre değişimleri bu program sayesinde elde edilmiştir. Bulunan bu sonuçlar robot üzerinde denenerek ideal bir sonuç elde edilmeye çalışılmıştır [29].

Adalı (2001) yüksek lisans tezinde Mitsubishi firmasının tarafından tasarlanan Movemaster EX (RV-M1) endüstriyel robot' u için üç boyutlu simülasyon programı yazarak sistemi daha işlevsel hale getirmeye çalışmıştır. Bu programı ise pascal tabanlı Delphi programını kullanarak yazmıştır [30].

Ayberk (2001) makalesinde farklı boyutlara sahip nesnelere tanımlayabilmek için görüntü işleme sistemi ile bu nesnelere birbirinden görüntü destekli ayırmak için bir takım çalışmalar yapmıştır. Robot kolunun hareketlerini DC motorlarla

sağlamıştır. Robotun istenilen yörüngeyi doğru bir şekilde takip edilebilmesi için C++'da mafsal kontrol algoritması yazmıştır. 24 farklı nesne üzerinde yapılan deneyler sonucu 5 ile 10 mm arasında kesinlik değerine sahip yörünge takibi yapılmış olup %95' lik bir nesne tanıma başarısına ulaşmıştır [31].

Bostan (2004) yüksek lisans çalışmasını altı serbestlik derecesine sahip PUMA 560 tipi bir robot üzerine yapmıştır. Daha önceden hesaplanan dinamik parametreler kullanılarak robot kolunun yörünge kontrolünü PD kontrol algoritması ve moment yöntemi metodu ile yapmıştır [32].

Köker(2002) doktora çalışmasında üç serbestlik derecesine sahip bir robot kolunun görmeye dayalı kontrolünü Yapay Sinir Ağları metodu kullanarak yapmıştır [33].

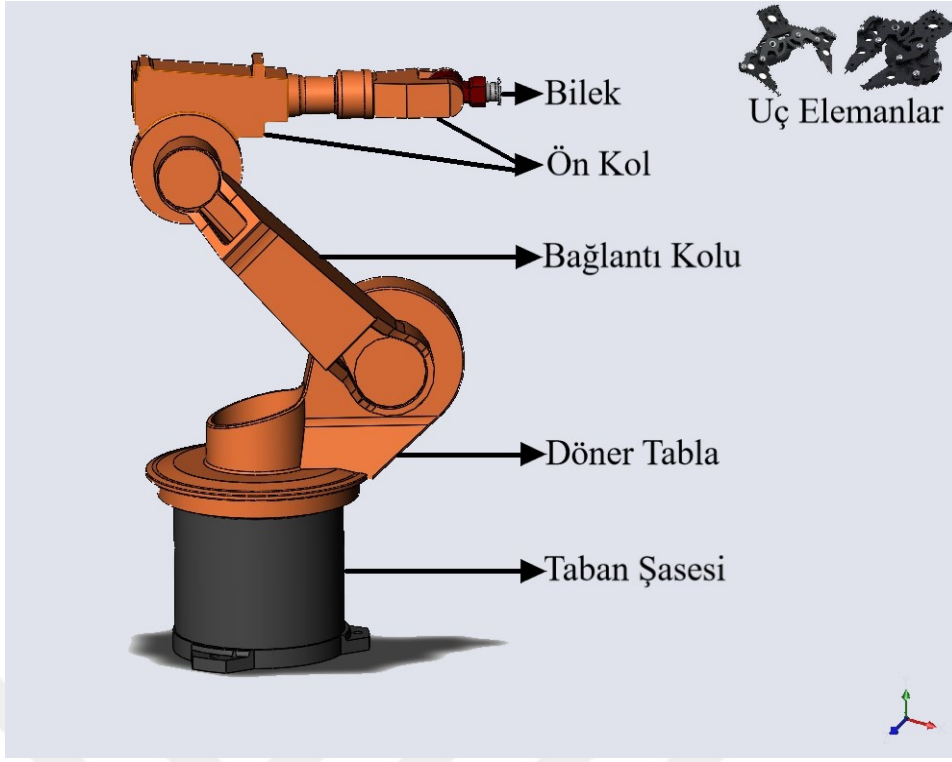
Yağlı (2005) çalışmasında labirent robotu tasarımı yapmıştır. Robotun eksenle hareketlerini 2 adet adım motorla sağlamıştır. Robotun iki tekerine de bu motorları bağlamış fakat denge problemi yaşamıştır. Bu sorunu ise robotun ön ve arka kısımlarına ağırlık koyarak (bilyeler) gidermeye çalışmıştır [34].

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Materyal

Genel olarak endüstriyel robotlar insansı özelliklere sahip programlanabilir makinalardır. Mühendisler bu tür robotları tasarlarken insan kolundan ilham almışlardır. Yani robot tutma ve yerleştirme işlemlerinde kolunu (tıpkı insan kolu gibi) kullanır. Ucuna yerleştirilen uç elemanın özelliğine göre robot kesme, delme, şekil verme, yüzey kaplama, boyama, kaynak ve yüzey taşlama gibi imalat işlemlerini gerçekleştirebilir.

Bu kısımda 5 farklı robot markası içinden seçilen Kuka marka endüstriyel robotun mekanik yapısından ve teknik özelliklerinden bahsedilecektir. Şekil 4.1’de Kuka marka robotun temel bileşenleri gösterilmiştir. Robotta mekanik yapı; ana gövde, mekanik kollar ve içine yerleştirilen aletlerden oluşmaktadır. Mekanik yapı robotlarda genellikle beş ya da altı parçadan oluşur ve insan kolundaki karşılığına benzer.



Şekil 4.1. Kuka Robotun Temel Bileşenleri

Bu çalışmada kullanılan robotun temel bileşenleri taban şasesi, döner tabla, bağlantı kolu, ön kol, bilek ve uç elemanlardan oluşmaktadır.

4.2. Taban Şasesi

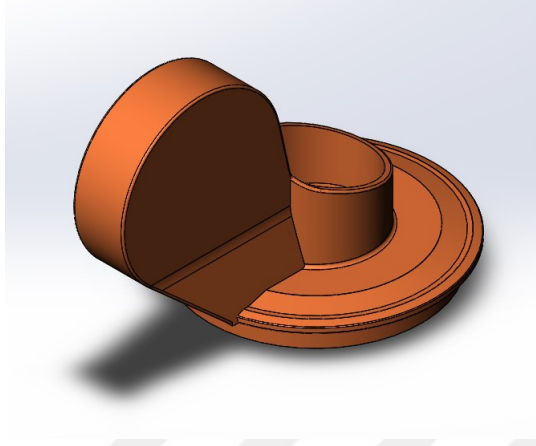
Taban şasesi robotun zeminle bağlantısını sağlar. Bu kısım herhangi bir yönde hareket etmez sabittir. Şekil 4.2’de taban şasesi gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Taban Şasesi

4.3. Döner Tabla

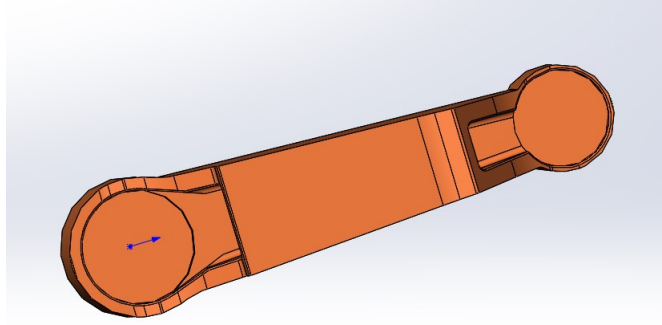
Taban şasesini üzerinde yer alır. Döner tabla Y ekseninde hareket ederek robot kolunun çalışma alanını artırır. Şekil 4.3’de döner tabla gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Döner Tabla

4.4. Bağlantı Kolu

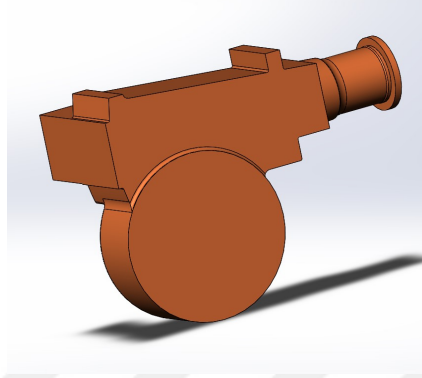
Robotun ikinci eksenini oluşturmaktadır. Bu kısım robot kol ağırlığının yaklaşık %70’ ini oluşturur. Dolayısıyla robotta asıl işi yapan kısım burasıdır. Düşey ekseninde hareket eder. Bu çalışmada bağlantı kolu üzerine yoğunlaşmış ve optimizasyon çalışması bu kısımda yapılmıştır. Şekil 4.4’de robotun bağlantı kolu gösterilmiştir.



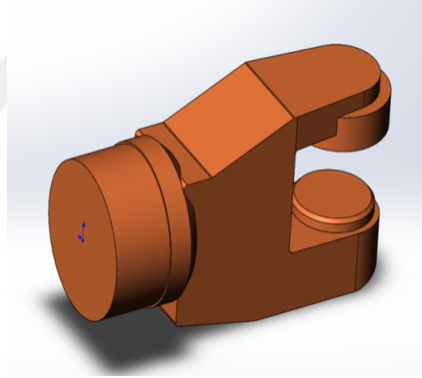
Şekil 4.4. Bağlantı Kolu

4.5. Ön Kol

Robotun üçüncü eksenini oluşturmaktadır. Düşey yönde hareket eder. Altı eksenli robotlarda hassasiyeti artırmak ve robotu daha işlevsel hale getirebilmek için üçüncü eksene kendi ekseninde dönebilen (dördüncü eksen) bir ön kol daha eklenir. Şekil 4.5’de robot kolunun ön kolları gösterilmiştir.



(a) Üçüncü Eksen



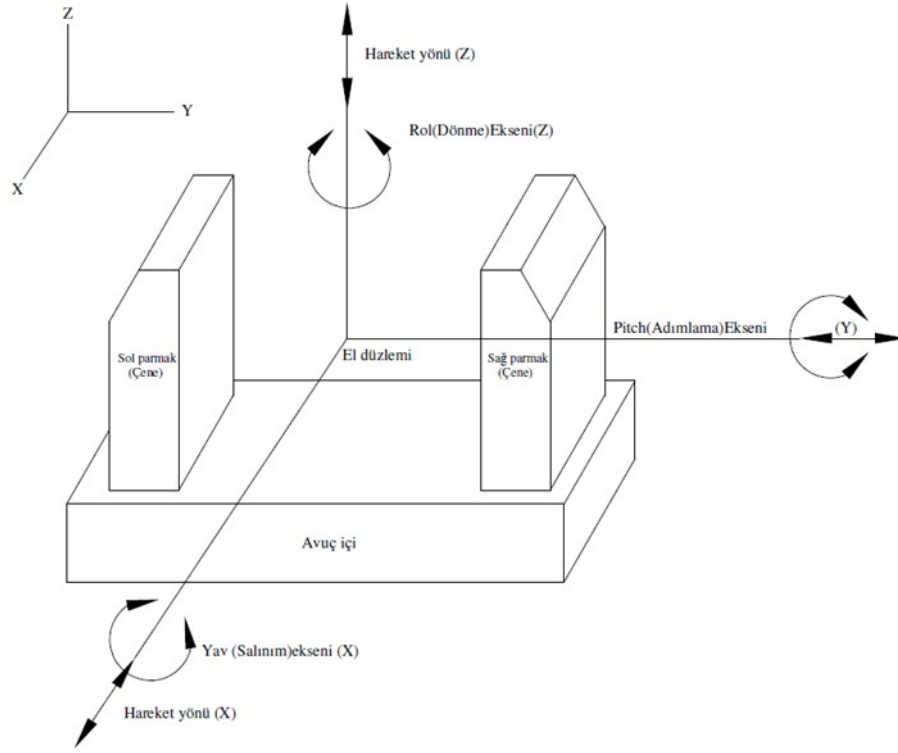
(b) Dördüncü Eksen

Şekil 4.5. Ön Kol

4.6. Bilek

Bilekler, robot kolun en ucunda yer alan kısımdır. Bazı bilekler üç serbestlik derecesine sahiptir ve bu bilekler insansı temel hareketler yapabilir. Literatürde bu eksenlerin farklı isimleri vardır. Bunlar; Roll (Dönme), Pitch (Adımlama) ve Yaw (Salınım) dır. Şekil 4.6’da bilek koordinat düzlemi gösterilmiştir.

