

AMELİYAT SİMÜLASYONU İÇİN

HAPTİK KOL TASARIMI

Kemal Cem KÖSE

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim - 2007

AMELİYAT SİMÜLASYONU İÇİN HAPTİK KOL TASARIMI.

Kemal Cem KÖSE

DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Dinamiği Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ŞENEL
Yardımcı Danışman: Yrd. Doç. Dr. Alpaslan DUYSAK

Ekim 2007

KABUL VE ONAY SAYFASI

Kemal Cem KÖSE'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı AMELİYAT SİMÜLASYONU İÇİN HAPTİK KOL TASARIMI başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir

/ / 2007

Üye : Yrd.Doç.Dr Mehmet ŞENEL

Üye : Yrd.Doç.Dr Alpaslan DUYSAK

Üye : Yrd.Doç.Dr E. İlhan KONUKSEVEN

Üye : Yrd.Doç.Dr İsmet ÇELİK

Üye : Yrd.Doç.Dr. Özer AYDIN

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr. M. Sabri ÖZYURT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

AMELİYAT SİMÜLASYONU İÇİN HAPTİC KOL TASARIMI

Kemal Cem KÖSE

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2007

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ŞENEL

Yardımcı Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Alpaslan DUYSAK

ÖZET

Bu çalışmada ameliyat simülasyonlarında kullanılmak üzere bir haptic cihaz tasarımı bilgisayar ortamında CATIA V5 R14 CAD programında tasarlanmıştır. Haptic yani dokunsal cihazlar günümüz teknolojisinde çok geniş (sanayi, tıp, eğitim, vb.) kullanım alanına sahiptirler. Bu cihazlar sanal ortamda bir nesneye dokunmaya imkan sağlayarak sanal gerçeklikte çeşitli çalışmaların yapılmasına imkan sağlamaktadır. Tez kapsamında 7 serbestlik dereceli bir dokunsal cihaz modellenmiştir. Burada daha önce yapılmış olan aynı uzuv uzunluklarındaki cihazlardan daha yüksek çalışma hacmine ulaşılmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ameliyat simülasyonu, haptic cihaz, haptic modelleme, kuvvet geribesleme, sanal gerçeklik.

DESIGN OF A HAPTIC ARM FOR SIMULATION OF SURGICAL OPERATION

Kemal Cem KÖSE

Mechanical Engineering, MSc Thesis, 2007

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ŞENEL

Co - Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Alpaslan DUYSAK

SUMMARY

In this study, the design of a haptic device is designed to be used in simulation of surgical operation with a program called CATIA V5 R14 CAD in the computer medium. Haptic, in other words tactile devices, has a wide usage area such as industry, medicine, education, etc. in nowadays technology. In a virtual setting, these devices enable us to touch an object and to make several studies in virtual reality. Within the context of thesis, a tactile device with seven degrees of freedom is modeled. It is aimed to reach a device with higher volume of operation than previously made devices.

Key Words: A simulation of the surgical operation, haptic devices, haptic modeling, force feedback, virtual reality.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında yardımlarını esirgemeyip her zaman bana destek olan sayın hocam Yrd.Doç.Dr.Mehmet ŞENEL'e, Yrd.Doç. Dr. Alpaslan Duysak'a, Yüksek lisans çalışmalarım boyunca hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN'e, Matematik bölümünden sayın Yrd. Doç. Dr. Erhan ATA'ya, , Değerli yorum ve katkılarıyla destek olan Yrd. Doç. Dr. Rahmi ÜNAL, Yrd. Doç. Dr. Mustafa AYDIN, ve Öğr.Gör. Feridun KARAKOÇ 'a, başta Bölüm Başkanımız sayın Prof. Dr. Ramazan KÖSE olmak üzere bölümdeki tüm hocalarıma ve değerli çalışma arkadaşlarıma, Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem babam ve kardeşlerim'e, tüm çalışmam boyunca gösterdiği sabır ve anlayış için nişanlım Hande ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. BÖLÜM	1
GİRİŞ	1
2.BÖLÜM.....	2
2.1 Literatür Çalışması.....	2
2.1.1 Mekanik Kol Dokunsal Cihazlar	2
2.1.2 Tel Tahrikli Dokunsal Cihaz.....	5
2.1.3 Manyetik Dokunsal Cihazlar	7
2.2 Dokunsal Cihazların Kullanım Alanları.....	9
2.2.1 Bilgisayar Destekli Endüstriyel Tasarım	10
2.2.2 Robot Kolların Uzaktan Kontrolü.....	10
2.2.3 Tıbbi Öğrenim	10
3. BÖLÜM	12
3.1 Tasarım Konuları Ve Göz Önüne Alınan Faktörler.....	12
3.2 Kinematik Tasarım.....	14
3.3 Tasarlanan 7 Serbestlik Dereceli Dokunsal Cihazın Kinematik Modeli.....	14
3.4 İleri Kinematik	16
3.5 Ters Kinematik ve Tekil Nokta Analizi	18
4. BÖLÜM	27
4.1 Çalışma Hacmi Analizi	27
5. BÖLÜM	30

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam)

	<u>Sayfa</u>
5.1 Motor Seçimi.....	30
5.1.1 AC Motorlar.....	30
5.1.2 DC Motorlar.....	30
5.1.3 Fırçasız DC Motorlar.....	30
5.1.4 Step Motorlar.....	31
5.1.5 Motor Seçimi ve Hesaplamalar.....	31
5.2 Ağırlık Merkezi.....	39
5.3 Statik Analiz.....	40
6. BÖLÜM.....	42
6.1 Sonuç.....	42
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	43
EKLER.....	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Phantom 1,5/6 DOF Haptic Device.....	3
2.2	Phantom Desktop ve Omni Desktop cihaz.....	3
2.3	Freedom 6S dokunsal cihaz.....	4
2.4	Omega.x dokunsal cihaz.....	4
2.5	Delta 6 DOF	5
2.6	HapticMaster.....	5
2.7	Tel tahrikli dokunsal cihaz.....	6
2.8	Tel tahrikli dokunsal cihazlar.....	7
2.9	Tel tahrikli dokunsal cihaz	7
2.10	Manyetik dokunsal cihaz.....	8
2.11	Manyetik araç kabini.....	8
2.12	El operasyon aleti.....	8
2.13	Endüstriyel tasarım uygulaması.....	10
2.14	Tıbbi Öğrenim.....	11
3.1	Tasarımı Yapılmış Olan Dokunsal Cihazın CAD Modeli.....	13
3.2	Tasarlanan Cihazın Kinematik Modeli.....	15
4.1	Tasarlanmış 7 Serbestlik Dereceli Dokunsal Cihazın Çalışma Hacmi.....	28
4.2	Phantom 1,5/6DOF Dokunsal Cihazın Çalışma Hacmi.....	29
5.1	Hareketli Motor Yapısı ve Ağırlık Merkezi.....	39
5.2	Tüm Sistemin Ağırlık Merkezi	40
5.3	Von Mises Stres Analizi.....	41
5.4	Kuvvet Etkisinde Sistemdeki Yer Değiştirmeler.....	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Dokunsal Cihaz Tasarım Kriterleri.....	12
3.2 Dokunsal Cihazın Kinematik Parametreleri	15
4.1 Eklem Değişkenleri Limitleri.....	27
5.1 7 Serbestlik dereceli dokunsal cihazın kritik pozisyonları.....	34

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler bilgisayar sistemlerinde sanal gerçeklik uygulamalarına olanak sağlamış ve bununla birlikte dokunsal (haptic: dokunma hisli ve kuvvet geri beslemeli) [1]cihaz fikri ortaya konmuştur. Dokunsal cihazlar insanların dokunma yoluyla bir cisimde meydana getirecekleri fiziksel deformasyonları sanal ortamda sanal bir nesneye uygulama ve bunun sonuçlarını hissetme imkânı vermektedir. Dokunsal cihazlarla, sanal gerçeklik ortamında kullanıcıya bir nesneyi görmenin yanında, sanal nesneye dokunma olanağı da sağlanmaktadır[2]. Bu nedenle özellikle sanayi, eğitim ve tıp alanlarında olmak üzere çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Dokunsal cihazlarda, sanal bir nesne üzerinde çalışma yapılabildiği gibi gerçek bir nesneden alınan verilerin sanal ortamda kullanılabilmesi de söz konusudur.

Dokunsal cihaz tasarımı geniş bir kullanım alanına sahip olması sebebiyle birçok anabilim dalında disiplinler arası bir çalışma gerektirmektedir. Özellikle ameliyat simülasyonları gibi el becerisi gerektiren işlerde kullanıcı dilediği ameliyatı defalarca sanal ortamda tekrar ederek pratik ve deneyimini arttıracaktır. Bu sayede gerçek ameliyatta operatör çok daha az hata yapmış olacak ve hasta korunmuş olacaktır. Buradan da anlaşılacağı gibi cihazın mekanik olarak tasarlanması tek başına yetmemektedir. Örneğin, farklı ameliyatlar için doktorlar tarafından önceden hazırlanmış farklı senaryoların olması ve bu senaryoların bilgisayar ortamında modellenmesi gibi farklı disiplinlerin çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dokunsal cihaz tasarımında temel parametre cihazın serbestlik derecesidir.

Manipülâtörler seri ve paralel olmak üzere 2 temel tasarıma sahiptir. Paralel manipülâtörler seri manipülâtörlere göre daha rijittirler. Seri manipülâtörler daha büyük bir çalışma hacmine sahiptir. Manipülâtör tasarımında sadece seri ya da sadece paralel manipülâtör kullanılması zorunlu değildir. Bu nedenle bu iki konfigürasyon birleştirilerek hibrit konfigürasyonlar tercih edilmektedir.

2.BÖLÜM

2.1 Literatür Çalışması

Sanal gerçeklik uygulamalarında kullanılmak üzere ilk dokunsal cihaz 1990' lar da Thomas Massie ve Kenneth Salisbury tarafından MIT Yapay Zeka Laboratuvarında tasarlanmış ve üretilmiştir[3]. Dokunsal cihazlar temelde 3 ana yapı altında toplanabilir.

- Mekanik kol dokunsal cihazlar
- Tel tahrikli dokunsal cihazlar
- Manyetik dokunsal cihazlar

Bu yapılar birbirlerine göre farklı avantaj ve dezavantajları barındırmaktadır.

2.1.1 Mekanik Kol Dokunsal Cihazlar

Bu tarz dokunsal cihazlarda moment, kuvvet ve hareket motorlardan kullanıcıya mekanik kollar vasıtasıyla aktarılır ve aynı şekilde kullanıcının 3 boyutlu hareketleri bilgisayar ortamına mekanik kollar aracılığıyla aktarılır. Temelde robot kollarla aynı yapıya sahiptir. Mekanik kol yapısında ilk dokunsal cihaz 1993 yılında MIT' de geliştirilmiş ve Sensable Technology Inc tarafından üretilmiştir[4]. Genellikle 6 serbestlik derecesine sahip olan bu cihazların bir takım avantaj ve dezavantajları aşağıda listelenmiştir[1].

Mekanik kol dokunsal cihazların avantajları;

- Maksimum uygulanabilir momenti ve kuvveti yüksektir.
- Büyük çalışma hacmine sahiptir
- Oldukça rijidtir
- Düşük atalete sahiptir
- İyi bir yapılandırma sonucunda cihazdaki boşluklar en aza indirgenebilir
- Oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler

Mekanik kol dokunsal cihazların dezavantajları;

- Geliştirme süresi çok karmaşıktır ve çok uzun çalışma süreleri gerektirir
- Maliyeti yüksektir.

Aşağıda yurt dışındaki firmaların üretmiş oldukları farklı özelliklerdeki dokunsal cihazlardan örnekler verilmiştir.

Şekil 2.1’de Sensable Technology tarafından üretilen 6 serbestlik dereceli dokunsal cihaz görülmektedir[5].



Şekil 2.1 Phantom 1,5/6 DOF Haptic Device



Şekil 2.2 Phantom Desktop ve Omni Desktop cihaz

Şekil 2.3’ te görülen “Freedom 6S” dokunsal cihazda Phantom dokunsal cihaza benzer özellikler taşıyıp 6 serbestlik derecesine sahiptir. MPB Technology Inc şirketi tarafından üretilmektedir[6].



Şekil 2.3 Freedom 6S dokunsal cihaz

Şekil 2.4' te görülen dokunsal cihaz Omega Technology tarafından üretilmiştir[7].



Şekil 2.4 Omega.x dokunsal cihaz

Şekil 2.5 de Delta 6 DOF dokunsal cihazı görülmektedir[8].



Şekil 2.5 Delta 6 DOF

Şekil 1.7 de görülen HapticMaster 3 serbestlik dereceli bir cihaz olup FCS Control System Inc tarafından üretilmiştir[9].



Şekil 2.6 HapticMaster

2.1.2 Tel Tahrikli Dokunsal Cihaz

Bu tarz dokunsal cihazlarda moment, kuvvet ve hareket motorlardan kullanıcıya mekanik kollar vasıtasıyla aktarılmaz bunun yerine motorların millerine sarılmış olan teller yardımıyla bu aktarım sağlanır. Aynı şekilde kullanıcının 3 boyutlu hareketleri bilgisayara ortamına bu teller aracılığıyla aktarılır. Bu tip cihazlarda en az istenilen serbestlik derecesi kadar farklı motorlarla tahrik edilen teller bulunmaktadır. Bu konuda araştırmalar halen devam

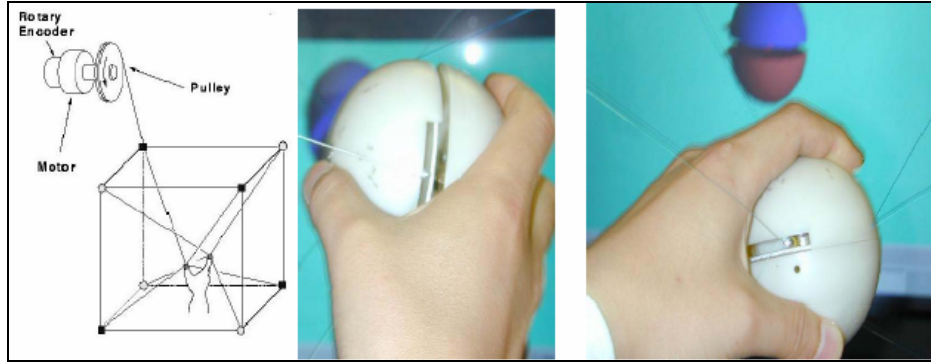
etmektedir. Ancak bu cihazlarında mekanik kollar dokunsal cihazlarda olduğu gibi bir takım avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır [1].

