

GAZALTI KAYNAĞI YAPABİLEN ÜÇ  
UZUVLU KARTEZYEN ROBOT  
KOL TASARIMI  
SELAMİ ÇAY  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
2010

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GAZALTI KAYNAĞI YAPABİLEN ÜÇ UZUVLU  
KARTEZYEN ROBOT KOL TASARIMI

SELAMİ ÇAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
YRD. DOÇ. SEMİHA BULUT

SİVAS

2010

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan Doç.Dr.Manefeddin NAMAZOV



Üye Yrd.Doç. Dr. Hacı Ali ERTAŞ

Üye (Danışman) Yrd. Doç. Dr. Semiha BULUT



ONAY

Bu tez çalışması, 07/10/2010 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

## ÖZET

### GAZALTI KAYNAĞI YAPABİLEN ÜÇ UZUVLU KARTEZYEN ROBOT KOL TASARIMI

Selami ÇAY

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Semiha BULUT

2010, 82 sayfa

Hızlı sanayileşme ve hızlı tüketimin bir sonucu olarak, farklı sınıflarda bulunan ürünlere olan talep her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte, ürüne erişme süresinin mümkün olduğunca kısa olması beklenmektedir. Dolayısıyla imalat sistemlerinde gelişmeler olması kaçınılmazdır. Geride kalan yüzyılın ortalarında temelleri atılan otomasyona dayalı imalat sistemi genişlemiş, optimizasyon devrine geçilmiş, üretimi artırarak yatırım masraflarını azaltan, daha fazla üretim yapmanın yanı sıra kaliteyi de artıran ve bu arada çok daha insancıl çalışma koşulları sunan "robot" devri başlamıştır. Robotların sanayiye girme süreci işçilik maliyetlerini düşürürken, dünya çapında bir üretim hızı kazandırmakta ve 24 saat kesintisiz üretim yapma imkânı tanımaktadır. Örneğin kaynak robotları kullanan otomotiv sanayisinde, kaynak emniyeti uluslararası standartlarda yapılırken, robot yatırımının geri dönüş süresi, kapasiteyi tam kullanabilme miktarlarına göre oldukça kısalmaktadır. Bu çalışmada, tamir bakım kapsamındaki kaynak işlerinde kullanılması düşünülen bilgisayar kontrollü, kartezyen koordinatlı kaynak robotu tasarımı ele alınmıştır. Tasarım sırasında takip edilen aşamalar; kartezyen robotun boyutlandırılması, kinematik ve dinamik analizi ile sistem için bir PID denetleyici tasarlanmasıdır.

**Anahtar kelimeler:** Kartezyen koordinatlı kaynak robotu, ark kaynağı, kaynak, kartezyen, servo motor, doğrusal hareket sistemleri, dinamik model.

## **ABSTRACT**

As a result of rapid industrialization and consumption, demand on a variety of products increases day by day. In addition to that, expected time to obtain the final product tends to be extremely short. As a result of this expectation, development in production systems was inevitable: Automation based production systems, started yet in the middle of the last century, has expanded and changed into optimization era. And the "robotics" era, decreasing investment costs by increasing productivity, has started the revolution. Besides increasing the amount of mass production, robots also increase the quality and thereby, more human friendly working conditions are obtained.

Industrialization by the use of robots, decreases the labor costs, and in the meantime, provides a world-standard production rate and 24 hours of uninterrupted production. As an example, welding safety in automotive industry using welding robots, is in international standards, and the payback time of the investment costs are significantly reduced based on the capacity of the production line which is used.

In this thesis, production of a computer controlled, cartesian welding robot, which is aimed to be used in welding applications for maintenance purposes, is studied. Design steps to be followed include: the dimensioning of the cartesian robot; kinematic and dynamic analysis; and the design of a PID controller for the system.

**Keywords:** Cartesian welding robot, arc welding, cartesian, servo motor.

## **TEŞEKKÜR**

Danışmanım Yrd. Doç. Dr. Semiha Bulut'a tez boyunca yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Bana her konuda sabırla yardımcı olan eşim Muradiye ÇAY' ve aileme desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u> :	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Döner tip eklem.....	15
Şekil 1.2 Kayar tip eklem.....	15
Şekil 1.3 Kartezyen manipülatör.....	16
Şekil 1.4 Silindirik manipülatör.....	16
Şekil 1.5 Küresel manipülatör.....	16
Şekil 1.6 Eklemli-insan kolu manipülatör.....	17
Şekil 1.7 Kartezyen koordinat sistemine ait çeşitli uygulamalar.....	18
Şekil 1.8 Kartezyen robot örneği.....	19
Şekil 1.9 $z_0$ ekseninde etrafında dönme.....	21
Şekil 1.10 Euler açıları gösterilimi.....	22
Şekil 1.11 Roll / Pitch /Yaw açıları gösterilimi.....	23
Şekil 1.12 Ötelenmiş çerçeve.....	24
Şekil 1.13 $n+1$ uzva sahip kinematik zincir oluşturan manipülatör.....	26
Şekil 1.14 Denavit- Hartenberg çerçeve ataması.....	28
Şekil 2.1 Ark kaynağı robot donanımı.....	30
Şekil 3.1 Bakım onarım kapsamında -32 derecede yapılan kaynak işi.....	35
Şekil.3.2 Kartezyen manipülatör ile kaynatılması düşünülen kaynak ağzı.....	36
Şekil 4.1 Standart gaz altı kaynak torcu.....	37
Şekil 4.2 Standart gaz altı kaynak torcu şeması.....	37
Şekil 4.3 Gaz altı kaynak makinesi ve ünitesi.....	38
Şekil 4.4 Mekanik sistemin şematik çizimi.....	39
Şekil 4.5 Mekanik sistemin AutoCAD programıyla çizilen ön görünüşü.....	39
Şekil 4.6 Mekanik sistemin AutoCAD programıyla çizilen üst görünüşü.....	40
Şekil 4.7 Mekanik sistemin AutoCAD programıyla çizilen sol yan görünüşü.....	40
Şekil 4.8 Torç askısı.....	41
Şekil 4.9 Doğrusal hareket sisteminin boyutları.....	42
Şekil 4.10 Doğrusal hareket sisteminin teknik değerleri.....	42
Şekil 5.1 Gazaltı kaynak hızı-nüfuziyet ilişkisi.....	45
Şekil 6.1 Kartezyen manipülatörün kinematik analizi.....	46
Şekil 6.2 Kartezyen manipülatörün uzuv parametreleri.....	47
Şekil 7.1 Kartezyen manipülatörün şematik gösterimi.....	53
Şekil 8.1 Servo motorlar.....	57
Şekil 8.2 Servo motor çeşitleri.....	59
Şekil 8.3 DC servo motor.....	60
Şekil 8.4 AC servo motorlar.....	61
Şekil 9.1 PID kontrolünün şematik gösterimi.....	63
Şekil 9.2 Sistem transfer fonksiyonunun adım tepkisi.....	64
Şekil 9.3 Sistemin Matlab ortamında oransal (P) kontrol altındaki adım tepkisi.....	65
Şekil 9.4 Sistemin Matlab da oransal-türevsel (PD) kontrol ile verdiği adım tepkisi.....	66

Şekil 9.5 Sistemin Matlab da oransal-integral (PI) kontrol ile verdiği adım tepkisi....	67
Şekil 9.6 Kartezyen manipülatörün $x$ eksenindeki dinamik modeli .....	68
Şekil 9.7 Kartezyen manipülatörün $x$ ekseninde basamak girişine karşılık gelen sistem çıkışı.....	68
Şekil 9.8 Kartezyen manipülatörün $y$ eksenindeki dinamik modeli .....	69
Şekil 9.9 Kartezyen manipülatörün $y$ ekseninde basamak girişine karşılık gelen sistem çıkışı.....	69
Şekil 9.10 Kartezyen manipülatörün $z$ eksenindeki dinamik modeli.....	70
Şekil 9.11 Kartezyen manipülatörün $z$ ekseninde basamak girişine karşılık gelen sistem çıkışı.....	70
Şekil 9.12 Manipülatörün $x$ eksenindeki PID kontrollü dinamik modeli .....	71
Şekil 9.13 Manipülatörün PID kontrol altında basamak formunda giriş sinyaline karşılık $x$ eksenindeki çıkış sinyali .....	71
Şekil 9.14 Kartezyen manipülatörün $y$ eksenindeki PID kontrollü dinamik modeli ...	72
Şekil 9.15 Kartezyen manipülatörün PID kontrol altında basamak formunda giriş sinyaline karşılık $y$ eksenindeki çıkış sinyali.....	72
Şekil 9.16 Kartezyen manipülatörün $z$ eksenindeki PID kontrollü dinamik modeli ...	73
Şekil 9.17 Kartezyen manipülatörün PID kontrol altında basamak formunda giriş sinyaline karşılık $z$ eksenindeki çıkış sinyali .....	73



## SİMGELER DİZİNİ

$c$	Cosinus
$s$	Sinus
$R_{x,\alpha}$	X eksenini etrafında alfa kadarlık bir dönüş
$d_{x,a}$	X ekseninde a mesafesi kadar ilerleme hareketi
$\theta_n$	Eksenler arası açı
$d_n$	Eksenler boyunca öteleme hareketi
$L$	Lagrange işlevi
$K$	Kinetik enerji
$V$	Potansiyel enerji
$P$	Oransal
$I$	İntegral
$D$	Türevsel
$K_p$	Oransal kontrol kazanç değeri
$K_d$	Türevsel kontrol kazanç değeri
$K_i$	İntegral kontrol kazanç değeri
$T_m$	Dönme torku
$F$	Kuvvet

## KISALTMALAR DİZİNİ

MIG	Metal inert gas
MAG	Metal active gas
TIG	Tungsten inert gas
R	Revolute (Döner eklem)
V	Voltaj (Gerilim)
A	Akım
P	Kayar tip eklem
RIA	Robot Institute of America
DH	Denavit-Hartenberg
DKVM	Doğrusal hareket sistemi
PID	Oransal Integral Türev Kontrol

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
SİMGELERDİZİNİ.....	VIII
KISALTMALAR DİZİNİ.....	IX
1-GİRİŞ.....	12
1.1-Robot Nedir?.....	14
1.1.1-Robotu oluşturan parçalar.....	14
1.1.2-Eklem yapıları.....	15
1.1.3- Manipülatörlerin sınıflandırılması.....	15
1.2- Kartezyen Robotlar ve Uygulama Alanları.....	17
1.3- Robotik Alanındaki Genel Kavramlar.....	20
1.3.1- Dönme matrisi.....	21
1.3.1.1- Euler açıları ve gösterilimi.....	22
1.3.1.2- Roll/Pitch/Yaw açıları ve gösterilimi.....	23
1.3.1.3- Öteleme vektörü.....	24
1.3.1.4- Homojen dönüşüm.....	24
1.3.2- Düz kinematikler.....	26
1.3.2.1- Denavit-Hartenberg(DH) dönüşümü.....	27
2- ROBOTLAR İLE YAPILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	29
2.1- Nokta Direnç Kaynağı.....	29
2.2- Ark Kaynağı.....	30
2.3- Robotlarda Ark Kaynağı Donanımları.....	31
2.4- Ark Kaynağı Robotunda Olması Gereken Özellikler.....	31
2.5- Robotların Tercih Edilme Nedenleri.....	32
2.5.1- İşletmelerimizde sağladığı yararlar.....	33
2.5.2- Yönetimde sağladığı yararlar.....	33
2.5.3- Personele sağladığı yararlar.....	33
2.5.4- Tüketiciye sağladığı yararlar.....	34
3- TEZİN AMACI VE KAPSAMI.....	34
4- MEKANİK SİSTEM TASARIMI.....	36
4.1- Mekanik Sistemin Boyutlandırılması.....	38
4.2- Mekanik Sistemin Oluşturulması ve DKVM ler.....	41
5-KAYNAK MANİPÜLATÖRÜN TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	43
5.1- Kaynak Hızları.....	44
5.1.1- Kaynak hızının ark kaynağına etkileri.....	44
5.1.2 Gazaltı ark kaynağında optimum kaynak hızları.....	44
5.1.3 Kartezyen koordinatlı kaynak manipülatörü için kaynak hızı hesabı.....	45
6- KARTEZYEN MANİPÜLATÖRÜN KİNEMATİK ANALİZ.....	45
7- KARTEZYEN MANİPÜLATÖRÜN DİNAMİK MODELLEMESİ.....	52

8- HAREKET SAĞLAYICILAR VE SERVO MOTORLARI SEÇİMİ .....	56
8.1- Kartezyen Manipülatörde Kullanılacak Servo Motorunun Seçimi.....	56
8.2- Servo Motorlar.....	56
8.2.1- Eylemsizlik momenti.....	57
8.2.2- Servo motorların belirgin özellikleri.....	58
8.2.3- Servo motorların kullanıldığı yerler.....	58
8.2.4- Servo Motor Çeşitleri.....	59
8.2.4.1- DC Servo motorlar.....	59
8.2.4.2- AC Servo motorlar.....	61
8.3- Servo Motor Sürücüleri.....	62
9-KARTEZYEN MANİPÜLATÖRÜN KONTROLÜ.....	63
9.1- PID Kontrol.....	63
9.1.1- Oransal kontrol (P).....	65
9.1.2- Oransal-türevsel kontrol (PD).....	66
9.1.3-Oransal – integral kontrol (PI).....	67
9.1.4- Oransal-integral-türevsel kontrol (PID).....	67
9.2 Kartezyen Manipülatörün Simulink İle Kontrolü.....	68
10-SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
11-ÖZGEÇMİŞ.....	77
12- KAYNAKLAR.....	78
13- EKLER.....	80
EK-1 Kartezyen Manipülatörde Kullanılan Servo Sürücünün Teknik Özellikleri.....	81
Ek-2 Kartezyen Manipülatörde Kullanılan Servo Motorun Boyutları.....	82

## 1-GİRİŞ

Robotik fiziksel aktivite ve karar verme gibi uygulamalarla bir görevi yürüterek insanların yerini alabilecek makinelerle ilgili çalışmaları içerir. Robotik, geleneksel mühendislik sınırlarını kesiştiren yeni bir modern teknoloji alanıdır. Robotların karmaşıklığını ve uygulama alanlarını anlamak için elektrik-elektronik mühendisliği, makine mühendisliği, endüstri mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, matematik alanlarında geniş bir bilgiye ihtiyaç vardır.

Günümüzde hızlı nüfus artışının doğal bir sonucu olarak farklı türdeki ürünlere olan talep giderek artmakta, dolayısıyla da imalat sistemlerinde olağanüstü gelişmeler meydana gelmektedir. Geçtiğimiz yüzyılın yarısında ortaya atılan otomasyona dayalı imalat sistemi genişleyerek optimizasyon devrine geçilmiş, üretkenliği artırarak yatırım masraflarını azaltan, daha fazla üretim yapmanın yanı sıra kaliteyi de yükselten ve bu arada çok daha insancıl çalışma koşulları sunan 'robotlar' devri başlamıştır.

Sanayi robotlarının temel kullanım amacı, üretim maliyetlerini düşürürken üretkenliği ve üretim kalitesini arttırmak, yapılması zor olan, insana fiziksel olarak zarar veren yorucu işlerde, sağlıksız ve zararlı (kimyasal madde, yüksek ısı, yüksek gürültü, titreşim, vs. bulunan) ortamlarda çalışmayı gerektiren uygulamalarda insanın yerine makine kullanmaktır.

Tüm ölçekteki üretici kuruluşlar bugünün uluslararası pazarında rekabet edebilir bir çizgi yakalamak için robota dayalı kaynak sistemlerini tercih etmektedirler. Bu tercihte olan üreticiler kaynak kalitesini, verimliliğini ve esnekliğini arttırmak ve müşterilerinin dinamik ihtiyaçlarını karşılamak gerektiğini fark etmektedirler. Bu çalışmada robotlar ve kaynak robotları hakkında genel bilgi verildikten sonra kartezyen koordinatlarda üç eksenle kaynak yapabilen bir robot kol tasarımı aşamalar halinde incelenecektir.

Son yıllarda hafif ve esnek kollu robotlar yüksek çalışma hızları, düşük maliyet, düşük güç ihtiyacı ve daha kolay taşınabilmeleri sebebiyle daha fazla tercih edilmeye başlamışlardır. Bununla beraber bu tür robot kollar esnek olmaları sebebiyle daha fazla titreşime maruz kalırlar. Birçok endüstriyel uygulamada (boyama, püskürtme, kesme, ezme, yüzey temizleme,...vb) son işlemciye bu titreşimler dolayısıyla kesik kesik kuvvetler gelmekte bu ise son işlemcinin konumundan sapmalara sebep olmaktadır. Bu ise yapılan işin kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir.

Esnek bir kartezyen robotun kesintili bir biçimde ve eksenel olarak uygulanan kuvvetler karşısındaki lineer olmayan davranışları [1] ve [2] de incelenmiştir. Genel olarak esnek uzuvlu kartezyen robot kollar uç kısımlarına ağırlık bağlanmış çubuk şeklinde modellenmiştir [3], [4]. Bu robot kolların basamak fonksiyonuna verdiği lineer olmayan cevaplar [5]-[6] da incelenmiştir. Bütün bu çalışmaların hepsinde kartezyen manipülatör bir ucuna ağırlık bağlanmış diğer ucu ise zemine dikey olarak sabitlenmiş metal çubuk şeklinde modellenmiştir. Sistemin genel hareket denklemi lineer olmamasına rağmen, bu denklem içerisinde doğrusal parametrik terimler olduğu da gözlemlenmiştir.

Son işlemcisine yük bağlanmış tek uzuvlu elastik bir kartezyen manipülatör hem nümerik hem de deneysel olarak incelenmiştir [7]. Çalışmanın deneysel kısmında dinamik analiz testleri yapılmıştır. Bu sonuçlar bir ucu duvara sabitlenmiş diğer ucuna ise ağırlık bağlanmış çubuğun deneysel ve nümerik sonuçları [8] ile karşılaştırıldığında; sonuçların oldukça benzer olduğu görülmüştür.

Yüksek hızlarda çalışan makinelerde besleme zamanının optimum olarak seçilmesi özellikle son işlemci eğrisel bir yörünge izliyorsa önem taşımaktadır. Çünkü besleme zamanı kesme ve sürtünme kuvvetlerini etkilemektedir [9], [10] ve [11]. Benzer şekilde optimum besleme zamanı kartezyen CNC makineler için son işlemci eğrisel bir yörünge üzerinde kesme veya ilerleme işlemi yaparken hareketin en az sapma ile ve kesintisiz olarak tamamlanabilmesi ve motorlardan gelen kuvvet değerlerinin düzgün ve kesintisiz bir biçimde kollara iletilebilmesi açısından önemlidir [9].

Gaz altı kaynak makinası ile kaynak yapma işlemi optimizasyona çok uygun bir yöntemdir. Bu nedenle başta otomotiv sektöründe olmak üzere birçok sektörde çeşitli robotik uygulamaları yapılmıştır. Otomotiv sektöründe hareket kabiliyetleri çok fazla olan 4, 5 ve daha fazla eksenli robotlar kullanılmaktadır. Kartezyen robotlara gaz altı kaynak makinasının torcunu kullanarak kaynak yaptırma işlemide son yıllarda bir çok çalışmanın konusu olmuştur.

Üç eksenli kartezyen koordinatlarda kaynak, kesme ve boyama gibi işlemleri gerçekleştirecek kartezyen koordinatlarda hareket edebilen robot tasarımını gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmalar, mekanik tasarımın vibrasyonlardan etkilenmemesi için daha mukavim bir yapıda olması gerektiğini, servo motor ve

sürücülerini kullanarak geri beslemeli bir sistem tasarlandığında daha iyi sonuçlar alınacağını göstermiştir [12].

Gaz altı kaynak makinasının torcunu kullanarak  $x$  ve  $y$  eksenlerinde hareket eden bir kaynak robotu tasarlanmıştır. Bu kaynak robotuna kaynak yaptırılmış ve elde edilen kaynağın çeşitli testler sonucu standartlar dahilinde kabul edilebilir bir kaynak olduğunu gösterilmiştir. Kartezyen robot 0,4 mm den küçük hatalarla istenilen konumda çalıştırılabilmiştir. Metal algılayıcı sensörlerin kullanılmasıyla kaynak robotunun ilk kaynağa başlayacağı noktanın belirlenmesinin daha kolay olacağı sonucuna da varılmıştır [13].

Mekatronik laboratuvarında kullanılmak üzere kartezyen koordinatlarda üç ekseninde hareket edebilen bir kartezyen robot tasarlanmıştır. Bu robotun kontrolünü internet üzerinden yaparak öğrencilerin uzaktan deneylere katılmasını amaçlamıştır. Çalışma kapsamında kartezyen robotun istenilen malzemeleri istenilen yere koyacak şekilde üç ekseninde hareket edebilen mekanik iskeleti oluşturulmuştur [14].

Malzeme taşımada ve yerleştirmede kullanılan bir kartezyen robotun tasarımı ele alınmıştır. Kartezyen robotun tasarlanmasında görüntü destekli nesne tanıma teknolojisi kullanılmış olup bu teknolojinin barkod okumada işleminde kullanılabileceği önerisinde bulunulmuştur [15].

## **1.1 Robot Nedir?**

Robot, bir dizi verilen görev çerçevesinde çeşitli programlanmış hareketler ile materyalleri, parçaları, aletleri veya özel donanımları hareket ettirmek için tasarlanmış programlanabilir çok işlevli manipulatördür. Bu tanım Robot Institute of America-RIA tarafından verilmiştir. Bu bölümde robotu oluşturan parçalar kısaca incelenecektir [16].

### **1.1.1 Robotu Oluşturan Parçalar**

Robot dört ana kısımdan meydana gelir :

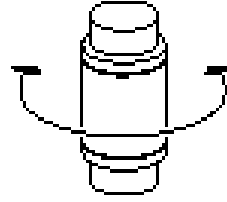
Bir mekanik yapı ya da eklemlerle birbirine bağlanmış sıralı rijid cisimlerden (uzuvlardan) oluşan manipulatör; manipulatör, serbestliği sağlayan bir koldan (arm), el becerisi sağlayan bir bilekten (wrist) ve robotun yapması gereken görevi tamamlayan sonlandırıcıdan (end effector) oluşmaktadır.

1. Eklemlerin hareketlenmesiyle manipülâtörün hareketini sağlayan hareketlendiriciler (actuators-motors)
2. Manipülâtörün veya çevrenin durumunu gözleyen algılayıcılar (sensors)
3. Manipülâtör hareketini kontrol eden ve yöneten bir kontrol sistemi

### 1.1.2 Eklem Yapıları

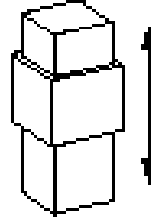
Eklemler manipülâtörlerde hareketi sağlayan mekanizmalardır ve yapılarına göre ikiye ayrılırlar:

1. Döner (Revolute – R) Eklemler : Mentешеye benzer ve iki uzuv arasında dönme hareketine izin verir.



Şekil 1.1 Döner tip eklem

2. Kayar (Prismatic – P) Eklemler: İki uzuv arasında doğrusal harekete izin verir.



Şekil 1.2 Kayar tip eklem

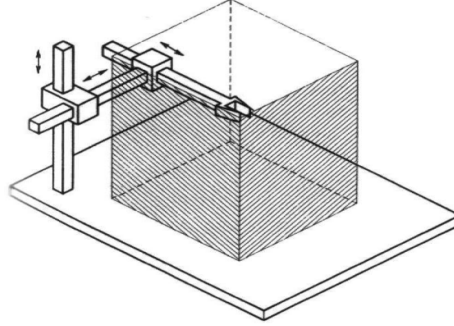
### 1.1.3 Manipülâtörlerin Sınıflandırılması

Manipülâtörler çalışma uzaylarına göre sınıflandırılırlar. Aşağıda manipülâtör yapıları ve bunların çalışma uzayları görülmektedir [17].