Bilek mekanizmaları kullanıldıkları alanlara göre farklılık gösterdiği için karmaşık ve pahalı mekanizmalardır. Bu yüzden daha basit işlerde iki eksenli



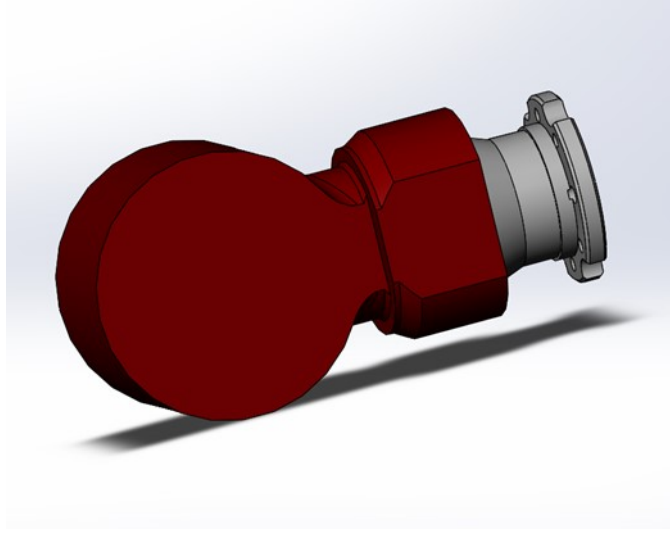
Şekil 4.6. Bilek Koordinat Düzlemi

bilekler (konik dişlilerden oluşmaktadır) kullanılırken daha karmaşık işlerde üç eksenli bilekler kullanılmaktadır. İki eksene sahip bilekler eğer yapısında bulunan tahrik dişlisi zıt yönde dönerse Yav (salınım), bu dişliler aynı yönde dönerse Pitch (Adımlama) eksen isimlerini alır.

Robotlarda kullanılan bilekler çok karmaşık işleri yerine getirebilir. Bu işleri yerine getirebilecek bileklerin sahip olması gereken bazı özellikleri vardır. Bu özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Boyutları mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır.
2. Mekanik yapısı dayanıklı ve eksen kaçıklığı olmamalıdır.
3. Matematiksel modelleri kolay hesaplanabilir olmalıdır.
4. Robotun izleyeceği yol karmaşık olmamalıdır.
5. Bilek beşinci eksene sağlamca bağlanmalıdır (Altı eksenli robotlarda).
6. Kolay programlanabilir olmalıdır.
7. Çevresinde üç eksenli hareket yapabilmelidir.

Şekil 4.7’de çalışmamızda kullanılan bilek gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Robot Kolu Bileği

4.6.1. Uç elemanlar

Robot kolların istenilen işleri yapabilmesi için bileğine (beşinci eksenine) farklı aparatlar takılmaktadır. Bu aparatların hepsine birden uç elemanlar denmektedir. Robot teknolojilerinde kullanılan bu tür elmanlar yapılarına göre incelendiğinde üç temel hareket yapabilmektedir:







1. Yatay Hareket
2. Dikey Hareket
3. Döndürme ve Fırlatma Hareketi

Genellikle uç elemanlar pnömatik yapıda tasarlanmaktadır. Bunlara ek olarak sektörde farklı kullanım alanları için elektrikli ve hidrolik yapıda olanları da mevcuttur. Şekil 4.8’de bazı uç elemanlar gösterilmiştir. En yaygın uç elemanları şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Kaynak Tabancası
2. Boyama Memesi
3. Yapıştırma Memesi
4. Lazer Kaynak Kafası
5. Frezeleme Kafası

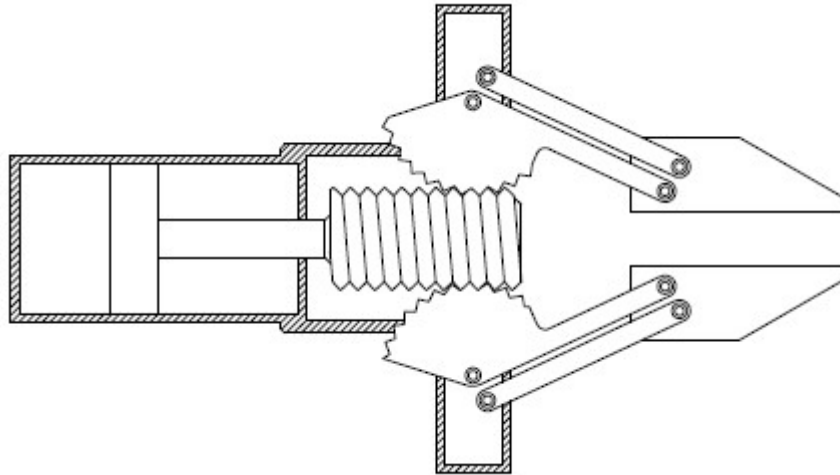
6. Kesme Aleti

7. Ölçüm Sensörleri









		
Talaş Kaldırma Araçları	Kaynak Torçları (Arc Welding – Spot Welding)	Boyama Aletleri
		
Kuvvet-Tork Sensörleri	Çarpışma Sensörleri	Alet Değiştiriciler

Şekil 4.8. Uç Elemanlar

Endüstriyel robotlar sektörde çoğu zaman yerleştirme işlerinde kullanılmaktadır. Bu tür robotlarda uç eleman olarak tutucular (gripper) kullanılır. Tutucular genellikle adım motorlarıyla kontrol edilirler. Şekil 4.9’da genel amaçlı kullanılan iki parmağa sahip bir tutucu gösterilmiştir. Şekil 4.10’da endüstride kullanılan bazı tutucu çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Genel amaçlı kullanılan iki parmaklı tutucu

			
Elektrikli Paralel Gripper	Standart Pnömatik Gripper	Açısal Hareketli Gripper	Parmak Adaptif Gripper
			
Parmak (Finger) Tipi Gripper	Vakum (Vacuum) Tipi Gripper	Çatal (Fork) Tipi Gripper	Manyetik Gripper

Şekil 4.10. Tutucu Çeşitleri

4.6.2. Kuka Kr 6'nın teknik özellikleri

Kuka firmasının üretmiş olduğu Kr 6 seri robotun teknik özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Üretici firma robot kolun malzemesini Dökme Paslanmaz Çelik olarak belirlemiştir.

Tablo 4.1. Teknik Özellikler

Eksen Sayısı	6
Maksimum Yükleme	6 kg
Maksimum Erişim Mesafesi	1570 mm
Robot Kol Hassasiyeti	± 0.06 mm
Robot Ağırlığı	235 kg

4.7. Metot

Doğru bir robot modeli seçebilmek amacıyla sektörde sıklıkla tercih edilen robot markalarından 5 tanesinin (Abb44, Fanuc, Kuka, Staubli ve Abb120) 3D modeli Solidworks paket programı ile elde edilmiştir. Devamında şu yöntem izlenmiştir:

1. Taşıyabilecekleri maksimum yük altıncı eksene uygulanmıştır.

Tablo 4.2. Robotlardaki Toplam Yer Değiştirme Miktarları δ ve Mak. Gerilmeler σ_u

		ABB44	FANUC	KUKA	STAUBLİ	ABB120
Dökme Paslanmaz Çelik	$\delta_{deliksiz}$	0,30105	2,1368	0,028138	0,012314	0,009219
	$\delta_{delikli}$	0,28803	2,1105	0,0284	0,012407	0,008765
	$\sigma_{deliksiz}$	40,696	162,3	5,1494	2,4966	2,442
	$\sigma_{delikli}$	40,32	160,7	4,0097	2,4247	1,8396
Alüminyum-1060	$\delta_{deliksiz}$	0,52679	1,9242	0,035918	0,014729	0,014337
	$\delta_{delikli}$	0,52277	1,9316	0,039875	0,01574	0,014727
	$\sigma_{deliksiz}$	32,553	141,73	3,4193	2,0609	3,0381
	$\sigma_{delikli}$	33,194	141,74	2,8065	2,071	3,0816
Epoksi/Karbon	$\delta_{deliksiz}$	1,5239	3,2338	0,097524	0,070882	0,017839
	$\delta_{delikli}$	1,4439	3,2766	0,16775	0,078369	0,019391
	$\sigma_{deliksiz}$	31,945	200	3,2955	3,6083	2,4243
	$\sigma_{delikli}$	31,828	180,91	3,8603	3,7975	2,5067

Simülasyon çalışması sonucunda robot kolun üzerinde oluşan gerilmelerin tümü belli iken, maksimum gerilmesin meydana geldiği noktada hasar oluşup oluşmayacağına dair farklı teoriler ve kriterler vardır. Malzeme sünek ise akma, gevrek ise kırılma olup olmayacağı bu kriterlere göre sayısal olarak belirlenebilir. Sünek malzemeler için tercih edilen iki tür akma kriteri vardır. Bunlar: Von Mises ve Tresca'dır. Çalışmamızda kullanılan akma kriteri, Von Mises (Eşdeğer Gerilme veya Maksimum Çarpılma Enerjisi) kriteridir.

Von mises akma kriteri, iki veya üç boyutta oluşan gerilmeleri birleştirerek tek yönde yüklenen materyalin çekme (tensile) dayanıklılığını verir. Yani o nokta için hesaplanan gerilme değerlerinin bileşenleri yerine tek bir eş değer gerilmeyi kabul eder. Skaler bir büyüklüktür. Von Mises kriteri " $\sigma_{eş}$ " ile ifade edilir. Formülü ise şu şekildedir;

$$\sigma_{eş} = \sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2] + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.1)$$

Von mises kriterine göre akmanın başlayabilmesi için eş değer gerilmenin kritik bir değere ulaşması gerekmektedir. Bu değer "k" ile ifade edilmektedir. Formülize edilecek olursa;

$$\sigma_{eş} = \sigma_{vm} = k \quad (4.2)$$

Tek eksenli von mises gerilme değerini ise şu şekilde formülize edebiliriz ;
(Tek eksenli yükleme olduğu için $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = \tau_{xy} = 0$ 'dır.)

$$\frac{1}{6}[2(\sigma_{xx})^2] = k_1^2 \quad (4.3)$$

tek eksenli bir yüklemede ” k_1 ” kritik değeri ise;

$$k_1 = \frac{\sigma_{xx}}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

olur. Sonuçta eğer ” $k_1 \geq k_0$ ” olursa akma başlayacaktır. Burada ” k_0 ” değeri, yapıya tek eksenli bir çekme testi uygulandığı zaman o yönde hesaplanan gerilme değeridir.