Tel tahrikli dokunsal cihazların avantajları;

- Cihazlardaki boşluklar düşüktür
- Cihazdaki hissedilen sürtünmeler düşüktür
- Maliyeti düşüktür
- Oldukça rijidtir

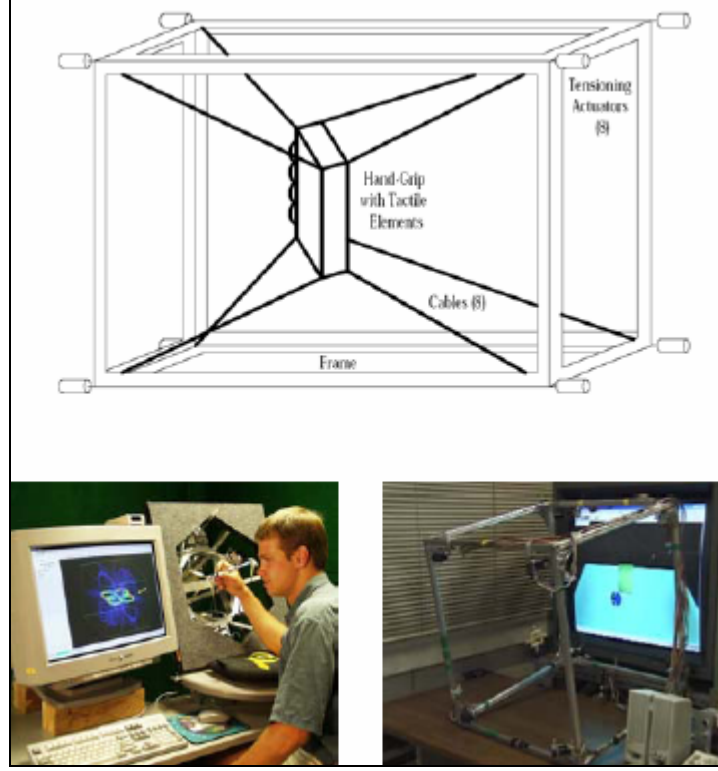
Tel tahrikli dokunsal cihazların dezavantajları;

- Maksimum uygulanabilir kuvvet düşüktür
- Cihazda istenmeyen titreşimler görülmektedir
- Hassasiyet düşüktür
- Dokunsal kalemin hareket kabiliyeti oldukça düşüktür



Şekil 2.7 Tel tahrikli dokunsal cihaz

Şekil 2.8’ da görülen cihaz da sekiz kablo bağımsız olarak çerçeveye monte edilmiş sekiz adet motorla kontrol edilmektedir.



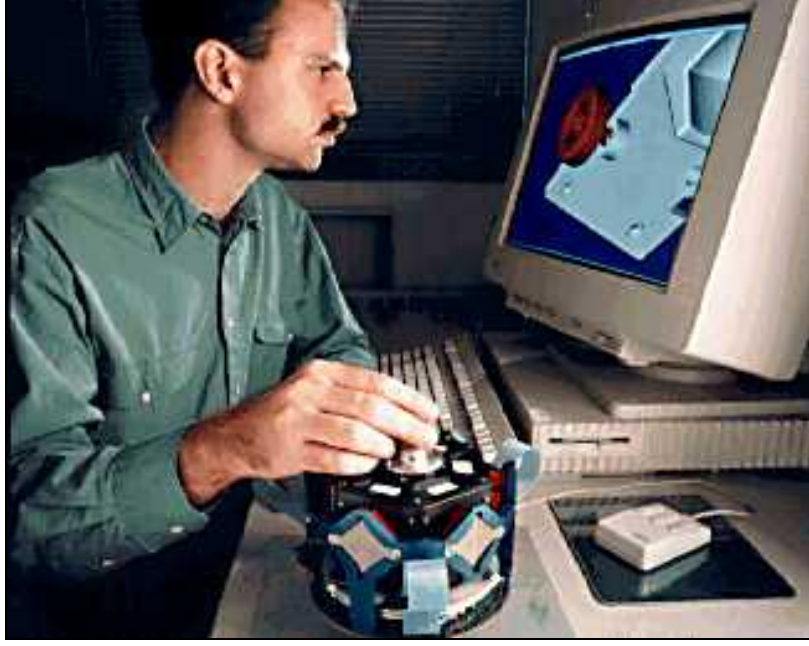
Şekil 2.8 Tel tahrikli dokunsal cihazlar



Şekil 2.9 Tel tahrikli dokunsal cihaz

2.1.3 Manyetik Dokunsal Cihazlar

Bu tarz dokunsal cihazlarda moment, kuvvet ve hareket motorlar aracılığıyla aktarılmaz, bunun yerine kalemin etrafına yerleştirilmiş bobinler aracılığıyla aktarım sağlanır. Bu özelliğinden dolayı yapısal olarak diğer dokunsal cihazlardan farklıdır. Şekil 2.10' da bir manyetik dokunsal cihaz görülmektedir[10].



Şekil 2.10 Manyetik dokunsal cihaz

Manyetik dokunsal cihaz iki ana parçadan oluşur. Birinci parça manyetik araç kabini dir. Bu yapıda güç kaynağı kontrol ünitesi bulunur. Diğer parça ise el operasyon aletidir.



Şekil 2.11 Manyetik araç kabini



Şekil 2.12 El operasyon aleti

Manyetik dokunsal cihazların avantajları[1];

- Mekanik kol içermezler.
- Maksimum uygulanabilir kuvvet ve moment yüksektir.
- Rijidliği yüksektir.
- Çok hassastır.

Manyetik dokunsal cihazların dezavantajları[1];

- Küçük çalışma hacmine sahiptir.
- Bu cihazlar ile gerçek bir nesneden veri alınmaz.

2.2 Dokunsal Cihazların Kullanım Alanları

Çağımızda her alanda kendine yer bulan bilgisayar ve bilgisayar uygulamaları insan hayatını ve eğitimini kolaylaştırmıştır. Sanal ortamda nesnelere dokunabilmenin ve bu nesnelere yapılan çalışmaların eş zamanlı olarak bilgisayar arayüzünde değerlendirilebilmesi sonucu dokunsal cihazlar çok geniş bir alanda kullanılmaya başlamış ve bu kullanıma her geçen gün yenileri eklenmeye başlamıştır. Dokunsal cihazların en önemli özelliği bir illüzyonla insanlara sanal gerçekliği hissettirebilmesidir. Dokunsal cihazların kullanıldığı önemli uygulama alanları;

- Bilgisayar destekli endüstriyel tasarım
- Robot kolların uzaktan kontrolü
- El işçiliği gerektiren profesyonel eğitimler
- Tıbbi öğrenim
- Cerrahi ameliyat uygulamaları
- Ortopedik operasyonlar için implant ve doku tasarımı

2.2.1 Bilgisayar Destekli Endüstriyel Tasarım

Bilgisayar günümüzde endüstriyel tasarımın olmazsa olmazlarında biri haline gelmiştir. Uzun süreç gerektiren tasarım uygulamaları CAD/CAM yazılımları ile çok kısa sürelerle indirgenmiş ve tasarlanan ürünün son halinin bilgisayar ortamında incelenmesine imkan sağlamıştır. İşte bu süreçte dokunsal cihazlar kullanılarak bilgisayar destekli üç boyutlu modelleme uygulamalarına yönelik önemli araştırmalar yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir. Şekil 2.13 te dokunsal cihaz yardımıyla yapılan bir tasarım görülmektedir.



Şekil 2.13 Endüstriyel tasarım uygulaması

2.2.2 Robot Kolların Uzaktan Kontrolü

Dokunsal cihazlar sayesinde üç boyutlu nesnelere sanal ortamda dokunabilmek ve hissedilmek robotların uzaktan kontrolüne farklı bir anlam kazandırmıştır. Bu sayede ana bir dokunsal cihaz aracılığıyla verdiğimiz komutları uygulayan diğer dokunsal cihaz aracılığıyla uzaktaki nesnelere hissedebilmek mümkün olmaktadır. Bu da özellikle cerrahi operasyonların uzaktan gerçekleştirilmesinde ve hava araçlarının uzaktan yönlendirilmesinde kullanılmaktadır.

2.2.3 Tıbbi Öğrenim

Tıp eğitiminin en büyük sıkıntılarından biride öğrencilerin çeşitli uygulamalarda pratik yaparak el becerilerini geliştirebilecekleri kadavra bulma sıkıntısıdır. Ayrıca hassas uygulama gerektiren ve hata kabul etmeyen çeşitli ameliyatlarında başarısını etkileyen en önemli unsur ameliyatı gerçekleştirecek olan cerrahın el becerisidir. Dokunsal cihazlar yardımıyla bu pratik yapma sorunu ortadan kaldırılmakta, birey sanal ortamda simüle edilen çeşitli ameliyatları

dilediği kadar tekrar yaparak el becerisini geliştirebilmekte ve bu sayede hasta sağlığı da korunmaktadır. Şekil 2.14' te bu uygulamaya bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.14 Tıbbi đrenim

3. BÖLÜM

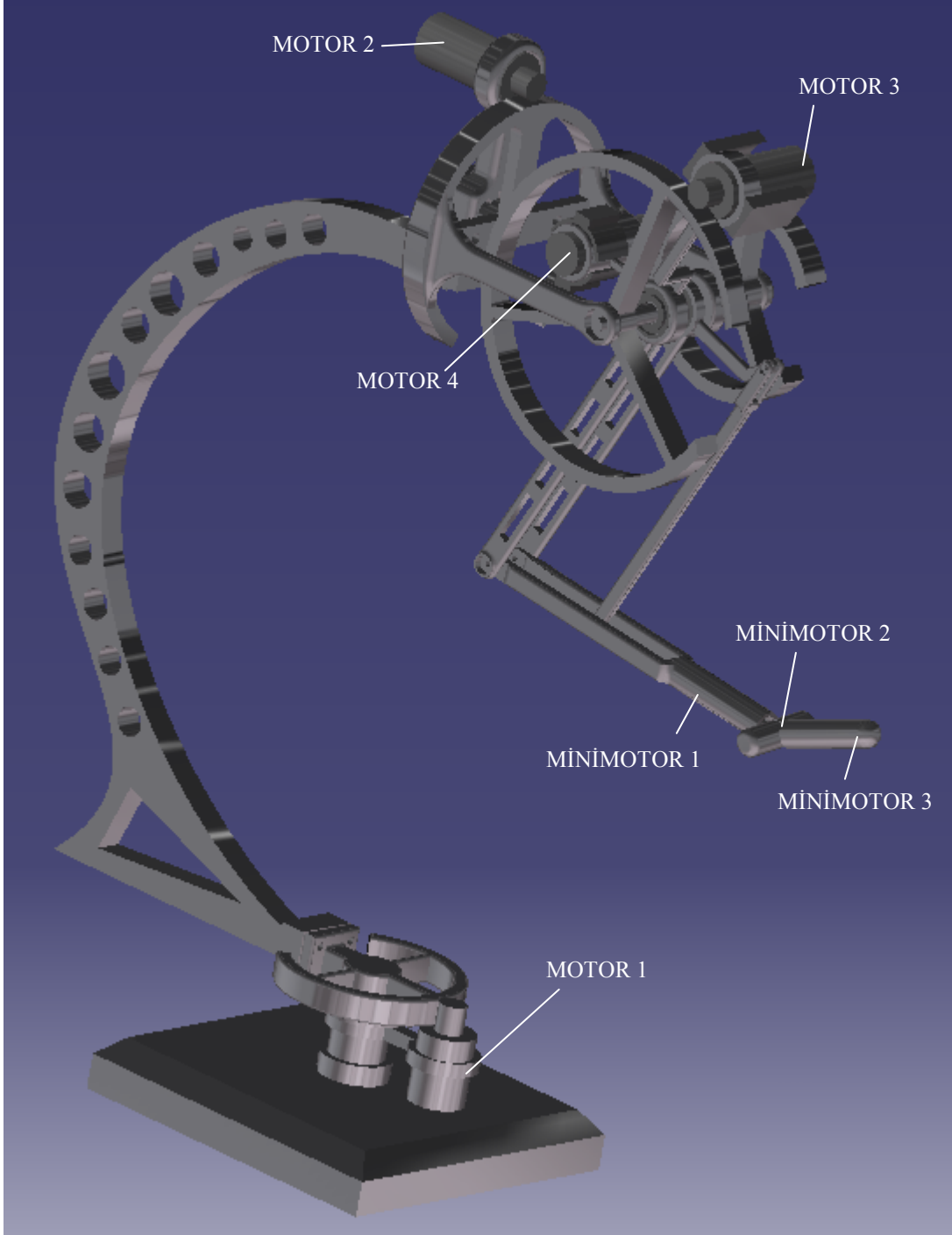
3.1 Tasarım Konuları Ve Göz Önüne Alınan Faktörler

Projede tasarımı yapılan dokunsal cihaz 10 N' luk maksimum uygulanabilir kuvvete ve uç noktada 500 Nmm' lik maksimum uygulanabilir momente sahip olacak şekilde tasarlanmıştır [11]. Tasarım ve tüm statik analizler CATIA V5 R14 bilgisayar programında yapılmıştır. Şekil 3.1 de tasarlanan 7 serbestlik dereceli dokunsal cihazın CAD modeli görülmektedir. Çizelge 3.1' de Dokunsal cihaz tasarım kriterleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Dokunsal Cihaz Tasarım Kriterleri

Tasarım Kriterleri	İstenen Değerler
Çalışma Hacmi	50 cm yarıçapında yarım küre
Maksimum Kuvvet	10 N
Maksimum Tork	500 Nmm z,y, 130 Nmm x
Maksimum Sürekli Kuvvet	1.5 N
Maksimum Sürekli Tork	180 Nmm z,y, 50 Nmm x
Rijidlik	Maksimum (1N/mm)
Boşluk	Minimum

Tasarlanan cihazda başlangıçtaki 4 dönme eksenini bir noktada kesiştirilmiş, böylece ters kinematik çözümleri kolaylaştırılmıştır. Hareket iletimi için tel tahrikli sistem kullanılmış, bu sayede istenmeyen boşluk ve titreşimler engellenmiştir. Uç noktada kullanılan 3 mini motorda tel tahrikli iletim sistemi kullanılmamıştır. Cihaz yapısal olarak insan kolunun simetrisinde tasarlanmıştır. Bu sayede insan kolunun yapabildiği tüm hareketlere cevap verebilmektedir.



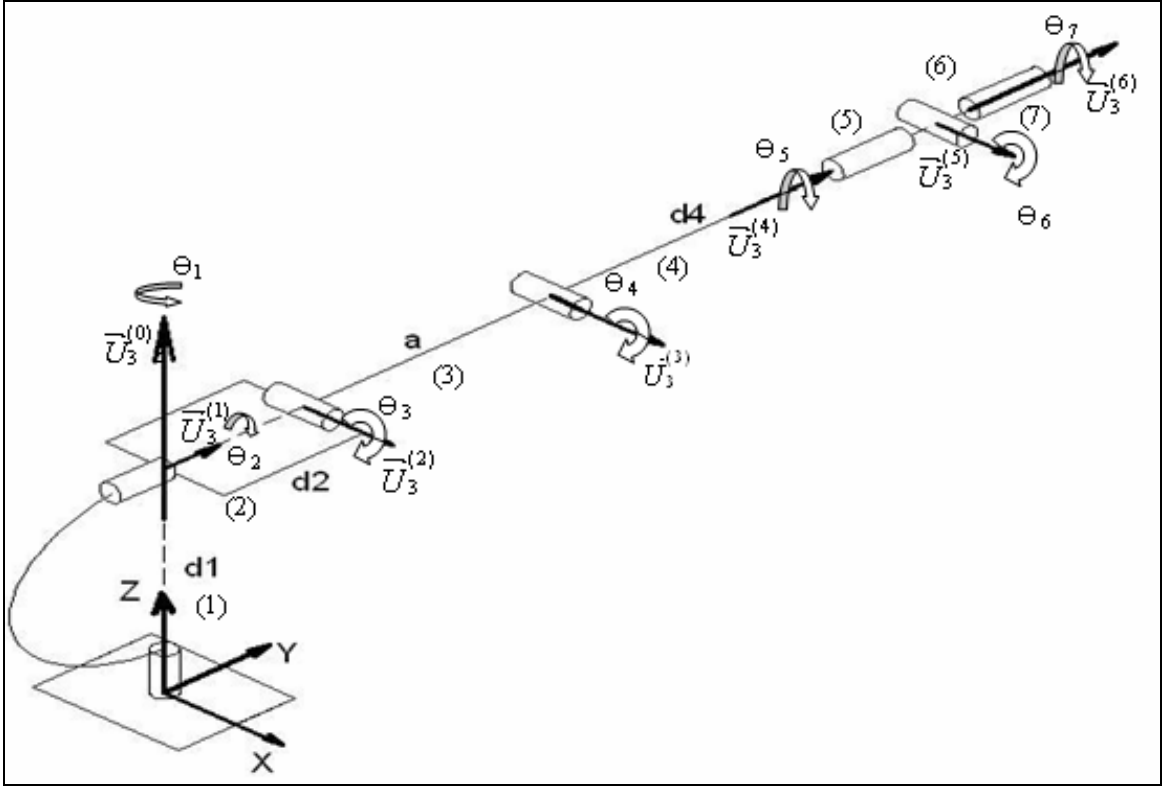
Şekil 3.1 Tasarımı Yapılmış Olan Dokunsal Cihazın CAD Modeli

3.2 Kinematik Tasarım

Geometrik bir sistemin yapısını ve hareketini inceleyen bilim dalına kinematik denir. Kinematik denklemler robot manipülatörlerin uç noktasının konum ve yöneliminin eklem değişkenleri cinsinden ifade edilebilmesine olanak sağlar. İleri kinematik ve ters kinematik olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Eklem açıları verildiğinde, kartezyen uzayda bir robot manipülatörün uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini bulma işlemine ileri kinematik problem denir[12]. Bir robot manipülatörün uç işlevcisinin yönelimini ve konumunu kartezyen koordinat sisteminden eklem koordinat sistemine dönüştürme işine ters kinematik problem denir[12]. Bu kısımda tasarlanan 7 serbestlik dereceli dokunsal cihazın kinematik modeli tanımlanacaktır. Bu kinematik model kullanılarak cihazın tüm tekil noktaları tanımlanmıştır.