1. Kartezyen (Cartesian) manipülâtör: Bu tip bir manipülâtör üç tane kayar tip eklem ile elde edilir. Mekanik yönden çok sağlamdır fakat çalışma uzayındaki hareket yeteneği bakımından zayıftır. Bu tip manipülâtörler çok büyük boyutlarda ve ağırlıklarda nesnelere hareket ettirmek ve taşımak için idealdir. Kartezyen manipülâtörlerde

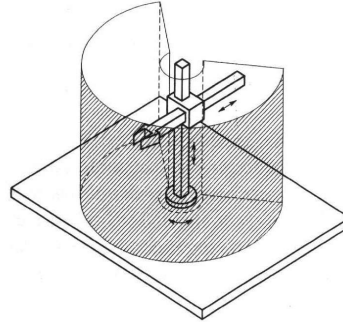


eklemleri hareket ettiren motorlar çoğunlukla elektrik bazen de pünomatik motorlarıdır [18].



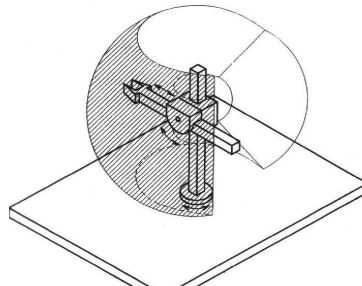
Şekil 1.3 Kartezyen manipülatör

2. Silindirik (Cylindrical) manipülatör: Bu tip bir manipülatör bir tane döner ve iki tane kayar tip eklem ile elde edilir. Bu tip manipülatörler de mekanik yönden sağlamdır fakat bilek konum doğruluğu (accuracy) yatay harekete bağlı olarak azalır. Benzer şekilde büyük boyutlu nesnelerin taşınmasında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde hidrolik motorları tercih edilir.



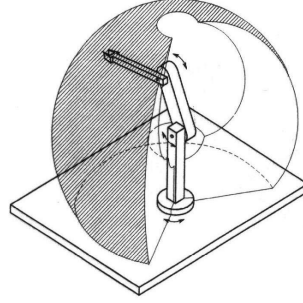
Şekil 1.4 Silindirik manipülatör

3. Küresel (Spherical) manipülatör : Bu tip bir manipülatör iki tane döner ve bir tane kayar tip eklem ile elde edilir. Bu tip manipülatörler mekanik yönden diğer iki tipten daha zayıf, mekanik yapı yönünden daha karmaşıktır. Çoğunlukla makine montajlarında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde elektrik motorları tercih edilir.



Şekil 1.5 Küresel manipülatör

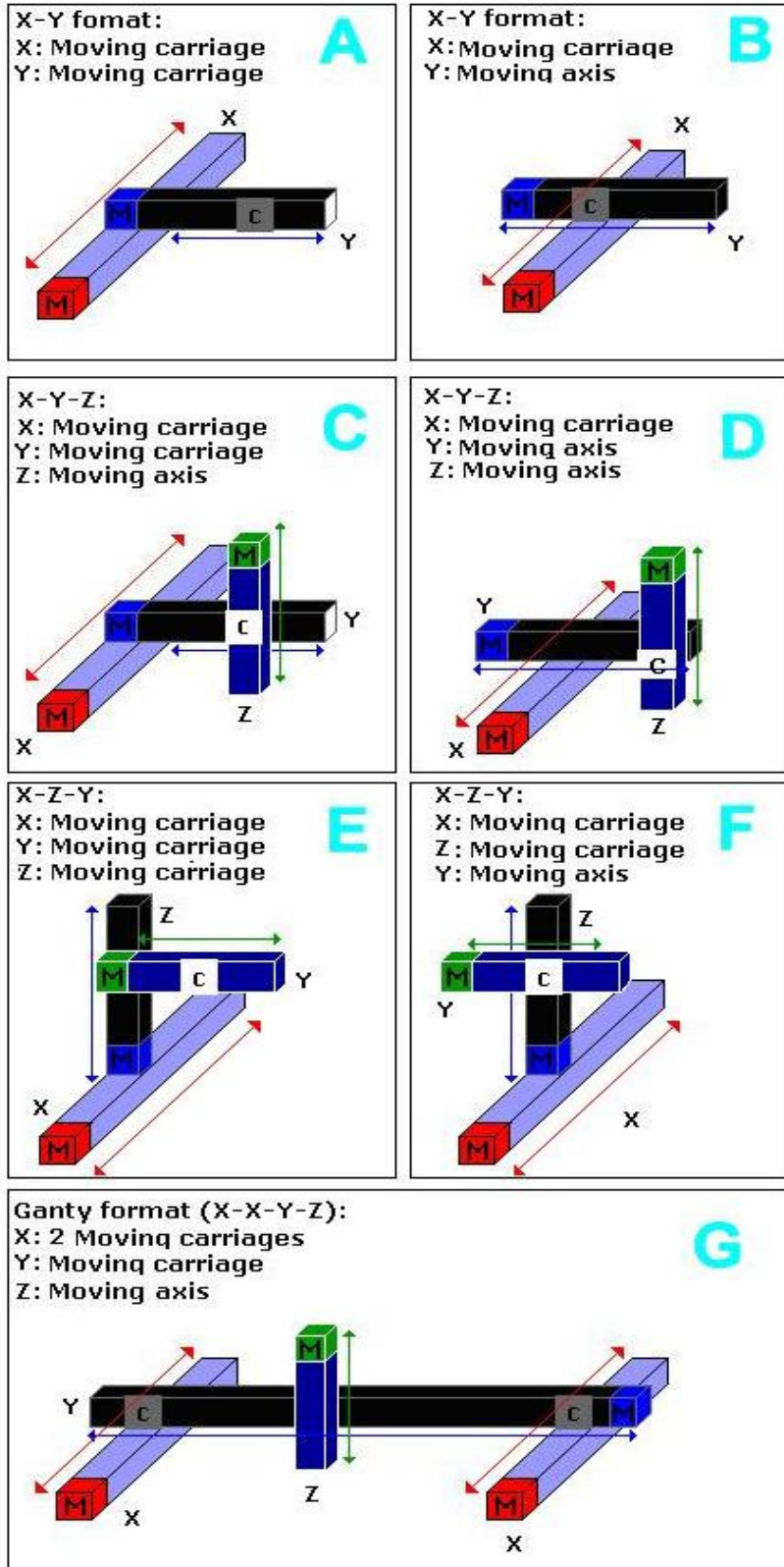
4. Eklemlili (Articulated)-İnsan Kolu (Anthrophomorphic) manipülatör: İnsan kol yapısı esas alındığı için bu isim verilmiştir. Bu tip manipülatörler tüm eklemleri döner olduğundan çalışma uzaylarında en yetenekli manipülatörlerdir. Endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahiptirler (boyama, kaynak yapma, montaj, yüzey temizleme vb.). Bu tip manipülatörlerde elektrik motorları tercih edilir.



Şekil 1.6 Eklemlili-İnsan kolu manipülatör

### 1.2- Kartezyen Robotlar Ve Uygulama alanları

Bu sistemde bütün robot hareketleri; birbirlerine karşı dik açılı eksenlerde olur (Şekil 1.7). Bu konfigürasyon en kısıtlı hareket serbestine sahip robot tasarım şeklidir. Bazı parçaların montajı için gerekli işlemler kartezyen konfigürasyonlu robotlar tarafından yapılır. Bu robot şekli birbirine dik üç eksenle hareket eden kısımlara sahiptir. Hareketli kısımlar  $x$ ,  $y$  ve  $z$  kartezyen koordinat sistemi eksenlerine paralel hareket ederler. Robot, üç boyutlu dikdörtgen prizması hacmi içindeki noktalara kolunu hareket ettirebilir [19].



Şekil 1.7 Kartezyen koordinat sistemine ait çeşitli uygulamalar

Bir kartezyen koordinat sisteminde, koordinat sistem merkezinin yeri, ilk iki bağlantının birleşme yerinin merkezidir. Merkezine doğru yapılan hareketler dışında, merkez hareket etmez, yani robotun merkezi sabittir. Robotun yerleştirildiği çalışma alanında eğer  $x$  yönündeki hattı bir kolona doğru çevrilirse,  $x$  hattı daima aynı kolona doğru yönelir robotun programını yaparken bu hareket yönü dikkate alınmalıdır. Bunlar verilmiş bir robot donanımı için, yer koordinatları olarak bilinir.

### Üç Serbestlik Dereceli Daire Testereli Kartezyen Robot Örneği



Şekil 1.8 Kartezyen robot örneği

Beyaz eşya sektörü için, termoformla üretilmiş parçaların kenarlarını belirli hatlar boyunca daire testere ile kesmek için tasarlanmıştır. Sistemde Kollmorgen Seidel servo motorlar, sürücüleri, Lenord Bauer hareket denetleyici ünite ve operatör paneli kullanılmıştır. Robotun gövde konstrüksiyonu Minitec alüminyum profil sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.8 deki Kartezyen robot uygulamalarına örnek robotun teknik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Kartezyen manipülatör örneğinin teknik değerleri aşağıdaki tablodaki gibidir.

<b>Eksenler</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Stroklar</b>	2500mm	1500mm	400mm
<b>En yüksek hızlar</b>	1.2m/s	1.2m/s	1.2m/s
<b>Motorlar</b>	Kalıcı mıknatıslı senkron servo motor	Kalıcı mıknatıslı senkron servo motor	Kalıcı mıknatıslı senkron servo motor
<b>Tahrik mekanizması</b>	Dişli kayışlı doğrusal hareket modülü	Dişli kayışlı doğrusal hareket modülü	Dişli kayışlı doğrusal hareket modülü
<b>Pozisyonlama hassasiyeti</b>	+/- 250µm	+/- 250µm	+/- 250µm
<b>Sistem denetimi</b>	İki eksende dairesel, üç eksende doğrusal interpolasyon yapabilme yeteneğine sahip hareket denetleyici ünite		
<b>Gövde</b>	Yapay olarak yaşlandırılmış, alaşımli alüminyum konstrüksiyon		

### 1.3 Robotik Alanındaki Genel Kavramlar

Robotik alanındaki genel kavramlar aşağıdaki ana ve alt başlıklarda toplanabilir:

1. Dönüşümler:
  - a) Dönme Matrisi
  - b) Öteleme Vektörü
  - c) Homojen Dönüşüm

2. Düz Kinematikler

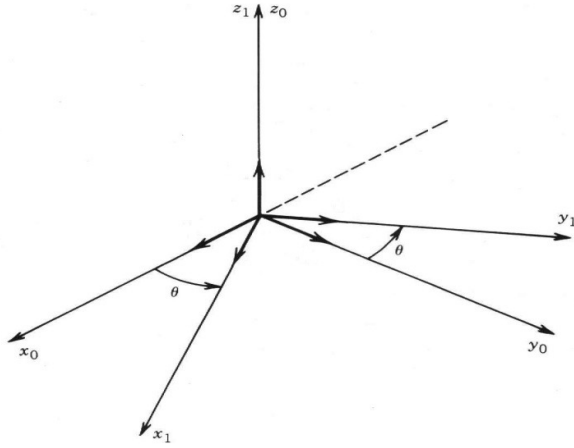
\* Denavit-Hartenberg (DH) Dönüşümü

İzleyen bölümlerde bu kavramlar tek tek ele alınacaktır. Manipülatör eklemlerle birbirine bağlanmış rijid cisimlerin açık uçlu kinematik zinciri olarak kabul edilir. Zincirin bir ucu yere bağlı iken diğer ucu sonlandırıcıya bağlıdır. Sonuçta bu yapının hareketi her bir uzvun diğerine göre hareketlerinin toplamından oluşturulur. Bunun için önce bir rijid cismin uzaydaki konumunu ve yönelimini belirtmek için dönme (rotation) matrisi ve öteleme (translation) vektörü oluştururuz. Bu matris ve vektörü birleştirmek için daha sonra homojen dönüşüm gösterilişini kullanırız.

### 1.3.1 Dönme Matrisi

Şekil 1.9'da gösterildiği üzere  $\{i_0, j_0, k_0\}$   $ox_0y_0z_0$  koordinat çerçevesi için,  $\{i_1, j_1, k_1\}$   $ox_1y_1z_1$  koordinat çerçevesi için birim vektörler olsun, 1. koordinat çerçevesi 0. koordinat çerçevesinde  $z_0$  eksenini etrafında  $\theta$  açısı kadar döndürülerek elde edilmiştir. Bu iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüşüm Eşitlik 1.1 ile bulunur. Buradaki  $R_0^1$  matrisi 1. koordinat çerçevesinden 0. koordinat çerçevesine dönme matrisini göstermektedir. 1. koordinat çerçevesi 0. koordinat çerçevesinden belli bir dönme ile elde edildiğinden bu matris dönme matrisi adını alır.

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{bmatrix} \quad [1.1]$$



Şekil 1.9  $z_0$  eksenini etrafında dönme

Burada

$$i_0 \cdot i_1 = \cos \theta \quad j_1 \cdot i_0 = -\sin \theta$$

$$j_0 \cdot j_1 = \cos \theta \quad i_1 \cdot j_0 = \sin \theta$$

$$k_0 \cdot k_1 = 1$$

Ve diğer tüm nokta çarpımlar sıfır olmak üzere,

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.2]$$

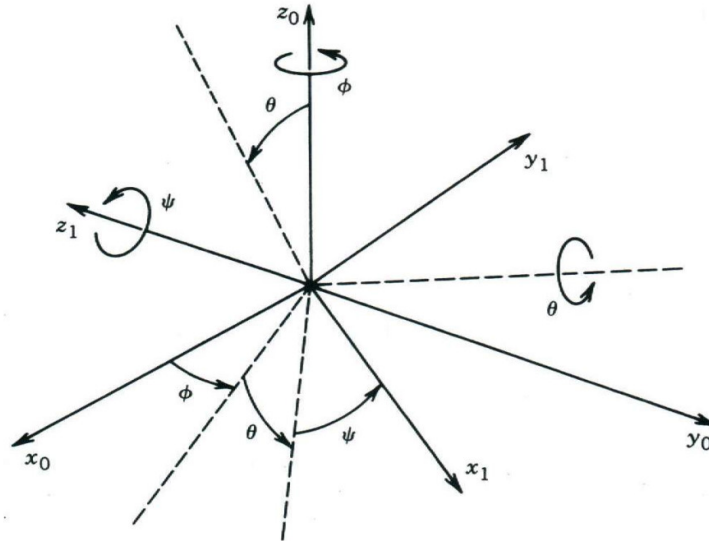
Dönme matrisi elde edilir.  $R_0^1$  Gösterilimi yerine dönme eksenini ve açısını belirten  $R_{z,\theta}$  gösterilimi de kullanılabilir.

Koordinat çerçeveleri etrafında dönme tek olmayabilir, böylece devam eden şekilde  $ox_2y_2z_2$ ,  $ox_3y_3z_3$ ,  $ox_4y_4z_4, \dots$  koordinat çerçeveleri elde edilebilir. Aslında sonuçta elde edilen koordinat çerçevesi sadece üç eksen etrafında  $(x, y, z)$  belirli açılarla dönmüştür. Bu nedenle elimizde bulunan rastgele bir koordinat çerçevesinin temel koordinat çerçevesine göre dönme matrisini elde etmek için üç tane açı değeri yeterlidir. Bu açıların tanımlanması için iki tane gösterilim mevcuttur :

1. Euler açıları gösterilimi
2. Roll / Pitch / Yaw açıları gösterilimi

### 1.3.1.1 Euler Açıları ve Gösterilimi

Euler açıları sırasıyla  $z$  eksenini etrafında  $\Phi$  açısı kadar,  $y$  eksenini etrafında  $\theta$  açısı kadar, tekrar  $z$  eksenini etrafında  $\Psi$  açısı kadar dönmelere karşılık gelmektedir. Euler açıları gösterilimi Şekil 1.11 'de verilmiştir.



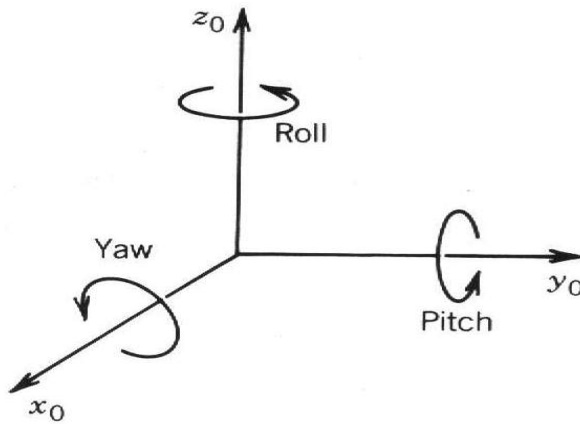
Şekil 1.10 Euler açıları gösterilimi

Burada  $\cos = c$  ,  $\sin = s$  olmak üzere dönme matrisi şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned}
R_0^1 &= R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} & [1.3] \\
&= \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} c\phi c\theta c\psi - s\phi s\psi & -c\phi c\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta \\ s\phi c\theta c\psi + c\phi s\psi & -s\phi c\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

### 1.3.1.2. Roll/Pitch/Yaw Açıları ve Gösterilimi

Roll / Pitch / Yaw açıları sırasıyla  $x_0$  eksenini etrafında  $\Psi$  açısı kadar,  $y_0$  eksenini etrafında  $\theta$  açısı kadar ve  $z_0$  eksenini etrafında  $\Phi$  açısı kadar dönmelere karşılık gelmektedir. Roll / Pitch / Yaw açıları gösterilimi Şekil 1.11’de verilmiştir.



Şekil 1.11 Roll / Pitch / Yaw açıları gösterilimi

Burada dönme matrisi şu şekilde elde edilir :

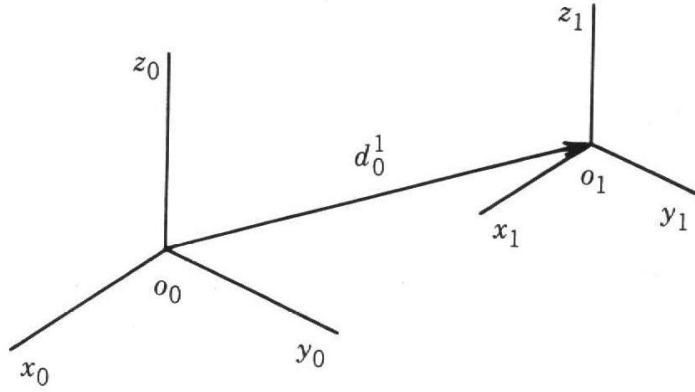
$$\begin{aligned}
R_0^1 &= R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{x,\psi} & [1.4] \\
&= \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi \\ 0 & s\psi & c\psi \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} c\phi c\theta & -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ s\phi c\theta & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix}
\end{aligned}$$



### 1.3.1.3 Öteleme Vektörü

Şekil 1.12’de gösterildiği üzere  $ox_0y_0z_0$ ’den  $|d|$  kadar bir öteleme ile elde edilmiş  $ox_1y_1z_1$  koordinat çerçevesi düşünelim. Bu iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüşüm öteleme vektörü ile tanımlanır.

$$d_0^1 = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad [1.5]$$



Şekil 1.12 Ötelenmiş çerçeve

### 1.3.1.4 Homojen Dönüşüm

Üç boyutlu uzayda koordinat çerçeveleri arasındaki dönüşüm dönme matrisleri ve öteleme vektörleri yardımıyla yapılır. Her ikisinin birlikte gösterilimi için yani koordinat çerçeveleri arasında hem dönmenin, hem de ötelemenin var olduğu durumda homojen dönüşüm matrisleri kullanılır. Homojen dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$T_0^1 = \left[ \begin{array}{ccc|c} & & & \\ & R_0^1 & & d_0^1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]_{4 \times 4} \quad [1.6]$$

Burada elde edilen  $T_0^1$  matrisi 1. koordinat çerçevesinden 0. koordinat çerçevesine homojen dönüşüm matrisini göstermektedir.  $T_0^1$  Matrisini 4x4 boyutundan kare matris olduğuna dikkat edilmelidir. Bu homojen matris oluşturulurken matrisin tersinin alınabilmesi için yapılmıştır.  $T_0^1$  Matrisindeki  $T_{4,4}$  elemanı olan 1 tüm elemanların bire bir ölçeklendiğini göstermektedir. Bu elde ettiğimiz genel kalıba bağlı olarak temel homojen dönüşüm matrisleri şu şekildedir.

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} c\phi & 0 & s\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\phi & 0 & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.7]$$

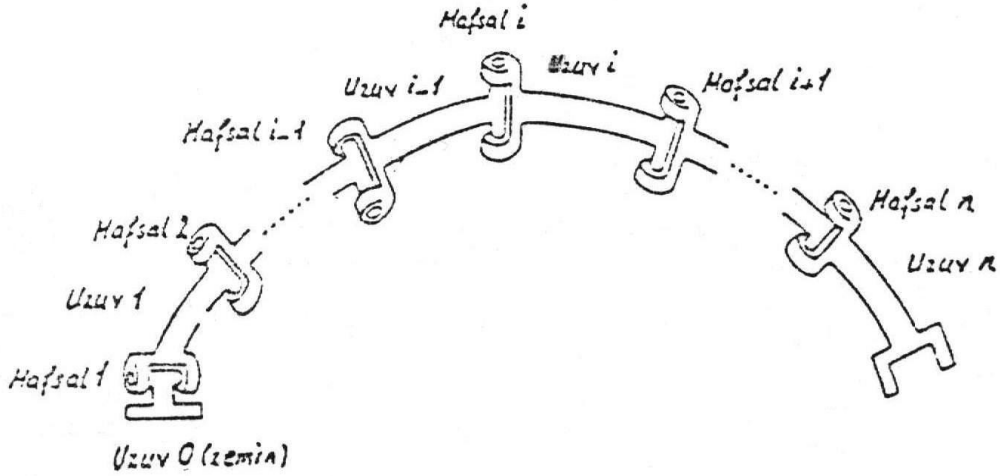
$$d_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} d_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} d_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.8]$$

### 1.3.2 Düz Kinematikler

Robotikte düz kinematikler manipülâtörün verilen eklem değişken değerleri için sonlandırıcının konumunu ve yönelimini bulmak olarak tanımlanabilir. Eklem değişkenleri, eklem döneer olması durumunda uzuvlar arasındaki açı, eklem kayar olması durumunda uzuv uzanma miktarıdır. Bu değişkenler için gösterilimler aşağıda verilmiştir:

$$q_i = \begin{cases} \theta_i & \text{döner eklem için} \\ d_i & \text{kayar eklem için} \end{cases}$$

Manipülâtörlerin eklemlerle birleştirilmiş bir dizi uzuv olduğundan yola çıkarak Şekil 1.13 'de gösterildiği üzere  $n+1$  uzva sahip bir manipülâtörümüz olduğunu ve her bir uzva bir koordinat çerçevesi atandığını düşünelim.