5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada robot kolu üzerinde Ansys paket programı kullanılarak statik, doğal frekans (Modal) ve Rijit dinamik analizler yapılmıştır. Optimizasyon çalışmasından önce yapılan analizlerde robot kolun malzeme özelliği olarak Dökme Paslanmaz Çelik seçilmiştir. Dökme Paslanmaz Çeliğin malzeme özellikleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Dökme Paslanmaz Çeliğin Malzeme Özellikleri

Özellikler	Değerler	Birimler
Elastise Modülü	190000	N/mm^2
Poisson Oranı	0,26	-
Yırtılma (Von Mises) Modülü	79000	N/mm^2
Kütle Yoğunluğu	7700	kg/m^3
Gerilme Mukavemeti	448,08	N/mm^2
Akma mukavemeti	241,28	N/mm^2

Ansys shape optimization modülü kullanılarak yapının gerekli yerlerinden 5 farklı tasarım oluşturularak malzeme azaltılması (uygun kanallar açılarak) yapılmıştır. Devamında yapılan statik analizler ilk sonuçlarla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Optimizasyon çalışması ve sonrasında ise Dökme Paslanmaz Çeliğe ilave olarak Alüminyum-1060 ve Karbon/Epoksi malzemeleri de kullanılmıştır. Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de Alüminyum ve Epoksi/Karbon'un malzeme özellikleri gösterilmiştir. Ansys rijid dinamik modülünde tork hesabı yapılmış ve her bir malzeme türüne göre robot kolun sahip olduğu güç değerleri hesaplanarak uygun motor seçimi yapılmıştır. Daha sonra motor maliyetine yıllık enerji tüketim maliyetide eklenerek bir yıllık işletme maliyeti hesaplanmıştır.

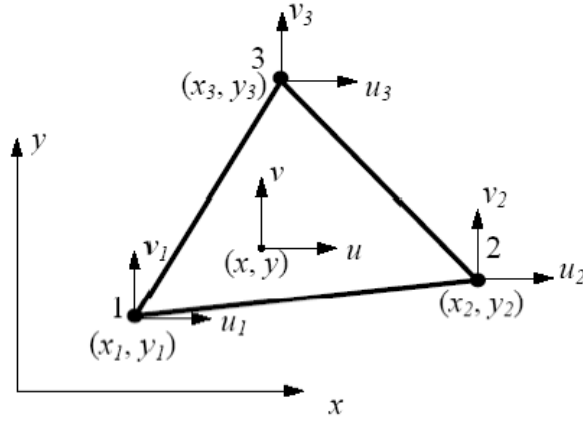
Tablo 5.2. Alüminyum 1060 Alaşımın Malzeme Özellikleri

Özellikler	Değerler	Birimler
Elastise Modülü	69000	N/mm^2
Poisson Oranı	0,33	-
Yırtılma (Von Mises) Modülü	27000	N/mm^2
Kütle Yoğunluğu	2700	kg/m^3
Gerilme Mukavemeti	68,94	N/mm^2
Akma mukavemeti	27,57	N/mm^2

Tablo 5.3. Karbon/Epoksi Kompozit Sheet' in Malzeme Özellikleri

Özellikler	Değerler	Birimler
Elastise Modülü	7000	N/mm^2
Poisson Oranı	0,27	-
Yırtılma (Von Mises) Modülü	5000	N/mm^2
Kütle Yoğunluğu	1600	kg/m^3
Gerilme Mukavemeti (Enine - Boyuna)	570	N/mm^2

Sonlu elemanlar yönteminde birçok problem iki boyutlu eleman tipiyle çözülebilir. İki boyutlu eleman tipleri arasında kullanılan en basit eleman tipi, üçgen elemandır. Bu çalışmada üç düğüm noktalı üçgen eleman kullanılmıştır. Şekil 5.1'de üç düğüm noktalı üçgen eleman gösterilmiştir.

**Şekil 5.1. Üç Düğüm Noktalı Üçgen Eleman Tipi**

Üç düğüm noktalı üçgen eleman tipi formülize edilirse;

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (5.1)$$

Burada "u" ve "v" değerleri yer değiştirme fonksiyonlarıdır.

$$u = b_1 + b_2x + b_3y \quad v = b_4 + b_5x + b_6y \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilir (b_i ($i = 1,2...6$) sabit katsayıdır).

Yer değiştirme vektörü yazılırsa ;

(Sadece u_1 ve v_3 değerlerin matematiksel ifadeleri gösterilmiştir. Diğer ifadelerde (u_2, u_3, v_2 ve v_3) benzer şekildedir.)

$$u_1 = b_1 + b_2x_1 + b_3y_1 \quad (5.3)$$

$$v_3 = b_4 + b_5x_3 + b_6y_3 \quad (5.4)$$

şeklindedir.

"x" ve "y" noktasındaki şekil fonksiyonları ;

$$N_1 = \frac{1}{2A}[(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (5.5)$$

$$N_2 = \frac{1}{2A}[(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (5.6)$$

$$N_3 = \frac{1}{2A}[(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (5.7)$$

şeklinde formülize edilir.

"A" burada alanı ifade etmektedir.

$$A = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Gerilim-yerdeğiştirme arasındaki bağıntı ise;

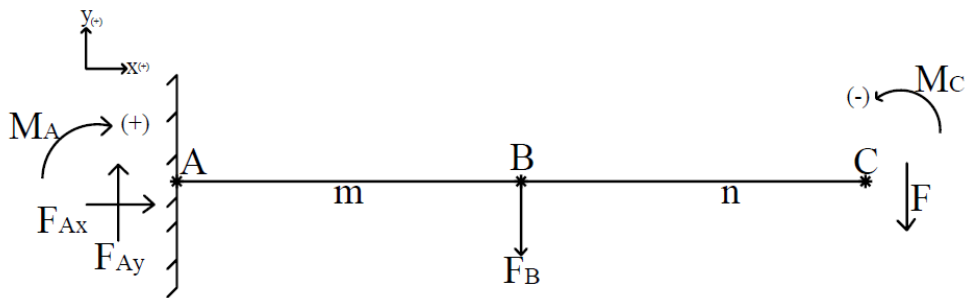
(Burada $y_{23} = y_2 - y_3$, $x_{13} = x_1 - x_3$ şeklindedir. Diğer ifadelerde benzerdir.)

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (5.9)$$

şeklindedir.

5.1. Robotun Statik Analizi

Robot kolun statik analizi Ansys 16.2 programı ile yapılmıştır. Analizin daha sağlıklı ve kolay yapılabilmesi için altı eksenli robot kolunun üçüncü, dördüncü, beşinci ve altıncı eksenlerin ağırlıkları ve robot kolun kaldırabileceği maksimum ağırlığın hepsi bir kuvvete dönüştürülmüştür. Dönüştürülen bu kuvvet gerekli statik hesaplamalar sonucu ikinci eksene taşınmış ve analizler bu şekilde yapılmıştır. Taşınan kuvvetin analitik hesaplaması aşağıda verilmiştir (Şekil 5.2). Şekil 5.3’de robot kolun sınır şartları gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Analitik Hesaplama

Şekil 5.2’de A noktası robot kolun birinci eksenle ikinci eksenin bağlantı noktasını, B noktası robot kolun ağırlık merkezinin yerini, C noktası ise ikinci eksenle üçüncü eksenin bağlantı noktasını göstermektedir. “m” robot kolun [AB] arası uzunluğu, “n” ise [BC] arası uzunluğu ifade etmektedir. “ F_{AY} ” robotun A noktasındaki; kol ağırlığı, F kuvveti ve C noktasındaki momente (M_C)

karşı oluşturduğu tepki kuvvetidir. " M_A ", A noktasında oluşan momenti ifade etmektedir. " F_B " robot kolun ikinci ekseninin ağırlığını ifade etmektedir. " F " kuvveti, robot kolun; üçüncü, dördüncü, beşinci, altıncı ve kolun kaldırabileceği maksimum ağırlığın toplamının oluşturduğu bileşke kuvvetin "C" noktasına taşınması sonucu oluşan kuvvettir. " M_C " ise kuvvet taşınması sonucu oluşan momenti ifade etmektedir.

Burada robot kolun üçüncü, dördüncü, beşinci, altıncı eksen ve robot kolun kaldırabileceği maksimum ağırlık "C" noktasına moment ve " F " kuvveti olarak indirgenmiştir. M_C momenti statik hesaplamalar sonucu 388 Nm (- yönde) bulunmuştur. " F " iç kuvveti ise 1108 N bulunmuştur.

Sistem statik dengede olduğu için toplam F_X ve F_Y kuvvetleri sıfıra eşitlenirse;

$$\sum F_X = 0 \quad F_{AX} = 0 \quad (5.10)$$

$$\sum F_Y = 0 \quad (5.11)$$

$$\sum F_Y = F_{AY} - F - F_B = 0 \quad (5.12)$$

$$0 = F_{AY} - 1108 - 960$$

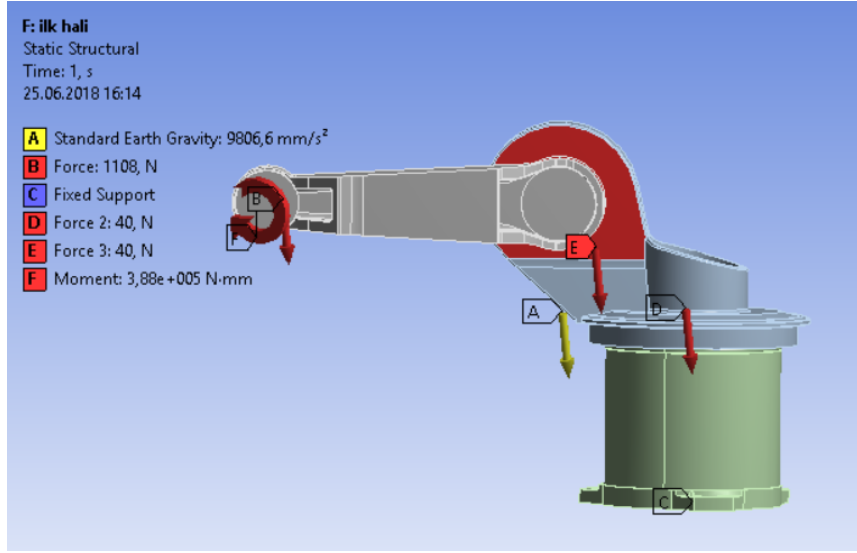
$$F_{AY} = 2069 \text{ N bulunur.}$$

"A" noktasında oluşan momen hesaplanılacak olursa;