3.3 Tasarlanan 7 Serbestlik Dereceli Dokunsal Cihazın Kinematik Modeli

İnsan kolunun çalışma hacmine en yakın tasarımın sağlanması amacıyla, tasarlanan cihazın kinematik modeli insan kolunun kinematik modeline benzetilmeye çalışılmıştır. Genel olarak cihazın başlangıcındaki 4 dönme eksenini bir noktada kesiştirilmek suretiyle cihazın ters ve ileri kinematik çözümü kolaylaştırılmıştır. Cihazın ileri ve ters kinematik çözümleri elde edilmiş ve kinematik açıdan çözümsüz olduğu noktalar belirlenmiştir. Bu anlamda kinematik model Denavit- Hartenberg metodu kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3.2’ de tasarlanan cihazın kinematik modeli görülmektedir. Tasarımda “d2 ve d4” 250 mm, “d1” 530 mm ve “a” 170 mm olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.2’ de dokunsal cihazın kinematik parametreleri görülmektedir.



Şekil 3.2 Tasarlanan Cihazın Kinematik Modeli

Çizelge 3.2 Dokunsal Cihazın Kinematik Parametreleri

link	a_i	α_i	d_i	Q_i
1	0	$-\pi/2$	d_1	Q_1
2	0	$-\pi/2$	d_2	Q_2
3	a	0	0	Q_3
4	0	$\pi/2$	d_4	Q_4
5	0	$-\pi/2$	0	Q_5
6	0	$\pi/2$	0	Q_6
7	0	0	0	Q_7

3.4 İleri Kinematik

Robot ana çerçevesiyle araç çerçevesi arasında eklem dönüştürme matrislerinden yararlanılarak tanımlanan ilişkiye robot ileri kinematiği denir. Eklem açıları verildiğinde, kartezyen uzayda bir robot manipülatörün uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini bulma işlemine ileri kinematik problem denir[12]. Tasarımı yapılan yedi serbestlik dereceli dokunsal cihazın ileri yön kinematiği denklem (3.1)' de verildiği gibidir.

$$\hat{C}^{(0,7)} = \hat{C}^{(0,1)} \hat{C}^{(1,2)} \hat{C}^{(2,3)} \hat{C}^{(3,4)} \hat{C}^{(4,5)} \hat{C}^{(5,6)} \hat{C}^{(6,7)} \quad (3.1)$$

Üstel dönme matrisi Tablo 1' de verilen kinematik parametrelere göre denklem (3.2) kullanılarak yazılabilir.

$$\hat{C}^{(k-1,k)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_k} e^{\tilde{u}_1 \alpha_k} \quad (3.2)$$

$$\hat{C}^{(0,1)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \quad (3.3a)$$

$$\hat{C}^{(1,2)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \quad (3.3b)$$

$$\hat{C}^{(2,3)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_1 0} \quad (3.3c)$$

$$\hat{C}^{(3,4)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \quad (3.3d)$$

$$\hat{C}^{(4,5)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \quad (3.3e)$$

$$\hat{C}^{(5,6)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_6} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \quad (3.3f)$$

$$\hat{C}^{(6,7)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_7} e^{\tilde{u}_1 0} \quad (3.3g)$$

Uç noktanın yönelim matrisi yukarıdaki denklemlerden faydalanarak aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\hat{C}^{(0,2)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \quad (3.4a)$$

$$\hat{C}^{(0,3)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_1 0} \quad (3.4b)$$

$$\hat{C}^{(0,4)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_1 0} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \quad (3.4c)$$

$$\hat{C}^{(0,5)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_1 0} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \quad (3.4d)$$

$$\begin{aligned}\hat{C}^{(0,6)} &= e^{\tilde{u}_3\theta_1} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_2} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_3\theta_4} e^{\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_5} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_6} e^{\tilde{u}_1\pi/2} \\ &= e^{\tilde{u}_3\theta_1} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_2} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_3\theta_4} e^{\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_5} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_6}\end{aligned}\quad (3.4e)$$

$$\hat{C}^{(0,7)} = e^{\tilde{u}_3\theta_1} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_2} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_3\theta_4} e^{\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_5} e^{\tilde{u}_2\theta_6} e^{\tilde{u}_3\theta_7} e^{\tilde{u}_1\pi/2}\quad (3.4f)$$

Bu denklem daha sade haliyle aşağıdaki denklem (3.5)' teki gibi yazılabilir.

$$\hat{C}^{(0,7)} = e^{\tilde{u}_3\theta_1} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_2} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_3\theta_4} e^{\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_5} e^{\tilde{u}_2\theta_6} e^{\tilde{u}_3\theta_7}\quad (3.5)$$

Tasarlanan cihazın bilek noktası eklem değişkenleri cinsinden ifade edilirse

$$\vec{r} = d_2 \vec{u}_3^{(1)} + a \vec{u}_1^{(3)} + d_4 \vec{u}_3^{(4)}\quad (3.6)$$

$$\vec{r} = d_2 \vec{u}_3^{(1/0)} + a \vec{u}_1^{(3/0)} + d_4 \vec{u}_3^{(4/0)} = d_2 \hat{C}^{(0,1)} \vec{u}_3 + a \hat{C}^{(0,3)} \vec{u}_1 + d_4 \hat{C}^{(0,4)} \vec{u}_3\quad (3.7)$$

Transformasyon matrisi denklem (3.8) deki gibi oluşturulur.

$$\begin{aligned}\vec{r} &= d_2 \left(e^{\tilde{u}_3\theta_1} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} \vec{u}_3 \right) + a \left(e^{\tilde{u}_3\theta_1} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_2} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_1\pi/2} \vec{u}_1 \right) + d_4 \left(e^{\tilde{u}_3\theta_1} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_2} \right. \\ &\quad \left. e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_4} e^{\tilde{u}_1\pi/2} \vec{u}_3 \right)\end{aligned}\quad (3.8)$$

Denklem (3.8) sadeleştirildiğinde, dokunsal cihazın bilek noktasının konum ve yönelimi ana koordinat sistemine göre ifade edilmiş olur.

$$\begin{aligned}\vec{r} &= e^{\tilde{u}_3\theta_1} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} \left(d_2 \vec{u}_3 + a e^{\tilde{u}_3\theta_2} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_1\pi/2} \vec{u}_1 \right. \\ &\quad \left. + d_4 e^{\tilde{u}_3\theta_2} e^{-\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_1\pi/2} e^{\tilde{u}_3\theta_4} e^{\tilde{u}_1\pi/2} \vec{u}_3 \right)\end{aligned}\quad (3.9)$$

Kartezyen koordinatlarda \vec{u}_1 , \vec{u}_2 , \vec{u}_3 vektörleri etrafında üstel dönme matrisleri (k) eklem değişkeni için aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$e^{\tilde{u}_1\theta_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_k) & -\sin(\theta_k) \\ 0 & \sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) \end{bmatrix}$$

$$e^{\tilde{u}_2\theta_k} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) & 0 & \sin(\theta_k) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_k) & 0 & \cos(\theta_k) \end{bmatrix}$$

$$e^{\tilde{u}_3\theta_k} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) & -\sin(\theta_k) & 0 \\ \sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Burada,

$$\bar{u}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{u}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{u}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Üstel dönme matrisleri ve birim vektör matrisleri kullanılarak bilek noktasının konumu elde edilir. Bilek noktasının ana koordinat sistemine göre kartezyen koordinatlardaki konumu eklem değişkenleri cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$x = r_1 = -s\theta_1 d_2 + (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + s\theta_1 s\theta_3 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 - s\theta_1 c\theta_3 c\theta_4) d_5 + (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + s\theta_1 s\theta_3) a \quad (3.10)$$

$$y = r_2 = c\theta_1 d_2 + (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_3 s\theta_4 + s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 + c\theta_1 c\theta_3 c\theta_4) d_5 + (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - c\theta_1 s\theta_3) a \quad (3.11)$$

$$z = r_3 = (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 - s\theta_2 s\theta_3 c\theta_4) d_5 - (s\theta_2 c\theta_3) a \quad (3.12)$$

3.5 Ters Kinematik ve Tekil Nokta Analizi

Robot manipülatörlerin ters kinematiği, robot kontrolünün en önemli aşamalarından birini oluşturmaktadır. Eklem açıları verildiğinde, kartezyen uzayda bir robot manipülatörün uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini bulma işlemine ileri kinematik problem denir[12]. İleri kinematik problem için her zaman bir çözüm olmasına karşın, Ters kinematik problem için her zaman bir çözüm yoktur. Bir robot manipülatörün uç işlevcisinin yönelimini ve konumunu Kartezyen koordinat sisteminden eklem koordinat sistemine dönüştürme işine ters kinematik problem denir[12]. Altı serbestlik dereceli manipülatörler için analitik ters kinematik çözüm kolaylıkla bulunabilmektedir. Ancak tasarımı yapılan dokunsal cihaz yedi serbestlik dereceli olup fazladan bir serbestlik derecesi içermektedir. Bu nedenle her bir eklem değişkeni sırayla tanımlanıp, diğer eklem değişkenleri tanımlanan bu eklem değişkenine göre ifade edilmektedir. Ancak ters kinematik çözümlemede her zaman tek bir çözüm bulunmaz. Bu durum tekil nokta olarak adlandırılır. Pratikte tekil nokta oluşmadan dokunsal cihaz tasarlamak mümkün değildir. Oluşan tekillikler tasarım sırasında tanımlanır ve cihazın kontrolünde bu noktalardan kaçınılır.

Ters kinematik denklem, denklem (3.9) kullanılarak türetilir.

$$\begin{aligned} \bar{r} &= e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \left(d_2 \bar{u}_3 + a e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_1 0} \bar{u}_1 + d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_1 0} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \right) \\ e^{-\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{r} &= \left(d_2 \bar{u}_3 + a e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_1 0} \bar{u}_1 + d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_1 0} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$e^{-\tilde{u}_3\theta_1} e^{\tilde{u}_1\pi/2} \bar{r} = d_2\bar{u}_3 + a(c\theta_2c\theta_3\bar{u}_1 + c\theta_3s\theta_2\bar{u}_2 - s\theta_3\bar{u}_3) + d_4(c\theta_2c\theta_3s\theta_4\bar{u}_1 + c\theta_2s\theta_3c\theta_4\bar{u}_1 + s\theta_2c\theta_3s\theta_4\bar{u}_2 + s\theta_2s\theta_3c\theta_4\bar{u}_2 - s\theta_3s\theta_4\bar{u}_3 + c\theta_3c\theta_4\bar{u}_3) \quad (3.14)$$

$$e^{-\tilde{u}_3\theta_1} e^{\tilde{u}_1\pi/2} \bar{r} = (c\theta_2c\theta_3s\theta_4d_4 + c\theta_2s\theta_3c\theta_4d_4 + c\theta_2c\theta_3a)\bar{u}_1 + (s\theta_2c\theta_3s\theta_4d_4 + s\theta_2s\theta_3c\theta_4d_4 + c\theta_3s\theta_2a)\bar{u}_2 + (d_2 - s\theta_3s\theta_4d_4 + c\theta_3c\theta_4d_4 - s\theta_3a)\bar{u}_3 \quad (3.15)$$

Denklemler düzenlenirse;

$$c\theta_1r_1 + s\theta_1r_2 = c\theta_2c\theta_3s\theta_4d_4 + c\theta_2s\theta_3c\theta_4d_4 + c\theta_2c\theta_3a \quad (3.16)$$

$$-r_3 = s\theta_2c\theta_3s\theta_4d_4 + s\theta_2s\theta_3c\theta_4d_4 + c\theta_3s\theta_2a \quad (3.17)$$

$$-s\theta_1r_1 + c\theta_1r_2 = d_2 - s\theta_3s\theta_4d_4 + c\theta_3c\theta_4d_4 - s\theta_3a \quad (3.18)$$

Yukarıda verilen üç denklemde, r_1 , r_2 , r_3 , d_2 , d_4 , a bilinmekte ve $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ bilinmemektedir. Bu denklemlerde her iki tarafın kareleri alınırsa;

$$c^2\theta_1r_1^2 + 2c\theta_1s\theta_1r_1r_2 + s^2\theta_1r_2^2 = c^2\theta_2c^2\theta_3s^2\theta_4d_4^2 + 2c^2\theta_2c\theta_3s\theta_3s\theta_4c\theta_4d_4^2\theta_4d_4^2 + c^2\theta_2s^2\theta_3c + 2c^2\theta_2c^2\theta_3s\theta_4d_4a + 2c^2\theta_2s\theta_3c\theta_3c\theta_4d_4a + a^2c^2\theta_2c^2\theta_3 \quad (3.19)$$

$$r_3^2 = s^2\theta_2c^2\theta_3s^2\theta_4d_4^2 + 2s^2\theta_2c\theta_3s\theta_3c\theta_4s\theta_4d_4^2 + s^2\theta_2s^2\theta_3c^2\theta_4d_4^2 + 2s^2\theta_2c^2\theta_3s\theta_4d_4a + 2s^2\theta_2s\theta_3c\theta_3c\theta_4d_4a + a^2c^2\theta_3s^2\theta_2 \quad (3.20)$$

$$s^2\theta_1r_1^2 - 2c\theta_1s\theta_1r_1r_2 + c^2\theta_1r_2^2 + 2(s\theta_1r_1 - c\theta_1r_2)d_2 + d_2^2 = s^2\theta_3s^2\theta_4d_4^2 + c^2\theta_3c^2\theta_4d_4^2\theta_4d_4^2 - 2s\theta_3c\theta_3c\theta_4s + 2s^2\theta_3s\theta_4d_4a - 2c\theta_3s\theta_3c\theta_4d_4a + a^2s^2\theta_3 \quad (3.21)$$

ve denklemler taraf tarafa toplandığında;

$$r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + 2(s\theta_1r_1 - c\theta_1r_2)d_2 + d_2^2 = d_4^2 + 2d_4^2as\theta_4 + a^2 \quad (3.22)$$