Şekil 1.13  $n+1$  uzva sahip kinematik zincir oluřturán manipülâtör

Őimdi  $T_{i-1}^i$ 'in çerçeve  $i$  'den çerçeve  $i-1$ 'e homojen dönüşüm matrisi olduğunu düşünelim. Burada  $T_{i-1}^i$  matrisinin sabit olmadığına, manipülâtörün hareketiyle değiştiğine dikkat edilmelidir. Bu ifadelere bağlı olarak sonlandırıcının konumunu ve yönelimini temel (base) koordinat çerçevesinde elde etmek için homojen dönüşüm matrisini şu şekilde ifade edebiliriz:

$$H = T_0^n = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot \dots \cdot T_{n-1}^n \quad [1.9]$$

### 1.3.2.1 Denavit-Hartenberg (DH) Dönüşümü

Eşitlik [1.9] ile elde edilen dönüşüm kolay gibi görünse de her bir eklem için koordinat çerçevelerinin yerleştirilmesi ve birbirlerine göre yorumlanması anlam karmaşasına yol açmaktadır. Bu anlam karmaşasını ortadan kaldırmak için Denavit ve Hartenberg 1955 yılında sistematik bir yöntem önermişlerdir [20].

Bu yöntemde aşağıdaki kurallara göre önce koordinat çerçeveleri atanır, daha sonra dönüşüm için gerekli uzuv ve eklem parametreleri bulunur. Yöntem dokuz adımdan oluşmaktadır ve bu adımlar aşağıda verilmiştir:

1. Eklem eksenleri  $z_0 \dots z_{n-1}$ 'i konumlandır.

2. Temel çerçeveyi sağ el kuralına göre düzenle.

$i = 1, \dots, n-1$  için adım 3-5'i tekrarla.

3. Merkez  $o_i$ 'yi yerleştir. Eğer  $z_i$   $z_{i-1}$  ile kesişiyorsa  $o_i$ 'yi bu noktaya yerleştir.

Eğer  $z_i, z_{i-1}$  eksenleri paralelse  $o_i$ 'yi eklem  $i$  üzerine yerleştir.

4.  $x_i$  ve  $y_i$  yerleştir. Eğer  $z_i$  ve  $z_{i-1}$  kesişiyorsa ikisinin oluşturduğu düzleme dik olarak  $x_i$  ve  $y_i$  eksenlerini yerleştir. Eğer  $z_i$  ve  $z_{i-1}$  eksenleri paralelse bunların ortak normalleri boyunca  $o_i$ 'ye doğru  $x_i$ 'yi yerleştir.

5. Sağ el çerçevesini tamamlayacak şekilde  $y_i$  eksenini yerleştir.

6. Sonlandırıcı çerçevesi  $o_n x_n y_n z_n$ 'i yerleştir. Bu yerleşim sonlandırıcı tipine göre değişir. Bu ilk altı adım koordinat çerçevelerinin yerleştirilmesi için kullanılır, daha sonraki üç adım bize eklem ve uzuv parametrelerini verir.

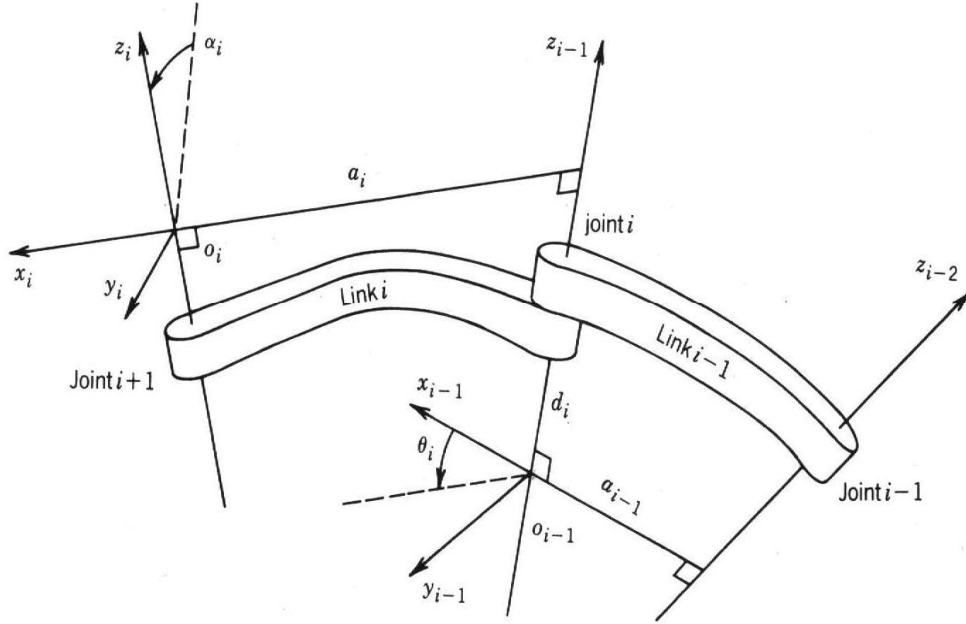
7. Daha sonra eklem ve uzuv parametreleri belirle. Bu parametreler aşağıdaki gibidir ve Şekil 4.2 üzerinde gösterilmiştir :

Uzuv uzunluğu  $a_i$  :  $x_i$  boyunca  $o_i$ 'den  $x_i$  ve  $z_{i-1}$ 'nin kesişimlerine olan uzaklık

Uzuv ofseti  $d_i$  :  $z_{i-1}$  boyunca  $o_{i-1}$ 'den  $x_i$  ve  $z_{i-1}$ 'in kesişme noktalarına olan uzaklık.

Uzuv bükümü  $\alpha_i$  :  $x_i$  etrafında  $z_{i-1}, z_i$  eksenleri arasındaki açı

Eklem açısı  $\theta_i$  :  $z_{i-1}$  etrafında  $x_{i-1}$  ve  $x_i$  eksenleri arasındaki açı



Şekil 1.14 Denavit-Hartenberg çerçeve ataması

8. Aşağıdaki matrise bağlı olarak iki çerçeve arasındaki homojen dönüşüm matrisi hesaplanır.

$$A_i = Rot_{z, \theta_i} Trans_{z, d_i} Trans_{x, a_i} Rot_{x, \alpha_i} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.10]$$

9. Daha sonra sonlandırıcı koordinat çerçevesinden temel çerçevesine dönüşüm matrisi hesaplanır.

$$T_0^n = A_1 \dots A_n \quad [1.11]$$

## 2- ROBOTLAR İLE YAPILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Başta nokta direnç kaynağı (punta kaynağı) olmak üzere, MIG/MAG, TIG ve plazma kaynak yöntemlerinde robotlar başarı ile kullanılmaktadırlar.

### 2.1 Nokta Direnç Kaynağı

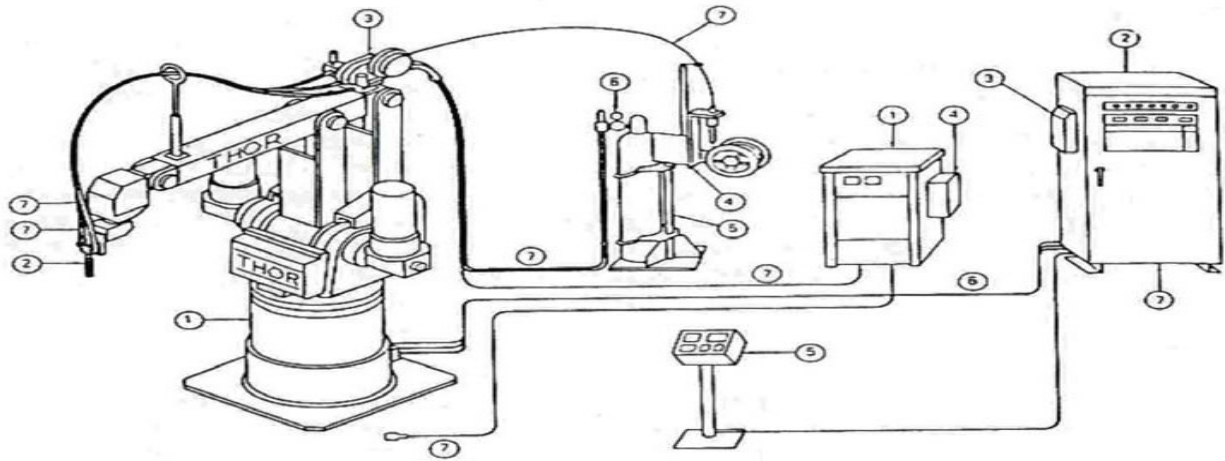
Endüstride robotların ilk yaygın kullanım alanı, nokta kaynağıdır. Otomobil üretiminde binek arabaların yapımı için yaklaşık 700 adet preslenmiş ve kesilmiş parça ile 400 adet talaş kaldırılarak işlenmiş parça kullanılır. Bu parçalar civata, perçin, kıvrırma, lehimleme, yapııştırma ile birleştirilmelerinin yanı sıra daha çok kaynak yolu ile birbirlerine bağlanmaktadır. Bir arabadaki toplam kaynak sayısı; yaklaşık olarak 5000 nokta kaynağı, 30 metre kadar ark kaynağı, 1 metre elektron ışın kaynağı ve 15 adet de sürtünme kaynağından oluşmaktadır.

Nokta direnç kaynağında kullanılan robotlar, işlemi gerçekleştirmek için bazı yetenek ve özelliklere sahip olmalıdır. Çalışma hacmi, parçanın boyutuna uygun olmalıdır. Robot, parça üzerinde ulaşılması güç olan yerlerde kaynak tabancasını konumlayabilmeli ve oryante edebilmelidir. Bu ise serbestlik derecesinin sayısının artması ihtiyacını doğurur. Kontrolör hafızası, nokta direnç kaynak döngüsü için gerekli birçok konumlama adımlarını gerçekleştirebilecek kapasiteye sahip olmalıdır. Bazı uygulamalarda, kaynak hattı, birçok farklı model ürünün üretimi için tasarlanabilir. Böylece, modeller değiştiğinde, robotlar bir programdan diğerine geçebilmelidir. Çok yönlü robotların bulunduğu kaynak hatları için, çeşitli kaynak istasyonlarında değişik modellerin izlenebilmesi ve iş istasyonlarındaki robotlara programların yüklenebilmesi için programlanabilir kontrolör kullanılır.

Robotlar aracılığıyla gerçekleştirilen nokta direnç kaynağı sürecinin otomasyonundan elde edilen faydalar, artırılmış ürün kalitesi, operatör güvenliği ve imalat operasyonuna daha fazla hâkim olunmasıdır. Kalitenin artması, kaynak dikişlerinin daha tutarlı olması ve kaynakların konumundaki tekrarlanabilirliğin daha iyi olmasındandır. Göreceli olarak çok iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olmayan robotlar bile insanlara nazaran nokta kaynaklarını daha doğru bir şekilde konumlandırabilirler. Elektriksel şok ve yanık tehlikelerinin bulunduğu çalışma alanından insanın uzak tutulması ile güvenlik artırılmış olur. Nokta direnç kaynağı prosesini otomize etmek için robotların kullanılması, üretim planlama ve süreç içi gelişmelere neden olacaktır. Robotların ve kaynak ekipmanının bakımı, nokta direnç kaynağı hattının otomizasyonunun başarıyla gerçekleştirilmesi için önemli bir faktördür [21].

## 2.2 Ark Kaynağı

Ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde, MIG/MAG ve TIG (Tungsten Inert Gas) robotlar yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Ancak ark kaynak yöntemlerinin uygulanmasında önemli teknik ve ekonomik problemlerle karşılaşmaktadır. Sürekli ark kaynağındaki tehlikeler yüzünden, süreçte endüstriyel robotların kullanımı mantıklıdır. Bununla birlikte, robotların ark kaynağı için kullanılmasında karşılaşılan önemli teknik ve ekonomik problemler vardır. Sürekli ark kaynağı, düşük sayıda üretilen ve birçok bileşenden oluşan ürünlerin imalatında sıklıkla kullanılır. Bu şartlar altında herhangi bir otomasyon şeklinin uygulanması zordur. Ark kaynağı, depoların içi, basınçlı kaplar ve gemi gövdeleri gibi ulaşmanın güç olduğu sıkışık alanlarda gerçekleştirildiği için robotların bu dar alanlarda çalışması da problem teşkil eder. Bu tip alanlarda insanlar daha rahat çalışabilirler [22].



### Robot Donanımları :

- 1) Ark Kaynak Robotu
- 2) Robot Kontrol Ünitesi
- 3) Öğretme (Teaching) Kutusu
- 4) Kaynak Sinyal Ünitesi
- 5) Kontrol Ünitesi
- 6) Kablolar

### Kaynak Makinası Donanımları :

- 1) Güç Ünitesi
- 2) Kaynak Torcu
- 3) Tel Besleme Ünitesi
- 4) Tel Kontrol Ünitesi
- 5) Koruyucu Gaz Ünitesi
- 6) Manometre
- 7) Kablo ve Hortumlar

Şekil 2.1 Ark kaynağı robot donanımı

### 2.3 Robotlarda Ark Kaynağı Donanımları

Endüstride kullanılan bir robotik ark kaynağı donanımı aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır.

1. Manipülâtör (Robot kolu)
2. Kaynak torçu
3. Güç ünitesi
4. Kontrol ünitesi
5. Tel sürme ünitesi
6. Tel kontrol ünitesi
7. Koruyucu gaz ünitesi
8. Öğretme kutusu
9. Kaynak sinyal ünitesi
10. Manometre
11. Robot kontrol ünitesi
12. Kablo ve hortumlar
13. Pozisyoner

### 2.4 Ark Kaynağı Robotunda Olması Gereken Özellikler

Ark kaynağı gerçekleştiren endüstriyel robotun bazı özellik ve yeteneklere sahip olması gerekir. Ark kaynağı uygulamalarında göz önünde bulundurulmuş bazı teknik konular şunlardır:

**a) Çalışma hacmi ve serbestlik dereceleri:** Robotun çalışma hacmi, kaynak edilecek parçaların boyutlarına yetecek büyüklükte olmalıdır. Kaynak torcunun yeterli manipülasyonuna izin verilmelidir. Ayrıca, eğer iş istasyonunda iki parça tutucu varsa her iki tutucuda da hareket döngüsü gerçekleştirmek için robot uygun erişime sahip olmalıdır. Ark kaynağı robotları için genellikle beş veya altı serbestlik derecesi gerekir. Bu sayı, kaynak işinin karakteristiklerinden ve parça manipülâtörünün hareket yeteneklerinden etkilenir. Eğer parça manipülâtörü 2 serbestlik derecesine sahipse, robotun daha az serbestlik derecesine sahip olmasına izin verilebilir.

**b) Hareket kontrol sistemi:** Ark kaynağı için sürekli-yol kontrolü gereklidir. Kaynak dikişinin üniformitesini sağlamak için robot, pürüzsüz sürekli harekete sahip olmalıdır. Buna ilaveten, kaynak döngüsünde hareketin başlangıcında kaynak banyosunu oluşturmak için bir bekleme, hareketin sonunda da kaynağı bitirmek üzere bir bekleme gerçekleştirilmelidir.



*c) Hareketin kesinliği:* Robotun tamlığı ve tekrarlanabilirliği kaynak işinin kalitesini belirler. Kaynak işlerinin kesinlik gereksinimleri, boyut ve endüstrinin pratiğine bağlı olarak değişiklik gösterir ve en uygun robot seçilmeden önce her kullanıcı tarafından bu gereksinimler tanımlanmalıdır.

*d) Diğer sistemlerle entegrasyonu:* Robot, hücredeki diğer ekipmanlarla birlikte çalışabilmek için yeterli giriş/çıkış ve kontrol yeteneklerine sahip olmalıdır. Bu diğer ekipmanlar, kaynak ünitesi ve parça pozisyoneleridir. Hücre kontrolörü, robotun hızı ve yörüngesi ile parça manipülatörünün operasyonu ve tel besleme hızı gibi kaynak parametrelerini koordine etmelidir.

*e) Programlama:* Robotun sürekli ark kaynağı için programlanması dikkat gerektirir. Düzensiz şekillere sahip kaynak yolları için, robotun hareket yolu boyunca fiziksel olarak hareket ettirildiği gösterme ile programlama metodunu kullanmak uygundur. Doğrusal kaynak yolları için robotun, uzaydaki iki nokta arasındaki interpolasyonu gerçekleştirecek yeteneğe sahip olması gereklidir. Bu, programcının kaynak başlangıç ve bitiş noktalarını belirlemesine ve robotun noktalar arasındaki düz çizgi yörüngeyi hesaplamasına izin verir.

## **2.5- Robotların Tercih Edilme Nedenleri**

Robotlar, endüstride çok çeşitli alanlarda kullanım faydaları sağlarlar. Günümüz ekonomisinde tüm iş alanlarında geçerli olan rekabet gücünü korumayı ve arttırmayı sağlar. İnsana dayalı üretimlerin çok çok üzerinde performans sağlayarak verimi artırır ve rekabet gücünüze güç katar. Robotlar, kişilere bağlı sıkıntılardan kaynaklanan ve üretime yansıyan problemlerden etkilenmezler ve sürekli üretim yaparlar. Robotlar, asla hastalanmazlar, yorulmazlar ve dinlenmeye ihtiyaç duymazlar. Bu yüzden 7 gün 24 saat çalışabilirler. İnsanların yapması gereken tehlikeli görevler olduğunda, onların yerine bu tür tehlikeli görevleri üstlenip yapabilirler. Robotlar sıkılmazlar, bu nedenle tekrarlayan rutin işleri ardı ardına yapmak hiç problem değildir [23].

### **2.5.1-İşletmelerimizde sağladığı yararlar**

Robotlar imalatlarda yüksek ürün kalitesinin sürekliliğini sağlar. Robotlar aralıksız yorulmadan çalıştıkları için aldıkları komutları çok daha hızlı işlerler ve sonucunda da yüksek kalitede ürünler çıkarırlar. Hepimizin bildiği gibi; kaliteyi bozmadan çok mal üretmek, yüksek şirket kârı demektir. Yüksek şirket kârı da sadece yurt içinde değil, dünya piyasalarında da söz sahibi olmayı sağlar. Robot üreticileri ve uygulama şirketleri yüksek performans, güvenilirlik ve süreklilik konusunda garanti vererek çalışırlar. Robotlar hasta olmazlar, herhangi bir sosyal sigorta gideri gerektirmez yemezler ve içmezler, psikolojik sorunları yoktur. Yapılacak işe itiraz etmezler, ayrılan işçinin yerine aynı vasıflarda işçi bulma zorluğu doğurmazlar. Bu sebeplerden dolayı işvereni mali sıkıntılara sokmazlar ve böylelikle büyük ölçüde nakit kârı sağlarlar. Çalışan personelin hatalarından dolayı oluşabilecek makine problemlerinden doğacak maddi zararların ve zaman kaybının önlenmesini sağlarlar.

### **2.5.2-Yönetimde Sağladığı Yararlar**

Yönetici ile personel arasında yaşanabilecek olumsuz davranışların ve bunlar sonucunda oluşan verimi etkileyecek durumları ortadan kaldırır. Robotlar, asla yorulmadığı ve asla çalışmayı bırakmadığından ötürü, yöneticinin, personel ile ilgili verimlilik kaygılarını ortadan kaldırır. Yöneticiler öğlen yemek paydosu, çay paydosu gibi zaman kaybı yaratan duraklamaları vermek zorunda kalmazlar. Yöneticiler hastalık, rahatsızlık gibi nedenlerden vizite işlemleri ile uğraşmazlar ve zaman kaybetmezler. Personelin işe başlamadan önceki hazırlığında kaybedilen zamanları otomatik olarak kazanmış olurlar. Yöneticiler günden güne artan personel masrafları, maaş zamları gibi maddi yükümlülüğü fazla ve cirosu gitgide yükselen harcamalarından tasarruf etmiş olurlar.

### **2.5.3-Personele Sağladığı Yararlar**

Çalışan personel robotlar sayesinde azalan iş gücünden, ağır operasyon gerektiren işlerin üzerinden kalkmasından haz duyar ve mevcut işlerine daha çok önem verir. Tehlikeli ve her gün tekrarlanan rutin işlerde dikkatli olma konusunda, çalışan personel üzerinde, hata yapmamalıyım düşüncesi ile oluşan baskıyı ortadan kaldırır. Çalışan personelin yaptığı işlerde fiziksel esnekliği gerektiren ve çoğu zaman sağlık problemleri ile sonuçlanabilecek riskli durumları ortadan kaldırır.

Personelin sürekli tekrarlayan rutin işlerden dolayı psikolojik olarak yıpranmasını engeller. Robotlar çok esnek çalışma alanlarına sahip olmalarına rağmen, insanın yapabileceği işlerin tamamını üstlenemezler. Her zaman insana ihtiyaç vardır. Çalışan personele yaptığı işin verimini arttırmada büyük faydalar sağlayarak, işçiye destek olurlar. Robotların çalışma ortamına girmesi işçiyi yüksek el becerisi gerektirecek işlerden kurtarır ve işçinin daha verimli, daha az riskli ortamlarda çalışmasına olanak sağlar. Robotların imalat parkurlarına girmesi ve çoğalması her zaman işçilerin sayısının azaltılması anlamına gelmez. Daha da iyisi işçilerin yükünü azaltıp yapılan iş ile ilgili eğitimlerin ve kişisel becerilerin artırılması için olanak sağlar.

#### **2.5.4-Tüketiciye Sağladığı Yararlar**

Tüketici robot almakla kâr etmeye başlar ve üretim için doğrudan etkileşimin ilk adımını atar. İmalat hatalarından arındırılmış yüksek kalitede, maliyeti düşük mallar üretir. Çok detaylı karmaşık etaplara sahip ürünleri kısa sürede ve hızlı olarak piyasaya sürmeye olanak tanır. Ürünlerdeki kalite ve süreklilik sayesinde pazardaki yerini sağlamlaştırır ve yeni pazarlarda ürünlerini sergileme imkânı bulur.

### **3 - TEZİN AMACI VE KAPSAMI**

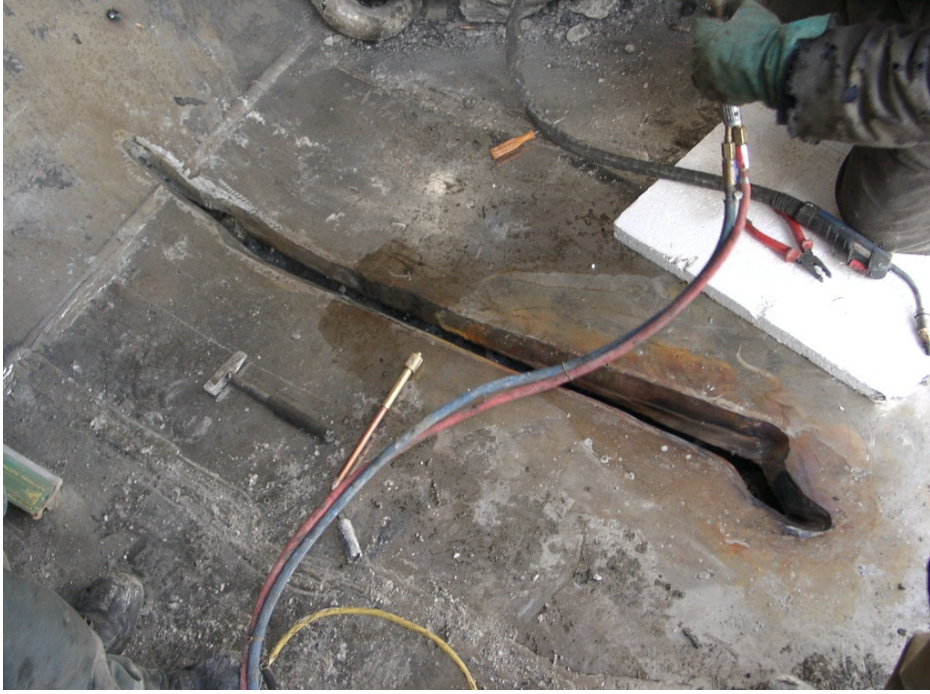
Tez kapsamında üç eksenli kartezyen robot tasarımı amaçlanmıştır. Bu kartezyen robot bir gaz altı kaynak makinesinin torcunu kullanarak üç eksenle kaynak yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kartezyen robot mekanik olarak Demirexport A.Ş Kangal Kömür İşletmesinde bulunan iş makinelerinin, bakım ve onarımı kapsamındaki kaynak işleri düşünülerek boyutlandırılmıştır. Gaz Altı Kaynak makinesi Askaynak MAG TRONIK 500W markadır. Kartezyen robot bu gaz altı kaynak makinesinin torcunu kullanarak  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerinde kaynak işlemi yapacaktır. İş makineleri genelde dış ortamda olduğundan ve atölye içerisine alınamayacak kadar büyük olduğundan kaynak işlerinin tamamı dış ortamda yapılmaktadır. Özellikle kış aylarında hava sıcaklığının -30 lara kadar düştüğü soğuk havalarda kaynakçının dış ortamda çalışması mümkün olmamaktadır. Üretimin devamlılığı açısından yapılması gereken kaynak işinin kartezyen robota yaptırılması amaçlanmıştır. Tez kapsamında öncelikle kartezyen robota yaptırılacak kaynak işleri incelenmiş ve hangi boyutlardaki kaynak işlerinin robot tarafından gerçekleştirilebileceğine bakılarak boyutlandırma işlemine geçilmiştir.