$$\sum M_A = F_B * m - M_C + F * (m + n) \quad (5.13)$$

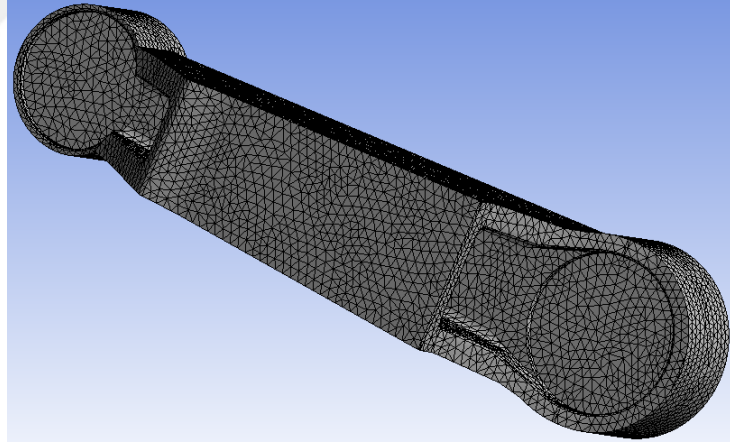
$$\sum M_A = 98 * 9,81 * 0,325 - 388 + 1108 * 0,65$$

$$\sum M_A = 644,6 \text{ Nm (+ yönde)}$$



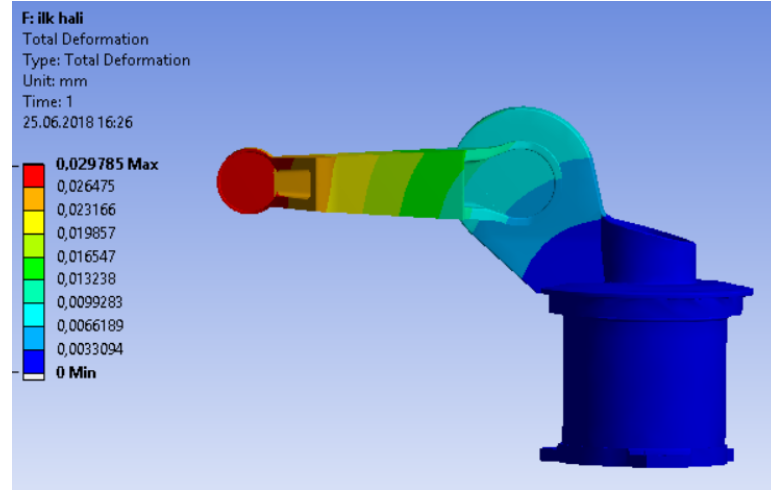
Şekil 5.3. Robotun Sınır Şartları

Robot koluna mesh atılırken daha hassas değerler ölçebilmek için element size değeri 10 mm girilmiştir. robot kolun üzerinde oluşan üçgen eleman tipi 146811 olurken, düğüm sayısı ise 220487 olmuştur. Şekil 5.4'de robot kolun ikinci eksenine atılan mesh ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



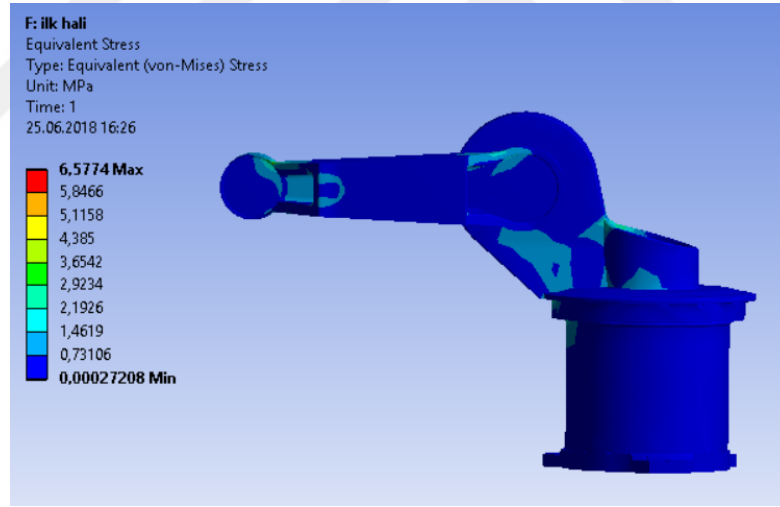
Şekil 5.4. İkinci Eksene Atılan Mesh

Robot zeminle bağlantısının olduğu kısımdan sabitlenmiştir. Malzeme olarak ise Dökme Paslanmaz Çelik seçilmiştir. Analizde yapıda meydana gelen yer değiştirmeler (Deformasyon) ve Von Mises gerilme değerleri ölçülmüştür. Şekil 5.5'de toplam yer değiştirme (Total Deformation) miktarları gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Toplam Yer Değişirme (Total Deformation)

Analiz sonucu maksimum 0,029785 mm'lik bir yer değişikliği robot kolun uç kısmında meydana gelmiştir. Bu sonuç ileride yapılacak olan optimizasyon çalışmasıyla daha ideal hale getirilecektir. Şekil 5.6'da Von Mises Gerilme dağılımı gösterilmiştir.



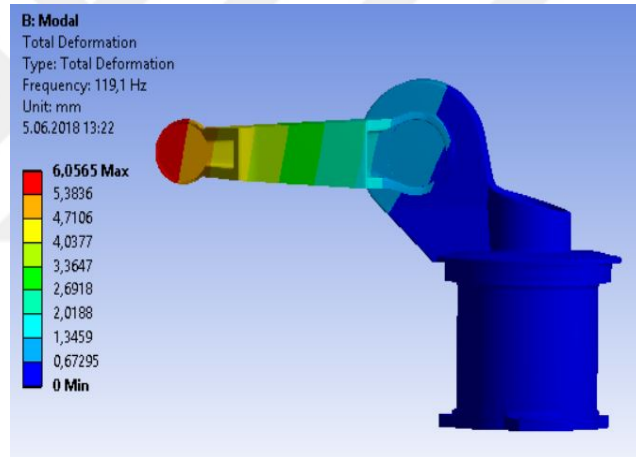
Şekil 5.6. Von Mises Gerilme Dağılımı

Analiz sonucu maksimum gerilme değeri 6,5774 MPa çıkmıştır. Bulunan gerilme kullanılan malzemenin akma değerinden büyük olmaması gerekmektedir. Büyük olması durumunda malzemede oluşan deformasyon değerleri artacaktır. Buda istenmeyen bir durumdur.

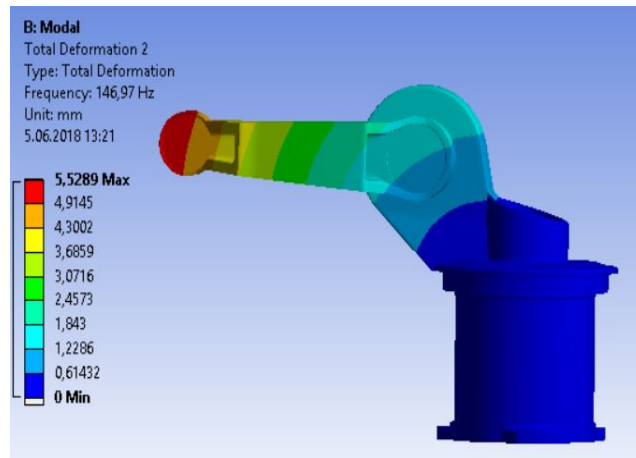
5.2. Doğal Frekans Analizi

Robot üzerinde yapılan doğal frekans analizi ile sistemin titreşim frekans değerleri bulunmaktadır. Sistem üzerine uygulanan bir kuvvetin frekansı, bulunan bu frekanslardan herhangi biriyle çakışırsa “rezonans” olayı meydana gelir. Genellikle yapıda meydana gelen rezonans olayı istenen bir durum değildir. Rezonanstan ya dış kuvvetin frekansı ya da yapının frekansı değiştirilerek kurtulunulabilir.

Robot kolu üzerinde bulunan servo motorlar titreşime sebep olmaktadır. Robot hassasiyetinin yüksek olabilmesi için bu tür titreşimlerden etkilenmemesi gerekmektedir. Yapıda rezonans meydana gelebilecek yerlerde emniyet katsayısını yüksek tutarak kurtulabiliriz. Ansys paket programının Modal kısmı kullanılarak analizler yapılmıştır. Şekil 5.7’de robot kolun doğal frekans analizi sonucu oluşan ilk iki mod’ u gösterilmiştir.



(a) mod 1



(b) mod 2

Şekil 5.7. Doğal Frekans Analizi

Analiz sonucu frekans değeri 119,1 Hz bulunmuştur. Yani sistemin frekans değeri 119,1 Hz değerine ulaştığı zaman robot kolunun ikinci ekseninde maksimum yer değiştirme 6,0565 mm olacaktır. Eğer dış ve iç kuvvetlerin oluşturduğu titreşim toplamı 119,1 Hz değerine ulaşırsa yapı rezonansa girecektir. Tablo 5.4'de analiz sonucu bulunan frekans değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Frekans Değerleri

Mod	Frekans (Hz)
1	119,1
2	146,97
3	316,09
4	362,95
5	614,35
6	759,81

Ansys programı doğal frekansı hesaplarken sisteme belirli bir kütleyle sahip bir küre ve yayı bağlayıp hareket ettirmektedir. Her mod da birer yay ve kütle eklemektedir. Frekans değerlerinin büyümesinin sebebi de budur. Mod 6'dan sonra titreşim değeri çok büyüdüğünden program diğer mod' ları hesaplamamıştır.

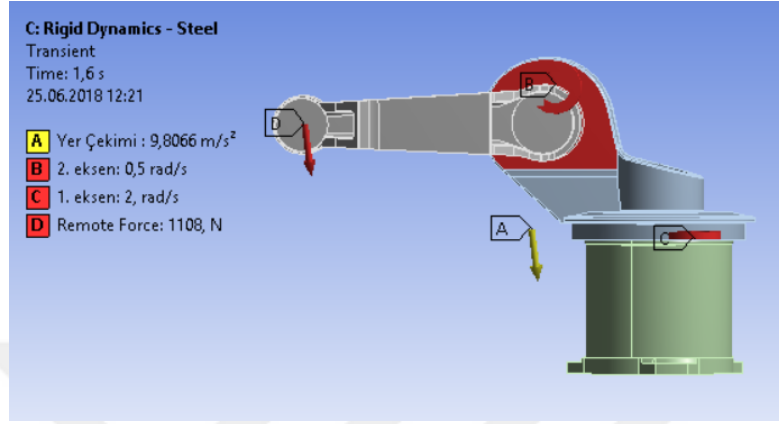
5.3. Rijit Dinamik Analiz

Bu kısımda yapılan analizler Ansys programının Rijid Dinamik modülünde yapılmıştır. Robot kolu oluşturan eksenler Rijit kabul edilmiştir. Burada kolu rijit seçmemizin bazı avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Mesela bu analizin işlem süresi transient structural (bu analiz türünde program yapıyı esnek kabul eder) modülüne göre daha kısadır. Çünkü program yapıyı herhangi bir sonlu elemanlara ayırmadan çözmeye çalışır. Ama rijit dinamik analizde yapı üzerinde deformasyonlar oluşmaz. Robot kolu hareket esnasında iken herhangi bir noktadan ya da eksen (x, y, z) üzerinde konum, hız, ivme değerleri sayısal olarak okunabilir.

Statik analiz de bağlantı noktaları sabitleyebilmek için mesnetler kullanılmıştı. Fakat rijit dinamik analizde sistemi hareketli hale getirebilmek için statik analizde kullanılan mesnetler yerine sabit mafsallar kullanılmıştır. Analizde kullanılan mafsallar iki kısımdan oluşmaktadır. İlki sistemi sabitleyebilmek için kullanılan, ikincisi de hareketli hale getirebilmek için kullanılan mafsallardır.