(3.16) ve (3.17) no'lu denklemler taraf tarafa toplanırsa;

$$c\theta_1r_1 + s\theta_1r_2 = c\theta_2c\theta_3s\theta_4d_4 + c\theta_2s\theta_3c\theta_4d_4 + c\theta_2c\theta_3a \quad (3.16)$$

$$-r_3 = s\theta_2c\theta_3s\theta_4d_4 + s\theta_2s\theta_3c\theta_4d_4 + c\theta_3s\theta_2a \quad (3.17)$$

$$s\theta_2c\theta_1r_1 + s\theta_2s\theta_1r_2 + c\theta_2r_3 = 0 \text{ Bulunur.} \quad (3.23)$$

θ_1 ' in bilindiği kabulüne göre çözüm edilirse

Denklem (3.21)' i kullanarak θ_4 bulunabilir

$$r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + 2(s\theta_1 r_1 - c\theta_1 r_2)d_2 + d_2^2 = d_4^2 + 2d_4^2 a s\theta_4 + a^2 \quad (3.21)$$

$$\sin \theta_4 = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + 2(s\theta_1 r_1 - c\theta_1 r_2)d_2 + d_2^2 - d_4^2 - a^2}{2d_4 a} \quad (3.24)$$

$$\theta_4 = \sigma \sin^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + 2(s\theta_1 r_1 - c\theta_1 r_2)d_2 + d_2^2 - d_4^2 - a^2}{2d_4 a} \right) \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.25)$$

Denklem (3.23) de $\tan(\theta/2)$ dönüşümü kullanılarak θ_2 bulunabilir.

$$t_2 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{2t_2}{1+t_2^2} \Rightarrow \cos \theta_2 = \frac{1-t_2^2}{1+t_2^2}$$

$$\frac{2t_2}{1+t_2^2} c\theta_1 r_1 + \frac{2t_2}{1+t_2^2} s\theta_1 r_2 + \frac{1-t_2^2}{1+t_2^2} r_3 = 0 \quad (3.26)$$

$$2t_2 c\theta_1 r_1 + 2t_2 s\theta_1 r_2 + r_3 - r_3 t_2^2 = 0 \quad (3.27)$$

$$t_2 = \frac{(c\theta_1 r_1 + s\theta_1 r_2) + \sigma \sqrt{(c\theta_1 r_1 + s\theta_1 r_2)^2 + r_3^2}}{r_3} \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.28)$$

$$\theta_2 = a \tan 2 \left[2t_2; 1-t_2^2 \right] \text{ bulunur.} \quad (3.29)$$

$r_1 = r_2 = r_3 = 0$ olursa denklem (3.27) çözülemeyeceğinden birinci tekil nokta oluşur.

Denklem (3.17) de $\tan(\theta/2)$ dönüşümü kullanılarak θ_3 bulunabilir.

$$t_3 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_3 = \frac{2t_3}{1+t_3^2} \Rightarrow \cos \theta_3 = \frac{1-t_3^2}{1+t_3^2}$$

$$c\theta_3 (s\theta_2 s\theta_4 d_4 + s\theta_2 a) + s\theta_3 (s\theta_2 c\theta_4 d_4) + r_3 = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{1-t_3^2}{1+t_3^2} (s\theta_2 s\theta_4 d_4 + s\theta_2 a) + \frac{2t_3}{1+t_3^2} (s\theta_2 c\theta_4 d_4) + r_3 = 0 \quad (3.31)$$

$$t_3 = \frac{-s\theta_2 c\theta_4 d_4 + \sigma \sqrt{(s\theta_2 c\theta_4 d_4)^2 - r_3^2 + ((s\theta_2 s\theta_4 d_4)^2 + (s\theta_2 a)^2)}}{-s\theta_2 s\theta_4 d_4 - s\theta_2 a + r_3}, \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.32)$$

$$\theta_3 = a \tan 2 \left[2t_3; 1-t_3^2 \right] \text{ olur.} \quad (3.33)$$

$\sin \theta_2 = 0$ olduğunda denklem (3.31) çözülemeyeceğinden dolayı ikinci tekil nokta oluşur.

$$\sin \theta_2 = 0 \Rightarrow \theta_2 = 0, \pm\pi$$

θ_2 'in bilindiği kabulüne göre çözüm edilirse

Denklem (3.23) $\tan(\theta/2)$ dönüşümü kullanılarak düzenlenirse θ_1 bulunabilir

$$t_1 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_1 = \frac{2t_1}{1+t_1^2} \Rightarrow \cos \theta_1 = \frac{1-t_1^2}{1+t_1^2}$$

$$s\theta_2 \frac{1-t_1^2}{1+t_1^2} r_1 + s\theta_2 \frac{2t_1}{1+t_1^2} r_2 + c\theta_2 r_3 = 0 \quad (3.34)$$

$$t_1^2 (c\theta_2 r_3 - s\theta_2 r_1) + 2s\theta_2 r_2 t_1 + s\theta_2 r_1 + c\theta_2 r_3 = 0 \quad (3.35)$$

$$t_1 = \frac{-2s\theta_2 r_2 + \sigma \sqrt{(s\theta_2 r_2)^2 + (s\theta_2 r_1)^2 - (c\theta_2 r_3)^2}}{c\theta_2 r_3 - s\theta_2 r_1}, \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.36)$$

$$\theta_1 = a \tan 2 \left[2t_1; 1-t_1^2 \right] \quad (3.37)$$

$r_1 = r_2 = 0$ olduğunda denklem (3.35) çözülemeyeceğinden dolayı üçüncü tekil nokta oluşur.

$$r_1 = r_2 = 0$$

θ_1 bulunduğuna göre

$$r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + 2(s\theta_1 r_1 - c\theta_1 r_2) d_2 + d_2^2 = d_4^2 + 2d_4^2 a s\theta_4 + a^2$$

$$\sin \theta_4 = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + 2(s\theta_1 r_1 - c\theta_1 r_2) d_2 + d_2^2 - d_4^2 - a^2}{2d_4 a} \quad (3.38)$$

$$\theta_4 = \sigma \sin^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + 2(s\theta_1 r_1 - c\theta_1 r_2) d_2 + d_2^2 - d_4^2 - a^2}{2d_4 a} \right), \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.39)$$

Denklem (3.17) $\tan(\theta/2)$ dönüşümü kullanılarak düzenlenirse θ_3 bulunabilir.

$$t_3 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_3 = \frac{2t_3}{1+t_3^2} \Rightarrow \cos \theta_3 = \frac{1-t_3^2}{1+t_3^2}$$

$$c\theta_3(s\theta_2s\theta_4d_4 + s\theta_2a) + s\theta_3(s\theta_2c\theta_4d_4) + r_3 = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{1-t_3^2}{1+t_3^2}(s\theta_2s\theta_4d_4 + s\theta_2a) + \frac{2t_3}{1+t_3^2}(s\theta_2c\theta_4d_4) + r_3 = 0 \quad (3.41)$$

$$t_3 = \frac{-s\theta_2c\theta_4d_4 + \sigma\sqrt{(s\theta_2c\theta_4d_4)^2 - r_3^2 + ((s\theta_2s\theta_4d_4)^2 + (s\theta_2a)^2)}}{-s\theta_2s\theta_4d_4 - s\theta_2a + r_3}, \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.42)$$

$$\theta_3 = a \tan 2\left[2t_3; 1-t_3^2\right] \text{ olur.} \quad (3.43)$$

$\sin \theta_2 = 0$ olduğunda denklem (3.41) çözülemeyeceğinden dolayı ikinci tekil nokta oluşur.

$$\sin \theta_2 = 0 \Rightarrow \theta_2 = 0, \pm\pi$$

θ_3 'ün bilindiği kabulüne göre çözüm edilirse

$$r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + 2(s\theta_1r_1 - c\theta_1r_2)d_2 + d_2^2 = d_4^2 + 2d_4^2as\theta_4 + a^2$$

$$s\theta_1r_1 - c\theta_1r_2 = \frac{d_4^2 + 2d_4^2as\theta_4 + a^2 - r_1^2 - r_2^2 - r_3^2 - d_2^2}{2d_2} \quad (3.44)$$

Denklem (3.18) den $s\theta_1r_1 - c\theta_1r_2$ ifadesi çekilip yerine yazılırsa;

$$2d_2d_4s\theta_3s\theta_4 - 2d_2d_4c\theta_3c\theta_4 - 2d_4as\theta_4 + \underbrace{(2d_2as\theta_3 - d_4^2 - a^2 + r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 - d_2^2)}_{(z) \text{ dersek}} = 0$$

Yukarıdaki denkleme yarım açı formülü uygulanırsa

$$t_4 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_4 = \frac{2t_4}{1+t_4^2} \Rightarrow \cos \theta_4 = \frac{1-t_4^2}{1+t_4^2}$$

$$2d_2d_4s\theta_3 \frac{2t_4}{1+t_4^2} - 2d_2d_4c\theta_3 \frac{1-t_4^2}{1+t_4^2} - 2d_4a \frac{2t_4}{1+t_4^2} + (z) = 0 \quad (3.46)$$

$$t_4 = \frac{-2d_2d_4s\theta_3 + 2d_4a + \sigma\sqrt{(2d_2d_4s\theta_3 - 2d_4a)^2 - (z^2 - 4d_2^2d_4^2c^2\theta_3)}}{(d_2d_4c\theta_3 + z)} \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.47)$$

$$\theta_4 = a \tan 2\left[2t_4; 1-t_4^2\right] \quad (3.48)$$

θ_4 bulunduğuna göre

Denklem (3.22) de yarım açı formülü uygulanırsa

$$t_1 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_1 = \frac{2t_1}{1+t_1^2} \Rightarrow \cos \theta_1 = \frac{1-t_1^2}{1+t_1^2}$$

$$2d_2(s\theta_1 r_1 - c\theta_1 r_2) = \underbrace{d_4^2 + 2d_4^2 a s \theta_4 + a^2 - r_1^2 - r_2^2 - r_3^2 - d_2^2}_{(s) \text{ dersek}} \quad (3.49)$$

$$2d_2 \left(\frac{2t_1}{1+t_1^2} r_1 - \frac{1-t_1^2}{1+t_1^2} r_2 \right) - (s) = 0 \quad (3.50)$$

$$4d_2 r_1 t_1 - 2d_2 r_2 + 2d_2 r_2 t_1^2 - s + s t_1^2 \quad (3.51)$$

$$t_1 = \frac{-4d_2 r_1 + \sigma \sqrt{4d_2^2 r_1^2 + (4d_2^2 r_2^2 + s^2)}}{2d_2 r_2 + s} \quad (3.52)$$

$$\theta_1 = a \tan 2 \left[2t_1; 1-t_1^2 \right] \text{ bulunur.} \quad (3.53)$$

θ_1 bulunduğuna göre;

Denklem (3.23) $\tan(\theta/2)$ dönüşümü kullanılarak düzenlenirse θ_2 bulunabilir.

$$t_2 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{2t_2}{1+t_2^2} \Rightarrow \cos \theta_2 = \frac{1-t_2^2}{1+t_2^2}$$

$$\frac{2t_2}{1+t_2^2} c\theta_1 r_1 + \frac{2t_2}{1+t_2^2} s\theta_1 r_2 + \frac{1-t_2^2}{1+t_2^2} r_3 = 0 \quad (3.54)$$

$$2t_2 c\theta_1 r_1 + 2t_2 s\theta_1 r_2 + r_3 - r_3 t_2^2 = 0 \quad (3.55)$$

$$t_2 = \frac{(c\theta_1 r_1 + s\theta_1 r_2) + \sigma \sqrt{(c\theta_1 r_1 + s\theta_1 r_2)^2 + r_3^2}}{r_3}, \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.56)$$

$$\theta_2 = a \tan 2 \left[2t_2; 1-t_2^2 \right] \text{ bulunur.} \quad (3.57)$$

$r_1 = r_2 = r_3 = 0$ olursa denklem (3.55) çözülemeyeceğinden birinci tekil nokta oluşur.

θ_4 'ün bilindiği kabulüne göre çözüm edilirse

Denklem (3.22) de yarım açı formülü uygulanırsa

$$t_1 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_1 = \frac{2t_1}{1+t_1^2} \Rightarrow \cos \theta_1 = \frac{1-t_1^2}{1+t_1^2}$$

$$2d_2(s\theta_1 r_1 - c\theta_1 r_2) = \underbrace{d_4^2 + 2d_4^2 a s \theta_4 + a^2 - r_1^2 - r_2^2 - r_3^2 - d_2^2}_{(s) \text{ dersek}} \quad (3.58)$$

$$2d_2 \left(\frac{2t_1}{1+t_1^2} r_1 - \frac{1-t_1^2}{1+t_1^2} r_2 \right) - (s) = 0 \quad (3.59)$$

$$4d_2 r_1 t_1 - 2d_2 r_2 + 2d_2 r_2 t_1^2 - s + s t_1^2 \quad (3.60)$$

$$t_1 = \frac{-4d_2 r_1 + \sigma \sqrt{4d_2^2 r_1^2 + (4d_2^2 r_2^2 + s^2)}}{2d_2 r_2 + s} \quad (3.61)$$

$$\theta_1 = a \tan 2 \left[2t_1; 1-t_1^2 \right] \text{ bulunur.} \quad (3.62)$$

θ_1 bulunduğuna göre;

Denklem (3.23) yarım açı formülüne göre düzenlenirse θ_2 bulunabilir.

$$t_2 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{2t_2}{1+t_2^2} \Rightarrow \cos \theta_2 = \frac{1-t_2^2}{1+t_2^2}$$

$$\frac{2t_2}{1+t_2^2} c\theta_1 r_1 + \frac{2t_2}{1+t_2^2} s\theta_1 r_2 + \frac{1-t_2^2}{1+t_2^2} r_3 = 0 \quad (3.63)$$

$$2t_2 c\theta_1 r_1 + 2t_2 s\theta_1 r_2 + r_3 - r_3 t_2^2 = 0 \quad (3.64)$$

$$t_2 = \frac{(c\theta_1 r_1 + s\theta_1 r_2) + \sigma \sqrt{(c\theta_1 r_1 + s\theta_1 r_2)^2 + r_3^2}}{r_3} \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.65)$$

$$\theta_2 = a \tan 2 \left[2t_2; 1-t_2^2 \right] \text{ bulunur.} \quad (3.66)$$

$r_1 = r_2 = r_3 = 0$ olursa denklem (3.64) çözülemeyeceğinden birinci tekil nokta oluşur.