Boyutlandırma işlemi tamamlandıktan sonra AutoCAD programı ile kartezyen robotun katı modeli ve teknik resmi çizilmiştir. Robotun iskeletinin oluşturulmasında 80 lik U profiller kullanılması düşünülmüştür. Kartezyen robotun mekanik iskeletinin 80 lik U profillerin kaynakla birbirine kaynatılmasıyla oluşturulmasının ardından, DKVM lerin monte edilmesi için civata delikleri açılacaktır. DKVM ler bu oluşturulan mekanik iskeletin üzerine civatalarla sabitlenecektir. Bunun için y eksenindeki DKVM ler mekanik iskelet üzerine monte edildikten sonra x eksenindeki hareketi sağlayan DKVM y eksen tablaları üzerine ve z eksenindeki hareketi sağlayan DKVM de x eksen üzerine monte edilerek mekanik tasarım tamamlanacaktır. Robotun kinematik ve dinamik analizi yapılarak uygun kuvvetler bulunacaktır. Bu bulunan kuvvet değerleri baz alınarak servo motorların üretmesi gereken tork değerleri hesaplanacaktır. Bu hesaplanan tork değerlerine göre servo motorlar seçilecektir. Daha sonra robotun x, y ve z eksenlerine ait hareket denklemlerine göre PID kontrol sisteme tasarlanacaktır. PID kontrol ve çeşitli hareket denklemlerinin çözümde Matlab ve Simulink programları kullanılacaktır.



Şekil 3.1 Bakım onarım kapsamında -32 derecede yapılan kaynak işi

Kartezyen robotun mekanik olarak boyutlandırılmasında bakım onarım kapsamındaki kaynak işlemlerinin boyutları ve torç boyutları dikkate alınmıştır. Şekil 3.1 deki resimde kaynak yapılan iş parçası görülmektedir. Bu kaynak işlemindeki kaynak ağzı ise Şekil 3.2 deki gibidir.



Şekil 3.2 Kartezyen manipülör ile kaynatılması düşünölen kaynak ağızı

Burada kaynak robotlarında çok önemli bir faktör olan tekrarlanabilirlik, yani robotun aynı komutla aynı yere yönlendirilmesi esnasında kaynaklanan hata miktarları ortalamasının çok daha üstündeki değerlere izin verebilmektedir. Daha önceki çalışmalarda torcun sapma miktarını 0,5-3 mm arasında olması amaçlanmıştır. Fakat bu kaynak uygulamasında torcun sapma miktarı 5-10 mm olması kaynağın kalitesine olumsuz bir etki yapmayacaktır.

#### **4-MEKANİK SİSTEM TASARIMI**

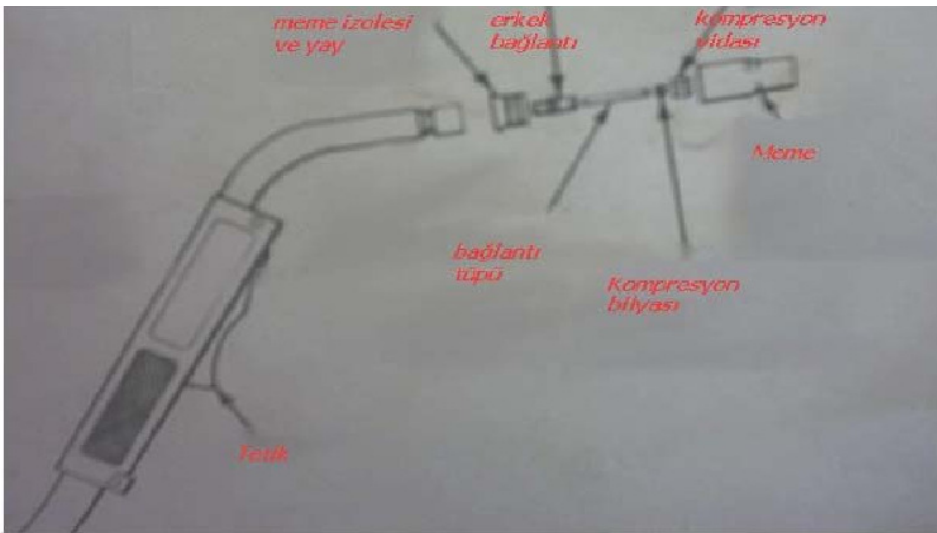
Mekanik sistem tasarımında boyutlandırılma yapılırken kartezyen robotun yapacağı kaynak işleri, gaz altı kaynak makinesinin ve torcun boyutları düşünölererek boyutlandırma yapılmıştır. Kartezyen robot için  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerinde sırasıyla 1100, 700, 650 mm boyutlarında bir dikdörtgen prizma şeklinde çalışma alanı oluşturulmuştur. Bu çalışma alanı düşünölererek robot boyutlandırılmıştır. Boyutlandırma işleminden sonra teknik resimler çizilmiş ve mekanik iskeleti oluşturmak için malzeme araştırması yapılmıştır. Maliyetinin ve uygulanabilirliğinin kolay olmasından dolayı, mekanik iskeletin oluşturulmasında 80'lik U profillerin kullanılması düşünölmüştür. U profiller ile oluşturulan mekanik iskeletin üzerine, doğrusal hareket sistemleri (DKVM) lerin monte edilmesi düşünölmüştür.

Şekil 4.1’ de kartezyen kaynak manipülatörünün son işlemcisi olan gaz altı kaynak makinasının torcu görülmektedir. Kartezyen kaynak manipülatörün kaynak torcunu  $x$ ,  $y$ , ve  $z$  eksenlerinde hareket ettirerek kaynak işleni yapması öngörülmüştür.



Şekil 4.1 Standart gaz altı kaynak torcu

Şekil 4.2’de standart gaz altı kaynak makinasının torcunun iç yapısını gösteren şematik bir çizim görülmektedir. Buradaki tetik devresi bir çok gazaltı kaynak makinasında otomatik olarak bulunmaktadır. Yani kaynakçı torcun tetiğine bir defa bastığında kaynak işlemi başlar ve kaynakçı tetik düğmesine ikinci bir kez basana kadar kaynak işlemi devam eder. Tel besleme, voltaj ve akım ayarı gibi tüm işlemler gazaltı kaynak makinası tarafından yapılır. Burada kartezyen manipülatörün görevi sadece torcu istenen yönlerde hareket ettirmektir.



Şekil 4.2 Standart gaz altı kaynak torcu şeması



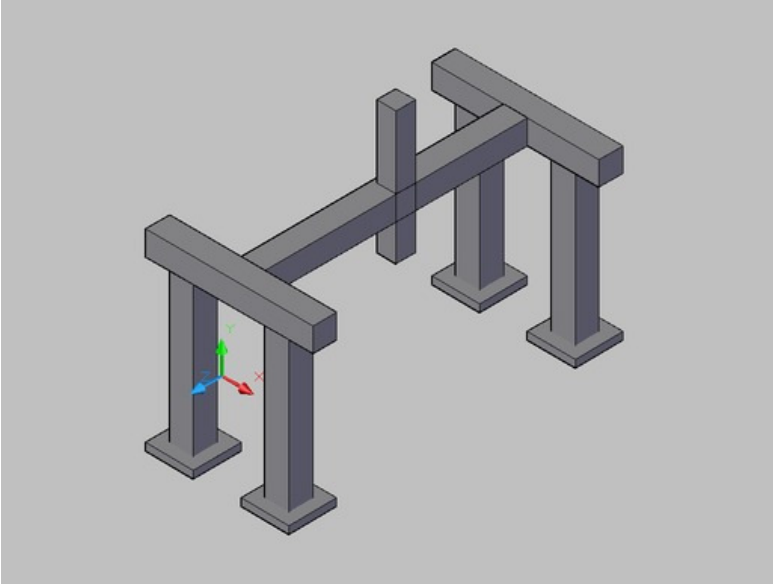
Şekil 4.3 Gaz altı kaynak makinesi ve ünitesi

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 deki gaz altı kaynak makinesi torcunun boyutlarına göre mekanik sistemin boyutlandırılması yapılmıştır. Üç eksenle kaynak yapabilen kartezyen manipülatör boyutlandırıldıktan sonra şematik olarak AutoCAD programında çizilmiştir.

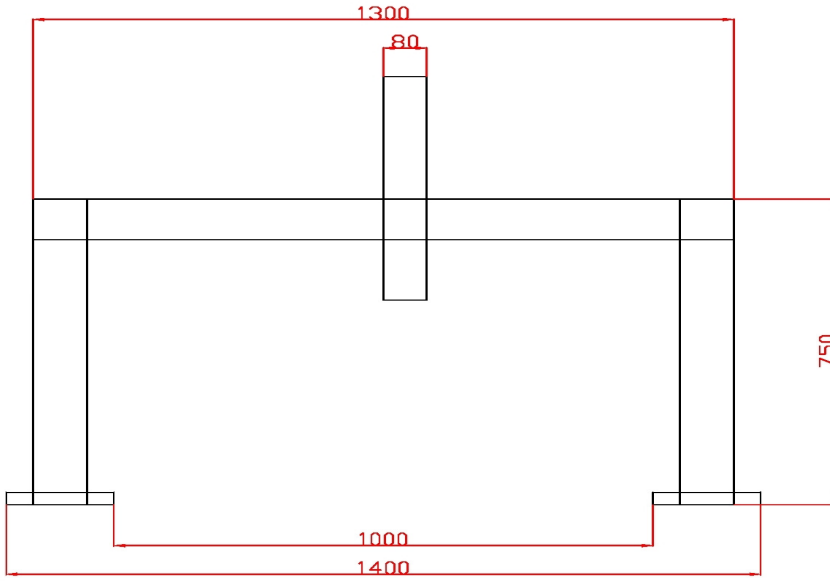
#### 4.1- Mekanik Sistemin Boyutlandırılması

Kartezyen manipülatör boyutlandırılırken, bakım onarım kapsamındaki kaynak işleri düşünülerek boyutlandırılmıştır. Kartezyen manipülatörün genelde çatlakları kaynatılacağı düşünülerek  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerinde sırasıyla 1100, 700, 650 mm boyutlarında bir dikdörtgen prizma şeklinde çalışma alanı oluşturulmuştur. Bu çalışma alanı düşünülerek robot boyutlandırılmıştır.

AutoCAD programı kullanılarak kartezyen manipülatör 1/8 ölçeğinde gerçek boyutlarına uygun üç boyutlu katı modeli ve teknik resimleri çizilmiştir. AutoCAD programı ile çizilen teknik resimler Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 de gösterilmiştir.

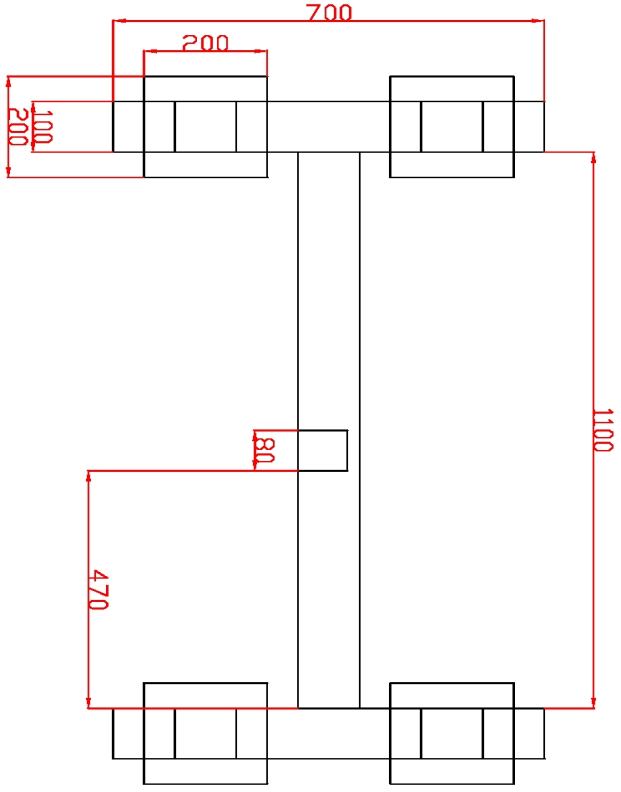


Şekil 4.4 Mekanik sistemin şematik çizimi

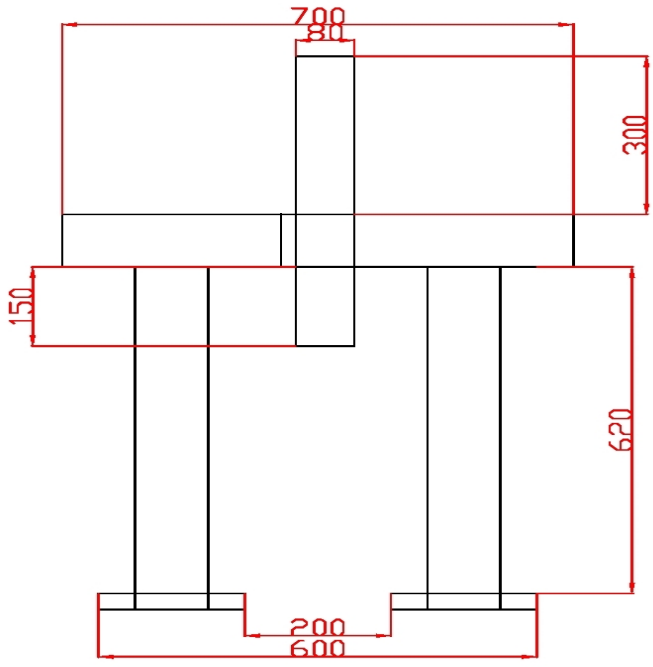


Şekil 4.5 Mekanik sistemin AutoCAD programıyla çizilen ön görünüşü

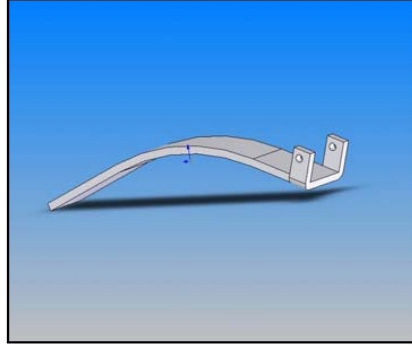




Şekil 4.6 Mekanik sistemin AutoCAD programıyla çizilen üst görünüşü



Şekil 4.7 Mekanik sistemin AutoCAD programıyla çizilen sol yan görünüşü



Şekil 4.8 Torç askısı

#### **4.2-Mekanik sistemin oluşturulması ve DKVM'ler.**

##### ***Torç askısı:***

Kaynak yapılırken kaynak torcunun darbe ve titreşimlerden etkilenmemesi gerektiğinden, tutucu ve torç arasında rijit bir bağlantı sağlanması amacıyla kaynak torcunun orijinal askı demiri sökülerek yerine alüminyum alaşımdan, taşıyıcı ve torcun ölçülerine uygun bir parça imal edilmiştir.

##### ***Limit sensör (sınır anahtar) tutucu:***

Kaynak robotunun, istenilen bir hareketi hatasız tekrarlayabilmesi için, öncelikle sistemin sıfır noktalarını bulması gerekmektedir. Bu nedenle sisteme sınır anahtarları eklenmiştir. Sınır anahtarları ayrıca kaynak torcunun tarama alanı sınırlarına geldiğinde, işlemin durmasını sağlamaktadır.

##### ***Doğrusal hareket sistemler:***

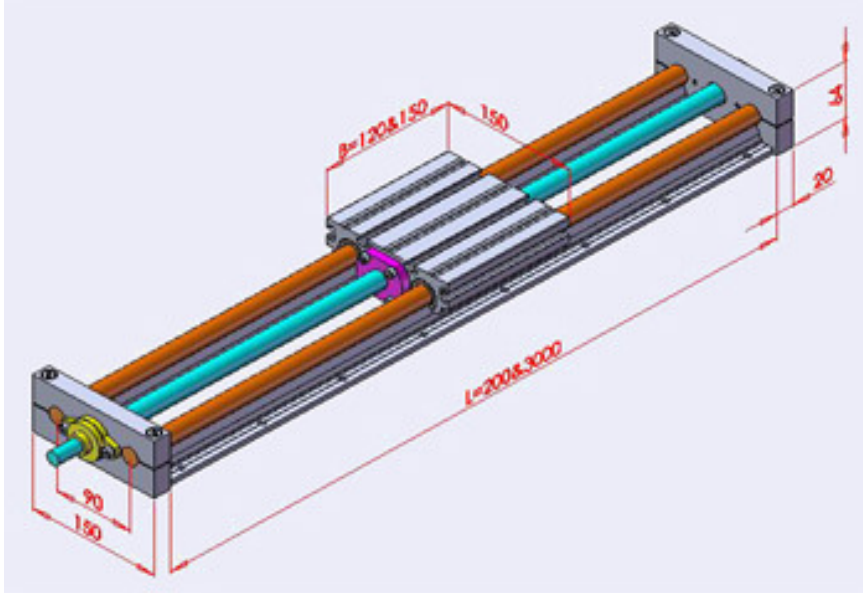
Kartezyen koordinatlı kaynak robot kolu tasarlanırken piyasada çeşitli stroklara göre üretilen DKVM lerin kullanılması düşünülmüştür. Kartezyen robotta kullanılması ön görülen DKVM ler Doğuş Kalıp Ltd. tarafından üretilmektedir. Sistemde  $x$ ,  $y$ ,  $z$  eksenlerinde DKVM20 adındaki doğrusal hareket sistemi kullanılması planlanmıştır. Üretici firmadan  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerinde kullanılması düşünülen çeşitli stroklardaki DKVM ler için fiyat ve teknik

özellikleri alınmıştır [24]. Kartezyen manipülatöre uygun doğrusal hareket sistemi DKVM 20 olarak tespit edilmiştir.

x eksenini için DKVM-20 vidalı modül 1100 mm strok

y eksenini için DKVM-20 vidalı modül 700 mm strok (2 Adet)

z eksenini için DKVM-20 vidalı modül 650 mm strok



Şekil 4.9 Doğrusal hareket sisteminin boyutları

Teknik Değerler								
Vidalı Mil					Flanşlı Somun		Tahrik Mili	
Tip	Statik	Dinamik	Mil Hatvesi	Max. Uzunluk	Tip	İlerleme/Tur	Standart	Özel
20-05	15500N	11500N	5 mm	3000mm	FSU20-05	5 mm	Ø15x25	İsteğe Göre
32-05	36300N	19300N	5 mm	6000mm	FSU32-05	5 mm	Ø25x30	İsteğe Göre

Kod	Max. Yükleme Kapasitesi		Statik Momentler		
	Fr	Fa	Mx	My	Mz
Dkvm-30	17330N	8388N	346,4Nm	487Nm	486Nm
Dkvm-20	11288N	5079,4N	298Nm	427Nm	216,5Nm

Şekil 4.10 Doğrusal hareket sisteminin teknik değerleri

Kartezyen kordinatlarda kaynak yapacak robot kolun torcunun kaynak esnasında taşıyacağı maksimum yük 4 kg olduğundan; DKVM ler her konumda bu yükü taşıyabilecek kapasite seçilmişlerdir [21].

Böylece  $y$  ekseninde 700 mm stroka sahip iki adet DKVM-20 kullanılmıştır;  $y$  eksenindeki 700 mm strokundaki DKVM ler üzerine  $x$  eksenindeki hareketi için 1100 mm stroka sahip DKVM-20 kullanılmıştır. Daha sonra  $x$  eksenindeki DKVM-20 nin üzerine  $z$  eksenindeki hareketi sağlamak için 650 mm stroka sahip bir DKVM-20 nin 90° döndürülerek yerleştirilmesi düşünülmüştür. Ayrıca  $z$  eksenindeki DKVM-20 yerleştirilirken  $x$  eksenindeki DKVM nin plakasının yan yüzeyine yerleştirileceğinden 100X100X20 mm ebatlarında sac levhanın  $x$  eksenindeki DKVM nin üzerine monte edilmesi düşünülmüştür. Böylece  $z$  eksenindeki 650 mm stroka sahip DKVM-20 nin bu levha üzerine monte edilmesi öngörülmüştür. DKVM lerin Şekil 4.4 deki ana iskelet üzerine montajının civatarla sağlanması düşünülmüştür. Servo motorlar kaplin ve flanş vasıtasıyla DKVM lere bağlanmıştır [21].

## **5-KAYNAK MANİPÜLATÖRÜNÜN TEKNİK ÖZELLİKLERİ**

### ***Robotun Ölçüleri ve Kullanım Alanı***

*$x$  eksen uzunluğu :1100 mm*

*$y$  eksen uzunluğu :700 mm*

*$z$  eksen uzunluğu:650 mm*

Bu değerler robotun mekanik boyutlarını göstermektedir. Robotun çalışma alanı içerisinde tarayabildiği alan, DKVM ler tarafından oluşturulan bu alan ile sınırlıdır. Yani robotun çalışma alanı 1100X700X650 mm dir. Bu alan içerisinde robot farklı ekipmanlar monte edildiğinde kesme, boyama gibi işlemleri de yapabilir.

### ***Tekrarlanabilirlik***

Daha önce de belirtildiği gibi, genel amaçlı robotlarda tekrarlanabilirlik değerinin 0,1 mm ile 0,2 mm olması yeterli olabilmektedir. Ark kaynağı uygulaması göz önüne alındığında tekrarlanabilirlik değerinin kaynakta uygulanacak tel çapının yarısından küçük olması gerekmektedir. Bu durumda uygulamada kullanılan 0,8 mm gaz altı kaynak teli çapının yarısı olan 0,4 mm kıstas alınmalıdır. Fakat daha önceden de bahsedildiği gibi bu kartezyen robotla yapılan kaynak işlemleri çok hassas olmadığından (kaynatılan kısım oldukça büyük olduğundan) tekrarlanabilirlik toleranslarında 7-8 mm kadarlık bir sapma dahi problem teşkil etmemektedir.