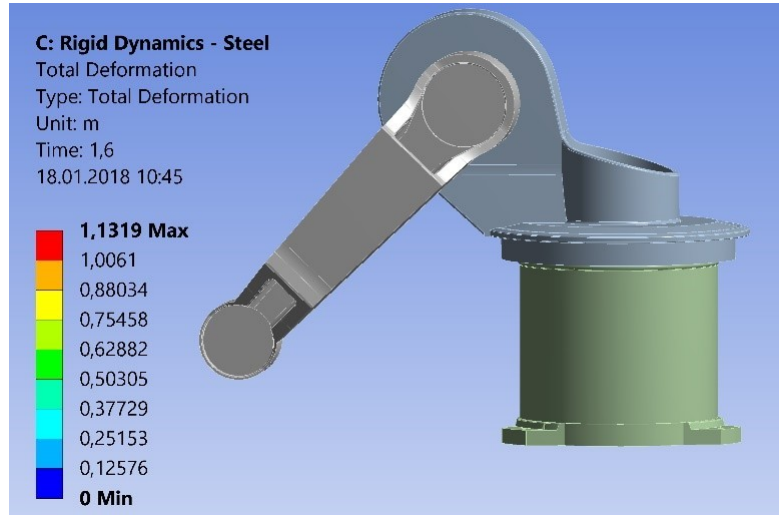
Statik hesaplamalar sonucu belirlenen 1108 N luk yük robot kolun uç kısmına

ağırlık olarak (D noktası) asılmıştır (bakınız Şekil 5.2). Devamında robot kolunun eksenlerine açısal hızlar uygulanmıştır. Birinci eksenin 180^0 , ikinci eksenin 45^0 ’ lik bir açıyla döndürülmek istenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu birinci eksenin açısal hızı $w_1 = 2$ rad/s, ikinci eksenin açısal hızı ise $w_2 = 0,5$ rad/s olarak belirlenmiştir (B ve C noktaları). Şekil 5.8’de robot kolun sınır şartları gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Sınır Şartları

Birinci eksenin 180^0 ve ikinci eksenin ise 45^0 dönebilmesi için analiz süresi 1,6 s olarak ayarlanmıştır. Analiz sonucunda maksimum yer değiştirme 1,1319 m bulunmuştur. Robot kolun son hali Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Analiz Sonucu Robot Kolun Son Hali

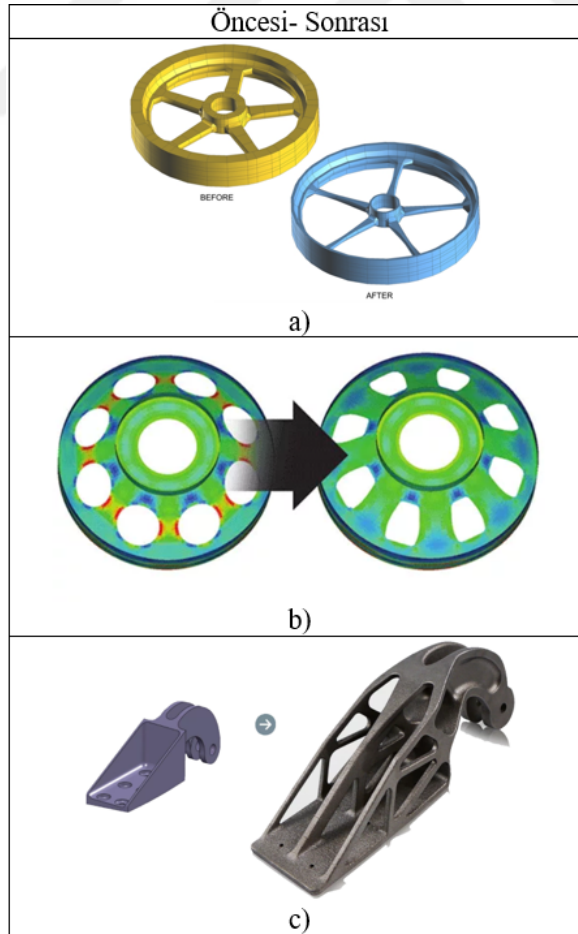
İleride (optimizasyon çalışmasından sonra) motor seçimi için robot kolunun ikinci ekseninde oluşan toplam moment (tork) miktarı tekrar hesaplanarak maliyet analizi yapılacaktır. Hesaplanan sonuçlara göre; ikinci ekseninde oluşan toplam moment ise 781 N.m bulunmuştur.

5.4. Optimizasyon Çalışması

Optimizasyon çalışmasında ki amaç, optimize edilecek yapının geometrik, maddi veya topolojik değişkenlerini değiştirerek ideale en yakın sonuçları elde etmektir. Optimizasyon kendi içinde üç kısma ayrılır:

1. Tasarım ya da hacim optimizasyonu, geometri de parçaların boyutlarının değiştirilmesi ile gerçekleşmektedir. Burada geometri ve topoloji sabit kalmaktadır [35].
2. Şekil optimizasyonu, yapının geometrisi üzerinde yapılan değişikliklerdir. Burada topoloji sabit tutulmaktadır [36, 37, 39].
3. Topoloji optimizasyonu, yapının hem geometrisinin hem de topolojisinin değiştirilebildiği bir optimizasyondur[38].

Şekil 5.10'da optimizasyon teknikleri gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Optimizasyon Teknikleri a) Tasarım b) Şekil c) Topoloji

Bu çalışmada robot kolu üzerinde şekil optimizasyonu uygulanarak dış yapının optimum duruma getirilmesi amaçlanmıştır. Lokal gerilme değerleri bu teknik ile daha kolay optimize edilebilmektedir.

5.4.1. Şekil optimizasyonu

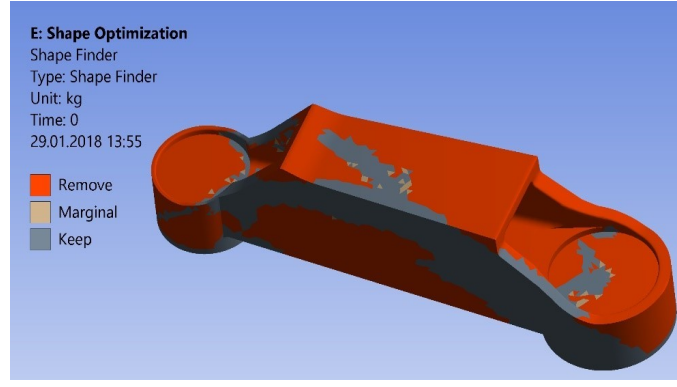
Şekil optimizasyonunun temel mantığı, optimize edilecek yapının dış kısmında herhangi bir değişiklik yapmadan, istenilen oranda kütle azaltılması yapılarak alternatif tasarımlar arasında en ideal yapının elde edilmesidir. Burada ki amaç fonksiyonu (Denklem 5.14) yapının doğal frekans, gerilme rijitlik, maliyet gibi parametrelerin minimuma veya minimuma en yakın değerlere indirmektir. Kısıtlayıcı fonksiyon (Denklem 5.15) ise yapıda meydana gelen toplam deformasyon ve gerilme değerleridir. Toplam deformasyon ve gerilme değerinin başlangıç değerini geçmesi optimizasyon çalışması açısından negatif bir durumdur.

Şekil optimizasyonu formülize edilecek olursa;

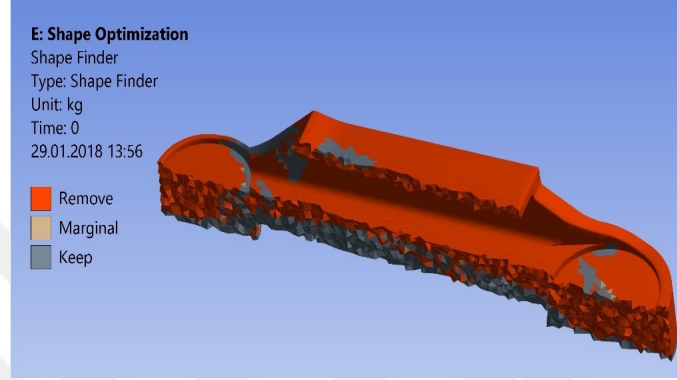
$$f(x) = (x_1, x_2, x_3 \dots) \quad (5.14)$$

$$g(x) = g_i(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \leq 0 \quad i = 1, 2 \dots m \quad (5.15)$$

Bu çalışmada Ansys programının Shape optimization modülünden yararlanılarak robot kolu üzerinde şekil optimizasyonu yapılmıştır. Robot kolun yapısal özellikleri üzerinde çok fazla değişiklik yapmadan program yardımıyla öncelikle hacim azaltılacak (%60' lık bir hacim azaltılmak istenmiştir) yerler belirlenmiş daha sonra makul ebatlarda kanallar açılmıştır. Şekil 5.11'de analiz sonuçları gösterilmiştir. Burada kırmızı renkle gösterilen alanlar hacim azaltılması yapılabilecek yerleri, gri renkli alanlarda hacim azaltılması yapılmaması gereken yerleri göstermektedir. Marjinal renkle gösterilen alan ise tarafsız bölgedir.



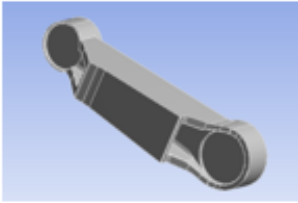
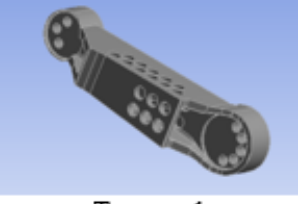
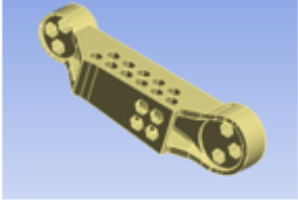



(a) Genel Hali



(b) Boyuna Kesitli Hali

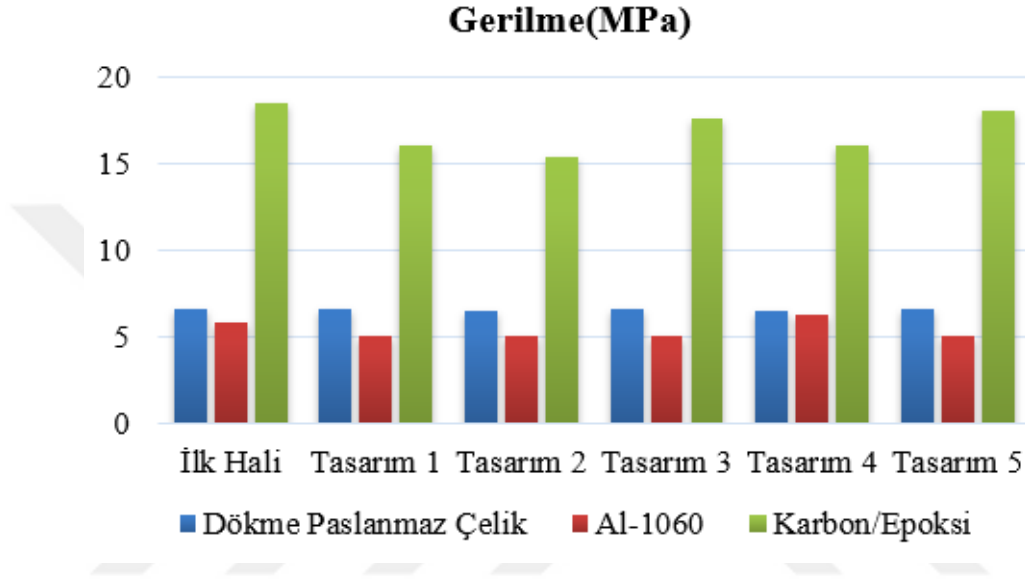
Şekil 5.11. Shape Optimization Analiz Sonucu