Denklem (3.17) $\tan(\theta/2)$ dönüşümü kullanılarak düzenlenirse θ_3 bulunabilir.

$$t_3 = \tan(\theta/2) \Rightarrow \sin \theta_3 = \frac{2t_3}{1+t_3^2} \Rightarrow \cos \theta_3 = \frac{1-t_3^2}{1+t_3^2}$$

$$c\theta_3(s\theta_2s\theta_4d_4 + s\theta_2a) + s\theta_3(s\theta_2c\theta_4d_4) + r_3 = 0 \quad (3.67)$$

$$\frac{1-t_3^2}{1+t_3^2}(s\theta_2s\theta_4d_4 + s\theta_2a) + \frac{2t_3}{1+t_3^2}(s\theta_2c\theta_4d_4) + r_3 = 0 \quad (3.68)$$

$$t_3 = \frac{-s\theta_2c\theta_4d_4 + \sigma\sqrt{(s\theta_2c\theta_4d_4)^2 - r_3^2 + (s\theta_2s\theta_4d_4)^2 + (s\theta_2a)^2}}{-s\theta_2s\theta_4d_4 - s\theta_2a + r_3} \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.69)$$

$$\theta_3 = a \tan 2 \left[2t_3; 1-t_3^2 \right] \text{ olur.} \quad (3.70)$$

$\sin \theta_2 = 0$ olduğunda denklem (3.68) çözülemeyeceğinden dolayı ikinci tekil nokta oluşur.

$$\sin \theta_2 = 0 \Rightarrow \theta_2 = 0, \pm\pi$$

$$e^{\tilde{u}_3\theta_5} e^{\tilde{u}_2\theta_6} e^{\tilde{u}_3\theta_7} = e^{-\tilde{u}_3\theta_4} e^{-\tilde{u}_3\theta_3} e^{\tilde{u}_1\pi/2} e^{-\tilde{u}_3\theta_2} e^{\tilde{u}_1\pi/2} e^{-\tilde{u}_3\theta_1} \hat{C}^{(0,7)} = \hat{C} \text{ (biliniyordu)} \quad (3.71)$$

Önce \bar{u}_3^t ile daha sonra \bar{u}_3 ile çarparsak

$$\bar{u}_3^t e^{\tilde{u}_3\theta_5} e^{\tilde{u}_2\theta_6} e^{\tilde{u}_3\theta_7} \bar{u}_3 = c_{33} \quad (3.72)$$

$$\bar{u}_3^t (\bar{u}_3 \cos \theta_6 + \bar{u}_1 \sin \theta_6) = c_{33} \quad (3.73)$$

$$\cos \theta_6 = c_{33} \quad (3.74)$$

$$\sin \theta_6 = \sigma \sqrt{1 - c_{33}^2} \quad \sigma = \pm 1 \quad (3.75)$$

$$\theta_6 = a \tan 2 \left[c_{33}; \sigma \sqrt{1 - c_{33}^2} \right] \quad (3.76)$$

Önce \bar{u}_1^t ile daha sonra \bar{u}_3 ile çarparsak

$$\bar{u}_1^t e^{\tilde{u}_3\theta_5} e^{\tilde{u}_2\theta_6} e^{\tilde{u}_3\theta_7} \bar{u}_3 = c_{13} \quad (3.77)$$

$$\left(\bar{u}_1^t \cos \theta_5 - \bar{u}_2^t \sin \theta_5 \right) (\bar{u}_3 \cos \theta_6 + \bar{u}_1 \sin \theta_6) = c_{13} \quad (3.78)$$

$$\cos \theta_5 \sin \theta_6 = c_{13} \quad (3.79)$$

$$\cos \theta_5 = \frac{c_{13}}{\sin \theta_6} \quad (3.80)$$

önce \bar{u}_2^t ile daha sonra \bar{u}_3 ile çarparsak

$$\bar{u}_2^t e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{\tilde{u}_2 \theta_6} e^{\tilde{u}_3 \theta_7} \bar{u}_3 = c_{23} \quad (3.81)$$

$$\left(\bar{u}_2^t \cos \theta_5 + \bar{u}_1^t \sin \theta_5 \right) \left(\bar{u}_3 \cos \theta_6 + \bar{u}_1 \sin \theta_6 \right) = c_{23} \quad (3.82)$$

$$\sin \theta_5 \sin \theta_6 = c_{23} \quad (3.83)$$

$$\sin \theta_5 = \frac{c_{23}}{\sin \theta_6} \quad (3.84)$$

$\sin \theta_6$ 'nın sıfır olması durumunda θ_5, θ_7 bağımsız olarak bulunamayacağından, $(\sin \theta_6 = 0 \Rightarrow \theta_6 = 0, \pm\pi)$ tekil nokta oluşur.

$$\theta_6 = a \tan 2[c_{23}; c_{13}] \quad (3.85)$$

Önce \bar{u}_3^t ile daha sonra \bar{u}_1 ile çarparsak

$$\bar{u}_3^t e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{\tilde{u}_2 \theta_6} e^{\tilde{u}_3 \theta_7} \bar{u}_1 = c_{31} \quad (3.86)$$

$$\left(\bar{u}_3^t \cos \theta_6 - \bar{u}_1^t \sin \theta_6 \right) \left(\bar{u}_1 \cos \theta_7 + \bar{u}_1 \sin \theta_7 \right) = c_{31} \quad (3.87)$$

$$-\sin \theta_6 \cos \theta_7 = c_{31} \quad (3.88)$$

$$\cos \theta_7 = \frac{-c_{31}}{\sin \theta_6} \quad (3.89)$$

Önce \bar{u}_3^t ile daha sonra \bar{u}_2 ile çarparsak

$$\bar{u}_3^t e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{\tilde{u}_2 \theta_6} e^{\tilde{u}_3 \theta_7} \bar{u}_2 = c_{32} \quad (3.90)$$

$$\left(\bar{u}_3^t \cos \theta_6 - \bar{u}_1^t \sin \theta_6 \right) \left(\bar{u}_2 \cos \theta_7 - \bar{u}_1 \sin \theta_7 \right) = c_{32} \quad (3.91)$$

$$\sin \theta_6 \sin \theta_7 = c_{32} \quad (3.92)$$

$$\sin \theta_7 = \frac{c_{32}}{\sin \theta_6} \quad (3.93)$$

$$\theta_7 = a \tan 2[c_{32}; -c_{31}] \quad (3.94)$$

$\sin \theta_6$ 'nın sıfır olması durumunda $(\sin \theta_6 = 0 \Rightarrow \theta_6 = 0, \pm\pi)$ tekil nokta oluşur.

4. BÖLÜM

4.1 Çalışma Hacmi Analizi

Dokunsal cihaz tasarımında bir diğer önemli unsur çalışma hacmidir. Çalışma hacmi, cihazın kullanılma alanlarını arttırdığı gibi kullanıcının tüm hareket ve isteklerine cevap verebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla tasarımı yapılan dokunsal cihaz serbestlik derecesi ve uzuv uzunlukları ile uygulamalarda insan kolunun yapabildiği birçok harekete cevap verebilmektedir. Çizelge 4.1’ de tasarlanan dokunsal cihazın eklem değişkenleri limitleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 Eklem Değişkenleri Limitleri

Eklem değişkenleri (Açılar)	Üst Limit	Alt Limit
θ_1	-90	90
θ_2	-150	150
θ_3	-150	150
θ_4	-150	150
θ_5	0	360
θ_6	0	360
θ_7	0	360

Şekil 4.1’ de tasarlanan 7 serbestlik dereceli dokunsal cihazın çalışma hacmi, ileri kinematik denklemleri kullanılarak MATLAB programında görsel olarak oluşturulmuştur. Burada; tasarlanan dokunsal cihazın uç noktasının konumu kartezyen koordinatlarda ileri kinematik denklemler kullanılarak eklem değişkenlerin farklı açılara göre belirlenmiş ve bu sayede robotun çalışma hacmi görselleştirilmiştir. Aynı yapı CATIA V5 CAD programında 3 boyutlu olarak görülebilir. Şekil 4.2 de ise Phantom 1,5/6DOF dokunsal cihazın çalışma hacmi görsel olarak verilmiştir[1]. Şekil 4.1 da kutucuklar içinde gösterilen bölgeler tasarlanan dokunsal cihazın çalışma hacminin Phantom 1,5/6DOF dokunsal cihazın çalışma hacminin üzerine çıktığı yerlerdir. Görüldüğü üzere tasarlanan 7 serbestlik dereceli dokunsal cihaz Phantom 1,5/6DOF dokunsal cihaza göre daha fazla hareket kabiliyeti ve %70 daha fazla çalışma hacmi sunmaktadır.

Birinci tekil nokta $\longrightarrow \theta_2 = 0, \pm \pi$

İkinci tekil nokta $\longrightarrow x = y = z = 0$

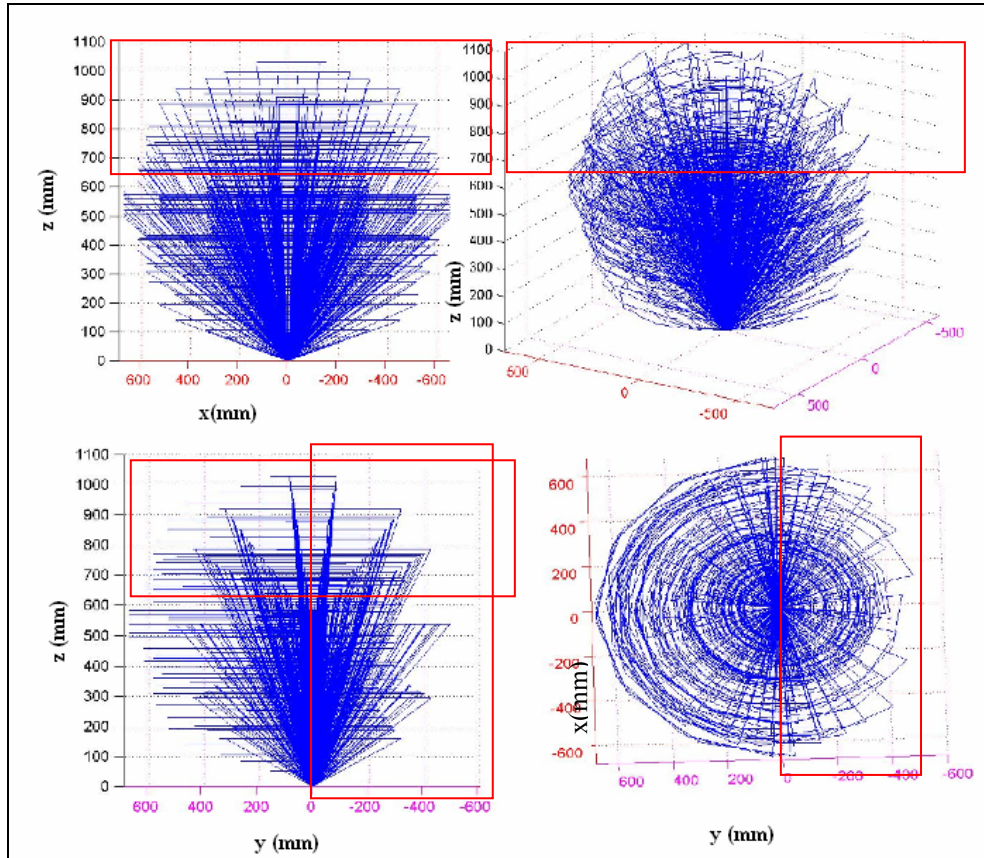
Üçüncü tekil nokta $\longrightarrow y = 0,$

Üçüncü tekil nokta $\longrightarrow \theta_6 = 0, \pm \pi$

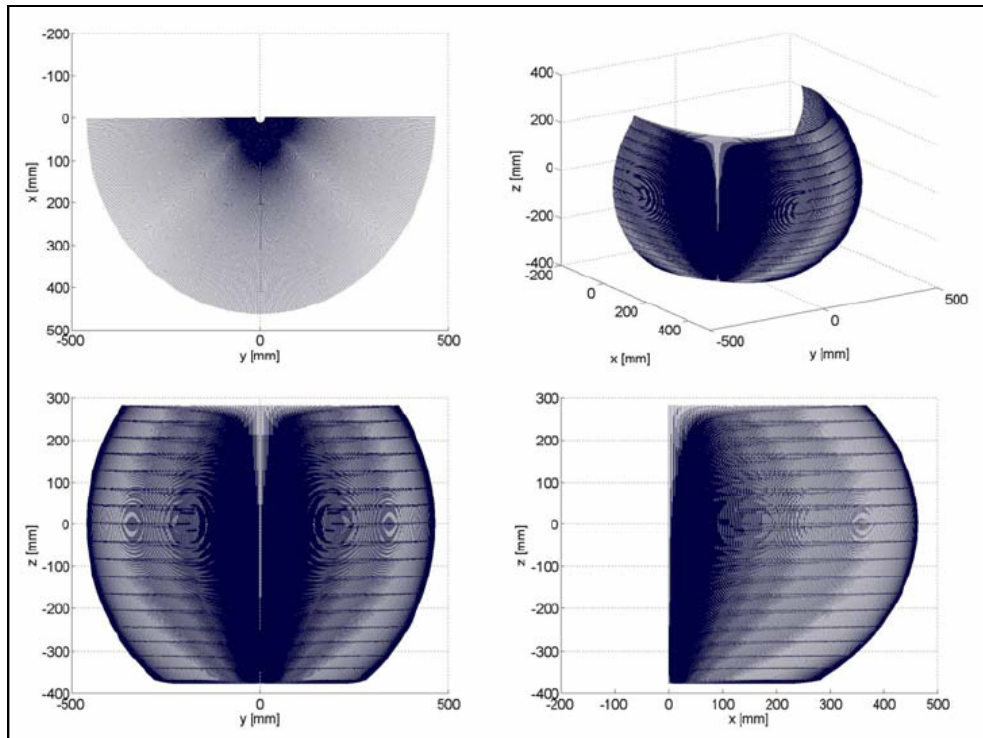
$$x = r_1 = -s\theta_1 d_2 + (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + s\theta_1 s\theta_3 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 - s\theta_1 c\theta_3 c\theta_4) d_5 + (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + s\theta_1 s\theta_3) a \quad (4.1)$$

$$y = r_2 = c\theta_1 d_2 + (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_3 s\theta_4 + s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\theta_4 + c\theta_1 c\theta_3 c\theta_4) d_5 + (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - c\theta_1 s\theta_3) a \quad (4.2)$$

$$z = r_3 = (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 - s\theta_2 s\theta_3 c\theta_4) d_5 - (s\theta_2 c\theta_3) a \quad (4.3)$$



Şekil 4.1 Tasarlanmış 7 Serbestlik Dereceli Dokunsal Cihazın Çalışma Hacmi



Şekil 4.2 Phantom 1,5/6DOF Dokunsal Cihazın Çalışma Hacmi

5. BÖLÜM

5.1 Motor Seçimi

Robota hareket veren parçadır. Gerçekleştirdiği işlev ve yapılarına göre farklı tiplerde motorlar vardır. Endüstride en yaygın kullanılan motor tipi AC motorlardır. Bu tip motorlar daha çok sabit hızlarda çalışır ve servo uygulamalar için pek uygun değildirler. Ayrıca bu motorların kontrolü de DC motorlara göre daha zordur. Bu nedenle servo uygulamalarında genellikle fırçalı DC motor kullanılır. Fırçasız doğru akım motorları, fırçalı olan türlere göre daha verimli çalışır. Fırçasız motorlar, sahip olduğu avantajlar nedeniyle pek çok cihazda tercih edilmektedir. Sadece konum kontrolü gerektiren uygulamalarda ise step motor kullanılır.

5.1.1 AC Motorlar

Bu motorların asenkron tipleri standart bir aygıt olmuştur. Senkron tipleri ise, büyük güç gerektiren yerlerde kullanılabilir. Alternatif akım motorları iki grupta toplanabilir: asenkron motorlar (indüksiyon motorları) ve senkron motorlar. Bütün bu motorların temel ilkesi, metalden yapılmış bir kütle, döner bir elektromanyetik alan yardımıyla sürüklenmesine dayanır. Bu iki grup motorlarda da eksenli iki armatür bulunur: bunların ilki olan stator sabit, ikincisi rotorsa hareketlidir. Senkron motorun statoru asenkron motorun statoruyla aynı şekilde ve aynı yapıdadır; birbirinden vernikle yalıtılmış manyetik saçlardan oluşan bir bilezik biçimindedir; bu saçların üzerindeki yivlere üç fazlı akımlarla beslenen bir sargı sarılmıştır.