## **5.1 Kaynak Hızları**

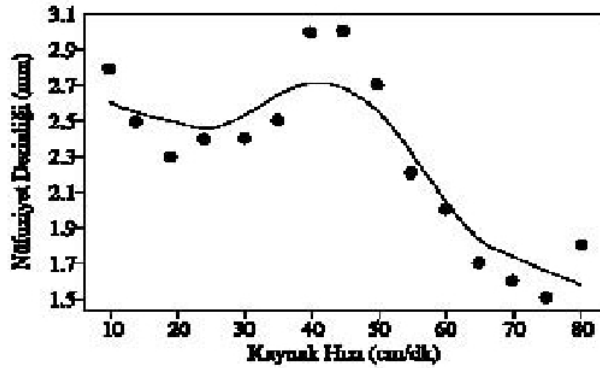
### **5.1.1-Kaynak Hızının Ark Kaynağına Etkileri**

Kaynak hızı, kaynak arkının iş parçası boyunca hareketi ya da birim zamanda yapılan kaynak dikişi boyu olarak bilinmektedir. Kaynak hızının artması veya azalması durumlarında kaynak yapılan malzemeye değişik oranlarda ısı girdisi uygulanmaktadır. Isı girdisinin bir sonucu olarak mikro yapıda ve nüfuziyette birtakım değişiklikler olmaktadır. Kaynak işlemi esnasında hız yavaş olduğu zaman birim uzunluğa yığılan kaynak metali artar ve bu da kaynak banyosunun büyümesine sebep olur. Kaynak metalinin büyümesi ve ısı girdisinin artmasıyla akışkan hale gelen sıvı metal kaynak ağzı içinde arkın önüne doğru akar, düzgün ark oluşumunu etkiler. Hızın artması birim uzunluğa verilen kaynak ısısının azalmasına ve dolayısıyla da ana metalin ergiyen miktarının azalmasına neden olur, bu da kaynak dikişi ıslatmasını olumsuz yönde etkiler.

### **5.1.2- Gazaltı Ark Kaynağında Optimum Kaynak Hızları**

Kaynak işleminde sürekli bir kaynak hızından söz edebilmek için kaynak torcunu sabit hızlarda sürebilen bir robot ya da ray üzerinde hareket edebilen otomatik hız arabaları gibi sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemler sayesinde kaynak işlemi değişik hızlarda uygulanıp optimum hızlar gözlemlenebilmektedir.

Gazaltı ark kaynağında otomatik arabalar ile yapılan deneylerde malzemenin cinsine, kalınlığına ve tel çapına bağlı olarak 40-60 cm/dak arasındaki hızların mikro yapı ve nüfuziyetin en tutarlı olduğu kaynak hızları olduğu görülmüştür. Nitekim Durgutlu, Gülenç ve Tülbentçi çalışmalarında 245A akım şiddeti, 1,2 mm çapında SG2 kaynak teli ile 10 mm kalınlığındaki Paltina (CK45) malzemeye çekilen dikişlerde en ideal kaynak dikişinin 40 ve 45 cm/dak kaynak hızlarında elde edilmiş ve bu hızlarda nüfuziyet 3 mm olarak tespit edilmiştir. Kaynak metalinin ana metali ıslatması bu hız değerlerinin daha aşağısında veya yukarısındaki değerlerde azalmaktadır. Kaynak hızı arttıkça kaynak dikişi çok ince bir hal almakta ve dikiş kenarlarında yanma oyukları meydana gelmektedir [25].



Şekil 5.1 Gazaltı kaynak hızı-nüfuziyet ilişkisi

### 5.1.3- Kartezyen Koordinatlı Kaynak Manipülatörü İçin Kaynak Hızı Hesabı

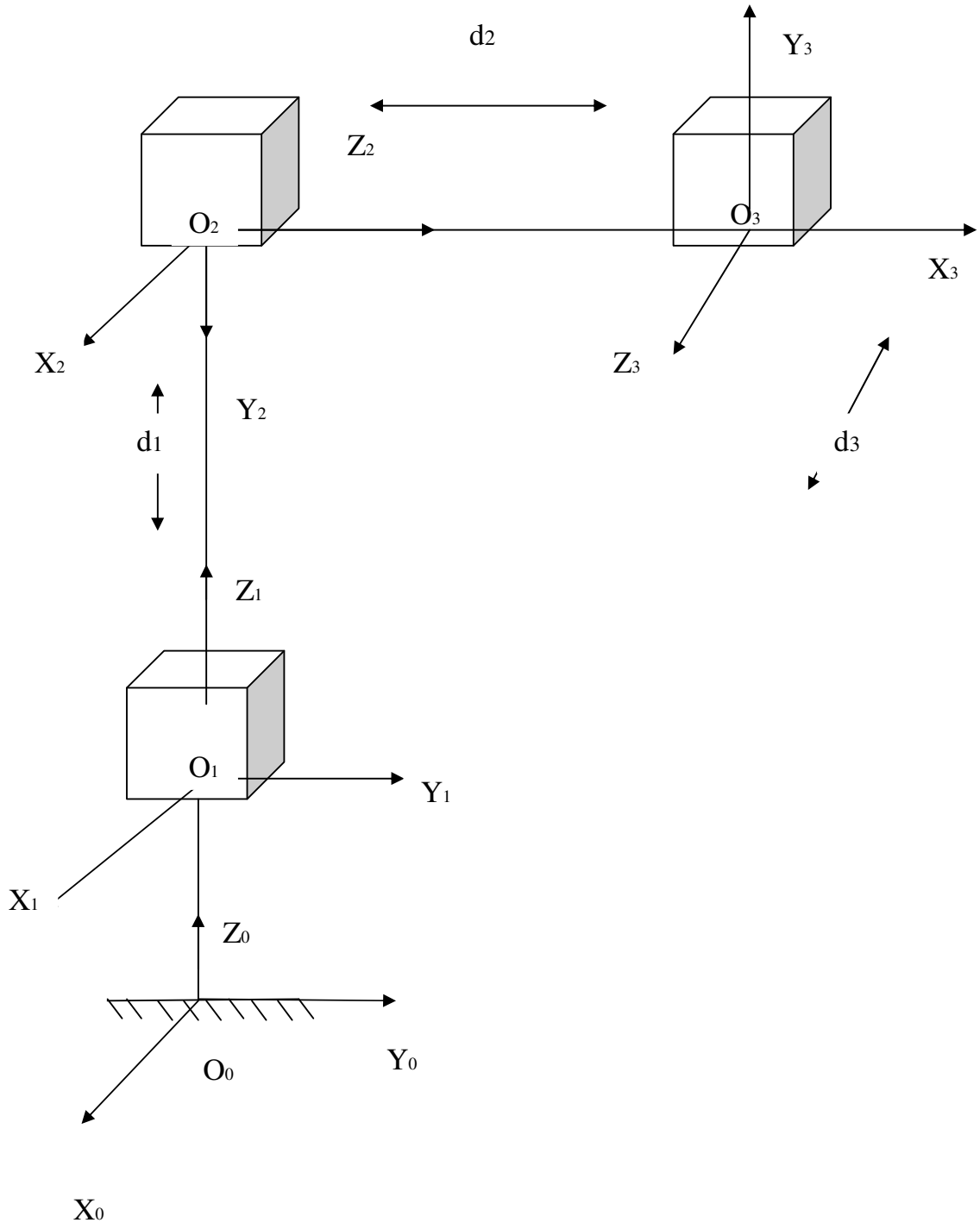
Kartezyen koordinatlı kaynak robotunda hareket sağlayıcılar, servo motorları ve onlara direkt bağlı DKVM sistemi olduğu için, robotun kolun hareket hızını doğrudan etkileyen kontrol yazılımı servo motor ve servo sürücüler ile belirlenir. Kartezyen robotta kullanılması düşünülen servo motorlar servo sürücüler ve bilgisayar programı ile istenilen hızda hareket ettirilebilmektedir.

Kartezyen robotta hazır doğrusal hareket sistemleri kullanılmıştır. Bu Doğrusal hareket sistemleri (DKVM) ler servo motorunun bir tur dönmesine karşılık 5 mm lik ilerleme hareketi yapmaktadır. DKVM leri oluşturan vidaların hatvesi 5mm dir.

Gazaltı ark kaynağında otomatik arabalar ile yapılan deneylerde malzemenin cinsine, kalınlığına ve tel çapına bağlı olarak 40-60 cm/dak arasındaki hızların mikro yapı ve nüfuziyetin en tutarlı olduğu kaynak hızları olduğu görülmüştür. Kartezyen robot gerçekleştirilemediğinden ve gereken deneysel veriler alınamadığından kartezyen manipülatörün hızınının daha önceki çalışmalardan 40-60 cm/dak arasında bir hızda olması gerektiği sonucu çıkarılmaktadır. Bu kaynak hızı kaynak edilen malzeme cinsine ve kaynak ağzının genişliğine ark türüne göre (kısa ark, uzun ark, spreyc ark) değişebilmektedir. Deneysel verilere göre optimum kaynak hızı seçilebilir.

## 6 - KARTEZYEN MANİPÜLATÖRÜN KİNEMATİK ANALİZİ

Kartezyen robotun kinematik analizi yapılırken Denavit Hartenberg gösterimi esas alınarak her eksenindeki hareket matrisleri ayrı ayrı yazılıp çarpılmıştır [26].



Şekil 6.1 Kartezyen manipulatörün kinematik analizi

Kartezyen koordinatlı kaynak robotu  $x$  eksenindeki  $d_2$  mesafesinde 1100 mm,  $y$  eksenindeki  $d_1$  mesafesinde 700 mm ve  $z$  eksenindeki  $d_3$  mesafesinde 650 mm hareket edebilmektedir.

Link	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	$d_1^*$	0
2	0	-90	$d_2^*$	0
3	0	-90	$d_3^*$	0

## 6.2 Kartezyen manipülâtörün uzuv parametreleri

uzuv uzunluğu  $a_i$  :  $x_i$  boyunca  $o_i$  'den  $x_i$  ve  $z_{i-1}$  'nin kesişimlerine olan uzaklık

Uzuv ofseti  $d_i$  :  $z_{i-1}$  boyunca  $o_{i-1}$  'den  $x_i$  ve  $z_{i-1}$  'in kesişimlerine olan uzaklık

Uzuv bükümü  $\alpha_i$  :  $x_i$  etrafında  $z_{i-1}$   $z_i$  arasındaki açı

Eklem açısı  $\theta_i$  :  $z_{i-1}$  etrafında  $x_{i-1}$   $x_i$  arasındaki açı

$$A_i = Rot.z, \theta_i, Trans.z, d_i, Trans.x, a_i, Rot.x, \alpha_i \quad [6.1]$$

Buradaki matrisler ayrı ayrı yazılıp çarpıldıktan sonra  $A_1$  matrisi elde edilir.

$$Rot.z, \theta_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad z \text{ ekseninde dÖnme matrisi} \quad [6.2]$$

$$Trans.z, d_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [6.3]$$

$$Trans.x, a_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [6.4]$$

$$Rot.x, \alpha_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_1 & -s\alpha_1 & 0 \\ 0 & s\alpha_1 & c\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [6.5]$$



$$\sin 0 = 0$$

$$\cos 0 = 1$$

$$Rot.z, \theta_1, Trans.z, d_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot.z, \theta_1, Trans.z, d_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot.z, \theta_1, Trans.z, d_1, Trans.x, a_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = Rot.z, \theta_1, Trans.z, d_1, Trans.x, a_1, Rot.x, \alpha_1$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[6.6]

$$A_2 = Rot.z, \theta_2, Trans.z, d_2, Trans.x, a_2, Rot.x, \alpha_2$$

Buradaki matrisler ayrı ayrı yazılıp çarpıldıktan sonra  $A_2$  matrisi elde edilir.

$$Rot.x, \alpha_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_2 & -s\alpha_2 & 0 \\ 0 & s\alpha_2 & c\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot.z, \theta_2 = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 & 0 \\ \sin 0 & \cos 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot.z, \theta_2 Trans.z, d_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Trans.x, a_2 Rot.x, \alpha_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_2 & -s\alpha_2 & 0 \\ 0 & s\alpha_2 & c\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Trans.x, a_2 Rot.x, \alpha_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = Rot.z, \theta_2 Trans.z, d_2 Trans.x, a_2 Rot.x, \alpha_2$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [6.7]$$

$$A_3 = Rot.z, \theta_3, Trans.z, d_3, Trans.x, a_3, Rot.x, \alpha_3$$

Buradaki matrisler ayrı ayrı yazılıp çarpıldıktan sonra  $A_3$  matrisi elde edilir.

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [6.8]$$

Üç uzuvlu kartezyen robot için  $A_1, A_2, A_3$  matrisleri;

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Bu matrisler çarpılarak transformasyon matrisi elde edilir.

$T_0^3$  Transformasyon matrisi

$$T_0^3 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 \cdot A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2^* + d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2^* + d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3^* \\ 0 & 0 & -1 & d_2^* + d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Kartezyen kaynak robotu dönme hareketi yapmadığından,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  eksenlerindeki öteleme hareketleri dikkate alınarak  $T_0^3$  dönüşüm matrisi hesaplanır.

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3^* \\ 0 & 0 & -1 & d_2^* + d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[6.9]

## 7- KARTEZYEN MANİPÜLATÖRÜN DİNAMİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Lagrange denklemleri mekanik sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri arasındaki farktan yola çıkarak oluşturulur [27].

$$L = K - V \quad [7.1]$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad [7.2]$$

$L$ =Lagrange işlevi

$K$ =Kinetik enerji

$V$ =Potansiyel enerji

Lagrange denkleminde gerekli terimler yerine konulduğunda aşağıdaki genel hareket eşitliği ortaya çıkar.

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F_d\dot{q} + g(q) + F_s(q) = \tau_c + J^T(q)h \quad [7.3]$$

Denklem [7.3], üç serbestlik dereceli bir robotun genel hareket denklemini ifade eder. Bu denklemde;

- $B(q) \in R^{3 \times 3}$  pozitif simetrik atalet matrisini,
- $C(q, \dot{q}) \in R^{3 \times 3}$  coriolis ve merkezkaç moment matrisini,
- $F_d \in R^{3 \times 3}$  sönümlenme matrisini,
- $g(q) \in R^{3 \times 1}$  yerçekimi kuvveti matrisini,
- $F_s \in R^{3 \times 3}$  statik sürtünme kuvvetini,
- $\tau_c \in R^{3 \times 1}$  eklem moment vektörünü,
- $h \in R^{3 \times 1}$  robot koluna etkiyen kuvvet ve moment vektörü,
- $J \in R^{3 \times 3}$  jacobian matrisini
- $q \in R^{3 \times 1}$  eklem konum değişkenlerini ifade eder.

Bu denklem üç eksenli kartezyen robot için aşağıdaki gibi yazılır.

$$B\ddot{q} + F_d\dot{q} + F_s q + Bq = F_c - J^T F_e \quad [7.4]$$

Burada, kartezyen robotun yapısından dolayı diyagonal atalet matrisi,  $B$  ve diyagonal jacobian matrisi,  $J$  eklem pozisyon değişkenlerinden bağımsızdır. Aynı sebepten dolayı sistemde Coriolis, merkezkaç ve eklem momentleri de mevcut değildir. Dolayısıyla eklem moment vektörü ve robot kol ucuna etkiyen harici kuvvet ve moment vektörü  $h$  sırası ile  $F_c$  ve  $F_e$  kuvvetlerine dönüşür. Denklem [7.4] eklem uzayında tanımlanmıştır. Direkt kinematik dönüşüm ile robot kol ucu uzayına aşağıdaki gibi dönüştürülebilir.

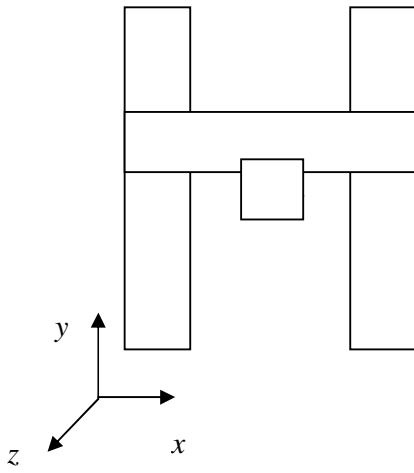
$$M\ddot{r} + D\dot{r} + F_s r + MJg = f - f_e \quad [7.5]$$

Burada,  $M$ ,  $D$ ,  $F_s$  3x3 boyutunda matrisler olup, sırası ile diyagonal kütle, sönümleme, ve statik sürtünme kuvveti matrislerini temsil etmektedir.  $MJg$  yerçekim kuvveti etkisini,  $f$  kontrol kuvvetini ve  $f_e$  robot kolu ucuna etkiyen harici kuvvetleri göstermektedir.

Kartezyen manipülâtörün sadece  $x$  eksenindeki hareketi ele alınırsa;

$$m_x \ddot{x} + d_x \dot{x} + f_{sx} = F \quad [7.6]$$

Kartezyen manipülâtöre  $x$  ekseninde yerçekim kuvvetinin etkisi sıfır kabul edilebilir. DKVM ağırlıkları üretici firmadan alınmıştır [3].



- $x$  eksenindeki DKVM nin toplam ağırlığı: 7 kg
- $y$  eksenindeki DKVM nin toplam ağırlığı: 4 kg
- $z$  eksenindeki DKVM nin toplam ağırlığı: 3.5 kg
- Kartezyen manipülâtörde kullanılan servo motor ağırlığı: 1.7 kg
- Torç ağırlığı = 4 kg

Şekil 7.1 Kartezyen manipülâtörün şematik gösterimi

Torç ağırlığı = 2m uzunluğundaki elektrik kablosu + soğutma suyu + tel + torcun kendi ağırlığı = 4kg

$M_z$ :  $z$  ekseninde servo motorun hareket ettirmesi gerek kütle

$M_y$ :  $y$  eksenindeki servo motorun hareket ettirmesi gereken kütle

$M_x$ :  $x$  ekseninde servo motorun hareket ettirmesi gereken kütle

$M_z$ : Torç ağırlığı + DKVM  $z$  tablası ağırlığı = 4kg + 0,7kg = 4,7 kg

$M_x = M_z + DKVM x$  tablası ağırlığı + DKVM  $z$  toplam ağırlığı +  $z$  eksenindeki servo motor ağırlığı

$M_x = 4,7 + 0,7 + 3,5 + 1,7 = 10,6$  kg

$$M_y = M_x + M_x \text{ servo motor ağırlığı} + M_x \text{ tabla ağırlığı} + M_x \text{ DKVM } x \text{ toplam ağırlığı}$$

$$= 10,6 + 1,7 + 0,7 + 7 = 20 \text{ kg}$$

y eksenindeki yükü iki adet DKVM ve iki adet servo motor karşılmasına rağmen sadece bir servo motora gelen yük dikkate alınmıştır.

$$M_x = 10,6 \text{ kg}$$

$$M_y = 10 \text{ kg}$$

$$M_z = 4,7 \text{ kg}$$

İncelenen kartezyen robotta x, y ve z eksenlerindeki sürtünme kuvvetleri aşağıdaki gibidir.

$F_s$ : Sürtünme kuvveti

$$F_s = K_d \cdot g \cdot M_x$$

$K_d$  = dinamik sürtünme katsayısı

$$K_d = 0,3 \quad \text{DKVM üreticisi firmadan alınmıştır.}$$

$D$  = Sönüm katsayısı

$$D = 9 \text{ Ns/m} \quad \text{DKVM üreticisi firmadan alınmıştır.}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F_s = 0,3 \cdot 9,81 \cdot 10,6$$

$$F_{sx} = 31,1 \text{ N}$$

$$F_{sy} = 29,4 \text{ N}$$

$$F_{sz} = 13,8 \text{ N}$$

### Kartezyen Manipülâtörün x Eksenindeki Dinamik Modelinin Çözümü

Manipülâtörün x eksenini yönündeki hareketi ikinci dereceden bir diferansiyel denklem ile ifade edilir. Bu diferansiyel denklem Matlab ortamında çözülür ise,

$$m_x \ddot{x} + d_x \dot{x} + f_{sx} = Fx$$

$$10,6 * \ddot{X} + 9 * \dot{X} + 31,12 * \text{Sgn}(x) = Fx \quad [7.6]$$

$$\text{dsolve('10.6*D2x+9*Dx+31.12=0,x(0)=0,Dx(0)=0.0001')}$$

$$X(t) = -16494077/4050000 * \exp(-45/53 * t) - 778/225 * t + 16494077/4050000$$

$$\dot{X}(t) = 206340886197278505/59672695062659072 * \exp(-45/53 * t) - 778/225$$

$$\ddot{X}(t) = -175195092054293055/59672695062659072 * \exp(-45/53 * t)$$

$t = 2$  saniyede konumun maximum olduğu noktadaki  $F$  kuvveti bizim  $F_{max}$  kuvvetimizdir.

$$X(t) = -3.5883$$

$$\dot{X}(t) = -2.8249$$

$$\ddot{X}(t) = -0.5374$$

Matlab ortamında türevler alınıp [7.6] denkleminde yerine konduğunda  $x$  eksenindeki  $F$  kuvveti  $F_x = 62,23$  N bulunur. Buradan servo motorunun üretmesi gerek tork;

$$T_m = F_x \cdot r = 62,23 \cdot 0,02 = 1,24 \text{ Nm}$$

şeklinde hesaplanır.

### Kartezyen Manipülâtörün $y$ Eksenindeki Dinamik Modelinin Çözümü

Manipülâtörün  $y$  eksenindeki hareketi ikinci dereceden bir diferansiyel denklem ile ifade edilir. Bu diferansiyel denklem Matlab ortamında çözülür ise,

$$m_y \ddot{y} + d_y \dot{y} + f_{sy} = F_y$$

$$10 * \ddot{Y} + 9 * \dot{Y} + 29.4 * \text{Sgn}(y') - F_y \quad [7.7]$$

$$\text{dsolve('10*D2y+9*Dy+29.4=0,y(0)=0,Dy(0)=0.0001')}$$

$$Y(t) = -98003/27000 * \exp(-9/10 * t) - 49/15 * t + 98003/27000$$

$$\dot{Y}(t) = 98003/30000 * \exp(-9/10 * t) - 49/15$$

$$\ddot{Y}(t) = -294009/100000 * \exp(-9/10 * t)$$

$$Y(t) = -3.5036$$

$$\dot{Y}(t) = -2.7267$$

$$\ddot{Y}(t) = -0.4860$$

Matlab ortamında türevler alınıp [7.7] denkleminde yerine konduğunda  $y$  eksenindeki  $F$  kuvveti  $F_y = 58,8$  N bulunur. Buradan servo motorunun üretmesi gerek tork;

$$T_m = F_x \cdot r = 58,8 \cdot 0,02 = 1,17 \text{ Nm}$$

şeklinde hesaplanır.