Robot kol üzerinde beş farklı tasarım yapılmıştır. Tasarımlar arasından en ideal olan seçilip ilerleyen çalışmalarda bu robot kolu kullanılmıştır. Şekil 5.12’de beş farklı tasarım üzerinden ölçülen yer değiştirme (deformasyon) ve gerilme (Von Misess) değerlerine kolun ağırlığı da eklenerek kol üzerinde hacim azaltılması yapılmadan önceki analiz sonuçlarıyla birlikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tasarımlar	Yer Değişirme	Gerilme (Von Misess)	Kol Ağırlığı
 İlk Hali	0,029785 mm (Dökme Paslanmaz Çelik)	6,5774 MPa (Dökme Paslanmaz Çelik)	98,593 kg (Dökme Paslanmaz Çelik)
	0,033278 mm (Al-1060)	5,8649 MPa (Al-1060)	33,911 kg (Al-1060)
	0,10067mm (Karbon/Epoksi)	18,452MPa (Karbon/Epoksi)	20,095 kg (Karbon/Epoksi)
 Tasarım 1	0,030033 mm	6,638 MPa	88,384 kg
	0,03592 mm	5,1073 MPa	30,4 kg
	0,11089 mm	16,008 MPa	18,015 kg
 Tasarım 2	0,029552 mm	6,5192 MPa	85,135 kg
	0,036417 mm	5,0753 MPa	29,282 kg
	0,11374 mm	15,404 MPa	17,352 kg
 Tasarım 3	0,029259 mm	6,6371 MPa	88,486 kg
	0,035489 mm	5,1128 MPa	30,435 kg
	0,10878 mm	17,617 MPa	18,035 kg
 Tasarım 4	0,028047 mm (Dökme Paslanmaz Çelik)	6,4888 MPa (Dökme Paslanmaz Çelik)	81,572 kg (Dökme Paslanmaz Çelik)
	0,036472 mm (Al-1060)	6,3101 MPa (Al-1060)	28,057 kg (Al-1060)
	0,11713 mm (Karbon/Epoksi)	16,019 MPa (Karbon/Epoksi)	16,626 kg (Karbon/Epoksi)
 Tasarım 5	0,028964 mm	6,6627 MPa	87,701 kg
	0,035544 mm	5,1314 MPa	30,165 kg
	0,10971 mm	18,101 MPa	17,875 kg

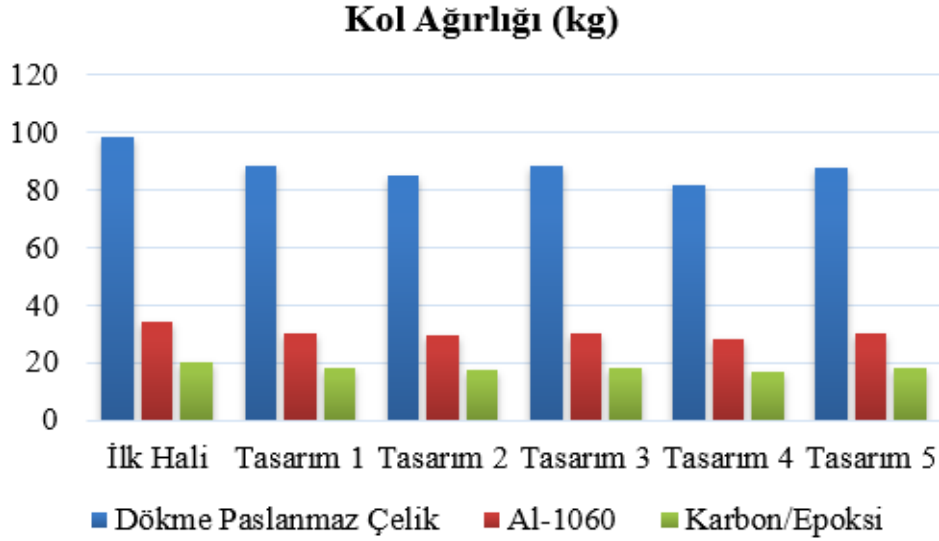
Şekil 5.12. Beş Farklı Tasarımın Analiz Sonuçları

Şekil 5.12 incelendiğinde gerilme, robot kol ağırlığı ve yer değiştirme miktarlarında genel bir düşme görülmektedir. Sonuçlar sayısal olarak incelendiğinde robot kolun malzeme türü Dökme Paslanmaz Çelik olarak seçilirse gerilme değerinde % 1, Alüminyum-1060 seçilirse % 9, Karbon/Epoksi seçilirse % 10'luk bir düşüş olduğu görülmektedir (kıyaslamalar optimizasyon çalışmasından önceki gerilme değeri baz alınarak yapılmıştır). Şekil 5.13'de gerilme değerleri malzeme türüne göre karşılaştırılmıştır.



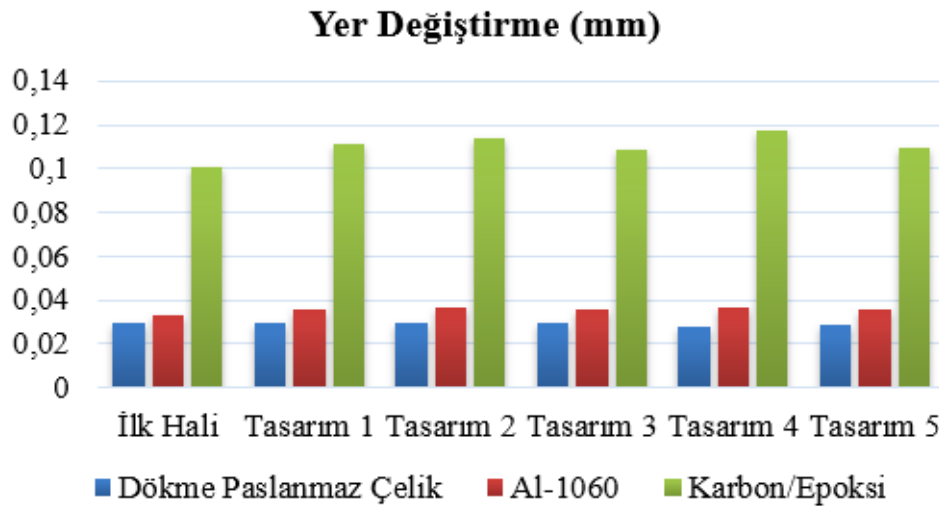
Şekil 5.13. Gerilme Değerlerindeki Değişim

Robot kol ağırlığında (hacim azaltılması yapıldığı için) her üç malzeme türü için de ortalama %13'lük bir düşüş meydana gelmiştir. Şekil 5.14'de robot kolunda meydana gelen ağırlık değişimlerinin malzeme türüne göre karşılaştırılması gösterilmiştir (kıyaslamalar optimizasyon çalışmasından önceki robot kol ağırlığı baz alınarak yapılmıştır).



Şekil 5.14. Kol Ağırlıklarındaki Değişim

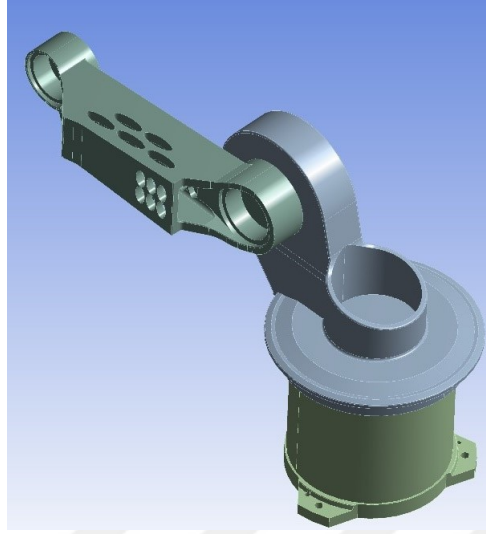
Sonuçları yer değiştirme açısından sayısal olarak incelendiğinde robot kolun malzeme türü Dökme Paslanmaz Çelik olarak seçildiğinde yer değiştirme miktarında % 2'lik bir azalış olurken, Alüminyum-1060 ve Karbon/Epoksi seçildiğinde ise yer değiştirme miktarında sırasıyla % 8 ve % 11'lik bir artış gözlemlenmektedir (kıyaslamalar optimizasyon çalışmasından önce robot kolda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı baz alınarak yapılmıştır). Şekil 5.15'de robot kol üzerinde meydana gelen yer değiştirme miktarının malzeme türüne göre karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Yer Değiştirme Miktarları

Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15 incelendiği zaman tasarım 4 diğer tasarımlar arasında en makul olanıdır. Yapılan bu tasarımda gerilme değerinde %4'lük bir

düşüş, kol ağırlığında %13'lük bir azalma görülürken yer değiştirme miktarında ise % 4'lük bir artış oluşmuştur. Devam eden çalışmalarda 4 numaralı tasarım kullanılacaktır. Şekil 5.16'de tasarım 4'ün genel hali gösterilmiştir.



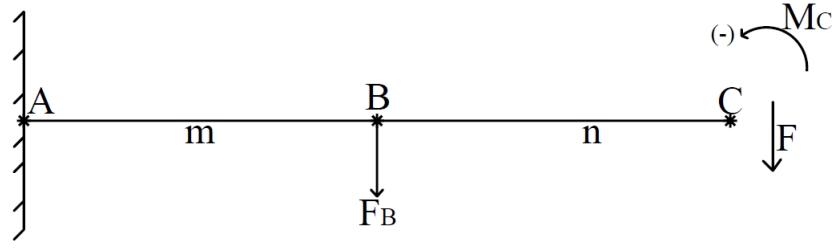
Şekil 5.16. Tasarım 4 Genel Gösterim

Tasarım 4 robot kolu seçildikten sonra sadece ikinci eksenin malzeme türü (Dökme Paslanmaz Çeliğine ilave olarak Alüminyum-1060 ve Karbon/Epoksi Kompozit Sheet malzemeleri seçilmiştir) değiştirilerek statik ve rijit dinamik analizler yapılmıştır. Rijit dinamik analiz sonucu eksenlerde oluşan torklar hesaplanmıştır. Tablo ??'de Tasarım 4 üzerinde yapılan analiz sonuçları gösterilmiştir.

5.4.2. Analitik hesaplamalar

5.4.2.1. Tork hesabı

Şekil optimizasyonu çalışmasından sonra ikinci eksen robot kolunun malzeme özelliği değiştirildi (Dökme Paslanmaz Çelik, Alüminyum-1060 ve Epoksi/Karbon). Bu ekseninde oluşan tork miktarları analitik yöntemlerle hesaplanarak bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Robot kolun ikinci eksenini, Şekil 5.17'de gösterildiği gibi iki boyutlu hale indirgenerek tork hesabı yapılmıştır.