5.1.2 DC Motorlar

Hareketleri düzgün, kesin ve güçlüdür. Hızları kolaylıkla değiştirilebilir; . Fırça içeren DC motorlarda, rotodaki sarımlara elektrik iletimi fırça-kollektör yapısı ile sağlanır. Dilimli bir yapıda olan kollektör düzeneği sayesinde, rotor sarımlarından geçen akımın yönü motor dönerken kendiliğinden değişir. Bu sistemin kıvılcım oluşturma, bakım gerektirme ve fırçalarda aşınma gibi problemleri vardır.

5.1.3 Fırçasız DC Motorlar

Fırçasız doğru akım motoru (brushless dc motor), komütasyon işlemini mekanik olarak değil elektronik olarak sağlayan bir motor türüdür. Fırça içeren DC motorlarda, rotodaki sarımlara elektrik iletimi fırça-kollektör yapısı ile sağlanır. Dilimli bir yapıda olan kollektör düzeneği sayesinde, rotor sarımlarından geçen akımın yönü motor dönerken kendiliğinden değişir. Bu sistemin kıvılcım oluşturma, bakım gerektirme ve fırçalarda aşınma gibi problemleri vardır. Fırçasız doğru akım motorları, fırçalı olan türlere göre daha verimli çalışır. Yani, aynı

giriş gücü uygulandığında, fırçasız motor fırçalı olana göre elektrik gücünü mekanik güce daha verimli olarak dönüştürür. Fırçasız motorlar, sahip olduğu avantajlar nedeniyle pek çok cihazda tercih edilmektedir. Örneğin, hardisk, CD/DVD oynatıcı, PC soğutma fanlarında bu motorlar kullanılır. Daha yüksek güçlü uygulamalar ise direct-drive olarak adlandırılan motor sürme yönteminde, endüstriyel uygulamalarda ve elektrikli taşıtlarda kullanılır.

5.1.4 Step Motorlar

Step motorlar açık çevrim problemleri için çok iyi çözüm sağlamaktadır. Bu tarz motorlar noktadan noktaya harekette ve düşük yüklerde çalışırlar. Ucuz maliyetli ve hatasız çalışırlar. Kritik yük ve hızların olmadığı ortamlarda çok verimli çalışırlar.

5.1.5 Motor Seçimi ve Hesaplamalar

Yukarıda açıklaması yapılan farklı tipteki motorlardan fırçasız DC motor (BLDC) birçok yönden üstünlükleri ile avantaj sağlamaktadır. Yüksek verim ve düşük rotor ataleti sayesinde, mekanik kol dokunsal cihazlar tasarımında çok büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle tasarımı yapılmış olan dokunsal cihazda dört adet BLDC motor kullanılmıştır. Uç noktada ise 3 adet DC minimotor kullanılmıştır. Dokunsal kalemi harekete geçiren insan eli olduğu için, dokunsal cihaz çok düşük hızlarda çalışır. Bu amaçla dokunsal cihazda ihtiyaç duyulan maksimum kuvvet ve tork değerleri aşağıda verilmiştir.

- Bilek noktasında tüm yönlerde 10 N' luk kuvvet
- Bilek noktasında tüm yönlerde 1.5 N' luk sürekli kuvvet
- Uç noktada 500 Nmm' lik tork
- Uç noktada 180 Nmm' lik sürekli tork
- Tüm kuvvet ve tork değerleri seçilen motorun stall tork değerlerini karşılamalıdır.

Minimotor seçimi;

Minimotorlar için DC motorlar seçilir. Motoru seçerken minimum boyut ve ihtiyaç duyulan tork değerlerini sağlaması göz önünde bulundurulmalıdır. Seçilen motorun ihtiyaç duyulan tork değerini sağlayamayabilmesi için düşük dişli oranına sahip bir dişli kutusu kullanılması gerekir. Bu amaçla seçilen 1 ve 2. minimotor 19:1, 3. minimotor ise 5.4:1 dişli oranına sahip olup % 90 verime sahiptir.

Minimotor 1 ve 2 için minimum stall tork ;

$$M_{\text{stall}} = \frac{M_{\text{peak}}}{i \cdot \eta} = \frac{500}{(19/1) \cdot (0.9)} = 28.72 \text{ Nmm}$$

Minimotor 3 için minimum stall tork

$$M_{\text{stall}} = \frac{M_{\text{peak}}}{i \cdot \eta} = \frac{130}{(5.4/1) \cdot (0.9)} = 26.75 \text{ Nmm}$$

Buna göre seçilen üç minimotor 28.8 Nmm stall tork değerine sahiptir(118730 serisi Maxon minimotor). Bu motor minimum stall tork değerini karşılamaktadır. Ayrıca 7 serbestlik dereceli cihazın maximum sürekli tork değerinin de hesaplanması gerekir

$$M_{\text{max}} = M_{\text{max sür}} \cdot i \cdot \eta = (4.98) \cdot (19/1) \cdot (0.9) = 86.2 \text{ Nmm}$$

$$M_{\text{max}} = M_{\text{max sür}} \cdot i \cdot \eta = (4.98) \cdot (5.4/1) \cdot (0.9) = 24.2 \text{ Nmm}$$

Motor seçimi için;

Virtual work metoduyla statik kuvvet analizinde belirli kuvvetlere göre motorları saptamak için temel ifade literatürde verilmiştir[13]. Bu ifade yerçekimi kuvveti, tork ve Jacobean transformasyon matrisine göre aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\bar{Q} = \bar{G} - \hat{J}_r^T \cdot \bar{R} \quad (5.1)$$

Tasarımı yapılmış olan dokunsal cihazda tüm hareketli parçaların ağırlık merkezi dönme eksenine çok yakındır ve harekete bağlı olarak yer değiştirmediğinden yer çekimi kuvveti ihmal edilebilir. Böylece denklem (5.1) aşağıda denklem (5.2)' de görüldüğü şekilde ifade edilir.

$$\bar{Q} = -\hat{J}_r^T \cdot \bar{R} \quad (5.2)$$

7 serbestlik dereceli dokunsal cihaz için oluşturulan Jacobean matrisi 7 sütun ve 6 satırdan oluşur.

$$\hat{J} = \begin{bmatrix} \bar{J}_{r1} & \bar{J}_{r2} & \bar{J}_{r3} & \bar{J}_{r4} & \bar{J}_{r5} & \bar{J}_{r6} & \bar{J}_{r7} \\ \bar{J}_{a1} & \bar{J}_{a2} & \bar{J}_{a3} & \bar{J}_{a4} & \bar{J}_{a5} & \bar{J}_{a6} & \bar{J}_{a7} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Jacobian matrisinin bileşenleri olan \bar{J}_{rk} ve \bar{J}_{ak} aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\bar{J}_{rk} = \frac{\partial \bar{r}}{\partial \theta_k} \quad (5.4)$$

$$\bar{J}_{ak} = \text{col} \left[\left(\frac{\partial \hat{C}}{\partial q_k} \right) \cdot \hat{C}^T \right] \quad (5.5)$$

Jacobian matrisinin bileşenleri denklem (5.4) ve (5.5) kullanılarak ifade edilirse.

$$\bar{J}_{r1} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} \tilde{u}_3 e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \left(d_2 \bar{u}_3 + a e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} \bar{u}_1 + d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \right) \quad (5.6)$$

$$\bar{J}_{r2} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \left(a e^{\tilde{u}_3 \theta_2} \tilde{u}_3 e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} \bar{u}_1 + d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_2} \tilde{u}_3 e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \right) \quad (5.7)$$

$$\bar{J}_{r3} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \left(a e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} \tilde{u}_3 \bar{u}_1 + d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} \tilde{u}_3 e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \right) \quad (5.8)$$

$$\bar{J}_{r4} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \left(d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} \tilde{u}_3 e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \right) \quad (5.9)$$

$$\bar{J}_{r5} = \bar{J}_{r6} = \bar{J}_{r7} = 0 \quad (5.10)$$

$$\bar{J}_{a1} = \bar{u}_3 \quad (5.11)$$

$$\bar{J}_{a2} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \quad (5.12)$$

$$\bar{J}_{a3} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \quad (5.13)$$

$$\bar{J}_{a4} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} \bar{u}_3 \quad (5.14)$$

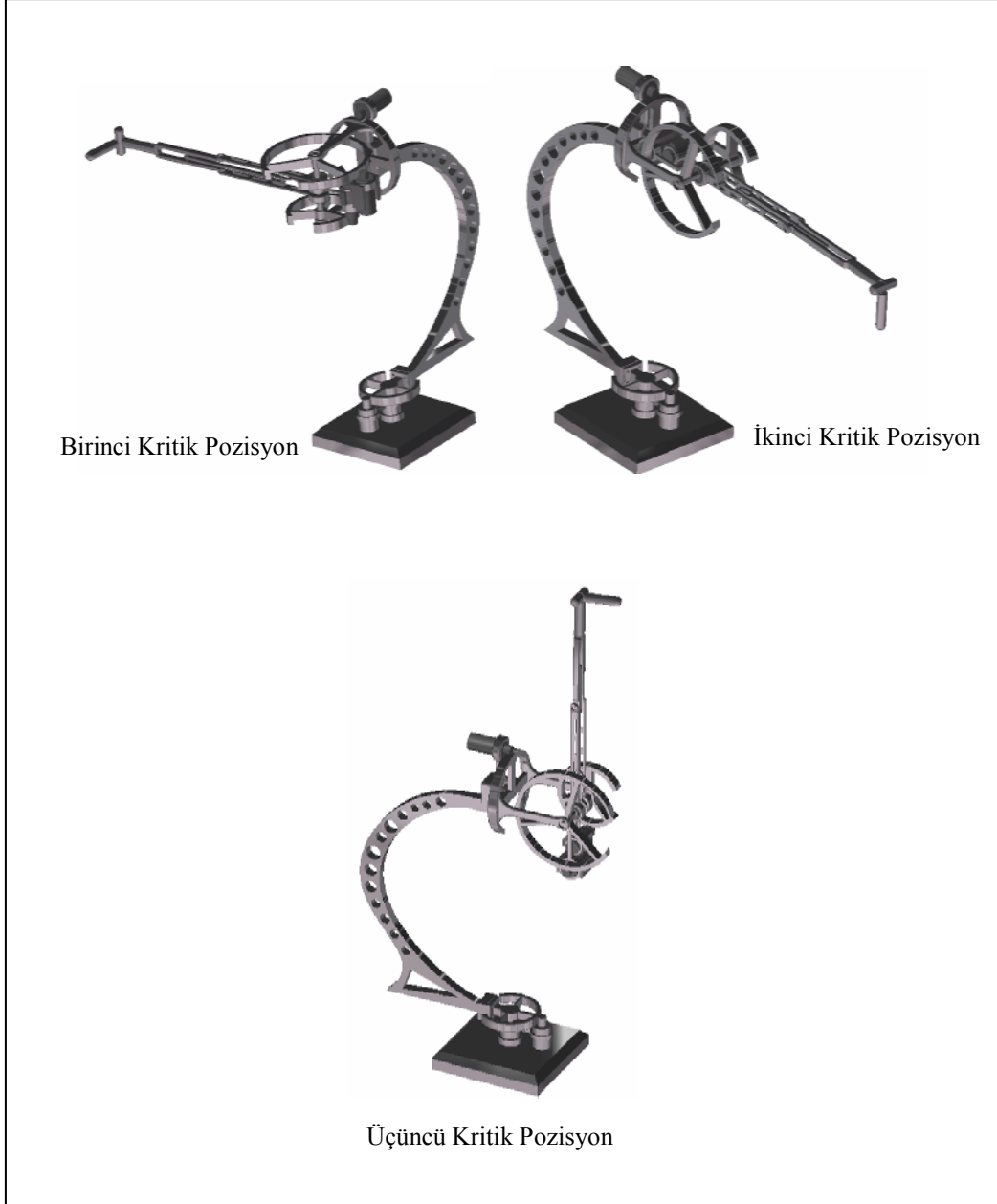
$$\bar{J}_{a5} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} \bar{u}_3 \quad (5.15)$$

$$\bar{J}_{a6} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_5} \bar{u}_2 \quad (5.16)$$

$$\bar{J}_{a6} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_2} e^{-\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_3 \theta_4} e^{\tilde{u}_1 \pi / 2} e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{\tilde{u}_2 \theta_6} \bar{u}_3 \quad (5.17)$$

Dokunsal cihazlara hareket el ile kullanıcı tarafından verilmesinden dolayı düşük hızlarda çalışır. Buradan hareketle 7 serbestlik dereceli dokunsal cihazın motorlarını seçerken tüm kritik pozisyonlara göre çözümlene yapılacaktır. Bu kritik pozisyonlar Çizelge 5.1' de verilmiştir. Motor torqları Çizelge 5.1' de verilen bu üç kritik pozisyonda bildiğimiz açı değerlerini ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7$) kullanmak suretiyle MATLAB programında hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1 7 Serbestlik dereceli dokunsal cihazın kritik pozisyonları



1. Kritik pozisyon tork değerleri

($\theta_1=0, \theta_2=-90, \theta_3=-90, \theta_4=90, \theta_5=90, \theta_6=90, \theta_7=90$)

$$F_{X_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 6.200 \\ 0.500 \\ 0.500 \\ 0.500 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Y_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.500 \\ 0.500 \\ 0.500 \\ 0.500 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Z_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.500 \\ 0.500 \\ 5.500 \\ 3.000 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{X_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.8250 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Y_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.5 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.1800 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Z_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.5 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.1800 \\ 0.1800 \\ 0.9300 \\ 0.5550 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

2. Kritik pozisyon tork değerleri

($\theta_1=0, \theta_2=0, \theta_3=0, \theta_4=90, \theta_5=90, \theta_6=90, \theta_7=90$)

$$F_{X_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 1.200 \\ 0.500 \\ 0.500 \\ 0.500 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Y_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 5.500 \\ 0.500 \\ 5.500 \\ 5.500 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Z_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.500 \\ 4.500 \\ 5.500 \\ 0.500 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{X_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.0750 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Y_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.5 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.9300 \\ 0.1800 \\ 0.9300 \\ 0.9300 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Z_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.5 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.1800 \\ 0.5700 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

3. Kritik pozisyon tork değerleri

($\theta_1=0, \theta_2=-90, \theta_3=0, \theta_4=90, \theta_5=90, \theta_6=90, \theta_7=90$)

$$F_{X_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 1.200 \\ 5.500 \\ 0.500 \\ 0.500 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Y_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.500 \\ 0.500 \\ 4.500 \\ 4.500 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Z_{\text{pik}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{pik}} = \begin{bmatrix} 0.500 \\ 0.500 \\ 0.500 \\ 0.500 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{X_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.0750 \\ 0.9300 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Y_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.5 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.1800 \\ 0.1800 \\ 0.5700 \\ 0.5700 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

$$F_{Z_{\text{maxsür}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.5 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad M_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.18 \\ 0.18 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{maxsür}} = \begin{bmatrix} 0.1800 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \\ 0.1800 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