### Kartezyen Manipülâtörün $z$ Eksenindeki Dinamik Modelinin Çözümü

Manipülâtörün  $z$  eksenindeki hareket ikinci dereceden bir diferansiyel denklem ile ifade edilir. Bu ekseninde yerçekim kuvvetinin etkisi dikkate alınacaktır. Bu diferansiyel denklem Matlab ortamında çözülür ise;

$$m_z \ddot{z} + d_z \dot{z} + f_{sz} + m * g = F_z$$

$$4.7 * \ddot{Z} + 9 * \dot{Z} + 13.8 * \text{Sgn}(z) + 46.1 = F_z$$

$$\text{dsolve('4.7*D2z+9*Dz+59.9=0,z(0)=0,Dz(0)=0.0001')} \quad [7.8]$$

$$Z(t) = -28153423/8100000 * \exp(-90/47 * t) - 599/90 * t + 28153423/8100000$$

$$\dot{Z}(t) = 352199292588899865/52917295621603328 * \exp(-90/47 * t) - 599/90$$

$$\ddot{Z}(t) = -448420330650195/35184372088832 * \exp(-90/47 * t)$$

$$Z(t) = -9.9$$

$$\dot{Z}(t) = -6.5$$



$$\ddot{z}(t) = -0.2767$$

Matlab ortamında türevler alınıp [7.8] denkleminde yerine yazıldığında  $z$  eksenindeki  $F$  kuvveti  $F_z = 119,34$  N bulunur. Buradan servo motorunun üretmesi gerek tork;

$$T_m = F_x \cdot r = 119,4 \cdot 0,02 = 2,38 \text{ Nm}$$

şeklinde hesaplanır.

## 8- HAREKET SAĞLAYICILAR VE SERVO MOTORLARI SEÇİMİ

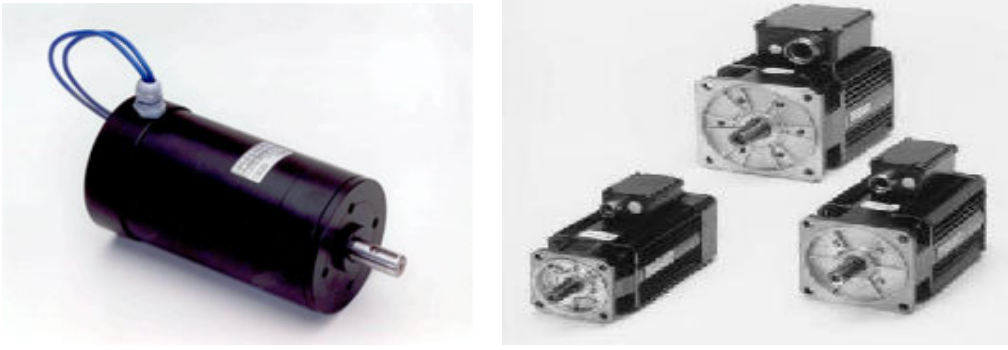
### 8.1 Kartezyen Manipülâtörde Kullanılacak Servo Motorunun Seçimi;

Bölüm 7 de dinamik analiz sonucu eksenlerde ihtiyaç duyulan tork değerleri  $T_x = 1,24$  Nm,  $T_y = 1,17$  Nm ve  $T_z = 2,38$  Nm dir. Dinamik analiz sonucu bulunan tork değerlerine bakıldığında bu değerlere en yakın servo motor ECMA-C30807\_S ve Servo Motor sürücü ASD-B0721-A olarak seçildi [28]. Seçilen servo motor ve sürücünün teknik özellikleri EK-1 ve EK-2 de verilmiştir.

### 8.2 Servo Motorlar

Yaygın dc ve ac motorlar, açık döngü tasarımdırlar. Bir güç kaynağından güç çekerek, bir shaftı veya dişli kutusunu hareket ettirmekle çalışmalarını gerçekleştirirler. Servo motorlar aksine kapalı döngü aygıtlardır. Bir denetleme sinyali sağlandığı zaman, servo motor verilen sinyale uygun olarak hareket eder. Eğer sinyal değişirse, servo motorlar dengeyi sağlarlar. Servo motorlar, kapalı bir döngü pozisyon denetimi içeren dc dişli motorlardır [29].

Bu tür motorlarda stator kutupları tabii mıknatıs oluşturmakta olup; rotor nüve olarak silisyumlu sac paketi ve bu nüve üzerindeki kanallara sarılmış sargılardan meydana gelmiştir. Rotor üzerine sarılmış sargıların uçları rotor üzerinde bulunan bir komitatöre irtibatlanmış olup, karbon fırçalar aracılığıyla DC gerilim komitatör üzerinden sargılara uygulanmaktadır. Dışarıdan uygulanan DC gerilim rotor sargılarında N-S kutuplarının oluşmasını sağlar, tabii mıknatısın karşılıklı N-S kutupları olduğundan rotorun kutuplarından aynı işareti taşıyan kutup itilir, ayrı işaretli kutup çekilir ancak kollektör uçlarından fırçaya temas eden dilim değişmiş olacağından yeniden statorun N kutpu ve S kutupları karşılıklı gelmiş olacaktır. Bu durumda rotor yine itilerek döndürülür. Motora DC gerilim uygulandığı sürece aynı olay sürekli tekrarlanacağından rotor devamlı dönecektir.



Şekil 8.1 Servo Motorlar

Bu tür motorlara uygulanan DC gerilim yönünün değiştirilmesi rotorunda dönüş yönünü değiştirecektir. Motorun devir sayısı uygulanan DC gerilimle doğru orantılı olarak sürekli değişir. Yani bu motorların dönüş yönü ve devir sayısı dışarıdan uygulanan DC gerilimin yönüne ve seviyesine bağlı olarak değişir. Bu sebeple bu motorlara servo (bağıl) kontrollü motorlarda denir. Bu tür motorlarda statorun itici gücü, bir tabii mıknatıs tarafından oluşturulduğu için motor gücü fazla büyük olmamaktadır. Genellikle küçük tip motorlar olup, çeşitli seviyelerde DC gerilimle çalışan türleri vardır. Servo motorlar hızlandırmada ve frenlemede hızlarını kısa sürede değiştirebilirler, 1d/dk'lık hız bölgelerinin altında bile kararlı çalışır, moment kontrolü yapan yardımcı motorlar veya akımı bilezikleri (motor miline yalıtarak takılan halkalar) üzerinden devresini tamamlayabilirler. Bu tür motorlar birkaç milisaniyede durma halinden istenilen dönme hızına ivmelendirilebilirler. Dinamik özellikleri, ivmelendirme ve konumlama yetenekleri yüksek olup konum ve açı denetiminde kullanılırlar [28].

### 8.2.1 Eylemsizlik Momenti

Eylemsizlik momenti elektrik motorlarının önemli bir büyüklüğüdür. Dinamiğin temel yasasının uygulanmasında ve hareket enerjisinin hesaplanmasında eylemsizlik momentinden yararlanır. Servo motor tekniğinde eylemsizlik momentinin küçük olması (atalet momenti) mekanik zaman sabitinin küçük olması demektir ki bu durum daima arzu edilen bir durumdur.

Dinamik işletme şartlarında çalıştıklarından eylemsizlik momentinin önemi servo motorlarda büyüktür. Dinamiğin temel yasasına göre  $\alpha$  açısal ivmesi  $M$  ivmelendirme momenti ile doğru orantılı olup;  $J$  atalet momenti ile ters orantılıdır.

$$M = (M_m - M_L) = J\alpha = J.d\omega/dt$$

$$\alpha = d\omega/dt = M/J$$

$$M_m = \text{Döndürme momenti}$$

$M_L$  : Yük döndürme momenti

$J$  : Tahrikin motor miline indirgenmiş toplam atalet momenti

O halde bir servo motorda hız değişiminin yüksek olması motor momentini arttırarak ve eylemsizlik momentini azaltarak sağlanabilir. Bir cismin bir dönme eksenine göre eylemsizlik momenti, noktasal kütlelerin aynı eksene göre eylemsizlik momentleri toplanarak bulunur.

Kütle tümüyle bir cisme özgü bir özellik olduğu halde eylemsizlik momenti yalnız bir cisim tarafından belirlenemez. Yarı çapı  $r$ , uzunluğu  $l$  ve yoğunluğu  $d$ , olan içi dolu bir silindirin simetri eksenine göre eylemsizlik momenti için şu formüller kullanılır [29].

$$J = 1/2.\pi.d.l.r^2$$

Bulunan denklemden eylemsizlik momentini azaltmanın dört yolu vardır. Bunların en etkili olanı yarıçapı azaltmaktır. Diğer yollar;

- 1- Çapı küçülterek, uzunluğu arttırarak ince uzun rotalar yapılmalı.
- 2- Endüvi sargısını demirden ayırarak sargının demirden bağımsız döndürülmesi.
- 3-Rotor demirinin hiç kullanılmaması ve endüvi sargısını taşıyan yalıtkan bir tepsinin aksenel bir alan içinde döndürülmesi.
- 4-Mukavemeti düşürmeden rotor malzemesinin azaltılması.

### 8.2.2 Servo Motorların Belirgin Özellikleri

- 1- Motor milindeki 40 Nm'ye kadar olan büyük dönme momenti.
- 2- Dönme momentinin, iki katına kadar olan kısa aralık aşırı yük yüklenebilme.
- 3- Yüksek devir kararlılığı; böylece çeşitli yüklerde hızın sabit kalması.
- 4- Yaklaşık 1-10000 arasında devir sayısının ayarlanabilmesi.
- 5- Çok küçük yol adımlarıyla hareket edebilme.
- 6- Küçük atalet momenti sayesinde komutların geciktirilmeden yerine getirilmesinin sağlanması.

### 8.2.3 Servo Motorların Kullanıldığı Yerler

- 1- Bilgisayarlarda ve hafızalı makinelerde
- 2- Endüstriyel aletlerde
- 3- 400 Hz frekanslı olanları askeri silah sanayinde
- 4- Küçük rotorlu saatlerde, oyuncaklarda ve bazı vantilatörlerde
- 5- Elektrik santrallerinde, alternatör devir ayar sistemlerinde

6-Tam otomatik regülatörlerin kumanda sisteminde

Ayrıca sayısal kontrollü makinalarda;

1. Pozisyon belirlenmesinde
2. Çalışma kararlılığının sağlanmasında

Servo motorlar uçaklarda kanat laplerini ve buna benzer cihazların ayarlamalarını yapmak için de kullanılır. Servo motorlar dahili dişli sistemine sahiptirler ve yüksek momentlere ulaşırlar. Çıkış shaftı DC ve step motorlarda olduğu gibi serbestçe dönmez belli açılarda döner. Servo motorlar bunu elektronik shaft yeri algılayıcısı ve bir kontrol devresi ile yaparlar. Servo motorlarda; güç, toprak ve kontrol çıkışı olmak üzere üç çıkış vardır ve çoğunlukla 5 voltta çalışırlar. Kontrol sinyalleri bir dizi vurgudan oluşur ve shaftın istenilen konumunu belirler. Her vurgu bir konum komutunu simgeler ve 180 derece dönebilirler [28].

#### 8.2.4 Servo Motor Çeşitleri

Servo motorlar; konum kontrolü yapan otomatik kontrol sistemlerinde sıklıkla kullanılırlar. Büyük güçlerin kumanda edilmesi gereken otomatik kontrol sistemlerinde geleneksel DC ve AC motorlar kullanılabilir. Servo motorlar DC ve AC olmak üzere iki çeşittir.



Şekil 8.2 Servo Motor Çeşitleri

##### 8.2.4.1 DC Servo Motorlar

Bu motorlar klasik DC motorlar gibi imal edilirler. Genellikle küçük yapıdadır ve endüvileri kutup atalet momentini minimum yapacak şekilde tasarlanmıştır. Küçük çaplı ve genellikle içerisinde bir kompensasyon sargısı olan kuvvetli manyetik alanlı, boyu uzun doğru akım motorlarına servo motorlar denir.



Şekil 8.3 DC Servo Motor

Doğru akım servo motorunda yüksek bir dönme momenti ve aşırı yüklenebilirlik elde etmek için özellikle şiddetli bir manyetik alan oluşturulmalıdır. DC servo motorlar en büyük dönme momenti kısa çalışmalar sırasında ve en küçük devir sayısı anma dönme momentinin 4 katıdır. Özellikle hızlı tepkili servo motorların milinde, içerisinde demir bulunmayan doğru akım motorları kullanılır. DC servo motorlar yaklaşık 1 kW'a kadar olan güçlerde yapılırlar. Bu motorlar; endüvi, endüktör, gövde, fırça ve kolektörden meydana gelir. Motorun dönme hareketi endüktör sargılarına uygulanan DC akımın oluşturduğu manyetik alan ile aynı DC akımın fırça ve kolektörden geçilerek endüvi sargılarına uygulanması sonucu oluşan endüvideki manyetik alanın etkisi sonucu meydana gelmektedir. Endüktördeki döner manyetik alanın etkisi endüvideki alan nedeniyle endüvinin dönmesini sağlar [29].

### **Özellikleri.**

1. Enerji kısımları asıl motorlara göre daha az enerjiye ihtiyaç gösterirler.
2. Motor çapı normal DC motorlara göre daha küçüktür.
3. Servo motorların boyları uzundur.
4. Rotorun dönme momenti rotor çapına bağlı olarak değişir.
5. Atalet momenti küçüktür.

#### 8.2.4.2 AC Servo Motorlar

Bu tip servo motorlar genellikle iki fazlı sincap kafesli indüksiyon tipi motorlardır. İki fazlı asenkron motorlar büyük güçlü yapılmakla birlikte, çoğunlukla otomatik kontrol sistemlerinde servo motor olarak kullanılmak amacıyla küçük güçlü yapılabilirler. Bu servo motorların fırça ve kollektörleri olmadığından arıza yapma ihtimalleri az, bakımları kolaydır [28].



Şekil 8.4 AC Servo Motorlar

İki fazlı servo motorun statorunda eksenleri arasında 90°'lik elektriksel açı olan referans ve kontrol sargısı olmak üzere iki adet sargı vardır. Rotoru ise sincap kafesli sargı taşır fakat yüksek dirence sahip olması gibi bir takım özellikler kazandırılmıştır. AC servo motorlarında rotor devresi oldukça yüksek dirence sahip olacak şekilde imal edilir. Bu işlem ya sincap kafes çubuklarıyla ya da çubukların bağlantı noktalarında yüksek dirençli maddeler kullanılarak yapılır. Bunun sağladığı fayda motor ileri ve geri yönde çalışırken hız momenti yüksek olur ve bu etkilere bağlı olarak manyetik akı artar. Bu şekilde bir fazın momenti frenlenebilir. Çünkü hızın yönü momentin yönüyle tersdir.

#### AC Servo Motorların Avantajları Ve Dezavantajları

Bakım gerektirmeyen AC servo motorların geniş ürün yelpazesi 0,15 Nm'den 104 Nm 'ye kadar moment değerleri arasında 10000 d/dk efektif NC hızına kadar olan bütün güç ve uygulama ihtiyaçlarına cevap vermektedir. Bu servo motorların başlıca faydaları:

1. Elektro-mekanik parçaların bulunmaması nedeniyle tüm hız bölgelerinde yüksek kullanılabilir tepe moment değerleri.
2. Çok uygun moment / eylemsizlik momenti oranı sayesinde üstün dinamik özellikleri
3. Stator sargılarında etkin ısı dağıtımı sayesinde yüksek yükleme kapasitesi

4. Yüksek moment ve hız kullanımını sayesinde uygun güç ağırlık oranı
5. Motor koruma normuna göre tamamıyla kapalı tasarım sayesinde en olumsuz çevre koşullarında dahi yüksek güvenli operasyon.
6. Aşınmaya maruz elektro-mekanik parçalar kullanılmadığından maksimum güvenlik ve bakım gerektirmeden çalışma imkanı.
7. Modüler yapı ve düşük motor ağırlıkları sayesinde birçok değişik uygulamalara uygunluk sağlaması.

AC servo motorun en önemli avantajı, motor hareket halindeyken elektriksel kontak bağlantısının bulunmamasıdır. Bu durum yüksek kullanılabilirlik ve arıza oranının azalmasını sağlar. AC servo motorun dezavantajları: Verimleri düşüktür, gövde üzerinde yüksek ısılar oluşturur, motoru besleyen güç kaynağının kare dalga olması gerekir.

### **8.3 Servo Motor Sürücüleri**

Servo motor sürücüleri, 90X190mm ebatlarında sac kutu içinde, DIN normlarına uygun, kontrol akımı ve motor durumunu belirten göstergelere sahip, otomatik ve elle kumandalı tamamen katlı hal (solid state) tekniği ile tasarlanmış elektronik cihazlardır. Servo motor sürücüleri ile sürülen bek ve brülörler ve vanaya bağlantı yapılabilen servo motorlar; oransal kontrol istenilen her türlü endüstriyel sistemin kontrolünde kullanılmaktadır.

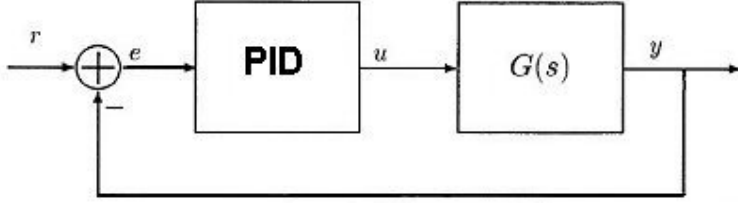
AC servo motor sürücülerin geniş ürün yelpazesi her bir müşterinin ayrı güç ve uygulama ihtiyacını teknik ve ekonomik açıdan en iyi şekilde karşılayacak çözümleri aşağıdaki özellikleri sebebiyle sunmaktadır.

1. Değişik motor boyutları ve modüler sürücü elektronik devreleri sayesinde makine tasarımlarını gerçekleştirirken maksimum esneklik.
2. Hızlı ileri-geri hareketlerde motorların yüksek dinamik yükleme kapasitesi ve kısa sürede istenilen noktaya eriştirilmesi sonucu artan verimlilik ve kesintisiz üretim. Pozisyon, hız ve ivmesinin tam hassas kontrolü ile gelişmiş ürün yelpazesi.
3. Aşınmaya maruz elektro mekanik parçaların olmaması ve çok az bakım gerektirmesi sonucu uzun süreli çalışma imkanı.
4. Güç kaynaklarının depoladıkları elektrik enerjisinin yeniden kullanılabilme özelliği ile azalan işletme giderleri [29].

## 9-KARTEZYEN MANİPÜLATÖRÜN KONTROLÜ

### 9.1 PID Kontrol

PID (Proportional-Integral-Derivative) günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemidir. Endüstrideki uygulamaların %75'inde kullanılmaktadır. Çok geniş bir uygulama alanının olmasına rağmen PID uygulamaları için standart bir tanımlama yoktur [30].



Şekil 9.1 PID kontrolün şematik gösterimi

Karl Astrom'a göre PID algoritması aşağıdaki gibidir [31].

$$u(t) = K[e(t) + 1/T_i \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad [9.1]$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad [9.2]$$

Burada  $u(t)$  kontrol değişkeni,  $e(t)$  kontrol hatası,  $y(t)$  çıkıştan ölçülen değerle aynıdır.  $K$ ,  $T_i$  ve  $T_d$  PID kontrol kazanç değerleridir. Yukarıdaki formülü biraz daha basite indirirsek:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) \quad [9.3]$$

**P:** Oransal

**I:** İntegral

**D:** Türevsel

$$P_s = K_{p_s} S(t), \quad I_s = K_{i_s} \int_0^t S(\tau) d\tau, \quad D_s = K_{d_s} \frac{dS(t)}{dt} \quad [9.4]$$

Kartezyen manipülatörün  $x$  eksenindeki hareket denklemi aşağıdaki gibidir.

$$m_x \ddot{x} + d_x \dot{x} + f_x x = F$$



$$10,6 * \ddot{X} + 9 * \dot{X} + 31,12 * X = F$$

Yukarıdaki denklemin Laplace dönüşümünü alırsak;

$$10,6 * s^2 X(s) + 9 * sX(s) + 31,12 * X(s) = F(s)$$

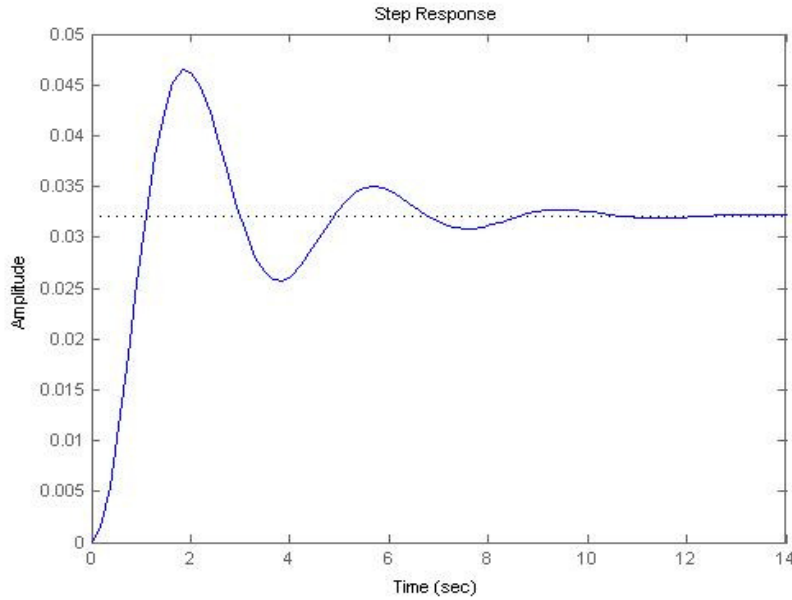
$$X(s)[10,6s^2 + 9s + 31,12] = F(s)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{10,6s^2 + 9s + 31,12} \quad [9.5]$$

Sistemin açık döngü adım tepkisi Matlab komutları ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

```
>> num=1;  
>> den=[10.6 9 31.12];  
>> step(num,den)
```

Matlab da yukarıdaki komutları girdiğimizde aşağıdaki grafiği elde edilir.



Şekil 9.2 Sistem transfer fonksiyonunun adım tepkisi

### 9.1.1 Oransal kontrol (P)

Oransal kazancı ( $K_p$ ) 300'e eşit kabul edersek,

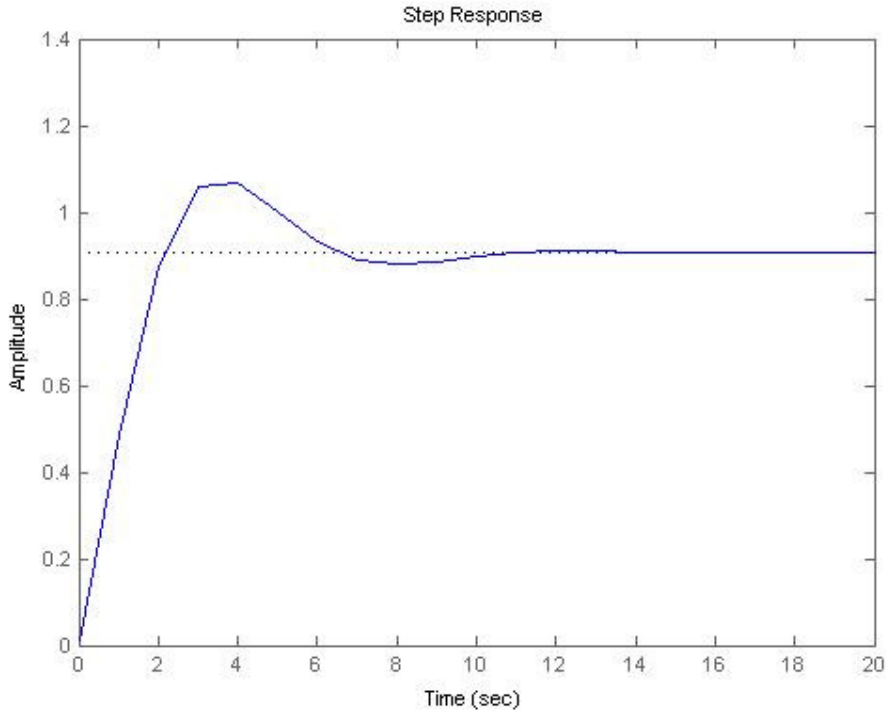
$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K_p}{10.6s^2 + 9s + 31.12 + K_p}$$

[9.6]

Matlab komutları aşağıdaki gibi olur.

```
Kp=300;  
num=Kp;  
den=[10.6 9 31.12+Kp];  
t=0:1:20;  
step(num,den,t)
```

Yukarıdaki kodlar Matlab da yazıldığında aşağıdaki grafik elde edilir.