Şekil 5.17. Tork Hesabı

Şekil 5.17’de “A” noktası robot kolun birinci eksenle ikinci eksenin bağlantı noktasını, “B” noktası robot kolun ağırlık merkezinin yerini, “C” noktası ise ikinci eksenle üçüncü eksenin bağlantı noktasını göstermektedir. “m” robot kolun [AB] arası uzunluğu, ”n” ise [BC] arası uzunluğu ifade etmektedir. “ F_B ” robot kolun ikinci ekseninin ağırlığını göstermektedir. ” F ”, Şekil 5.2’de hesaplanan kuvvet taşınması sonucu oluşan kuvvettir. M_c kuvvet taşınması sonucu oluşan momenttir. Optimizasyon çalışmasından önceki (robot kolun ilk hali) ve sonraki (tasarım 4) robot kolun ikinci ekseninin ağırlıkları Şekil 5.12’den alınmıştır.

Optimizasyon çalışmasından önceki robot kolun farklı malzeme türleri için hesaplanan tork değerleri aşağıda verilmiştir.

Dökme Paslanmaz Çelik malzemesi için tork hesabı;

$$\Sigma M_A = \Sigma M_B + \Sigma M_C - M_c \quad (5.16)$$

$$\Sigma M_A = F_B * m + F * (m + n) - M_c \quad (5.17)$$

$$(G = 98,6 * 9,81 = 967 \text{ N}, F = 1108 \text{ N}, M_C = 388 \text{ N.m}, m = n = 325 \text{ mm})$$

$$\Sigma M_A = 967 * 0,325 + 1108 * 0,65 - 388 = 715 \text{ N.m}$$

Alüminyum-1060 malzemesi için tork hesabı;

$$\Sigma M_A = \Sigma M_B + \Sigma M_C - M_c \quad (5.18)$$

$$\Sigma M_A = F_B * m + F * (m + n) - M_c \quad (5.19)$$

$$(G = 33,9 * 9,81 = 333 \text{ N}, F = 1108 \text{ N}, M_C = 388 \text{ N.m}, m = n = 325 \text{ mm})$$

$$\Sigma M_A = 333 * 0,325 + 1108 * 0,65 - 388 = 540 \text{ N.m}$$

Epoksi/Karbon Malzemesi için tork hesabı;

$$\Sigma M_A = \Sigma M_B + \Sigma M_C - M_c \quad (5.20)$$

$$\Sigma M_A = F_B * m + F * (m + n) - M_c \quad (5.21)$$

$$(G = 20,1 * 9,81 = 197 \text{ N}, F = 1108 \text{ N}, M_C = 388 \text{ N.m}, m = n = 325 \text{ mm})$$

$$\Sigma M_A = 197 * 0,325 + 1108 * 0,65 - 388 = 396 \text{ N.m}$$

Optimizasyon çalışmasından sonraki robot kolun farklı malzeme türleri için hesaplanan tork değerleri aşağıda verilmiştir.

Dökme Paslanmaz Çelik malzemesi için tork hesabı;

$$\Sigma M_A = \Sigma M_B + \Sigma M_C - M_c \quad (5.22)$$

$$\Sigma M_A = F_B * m + F * (m + n) - M_c \quad (5.23)$$

$$(G = 81,6 * 9,81 = 800,5 \text{ N}, F = 1108 \text{ N}, M_C = 388 \text{ N.m}, m = n = 325 \text{ mm})$$

$$\Sigma M_A = 800,5 * 0,325 + 1108 * 0,65 - 388 = 592,4 \text{ N.m}$$

Alüminyum-1060 malzemesi için tork hesabı;

$$\Sigma M_A = \Sigma M_B + \Sigma M_C - M_c \quad (5.24)$$

$$\Sigma M_A = F_B * m + F * (m + n) - M_c \quad (5.25)$$

$$(G = 28 * 9,81 = 275 \text{ N}, F = 1108 \text{ N}, M_C = 388 \text{ N.m}, m = n = 325 \text{ mm})$$

$$\Sigma M_A = 275 * 0,325 + 1108 * 0,65 - 388 = 421,6 \text{ N.m}$$

Epoksi/Karbon Malzemesi için tork hesabı;

$$\Sigma M_A = \Sigma M_B + \Sigma M_C - M_c \quad (5.26)$$

$$\Sigma M_A = F_B * m + F * (m + n) - M_c \quad (5.27)$$

$$(G = 16,6 * 9,81 = 163 \text{ N}, F = 1108 \text{ N}, M_C = 388 \text{ N.m}, m = n = 325 \text{ mm})$$

$$\Sigma M_A = 163 * 0,325 + 1108 * 0,65 - 388 = 385 \text{ N.m}$$

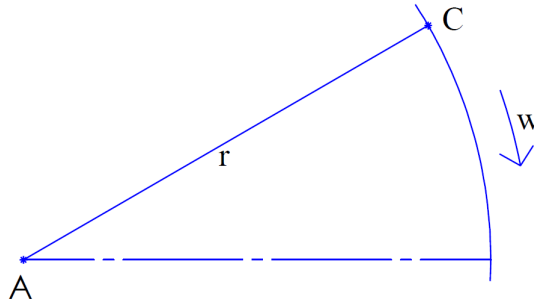
Tablo 5.5’de tork değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.5. İkinci Eksen İçin Hesaplanan Tork Değerlerinin Karşılaştırılması

	Optimizasyon Çalışmasından Önce	Optimizasyon Çalışmasından Sonra
Dökme Paslanmaz Çelik	715 N.m	592,4 N.m
Alüminyum - 1060	540 N.m	421,6 N.m
Epoksi/Karbon	396 N.m	385 N.m

5.4.2.2. Güç hesabı

Güç hesabı yapılırken robot kolun (Şekil 5.17) ikinci ekseninin iki boyuta indirgenen şekli kullanılmıştır. Robot kolu hareketi esnasında bir yay çizmektedir. "A" noktası robot kolun ikinci ekseninin başlangıç noktasıdır. "C" ise robot kolun ikinci ekseninin bitiş noktasıdır. Burada (Şekil 5.18) gösterilen "r" yarıçapı ikinci eksen robot kolun tam boyudur.



Şekil 5.18. Güç Hesabı

Şekil 5.18’de "w" robot kolun açısal hızını göstermektedir. Birimi rad/s’dir. Güç hesabında kullanılan tork miktarları Denklem 5.17, 5.19,..., 5.27’den alınmıştır.

Optimizasyon çalışmasından önceki robot kolun farklı malzeme türleri için hesaplanan güç değerleri aşağıda verilmiştir.

Dökme Paslanmaz Çelik malzemesi için;

Güç = Tork*Açısal Hız

$$P = T * w \quad (5.28)$$

$$(w = 2,2 \text{ rad/s})$$

$$P = 715 * 2,2$$

$$P = 1573 \text{ W}$$

Alüminyum-1060 malzemesi için;

$$P = T * w \quad (5.29)$$

$$P = 540 * 2,2$$

$$P = 1188 \text{ W}$$

Epoksi/Karbon Malzemesi için;

$$P = T * w \quad (5.30)$$

$$P = 396 * 2,2$$

$$P = 871 \text{ W}$$

Optimizasyon çalışmasından sonraki robot kolun farklı malzeme türleri için hesaplanan güç değerleri aşağıda verilmiştir.

Dökme Paslanmaz Çelik malzemesi için;

$$\text{Güç} = \text{Tork} * \text{Açısal Hız}$$

$$P = T * w \quad (5.31)$$

$$(w = 2,2 \text{ rad/s})$$

$$P = 592,4 * 2,2$$

$$P = 1303 \text{ W}$$

Alüminyum-1060 malzemesi için;

$$P = T * w \quad (5.32)$$

$$P = 421,6 * 2,2$$

$$P = 926 \text{ W}$$

Epoksi/Karbon Malzemesi için;

$$P = T * w \quad (5.33)$$

$$P = 385 * 2,2$$

$$P = 847 \text{ W}$$

Analitik hesaplamalar sonucu elde edilen güç değerleri Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6. Robot Kolun İkinci Ekseni İçin Yapılan Güç Hesabı

	Optimizasyon Çalışmasından Önce	Optimizasyon Çalışmasından Sonra
Dökme Paslanmaz Çelik	1573 W	1303 W
Alüminyum - 1060	1188 W	926 W
Epoksi/Karbon	871 W	847 W

5.4.3. Motor seçimi

Simülasyon çalışması sonucu elde edilen tork miktarlarına göre robot kolun ikinci ekseninde meydana gelen güç değerleri hesaplanarak motor seçimi yapılmıştır. Motor seçimi yapılırken emniyet katsayısı 2 olarak belirlenmiştir. Bunun nedenini ise şu şekilde açıklayabiliriz:

1. Dış kuvvetlerin çoğu zaman belirsiz olması
2. İç kuvvetlerin hesabında yapılan kabullerden dolayı sonuçların kesin olmaması
3. Robot kolun üretimi esnasında birtakım hatalar çıkabilir
4. İlerleyen zamanlarda robot kolun kesitinde zayıflamalar meydana gelebilir
5. Bu tür makine elemanlarının uzun zaman çalışması sonucunda yorulmalar ve sınır gerilmelerinde değişiklikler olmaktadır.

Emniyet katsayısı da dahil edildiğinde robot kolun ikinci ekseni için seçilen motorun gücü ve fiyatı Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

Tablo 5.7. Robot Kolun İkinci Ekseni İçin Seçilen Motor Güçleri ve Fiyatları

	Optimizasyon Çalışmasından Önce	Motor Fiyatı	Optimizasyon Çalışmasından Sonra	Motor Fiyatı
Dökme Paslanmaz Çelik	4 kW	9.786 TL	3 kW	8.968 TL
Alüminyum - 1060	3 kW	8.968 TL	2 kW	7.836 TL
Epoksi/Karbon	2 kW	7.836 TL	1,5 kW	7.166 TL

5.4.3.1. Maliyet hesabı

Endüstride kullanılan robotlar ortalama 100.000 saatlik çalışma kapasitesine sahiptir. Robot kolu tam kapasite çalışırsa bu yaklaşık 12 yıla denk gelmektedir [40].

Maliyet hesabı; yatırım ve işletme maliyetine ayrılarak hesaplanmıştır. Yatırım maliyetleri motor fiyatlarına göre belirlenmiştir (seçilen motorların fiyatları Tablo 5.7'den alınmıştır). Daha sonra seçilen motorların gücüne göre robot kolun ömrü boyunca tükettiği enerji miktarları belirlenmiş ve bulunan enerji miktarlarıyla birim enerji fiyatı çarpılarak toplam işletme maliyeti hesaplanmıştır (seçilen motorların % 75 kapasitesiteyle çalıştığı varsayılmıştır).