Her bir motor için ayrı ayrı seçilen dişli oranına göre, stall tork ve maksimum sürekli tork değerleri hesaplanırsa;

$$\text{Motor 1} \Rightarrow Q1_{\text{pik}} = 6.200 \text{ Nm}, Q1_{\text{maxsür}} = 0.93 \text{ Nm}, i = 10:1$$

$$M1_{\text{stall}} = \frac{Q1_{\text{pik}}}{i} = \frac{6.200}{10} = 0.62 \text{ Nm}, \quad M1_{\text{maxsür}} = \frac{Q1_{\text{maxsür}}}{i} = \frac{0.93}{10} = 0.093 \text{ Nm}$$

$$\text{Motor 2} \Rightarrow Q2_{\text{pik}} = 5.500 \text{ Nm}, Q2_{\text{maxsür}} = 0.93 \text{ Nm}, i = 10:1$$

$$M2_{\text{stall}} = \frac{Q2_{\text{pik}}}{i} = \frac{5.500}{10} = 0.55 \text{ Nm}, \quad M2_{\text{maxsür}} = \frac{Q2_{\text{maxsür}}}{i} = \frac{0.93}{10} = 0.093 \text{ Nm}$$

$$\text{Motor 3} \Rightarrow Q3_{\text{pik}} = 5.500 \text{ Nm}, Q3_{\text{maxsür}} = 0.93 \text{ Nm}, i = 10:1$$

$$M3_{\text{stall}} = \frac{Q3_{\text{pik}}}{i} = \frac{5.500}{10} = 0.55 \text{ Nm}, \quad M3_{\text{maxsür}} = \frac{Q3_{\text{maxsür}}}{i} = \frac{0.93}{10} = 0.093 \text{ Nm}$$

$$\text{Motor 4} \Rightarrow Q4_{\text{pik}} = 5.500 \text{ Nm}, Q4_{\text{maxsür}} = 0.93 \text{ Nm}, i = 10:1$$

$$M4_{\text{stall}} = \frac{Q4_{\text{pik}}}{i} = \frac{5.500}{10} = 0.55 \text{ Nm}, \quad M4_{\text{maxsür}} = \frac{Q4_{\text{maxsür}}}{i} = \frac{0.93}{10} = 0.093 \text{ Nm}$$

Yapılan hesaplamalara göre ilk dört motor Maxon katalogundan seçilirse;

Motor 1 : 283873 Maxon BLDC (2.19 Nm stall ve 0.186 Nm max. sür. Trq)

Motor 2 : 283869 Maxon BLDC (0.64 Nm stall ve 0.0929 Nm max. sür. Trq)

Motor 3 : 283869 Maxon BLDC (0.64 Nm stall ve 0.0929 Nm max. sür. Trq)

Motor 4 : 283869 Maxon BLDC (0.64 Nm stall ve 0.0929 Nm max. sür. Trq)

Üç adet minimotor ise;

Minimotor 1 ve 2 : 1118730 Maxon DC minimotor – 110322 dişli kutusu

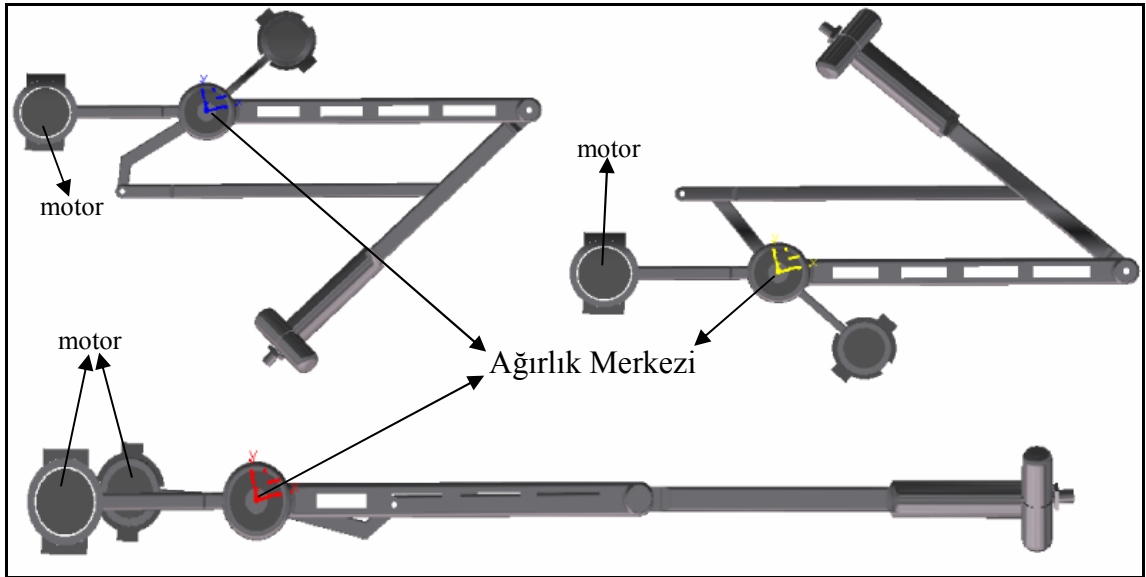
(28.8 Nmm stall ve 4.98 Nmm max. sür. Tork - 19/1 dişli oranı)

Minimotor 3 : 1118730 Maxon DC minimotor -110321 dişli kutusu

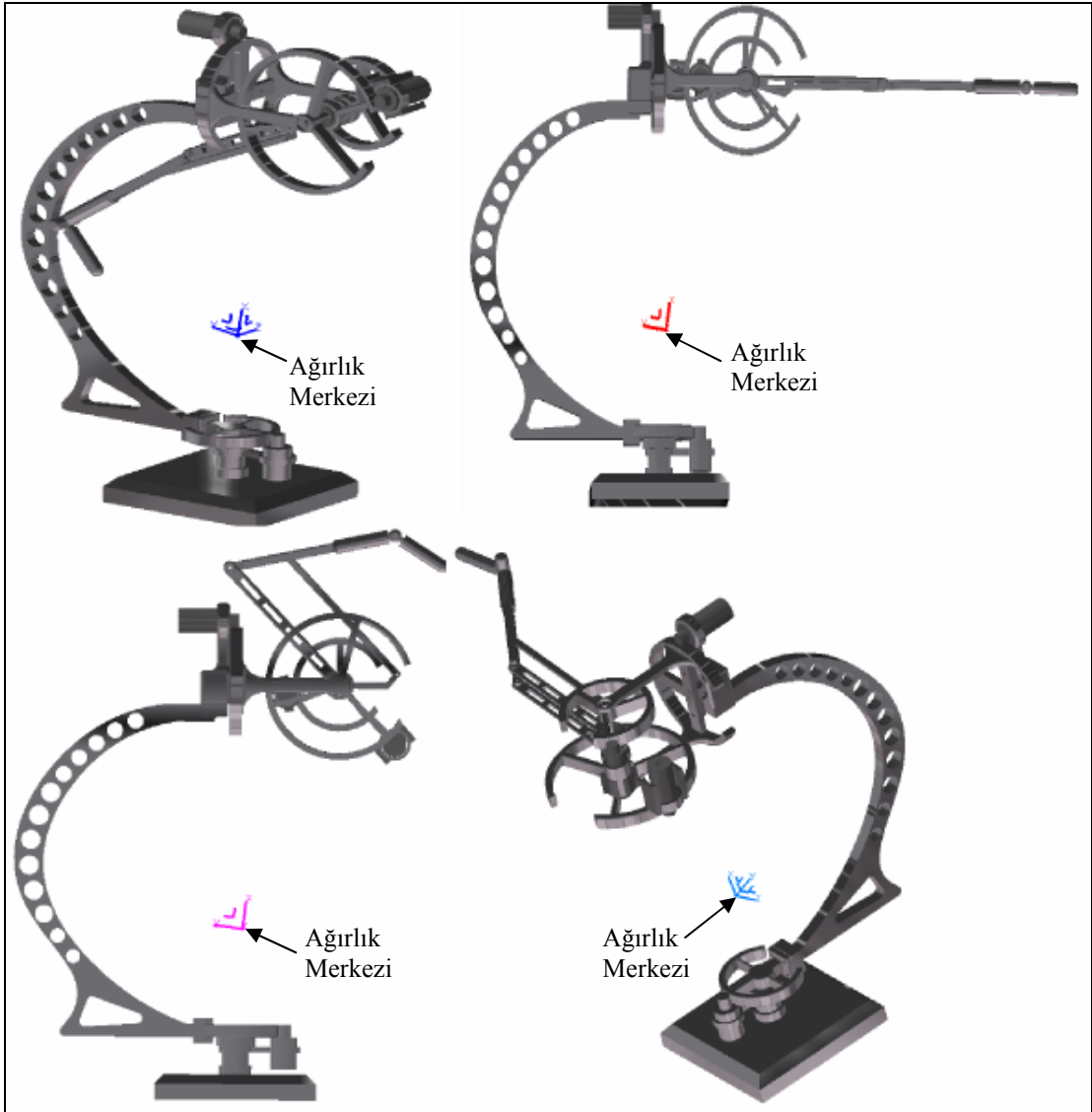
(28.8 Nmm stall ve 4.98 Nmm max. sür. Tork – 5.4/1 dişli oranı)

5.2 Ağırlık Merkezi

Dokunsal cihaz tasarımında ağırlık merkezi, oluşacak olan atalet kuvvetlerinden dolayı oldukça önemlidir. Tasarımı yapılan dokunsal cihazda tüm hareketli parçaların ağırlık merkezi dönme eksenine yaklaştırılarak atalet momenti minimuma indirgenmiştir. Bu amaçla şekil 5.1’ de görüldüğü gibi motorlar kolla birlikte hareket edecek şekilde konumlandırılmış olup, ağırlık merkezi harekete bağlı olarak yer değiştirmemektedir. Bu sayede tüm sistemin ağırlık merkezi dönme eksenine çok yakın konumlandırılmıştır. Şekil 5.2’ de tüm sistemin ağırlık merkezi değişik pozisyonlarda verilmiştir. Sistemin ağırlık merkezi CATIA V5 R14 bilgisayar programında hesaplanmıştır. Sistemde kullanılan motorlar gerçek ağırlıkları ile hesaplamada kullanılmıştır. Görüldüğü gibi tasarımı yapılmış olan dokunsal cihazın ağırlık merkezi hareketle değişmemekte ve dönme eksenine çok yakın bulunmaktadır.



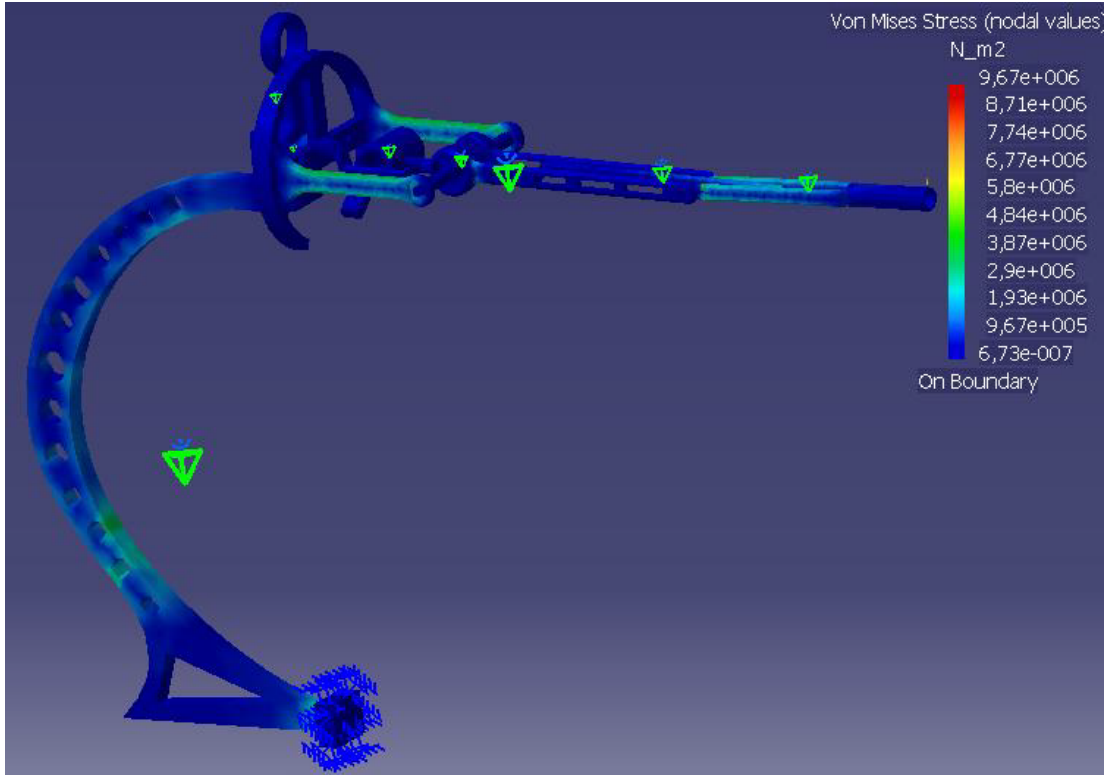
Şekil 5.1 Hareketli Motor Yapısı ve Ağırlık Merkezi



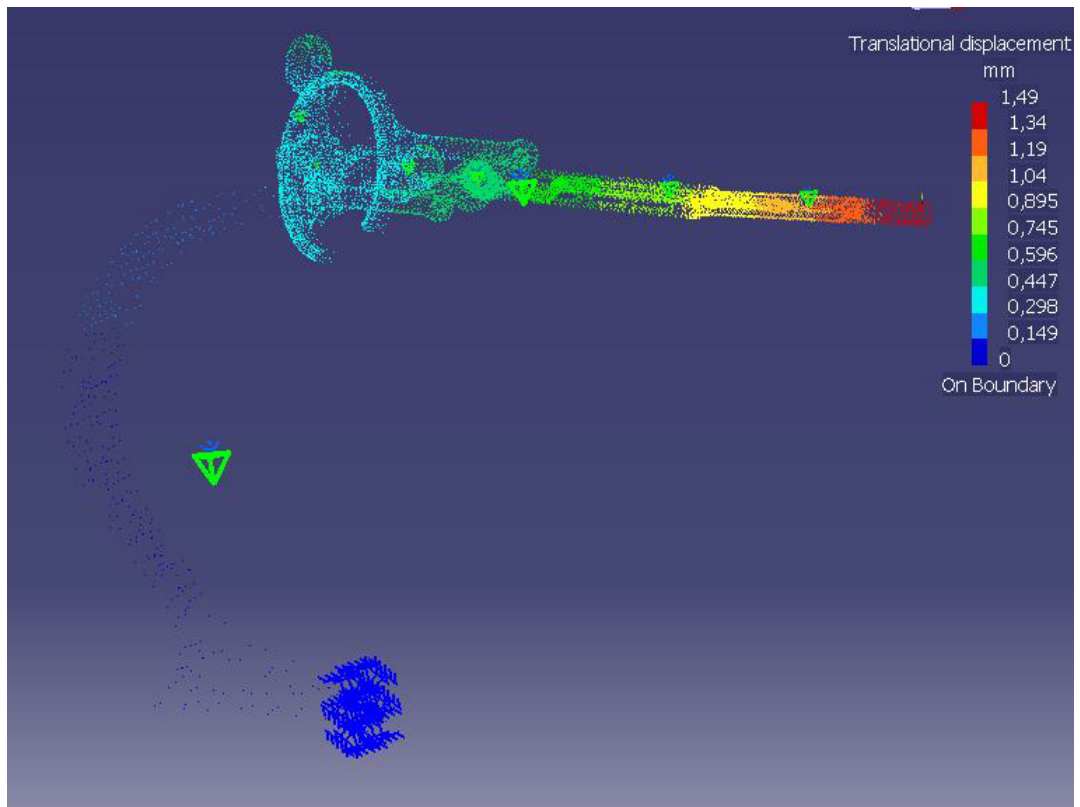
Şekil 5.2 Tüm Sistemin Ağırlık Merkezi

5.3 Statik Analiz

Dokunsal cihaz tasarımındaki önemli parametrelerden biri cihazın rijidliğidir. Tasarlanan dokunsal cihazda uç noktada maksimum uygulanabilir kuvvet 10 N olarak kabul edilmiştir. Analizlerin tümü CATIA V5 CAD Programında alüminyum malzeme kullanılarak yapılmış olup, aşağıda Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’ de kritik statik analiz sonuçları verilmiştir. Analizlerde Von Mises akma kriteri kullanılmıştır. Bu kritere göre yapılan analizde oluşan maksimum gerilme değeri $9,67 \cdot 10^6$ olup, seçilen malzemenin akma mukavemet değeri $9,5 \cdot 10^7$ den daha küçük çıkmıştır. Bu sonuca göre seçilen eleman boyutları yeterli ölçülerdedir. Ayrıca kuvvet etkisindeki yer değiştirmelerinde cihazın uç noktasında maksimum sınırlar içinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.3 Von Mises Stres Analizi