Şekil 9.3 Sistemin Matlab ortamında oransal (P) kontrol altındaki adım tepkisi

### 9.1.2 Oransal-Türevsel Kontrol (PD)

$K_p$  yi 300 ve  $K_d$  yi 10 alırsak PD kontrol aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K_p}{10.6s^2 + (9 + K_d)s + (31.12 + K_p)} \quad [9.7]$$

$K_p=300$ ;

$K_d= 0$ ;

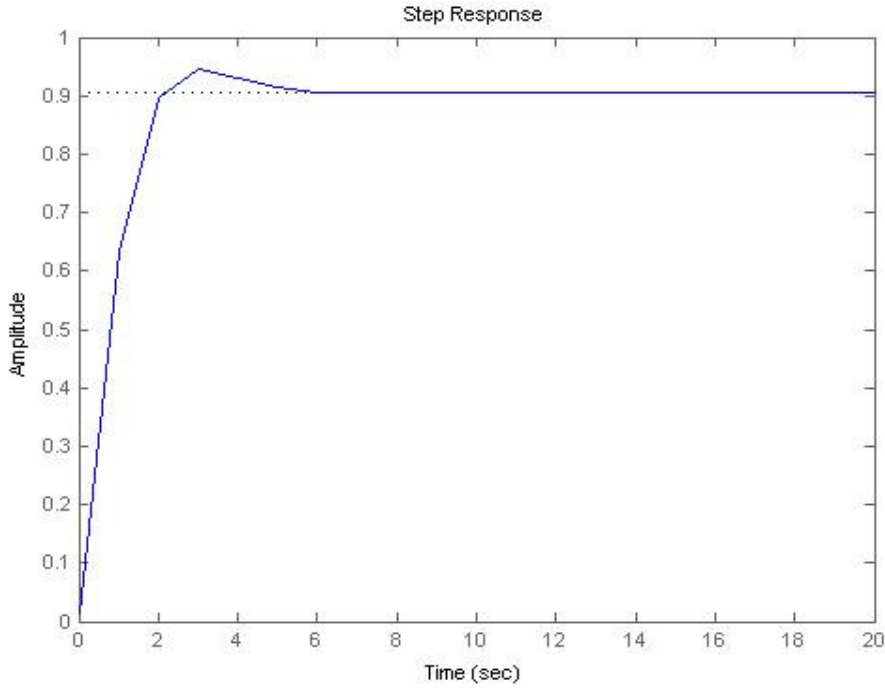
$\text{num}=[K_d \ K_p]$ ;

$\text{den}=[10.6 \ 9+K_d \ 31.12+K_p]$ ;

$t=0:1:20$ ;

$\text{step}(\text{num},\text{den},t)$

Matlab da yukarıdaki komutları girdiğimizde aşağıdaki grafiği elde ederiz.



Şekil 9.4 Sistemin Matlab da oransal-türevsel (PD) kontrol ile verdiği adım tepkisi

### 9.1.3 Oransal – İntegral Kontrol (PI)

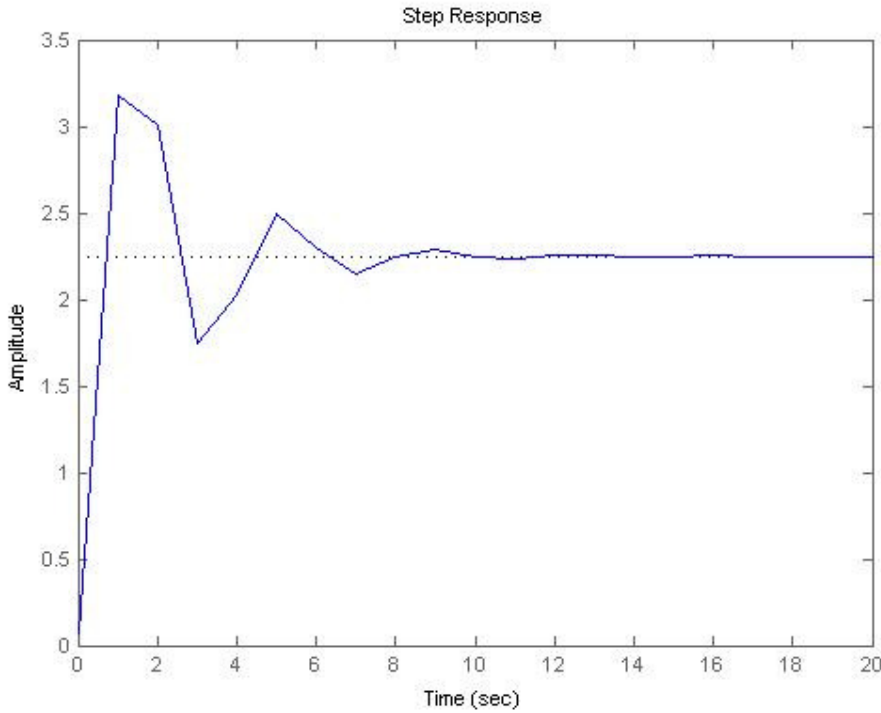
PI kontrollünde sistemin kapalı-çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{Kp + Ki}{10.6s^3 + 9s^2 + (31.12 + Kp)s + Ki} \quad [9.8]$$

$Kp$  yi 30 ve  $Ki$  yi 70 kabul edersek Matlab komutları aşağıdaki gibi olur.

```
Kp=30;  
Ki=70;  
num=[Kp Ki]  
t=0:1:20;  
step(num,den,t)
```

Matlab da yukarıdaki komutları girdiğimizde aşağıdaki grafiği elde ederiz.



Şekil 9.5 Sistemin Matlab da oransal-integral (PI) kontrol ile verdiği adım tepkisi

### 9.1.4 Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol (PID)

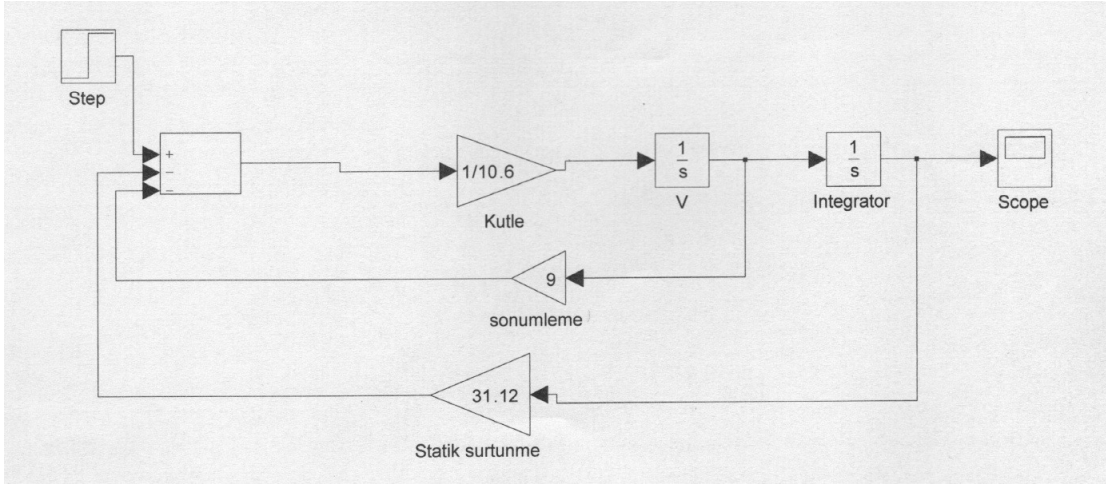
PID kontrollü sistemin kapalı-çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{Kds^2 + Kps + Ki}{10.6s^3 + (9 + Kd)s^2 + (31.12 + Kp)s + Ki} \quad [9.9]$$

PID kontrolü için optimum  $K_p$ ,  $K_d$ , ve  $K_i$  değerleri bulmak için simulink optimizasyon bloğu kullanılarak tüm eksenler için uygun  $K_p$ ,  $K_d$  ve  $K_i$  değerleri hesaplanmıştır.

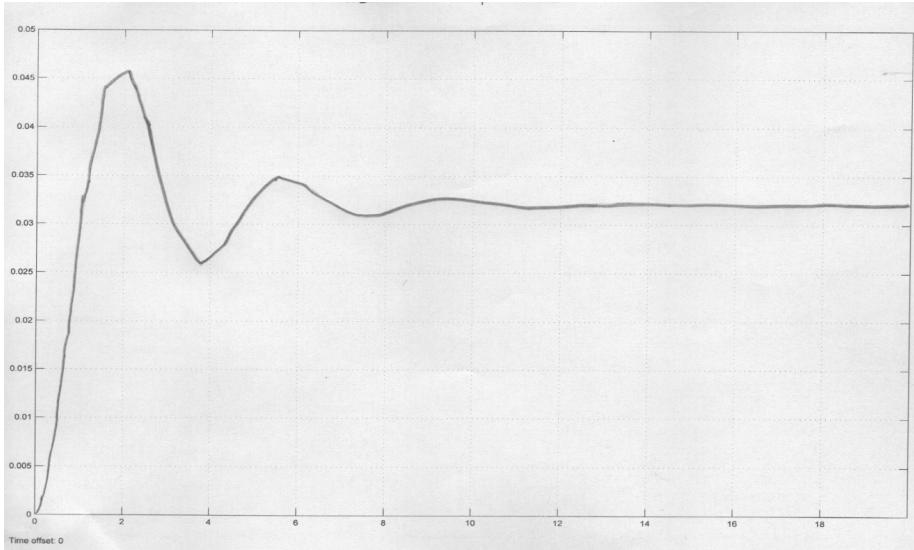
## 9.2 Kartezyen Manipülatörün Simulink İle Kontrolü

Kartezyen manipülatörün kontrolü Matlab simulink ortamında PID kontrolü ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin dinamik modeli oluşturulduktan sonra her eksen için ayrı ayrı simulink diyagramları oluşturulmuştur. Simulink modelleri ve scope bloğundan alınan grafikler aşağıdaki gibidir.



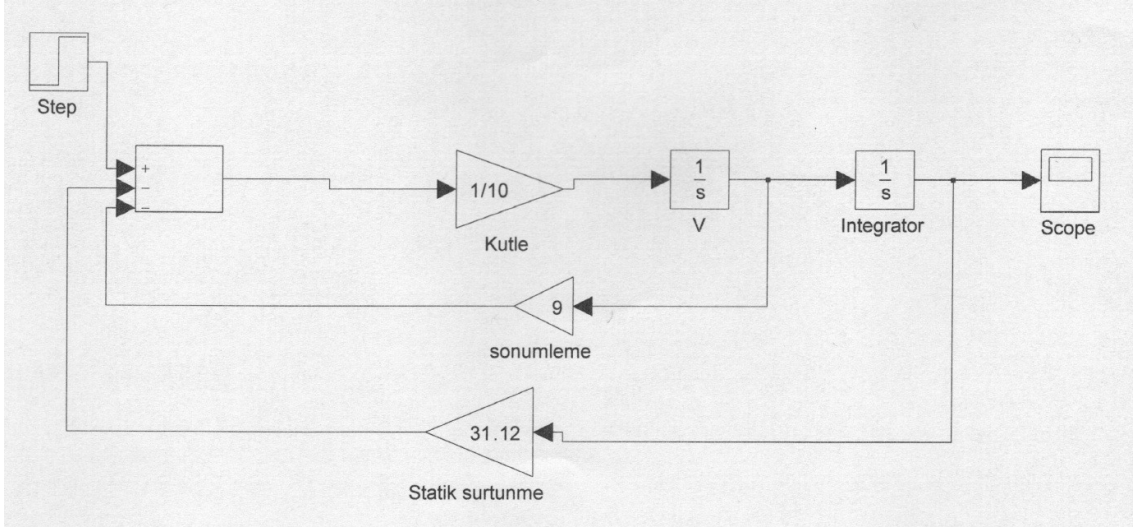
şekil 9.6 Kartezyen manipülatörün  $x$  eksenindeki dinamik modeli

Bu model simulink ortamında çalıştırıldığında basamak formunda giriş sinyaline karşılık gelen konum-zaman grafiği aşağıdaki gibi elde edilir.



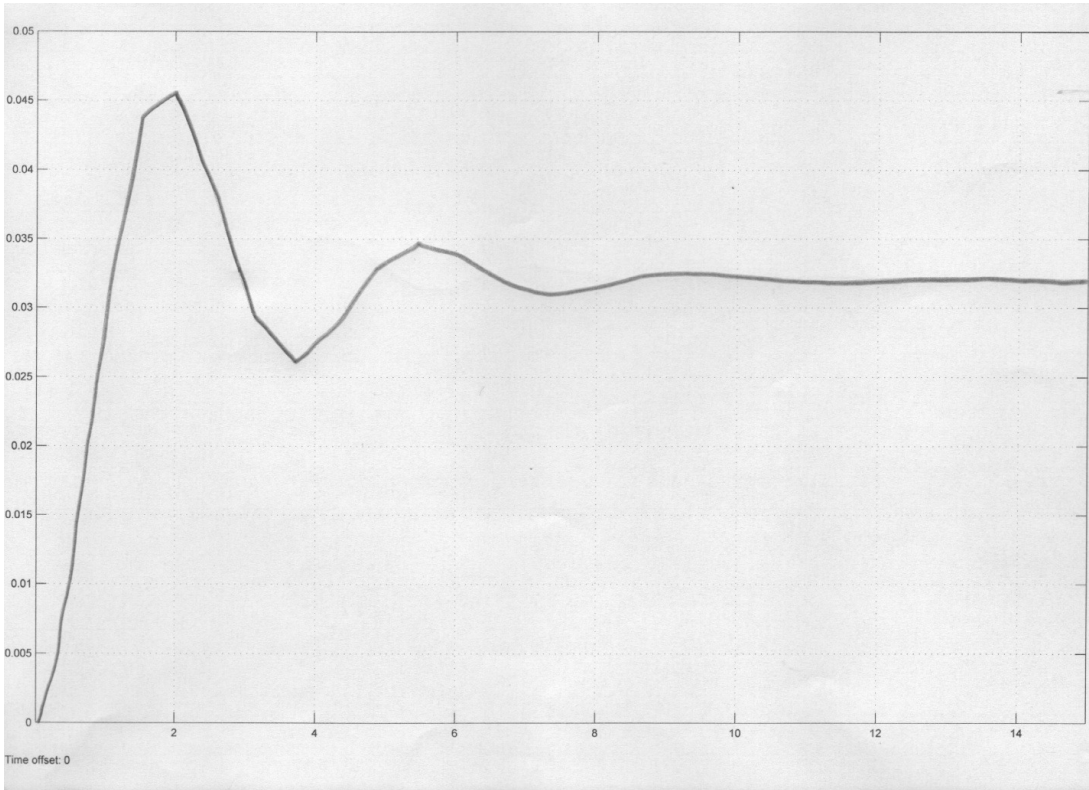
şekil 9.7 Kartezyen manipülatörün  $x$  ekseninde basamak girişine karşılık gelen sistem ıkışı

Manipülâtörün simulinkte oluşturulan y eksenindeki dinamik modeli aŖağıdaki gibidir.



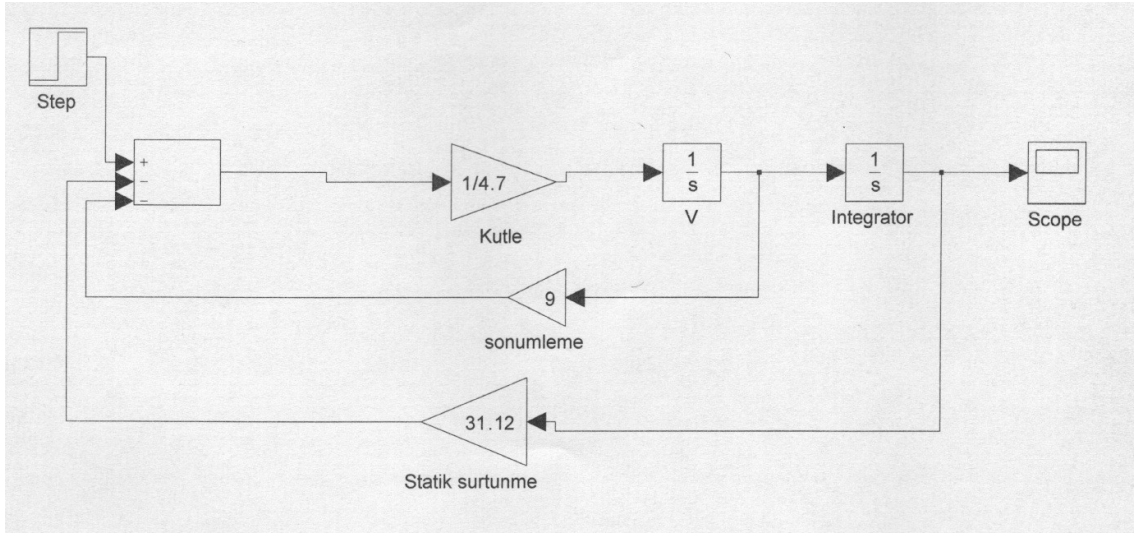
Ŗekil 9.8 Kartezyen manipülâtörün y eksenindeki dinamik modeli

Bu model simulink ortamında alıŖtırıldıėında basamak formunda giriŖ sinyali için sistemin ıkıŖ sinyali aŖağıdaki gibi elde edilir.



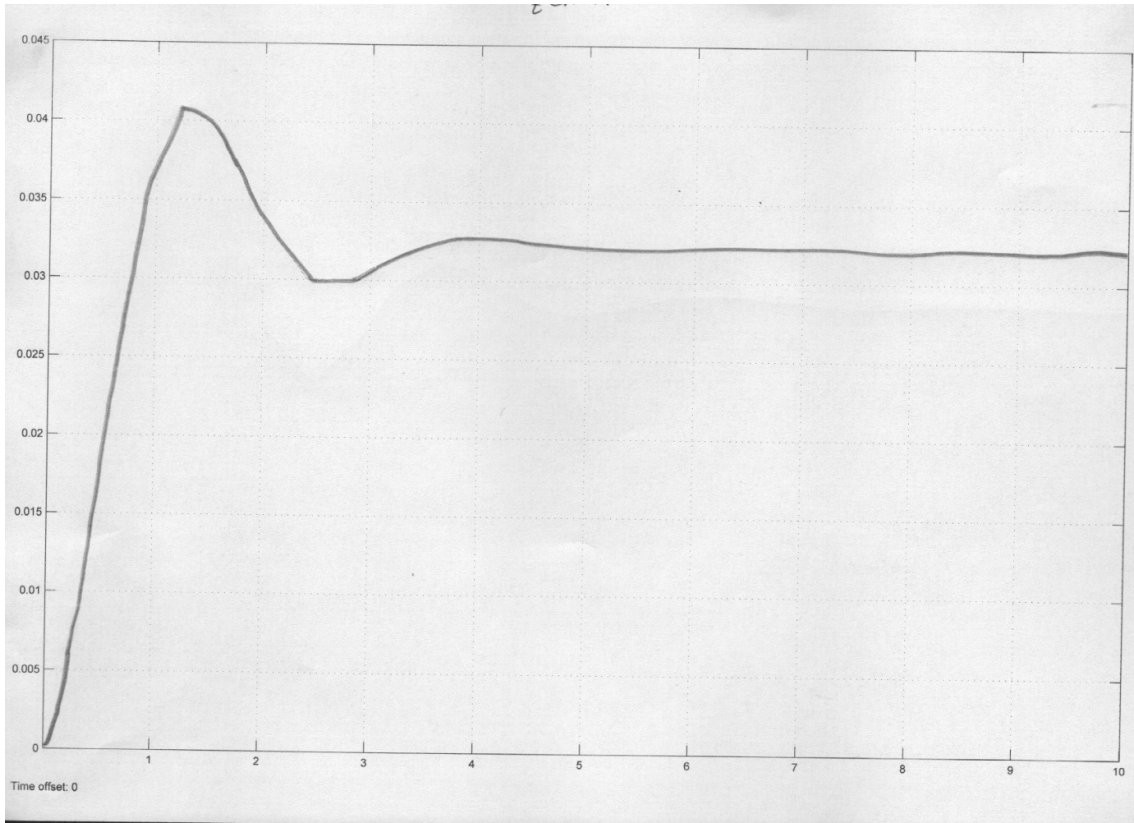
Ŗekil 9.9 Kartezyen manipülâtörün y ekseninde basamak giriŖine karŖılık gelen sistem ıkıŖı

Manipülâtörün simulinkte  $z$  ekseninde oluşturulan dinamik modeli aşağıdaki gibidir.



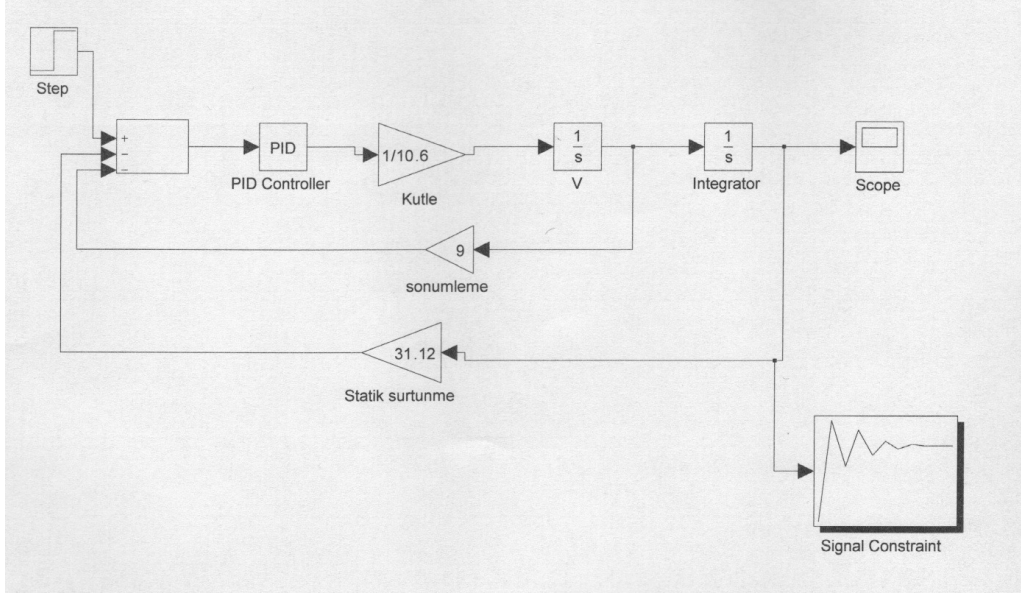
Şekil 9.10 Kartezyen manipülâtörün  $z$  eksenindeki dinamik modeli

Bu model simulink ortamında çalıştırıldığında basamak formundaki giriş sinyaline karşılık çıkış sinyali - zaman grafiği aşağıdaki gibi elde edilir.



Şekil 9.11 Kartezyen manipülâtörün  $z$  ekseninde basamak girişine karşılık gelen sistem çıkışı

Simulink'te hazır olarak bulunan PID ve Signal Constraint blokları oluşturulan dinamik modele eklenerek bu manipülatör için PID kontrol kazanç değerlerinin optimizasyonu yapılmıştır. Böylece manipülatörün simulinkte oluşturulan  $x$  eksenine ait PID kontrollü dinamik modeli aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.