Optimizasyon çalışmasından önceki maliyet hesabı;

Maliyet Hesabı = Motor fiyatı (TL) + (Motor Gücü (kW)* Çalışma Kapasitesi * Robot Kolun Ortalama Çalışma Ömrü (h) * Enerjinin Birim Fiyatı (TL/kWh))

4 kW Servo Motor İçin Maliyet Hesabı;

$$= 9.786 + (4 * 0,75 * 100.000 * 0,22)$$

$$= 75.786 \text{ TL}$$

3 KW Servo Motor İçin Maliyet Hesabı;

$$= 8.968 + (3 * 0,75 * 100.000 * 0,22)$$

$$= 58.468 \text{ TL}$$

2 KW Servo Motor İçin Maliyet Hesabı;

$$= 7.836 + (1,5 * 0,75 * 100.000 * 0,22)$$

$$= 32.586 \text{ TL}$$

Optimizasyon çalışmasından sonraki maliyet hesabı;

Maliyet Hesabı = Yatırım Maliyeti + İşletme Maliyeti

Maliyet Hesabı = Motor fiyatı (TL) + (Motor Gücü (kW)* Çalışma Kapasitesi * Robot Kolun Ortalama Çalışma Ömrü (h) * Enerjinin Birim Fiyatı (TL/kWh))

3 kW Servo Motor İçin Maliyet Hesabı;

$$= 8.968 + (3 * 0,75 * 100.000 * 0,22)$$

$$= 58.468 \text{ TL}$$

2 KW Servo Motor İçin Maliyet Hesabı;

$$= 7.826 + (2 * 0,75 * 100.000 * 0,22)$$

$$= 32.586 \text{ TL}$$

1.5 KW Servo Motor İçin Maliyet Hesabı;

$$= 7.166 + (1.5 * 0,75 * 100.000 * 0,22)$$

$$= 31.916 \text{ TL}$$

Tablo 5.8’da maliyet hesabı karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.8. Robot Kolun İkinci Ekseni İçin Seçilen Motorların Maliyet Hesabı

	Optimizasyon Çalışmasından Önceki Maliyet Hesabı	Optimizasyon Çalışmasından Sonraki Maliyet Hesabı
Dökme Paslanmaz Çelik	75.836 TL	58.468 TL
Alüminyum - 1060	58.468 TL	32.586 TL
Epoksi/Karbon	32.586 TL	31.916 TL

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada model olarak Kuka endüstriyel robotu seçilmiştir. Robot kol üzerinde statik, modal ve rijit dinamik analizler yapılmıştır. Robot kolun ikinci ekseninde gerekli optimizasyon çalışmaları yapılarak en uygun geometrik tasarım belirlenmiştir.

Geometrik tasarım belirlendikten sonra motor seçimi yapılmıştır. Seçilen motorların işletmeye olan maliyeti hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar optimizasyon çalışmasından önceki ve sonraki verilerle karşılaştırılarak elde edilebilecek tasarruf oranları belirlenmiştir.

Robot kolun ikinci ekseninde Ansys Shape Optimizasyon modülü kullanılarak kanal açılabilir yerler belirlenmiş ve bu noktalardan makul kanallar açılarak beş farklı tasarım elde edilmiştir. Alternatif tasarımlar arasından seçilen tasarımda, (sehimden ödün verilmeden) atıl yüklerden %13'lük bir tasarruf sağlanabileceği ön görülmüştür. Seçilen robot kolu tasarımının ikinci ekseninde farklı malzeme türleri (Dökme Paslanmaz Çelik, Al-1060 ve Epoksi/Karbon) kullanılarak robot kolun ikinci ekseninin ağırlığı hafifletilmeye çalışılmış ve daha düşük güçte motor seçilmiştir. Bulunan motor güçleri maliyet açısından (optimizasyon çalışmasından önce ve sonra) kıyaslanmış ve ilk duruma göre motor maliyetinden %10'luk bir tasarruf sağlanmıştır. Motor seçiminden sonra robot kolun çalışma süresi boyunca tüketebileceği enerji miktarları hesaplanarak maliyet hesabı yapılmıştır. Bulunan sonuçlar ilk verilerle (optimizasyon çalışmasından önce ve sonra) karşılaştırıldığında %24'lük bir tasarruf elde edilebileceği ön görülmüştür.

Farklı yükler ve frekanslarda çalışan mekanik sistemler enerji verimliliği ve maliyet açısından optimize edildiklerinde işletme giderlerinde kısmi bir düşüş sağlanabilmektedir. Mekanik sistemlerden beklenen esneklik, rijitlik ve hassasiyet gibi kısıtlayıcı faktörler göz önüne alındığında bazı maliyetler göz ardı edilebilir ancak çalışma ömrü uzun ve çevrim sayısı yüksek olan robotların optimizasyonu sadece maliyet ve verim artışı değil aynı zamanda robot ve motor ömründe de iyileşme sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Akin, H.B. Yeni ekonomi: Strateji. *Rekabet ve Teknoloji Yönetimi, Çizgi Kitabevi*, 2001.
- [2] Groover, M.P. *Industrial robotics: Technology, programming, and applications*. McGraw-Hill New York, 1986.
- [3] Silva, D.D. Reactions to robots, *engineering*, 227-230, 1987.
- [4] Gök, G. V. ve Afyon, Ç. Kaynak uygulamalarında robot teknolojisi. 1999.
- [5] Erdem, H.İ, Önüt, S., Demirel, T ve Günay, G. Bilgisayar destekli mühendislik sistemlerinin yapısal analizi, planlaması ve geliştirilmesi. *Verimlilik Dergisi, MPM Yayınları, Ankara*, 3:45–46, 1997.
- [6] Pupăză, C., Constantin, G., ve Negrilă, Ş. Computer aided engineering of industrial robots. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 9(2):87–92, 2014.
- [7] Francis, N. ve Urmila, K. Design and analysis of circular and square arm robot. *Anveshana's International Journal Of Research in Engineering And Applied Sciences*, 1(11):7-15, 2016.
- [8] Zhou, J., Yang, Z. and Chen, S. Analysis of the harvesting robot arm modal based on cae. *J. Chem. Pharm. Res*, 6(11):669–673, 2014.
- [9] Prasad, C.S. ve Balaji, M. Geometric parameters optimization and analysis of packing robot arm using ansys. *International Journal Of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology (IJARBEST)*, 3(30):1–6, 2017.
- [10] Sahu, S., ve Choudhury, B. B. Static analysis of a 6-axis industrial robot using finite element analysis. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(3):49-55, 2017.
- [11] Jeevan, A. and Rao, N. Modeling and analysis of robot arm using ansys. *International Journal Of Science Engineering And Technology Research (Ijsetr)*,

4(33):6692–6697, 2015.

- [12] Ghiorghe, A. Optimization design for the structure of an rrr type industrial robot. *UPB Sci. Bull., Series D*, 72(4):121–134, 2010.
- [13] Ali, A. and Ramadhan, D. Comparative analysis for link cross-section of manipulator arms. *Journal of Engineering*, 16(2), 2010.
- [14] Vadhadiya, R. P., Patel, B. K., Zala, C. and Patel, C. C. Static analysis of five degrees of freedom articulated robot arm. *International Journal for Scientific Research and Development*, 3(03), 2015.
- [15] Singh, M., Yadav, P., Pandey, S. and Patil, S. Stress analysis of pick and place robot using ansys. *International Journal for Scientific Research and Development*, 7, 2017.
- [16] Chitte, P. G., Bansode, S. S., Rathod, S. S. and Motgi, N. S. Structural and vibrational analysis of six axis aristo robot using ansys. *International Journal Of Innovative Research In Technology (IJIRT)*, 3:1, 2016.
- [17] Choong, W. H., ve Yeo, K. B. Structural design for a 3dof robot lower-arm via computer aided engineering. *Centre of Materials & Minerals, Universiti Malaysia Sabah*, 88999:8–18, 2007.
- [18] Çiçek, S. Renge göre (kırmızı, yeşil, mavi) malzeme taşıyan robot kolu tasarımı ve uygulaması. *GÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maltepe, Ankara.*, 2006.
- [19] Karcı, H. ve Tangel, A. Fpga tabanlı 5 eksenli mobil robot kolu tasarımı ve prototip gerçekleştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 2016.
- [20] Toraman, M. K. Bilgisayar destekli vektörel Çizim yapan kartezyen robot tasarımı ve programlanması. *YYÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.*, 2008.
- [21] Özyalçın, İ. Kartezyen robot tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2006.

- [22] Demirci, A.E. *Scara robot tasarım ve analizi*. PhD thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir., 2012.
- [23] Aydın, M. *Üç Serbestlik Dereceli Paralel Bir Robotun Kinematığı, Dinamiği ve Denetimi*. PhD thesis, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ., 2012.
- [24] Toker, S.B. *6 Serbestlik Dereceli Kaynak Robotu Tasarımı*. PhD thesis, O.D.T.Ü., Yüksek Lisans Tezi, Ankara., 1999.
- [25] Yarım, M. A. *Robot Control Over Internet Using Tcp/Ip Protocol*. PhD thesis, M. Sc Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, 2004.
- [26] Şahin, D. Robot manipulatorlerinin gerçek zamanlı kontrol ve simülasyonu. PhD thesis, MEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mersin., 2006.
- [27] Kert, M. *Gerçek görüntüden elde edilen koordinatlarla robot kol hareket optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [28] Yılmaz, M. *Step Motor ile İki Eksenli Robot Kol Tasarımı (yüksek lisans tezi)*. PhD thesis, 2007.
- [29] Tonbul, T. S. ve Sarıtaş, M. *Beş eksenli bir edubot robot kolunda ters kinematik hesaplamalar ve yörünge planlaması*. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18(1), 2003.
- [30] Adalı, S. *3-boyutlu Robot Simülasyonu*. PhD thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001 .
- [31] Ayberk, A. *Visual object recognition and assortment by a robot manipulator*. Yüksek lisans tezi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi., 2001.
- [32] Bostan, B. *Puma 560 robotunun hesaplanmış moment metoduyla kontrolü*.

Yüksek lisans tezi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi., 2004.

- [33] Köker, R . *Üç eklemlı bir robot kolunun görmeye dayalı olarak model tabanlı zeki kontrolü*. Doktora tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2002.
- [34] Yağlı, O. *Labirent robotu tasarımı ve gerçekleştirilmesi. yüksek lisans tezi*. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi., 2005.
- [35] Azid, I. A., Kwan, A. S. K. and Seetharamu, K. N. A ga-based technique for layout optimization of truss with stress and displacement constraints. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 53(7):1641–1674, 2002.
- [36] Afonso, S. M. B., Macedo, C. M. H., ve Oliveira, D. A. P. Structural shape optimization under multicriteria conditions. In *WCCM V–Fifth World Congress on Computational Mechanics*, 2002.
- [37] Braibant, V. ve Fleury, C. Shape optimal design using b-splines. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 44(3):247–267, 1984.
- [38] Nakanishi, Y. Application of homology theory to topology optimization of three-dimensional structures using genetic algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(29-30):3849–3863, 2001.
- [39] Zhang, W. H. *Calcul des sensibilités et optimisation de forme par la méthode des éléments finis*. PhD thesis, PhD Thesis, Faculté des Sciences Appliquées, University of Liège, Belgium, 1991.
- [40] www.new.abb.com/products/robotics/tr/endustriyel-robotlar/irb-6700

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa Buğday
Uyruğu : TC
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya / 22.04.1993
Telefon : -
Faks : -
e-mail : bugday.mb@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Lise	Özel Envar Lisesi	2011
Lisans	KTO Karatay Üniversitesi	2016
Yüksek Lisans	-	-
Doktora	-	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
-	-	-
-	-	-

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Buğday, M. ve Karalı, M., (2018). Optimization of Deadweights Caused by the Design of Industrial Robot Arms, *1st International Symposium on Approaches in Scientific Studies (ISAS)*, 2(1), 40