Şekil 9.12 Manipülatörün  $x$  eksenindeki PID kontrollü dinamik modeli

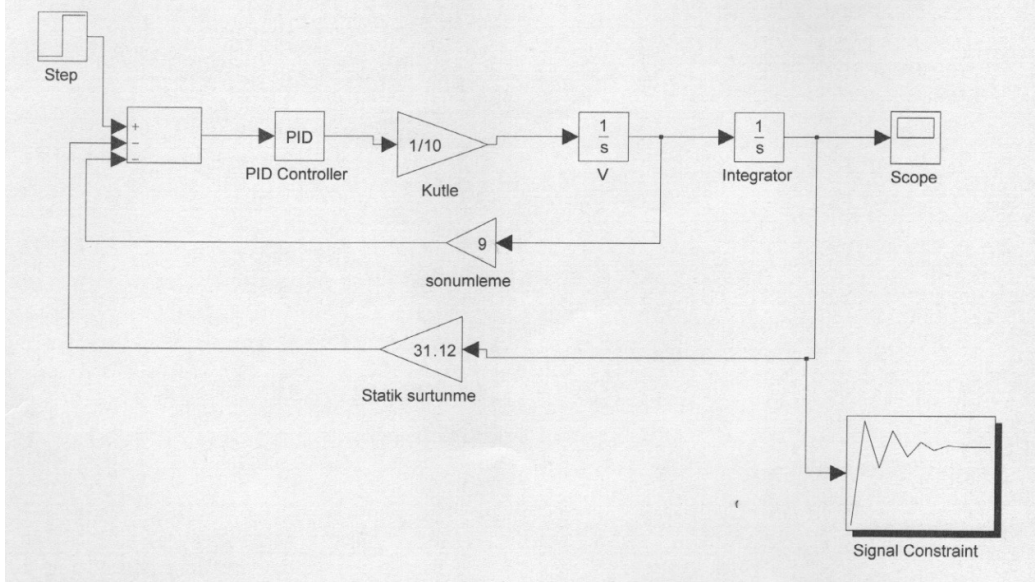
Bu model simulink ortamında çalıştırıldığında girilen basamak formundaki giriş sinyaline karşılık konum-zaman grafiği aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi elde edilir.



Şekil 9.13 Manipülatörün PID kontrol altında basamak formunda giriş sinyaline karşılık  $x$  eksenindeki çıkış sinyali

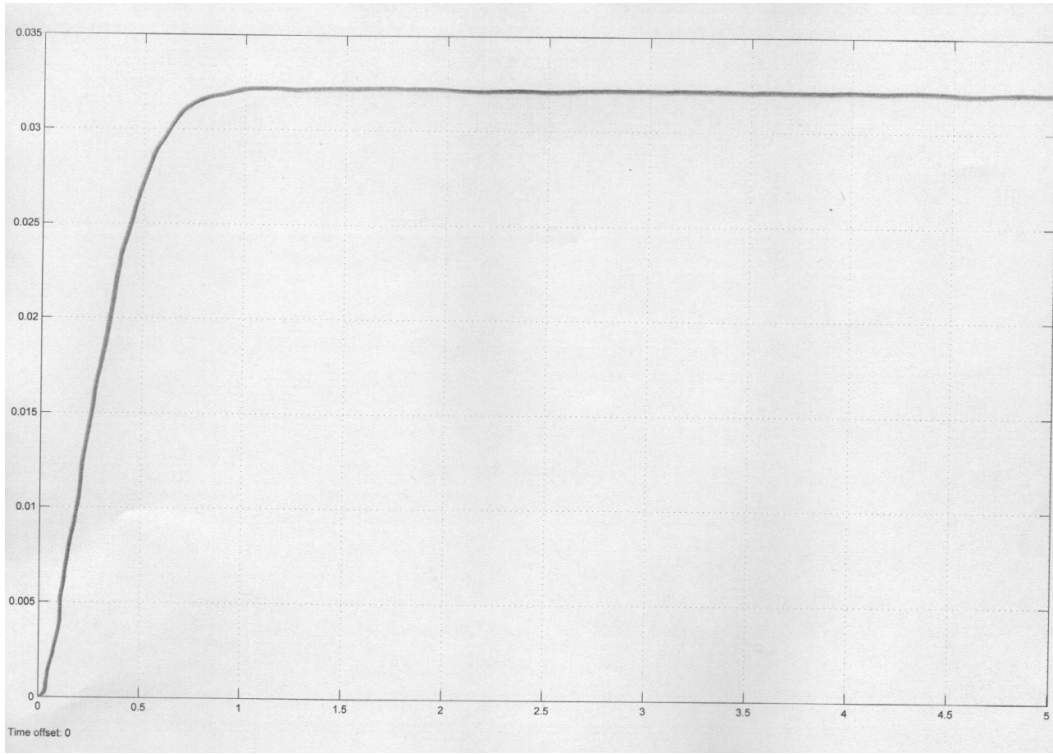


Kartezyen manipölatorün simülinke y ekseninde oluşturulan PID kontrollü dinamik modeli aşağıdaki gibidir.



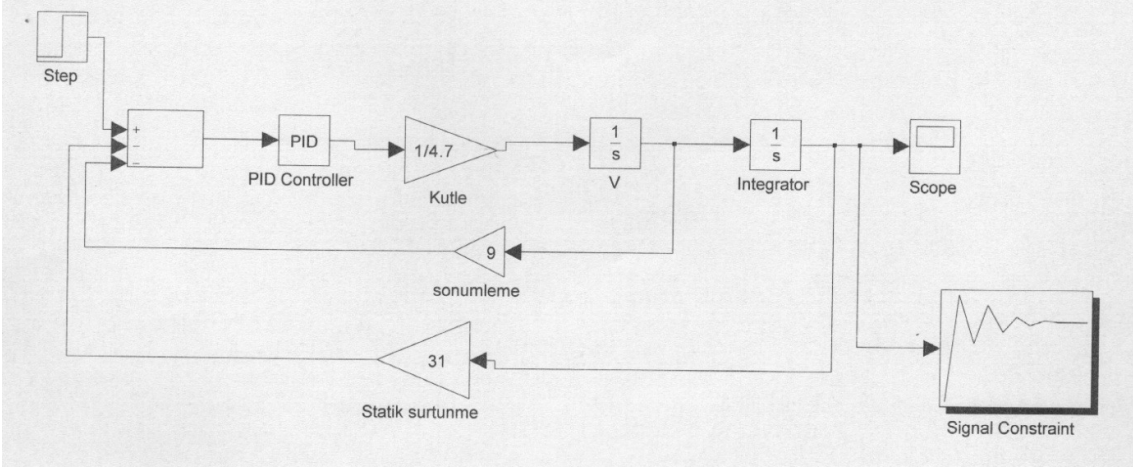
şekil 9.14 Kartezyen manipölatorün y eksenindeki PID kontrollü dinamik modeli

Bu model simülink ortamında çalıştırıldığında girilen basamak formundaki giriş sinyaline karşılık konum- zaman grafiği aşağıdaki gibi elde edilir.



şekil 9.15 Kartezyen manipölatorün PID kontrol altında basamak formunda giriş sinyaline karşılık y eksenindeki çıkış sinyali

Kartezyen manipulatörün simülükte z ekseninde oluşturulan PID kontrollü dinamik modeli aşğıdaki gibidir.



Şekil 9.16 Kartezyen manipulatörün z eksenindeki PID kontrollü dinamik modeli

Bu model simülük ortamında çalıştırıldığında basamak formundaki giriş sinyaline karşılık sisitemin konum-zaman grafiğı aşğıdaki gibi olur.



Şekil 9.17 Kartezyen manipulatörün PID kontrol altında basamak formunda giriş sinyaline karşılık z eksenindeki çıkış sinyali

Simulinkte PID kontrol altında simülasyon yapılırken, PID bloğu içerisinde bulunan  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  kontrol kazanç değerleri tanımlanır. Daha sonra bu değerler Matlab çalışma ortamında tanıtılır. Bu yazılan  $K_p$ ,  $K_d$  ve  $K_i$  değerleri Signal Constraint blokuna tanıtılır. Signal Constraint bloğu başlangıç kontrol kazanç değerlerinin optimizasyonunu yaparak bu sistem için optimum olan  $K_p$ ,  $K_d$  ve  $K_i$  değerlerini üretir. Constraint optimizasyon sonucunda bulunan  $K_p$ ,  $K_d$  ve  $K_i$  değerleri aşağıda gösterilmiştir.

Kartezyen manipülatörün  $x$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_p = 7,6724$

Kartezyen manipülatörün  $x$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_d = 1,5735$

Kartezyen manipülatörün  $x$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_i = 2,7435$

Kartezyen manipülatörün  $y$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_p = 12,5926$

Kartezyen manipülatörün  $y$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_d = 0,0814$

Kartezyen manipülatörün  $y$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_i = -0,0704$

Kartezyen manipülatörün  $z$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_p = 46,7318$

Kartezyen manipülatörün  $z$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_d = -0,1099$

Kartezyen manipülatörün  $z$  eksenini; PID kontrolü için optimum;  $K_i = 7,76$

## 10-SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında üç eksenle hareket edebilen kartezyen bir kaynak manipülatörünün tasarımı amaçlanmıştır. Kartezyen manipülatörün boyutlandırılmasında tamir bakım kapsamındaki kaynak işçilikleri göz önüne alınmıştır. AutoCAD programında mekanik iskeletin katı modeli ve teknik resimleri çizilmiştir. Bu mekanik iskeletin üzerine Doğrusal Hareket Sistemleri (DKVM)'ler yerleştirilerek mekanik sistemin gerçekleştirilmesi öngörülmüştür.

Kinematik analiz yapılarak sistemin transformasyon matrisi  $T_0^3$  hesaplanmıştır. Dinamik analiz sonucunda eksenlere gelen yükler hesaplanmıştır. Bu hesaplanan yüklere uygun olacak şekilde servo motor ve sürücü seçilmiştir.

Matlab ve Simulinkte herhangi bir kontrol yöntemi uygulanmadan sistem çalıştırıldığında sistemin yerleşme zamanına ulaşmadan önceki çıkış sinyalinde çok fazla osilasyon olduğu gözlemlenmiştir. Bu osilasyonlar (salınım, dalgalanma) uygulamada istenmeyen bir durumdur. Çünkü gerçek sistemde bu dalgalanmalar esnasında sistemi kontrol etmek oldukça güç olacaktır. Hatta sistemi karalı bir şekilde çalıştırmak mümkün olmayacaktır. Bu ani salınımlar ilk kalkış anında motorun aşırı akım çekmesine, robot kolun uzuv ve eklem noktalarına ani gerilmeler ve anlık büyük kuvvetler uygulanmasına sebep olacaktır. Bu ise eklem noktalarında, uzuvlarda ve son işlemcide hasarlara, çatlamalara ve hatta kırılmalara sebep olabilir. Ayrıca bu osilasyonlar son işlemcinin yaptığı kaynağın kalitesinin düşmesine sebep olur. Osilasyonların ortadan kaldırılarak sistemin kararlı halde çalıştırılabilmesi için P, PI, PID kontrol yöntemleri kartezyen manipülatöre ayrı ayrı uygulanmıştır.

Herhangi bir kontrol yöntemi uygulanmadığında sistem yaklaşık olarak 11. saniyede yerleşmeye başlamaktadır. Sistemin yerleşinceye kadar basamak cevabında büyük iniş-çıkışlar, dalgalanmalar mevcuttur. Bu dalgalanmalar yukarıda açıklanan sebepler dolayısıyla istenmezler ve sisteme birtakım kontrol yöntemleri uygulanarak tamamen ortadan kaldırılabilir veya minimum seviyeye indirgenebilirler.

Oransal kontrol yöntemi sisteme uygulandığında kapalı-çevrim sistemin yerleşme zamanının 11 saniye olduğu görüldü. Sistemin cevap zamanı iyi, basamak cevabındaki dalgalanmalar açık-çevrim sistem ile karşılaştırıldığında oldukça azalmış olmasına rağmen azda olsa halen mevcuttur. Buradan oransal kontrolün sistemi en az hata ile kontrol etmek için yeterli olmadığı sonucunu çıkarabiliriz.

Oransal-Türevsel kontrol yöntemi tasarlandığında kapalı-çevrim sistem 6. saniyeden sonra yerleşmeye başladı. Basamak cevabının başlangıcında çok az bir salınım mevcut olmakla beraber daha sonrasında sinyal oldukça düzgündür. Buradan bu kontrol yönteminin sistemi efektif olarak çok az bir hata ile kontrol edebileceği sonucunu çıkarabiliriz.

Sistemin Oransal-İntegral Kontrol altındaki yerleşme zamanı 11 saniyedir. Basamak cevabındaki dalgalanmalarda açık-çevrim sistem ile karşılaştırıldığında bir iyileşme mevcut değildir. Bu kontrol yöntemi sistemi kararlı bir şekilde kontrol etmek için uygun değildir. İntegral kazanç değeri dalgalanmaları artırmaktadır.

Sistemin Simulinkte oluşturulan  $x$  ve  $y$  eksenlerindeki dinamik modellerinde yerleşme zamanının 11 saniye civarında olduğu görülmektedir. Sistemin  $z$  eksenindeki dinamik modelinde ise yerleşme zamanı yaklaşık olarak 6 saniyedir. PID kontrol yöntemi uygulandıktan sonra bütün modellerin yerleşme zamanı yaklaşık olarak 2 saniyeye düşmüş ve basamak cevabındaki dalgalanmalar tamamen ortadan kalkmıştır.

Simulink ortamında optimum  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  değerlerini üreten Signal Constraint optimizasyon bloğu kullanılarak sistem için optimum  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  bulunmuş ve osilasyon miktarları minimum seviyeye indirilmiştir. Buradan PID kontrol yöntemi ile bu kartezyen manipülatörün kararlı bir şekilde kontrol edilebileceği sonucunu çıkarabiliriz

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel bilgiler

Adı Soyadı Selami ÇAY  
Doğum Yeri ve Tarihi Sivas, 07/04/1981  
Medeni Hali Evli  
Yabancı Dil İngilizce  
İletişim Adresi Demir Export A.Ş Kangal kömür işletmeleri  
KANGAL/SİVAS  
E-posta Adresi selamic@demirexport.com

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise Özel Selahaddin Eyyübi Lisesi, 1998  
Lisans Atatürk Üniversitesi, 2004  
Yüksek Lisans Cumhuriyet Üniversitesi, 2006-.....

### İş Tecrübesi

Demirexport A.Ş Makine mühendisi, 2005-2008  
Demirexport A.Ş Bakım onarım sorumlusu, 2008- halen

### Ödüller, Teşvikler ve Üyelikler

TMMOB/MMO Asil Üye, 2006-.....

## KAYNAKLAR

- 
- [1] B. Pratiher, S.K. Dwivedy, “Nonlinear response of a flexible cartesian manipulator with payload and pulsating axial force”, *Nonlinear Dyn.*, Vol. 57, pp. 177-195, DOI 10.1007/s11071-008-9431-6, 2009.
- [2] S.K. Dwivedy, P. Eberdhard, “Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review”, *Mech. Mach. Theory* 41, pp. 749-777, 2006.
- [3] E. Esmailzadeh, G.N. Jazar, “Periodic behaviour of a cantilever beam with end mass subjected to harmonic base excitation”, *Int. J. Non-Linear Mech.*, 33, pp. 567-577, 1998.
- [4] D.I.M. Forehand, M.P. Cartmell, “On the derivation of the equations of motion for a parametrically excited cantilever beam”, *J. Sound Vib.* 245, pp.165-177, 2001.
- [5] P.F. Pai, A.H. Nayfeh, “Non-linear non-planar oscillations a cantilever beam under lateral base excitations”, *Int. J. Non-Linear Mech.* 25, pp. 455-474, 1990.
- [6] S.K. Dwivedy, R.C. Kar, “Nonlinear response of a parametrically excited system using higher order method of multiple scales”, *Nonlinear Dyn.* 20, pp. 115-130, 1999.
- [7] B. Pratiher, S.K. Dwivedy, “Nonlinear dynamic of a flexible single-link cartesian manipulator”, *Int. J. Non-Linear Mech.* 42, pp. 1062-1073, 2007.
- [8] O. Cuvalci, “The effect of detuning parameters on the absorption region for a coupled system: a numerical and experimental study”, *J. Sound Vib.* 229, pp. 837-857, 2000.
- [9] S.D. Timar, R.T. Farouki, T.S. Smith, and C.L. Boyadjeff, “Algorithms for time-optimal control of CNC machines along curved tool paths”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(1), 37-53, 2005.
- [10] J.J.E. Slotine, H.S. Yang, “Improving the efficiency of time-optimal path-following algorithms”, *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 5(1), pp. 118-124, 1989.
- [11] F. Pfeiffer, R. Johanni, “A concept for manipulator trajectory planning”, *IEEE Journal of Robotics and Automation* RA-3(2), pp. 115-123, 1987.
- [12 ] Özyalçın, İ.(2006).Kartezyen robot tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- [13] Eğilmez, M.(2005). Kartezyen koordinatlı kaynak robotu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14 ] Çalışkan, A.(2004). Mekatronik sistemlerde internet tabanlı kontrol ve kartezyen robot üzerine bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- 
- [15 ] Akpınar, O. (2007). Görüntü denetimli üç eksen kartezyen robot, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [16] Oxford English Dictionary, Oxford University Press, Oxford, 1971.
- [17] ASADA, H. And SLOTINE J-J E., Robot Analysis and Control, Wiley, New York,1986.
- [18] M.H. Korayem, N. Shiehbeiki and, T. Khanali, “Design manufacturing and experimental tests of prismatic robot for assembly line”, International Journal of AMT, Vol. 29, No. 3-4, pp. 379-388, 2006.
- [19] H.S. Kim, L.W. Tsai, “Design optimisation of a cartesian paralel manipulator”, ASME J. Mech. Des. 125, pp. 43-51, 2003.
- [20] M. W. Spong, M. Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, Wiley, 1989.
- [21] Yumurtacı, S., Mert, T., (2003), "Robotik Kaynak Sistemleri ve Gelişme İstikametleri".
- [22] Tülbentçi, K., (1998), MIG-MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi, Rem Matbaacılık, İstanbul.
- [23] Ceyhun, V., (1996), Kaynak Robotları ve Ekonomisi, Gedik Eğitim Vakfı Uluslararası Kaynak Teknolojisi'96 Sempozyum Bildirileri, İstanbul
- [24] <http://www.makina-market.com/tr/dogrusal-hareket-sistemleri/modul-yataklamalar/174-dkm-32-vidali-modul.html>
- [25] Durgutlu, A., Gülenç, B., Tülbentçi, K., (1999), "Ark Kaynağında Kaynak Hızının Nüfuziyete ve Mikroyapıya Etkisi", Tübitak (23): 251-259
- [26] C.S. G. Lee, “Robot arm kinematics, dynamics, and control”, Computer, Vol.15, No:12, 1982.
- [27] D.B. Silver, “On the equivalence of Lagrangian and Newton-Euler dynamics for manipulators”, Int. J. Robotics Res. Vol.1, No:2, 1982.
- [28] <http://www.kavrammuhendislik.com.tr/?pId=urunler&pgId=65&pgrId=162>
- [29] B.C Newton, “Newnes Robotics, Mechatronics and Artificial Intelligence”, Butter worth-Heineman,2003.
- [30] J.Y.S. Luh, “Conventional controller design for industrial robots- A tutorial”, IEEE Trans. Sys. Man. Cyber, SMC-13, No:3, May/June 1983.
- [31] S. Arimoto, F. Miyazaki, “Stability and robustness of PID feedback control for robot manipulators of sensory capability”, First Int. Symp. Robotics Res., 1983.



---

## EKLER

EK-1 Kartezyen Manipulatörde Kullanılan Servo Sürücünün Teknik Özellikleri

Ek-2 Kartezyen Manipulatörde Kullanılan Servo Motorun Boyutları

---

EK-1  
KARTEZYEN MANİPÜLATÖRDE KULLANILAN SERVO SÜRÜCÜNÜN TEKNİK  
ÖZELLİKLERİ

ASD-B SERİSİ SERVO SÜRÜCÜ( ASD-B0721-A)



Pozisyon / Hız / Tork Kontrol modları

- Hız / Tork sınırlama fonksiyonu
- Hız kontrol modu için S-eğrisi
- Pozisyon / Hız / Tork modları için alçak geçiren filtre
- Keypad'e parametreleri kaydedip tekrar geri çağırabilme özelliği.
- Bu şekilde 25 farklı parametre gurubu kaydedilebilme imkanı
- Devreye alma sürelerini kısaltan windows tabanlı kullanıcı dostu yazılım arabirimi
- Yazılımda gerçek zamanlı osilaskop fonksiyonu (0.5ms. örnekleme zamanlı)
- Yazılımla veya dijital keypadle kolay ve rahat kazanç ayarlama fonksiyonu
- Bütün I/O durumlarının görüntülenmesi
- Çözünürlüğü ayarlanabilir encoder çıkışı
- Koruma fonksiyonları ve hata mesajları
- Modbus ASCII/RTU haberleşme
- RS232 / RS485 haberleşme arabirimi

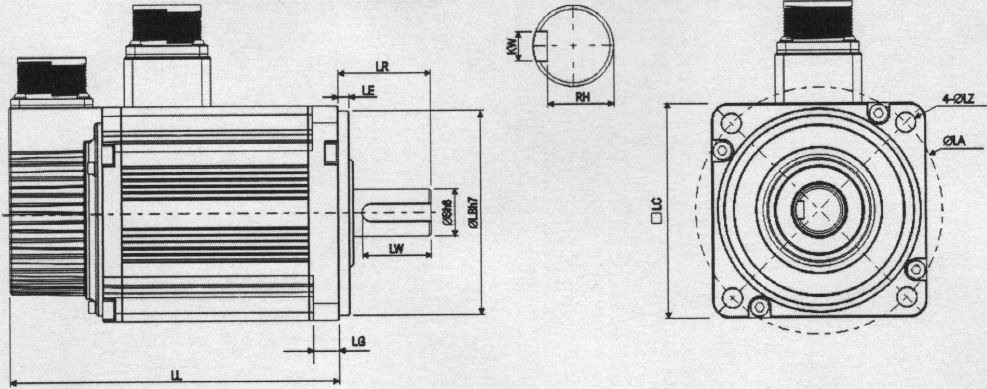
## EK-2

### KARTEZYEN MANİPÜLATÖRDE KULLANILAN SERVO MOTORUN BOYUTLARI

#### SERVO MOTOR ( ECMA-C30807)

##### Chapter 11 Specifications | ASDA-B Series

##### Motor Frame Size: 100mm Models



Model	G31303□S	E31305□S	G31306□S	G31309□S	C31010□S
LC	130	130	130	130	100
LZ	9	9	9	9	9
LA	145	145	145	145	115
S	22	22	22	22	22
LB	110	110	110	110	95
LL (without brake)	147.5	147.5	147.5	163.5	153.5
LL (with brake)	183.5	183.5	183.5	198	192.5
LR	55	55	55	55	45
LE	6	6	6	6	5
LG	11.5	11.5	11.5	11.5	12
LW	36	36	36	36	32
RH	18	18	18	18	18
kW	8	8	8	8	8



- 1) Dimensions are in millimeters. Actual measured values are in metric units. Please use metric for precise measurements.
- 2) The boxes (□) in the model names are for optional configurations. (Please refer to Section 1.2 for model explanation)