Şekil 5.4 Kuvvet Etkisinde Sistemdeki Yer Değiştirmeler

6. BÖLÜM

6.1 Sonuç

Bu tezde;

- 7 serbestlik dereceli bir dokunsal cihaz tasarımı bilgisayar ortamında yapılmıştır.
- Arttırılan serbestlik derecesiyle optimum kuvvet iletimi sağlanmıştır.
- Cihazın kinematik modeli insan kolunun kinematik modeline benzetilmiş, bu sayede insan kolunun çalışma hacmi içinde ihtiyaç duyduğu hareketlerin büyük çoğunluğu karşılanabilmiştir.
- Arttırılan serbestlik derecesi sayesinde cihazın çalışma hacmi link uzunlukları değişmeden %70 bir artış sağlanmıştır.
- Cihazda kullanılan motorlar kolla birlikte hareket edecek şekilde yapılandırılmış olup, bu sayede harekete bağlı olarak ağırlık merkezi değişimi engellenmiştir.
- Bütün cihazın ağırlık merkezi dönme eksenine yaklaştırılmış bu sayede atalet momentleri minimum düzeye indirilmiştir.
- Cihazın rijitliği maksimum değere çıkartılmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

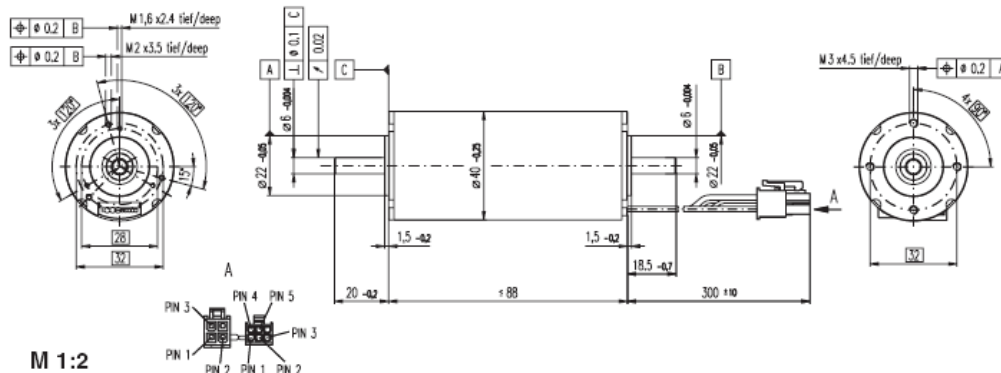
- [1] Başer, Ö.,Konukseven, İ. E., Koku, B.,”Dokunsal Kuvvet Beslemeli Cihaz Tasarımı”,Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, Cilt:7 Sayı: 2 Kasım 2005
- [2] Webster M. Webster’s 9th new collegiate dictionary. Spring field, MA: Merriam-Webster; (1985).
- [3] Burdea GC., “Force and touch feedback for virtual reality.” John Wiley; (1996).
- [4] Salisbury, J.K. and Mandayam A. Srinivasan, “PHANTOM-Based Haptic Interaction with Virtual Objects.” IEEE Computer Graphics and Applications; Volume 17, Number 5, pp. 6-10; September-October (1997).
- [5] http://www.sensable.com/products/phantom_ghost/phantompremium.asp,
- [6] http://www.mpb-technologies.ca/mpbt/haptics/hand_controllers/freedom/freedom.html
- [7] http://www.immersion.com/3d/products/cyber_force.php, 10.01.2005.
- [8] http://www.forcedimension.com/fd/avs/home/products/6-dof_delta,
- [9] <http://www.fcs-cs.com/robotics/products/hapticmaster>, 10.01.2005.
- [10] P. J. Berkelman, R. L. Hollis, and S. E. Salcudean, “Interacting with Virtual Environments using a Magnetic Levitation Haptic Interface.” International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS '95, Pittsburgh, August, (1995).
- [11] Colgate, J.E., “Issues in the Haptic Display of Tool Use.” Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intellegent Robots and Systems, Pittsburgh, PA, pp. 140-145, (1995).
- [12] Bingül, Z.,Küçük, S.,”Robot Tekniği I”,Birsen Yayınevi;(2005)
- [13] Özgören, M.K.,ME 522 “Principle of Robotic” Lecture Notes, METU, Ankara, Turkey, (2004)

EKLER

SEÇİLEN MOTORLAR ve ÖZELLİKLERİ

BİRİNCİ MOTOR

EC-max 40 Ø40 mm, brushless, 120 Watt



maxon EC-max

Order Number

283670	283671	283672	283673
--------	--------	--------	--------

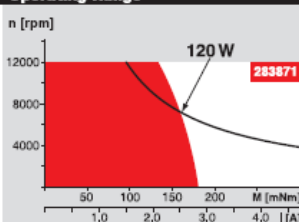
Motor Data

Values at nominal voltage		48.0	48.0	48.0	48.0
1	Nominal voltage	V	48.0	48.0	48.0
2	No load speed	rpm	10100	7240	3610
3	No load current	mA	348	202	105
4	Nominal speed	rpm	9280	6290	2670
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	164	183	203
6	Nominal current (max. continuous current)	A	3.95	3.08	2.19
7	Stall torque	mNm	2090	1490	1050
8	Starting current	A	46.7	23.7	10.9
9	Max. efficiency	%	84	83	82
Characteristics					
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	1.03	2.02	4.40
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.204	0.400	0.937
12	Torque constant	mNm / A	44.8	62.8	96.1
13	Speed constant	rpm / V	213	152	99.4
14	Speed / torque gradient	rpm / mNm	4.89	4.90	4.55
15	Mechanical time constant	ms	5.17	5.19	4.81
16	Rotor inertia	gcm ²	101	101	101

Specifications

- 17 Thermal data
- 18 Thermal resistance housing-ambient 3.45 K / W
- 19 Thermal resistance winding-housing 0.29 K / W
- 20 Thermal time constant winding 3.87 s
- 21 Thermal time constant motor 1140 s
- 22 Ambient temperature -40 ... +100°C
- 23 Max. permissible winding temperature +155°C
- 24 Mechanical data (preloaded ball bearings)
- 25 Max permissible speed 12000 rpm
- 26 Axial play at axial load < 10 N 0 mm
- 27 Axial play at axial load > 10 N 0.14 mm preloaded
- 28 Radial play 0.14 mm preloaded
- 29 Max. axial load (dynamic) 9 N
- 30 Max. force for press fits (static) 170 N
- 31 (static, shaft supported) 5000 N
- 32 Max. radial loading, 5 mm from flange 80 N
- 33 Other specifications
- 34 Number of pole pairs 1
- 35 Number of phases 3
- 36 Weight of motor 650 g
- 37 Values listed in the table are nominal.
- 38 Connection Motor (Cable AWG 20)
- 39 red Motor winding 1 Pin 1
- 40 black Motor winding 2 Pin 2
- 41 white Motor winding 3 Pin 3
- 42 N.C. Pin 4
- 43 Connector Article number
- 44 Molex 39-01-2040
- 45 Connection Sensors (Cable AWG 26)
- 46 yellow Hall sensor 1 Pin 1
- 47 brown Hall sensor 2 Pin 2
- 48 grey Hall sensor 3 Pin 3
- 49 blue GND Pin 4
- 50 green V_{bat} 4.5 ... 24 VDC Pin 5
- 51 N.C. Pin 6
- 52 Connector Article number
- 53 Molex 430-25-0600
- 54 Wiring diagram for Hall sensors see page 26

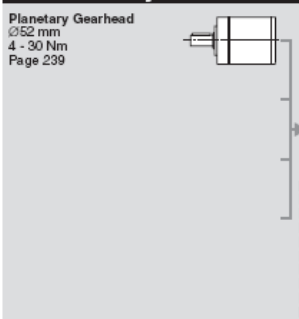
Operating Range



Comments

- Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- Assigned power rating

maxon Modular System



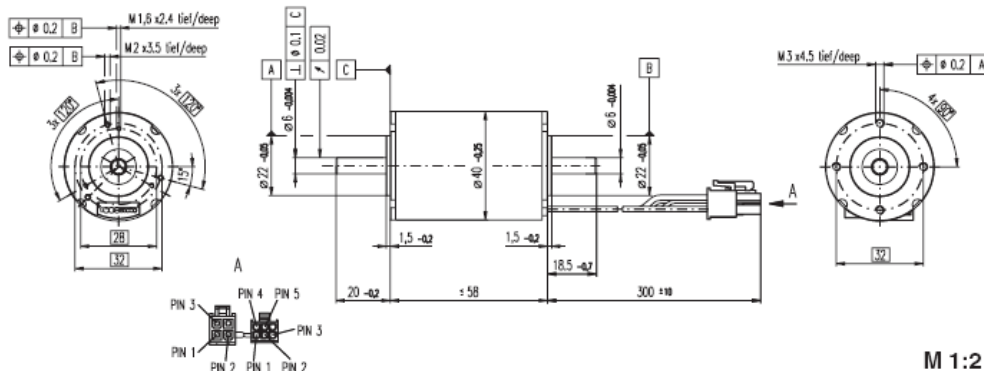
Overview on page 16 - 21

- Encoder MR 500 - 1000 CPT, 3 channels Page 251
- Encoder HEDL 5540 500 CPT, 3 channels Page 258
- Brake AB 28 Ø28 mm 24 VDC, 0.4 Nm Page 299

İKİNCİ ÜÇÜNCÜ VE DÖRDÜNCÜ MOTOR

maxon EC-max

EC-max 40 Ø40 mm, brushless, 70 Watt



M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Order Number

283866	283867	283868	283869
--------	--------	--------	--------

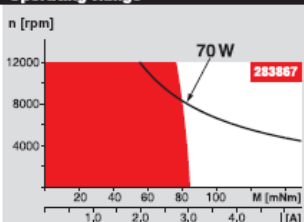
Motor Data

Values at nominal voltage		12.0	24.0	36.0	48.0
1 Nominal voltage	V	12.0	24.0	36.0	48.0
2 No load speed	rpm	8020	8030	8450	9020
3 No load current	mA	631	316	228	190
4 Nominal speed	rpm	6490	6540	7050	7620
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	85.1	88.0	93.7	92.9
6 Nominal current (max. continuous current)	A	6.58	3.39	2.52	2.01
7 Stall torque	mNm	466	497	595	636
8 Starting current	A	33.3	17.8	14.9	12.7
9 Max. efficiency	%	75	76	77	78
Characteristics					
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.360	1.35	2.42	3.78
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.0464	0.186	0.379	0.592
12 Torque constant	mNm / A	14.0	28.0	40.0	50.0
13 Speed constant	rpm / V	682	341	239	191
14 Speed / torque gradient	rpm / mNm	17.6	16.5	14.4	14.4
15 Mechanical time constant	ms	9.41	8.82	7.74	7.73
16 Rotor inertia	gcm ²	51.2	51.2	51.2	51.2

Specifications

- 17 Thermal data
- 18 Thermal resistance housing-ambient 4.63 K / W
- 19 Thermal resistance winding-housing 0.542 K / W
- 20 Thermal time constant winding 3.76 s
- 21 Thermal time constant motor 926 s
- 22 Ambient temperature -40 ... +100°C
- 23 Max. permissible winding temperature +155°C
- 24 Mechanical data (preloaded ball bearings)
- 25 Max permissible speed 12000 rpm
- 26 Axial play at axial load < 10 N 0 mm
- 27 Axial play at axial load > 10 N 0.14 mm preloaded
- 28 Radial play 9 N
- 29 Max. force for press fits (static) 170 N
- 30 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported) 5000 N
- 31 Max. radial loading, 5 mm from flange 80 N
- 32 Other specifications
- 33 Number of pole pairs 1
- 34 Number of phases 3
- 35 Weight of motor 400 g
- 36 Values listed in the table are nominal.
- 37 Connection (Cable AWG 20)
 - red Motor winding 1 Pin 1
 - black Motor winding 2 Pin 2
 - white Motor winding 3 Pin 3
 - N.C. N.C. Pin 4
- 38 Connector Article number
- 39 Molex 39-01-2040
- 40 Connection (Cable AWG 26)
 - yellow Hall sensor 1 Pin 1
 - brown Hall sensor 2 Pin 2
 - grey Hall sensor 3 Pin 3
 - blue GND Pin 4
 - green V_{bat} 4.5 ... 24 VDC Pin 5
 - N.C. N.C. Pin 6
- 41 Connector Article number
- 42 Molex 430-25-0900
- 43 Wiring diagram for Hall sensors see page 26

Operating Range

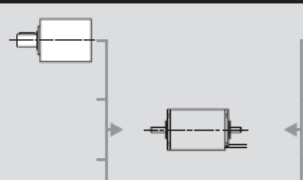


Comments

- Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- Assigned power rating

maxon Modular System

- 1 Planetary Gearhead
- 2 Ø42 mm
- 3 3 - 15 Nm
- 4 Page 236



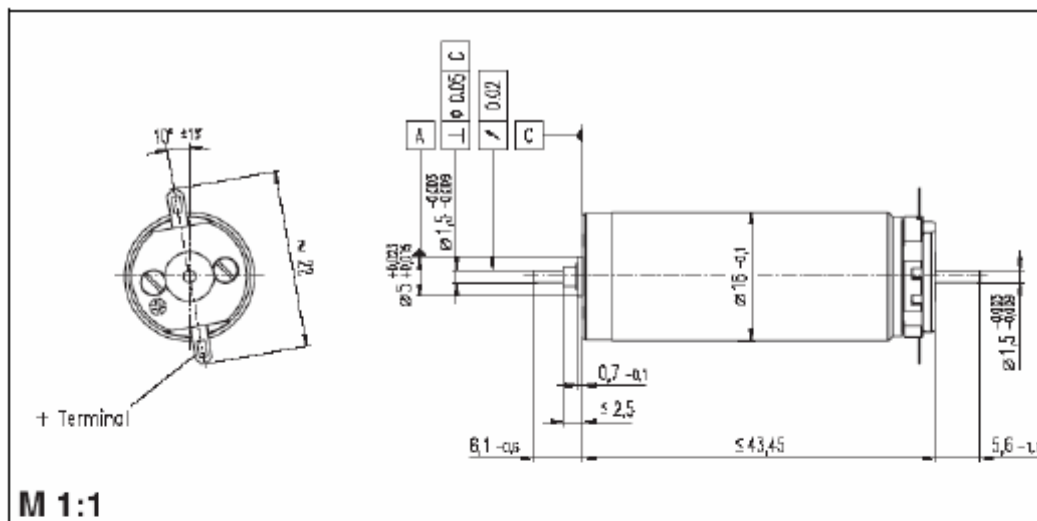
Overview on page 16 - 21

- Encoder MR 500 / 1000 CPT, 3 channels Page 251
- Encoder HEDL 5540 500 CPT, 3 channels Page 258
- Brake AB 28 Ø28 mm 24 VDC, 0.4 Nm Page 299

- Recommended Electronics:
- DEC 50/5 Page 277
 - DECV 50/5 278
 - DES 50/5 279
 - EPOS 24/5 286
 - EPOS P 24/5 287
 - MIP 50, 100 289
 - Notes 20

MINIMOTORLAR

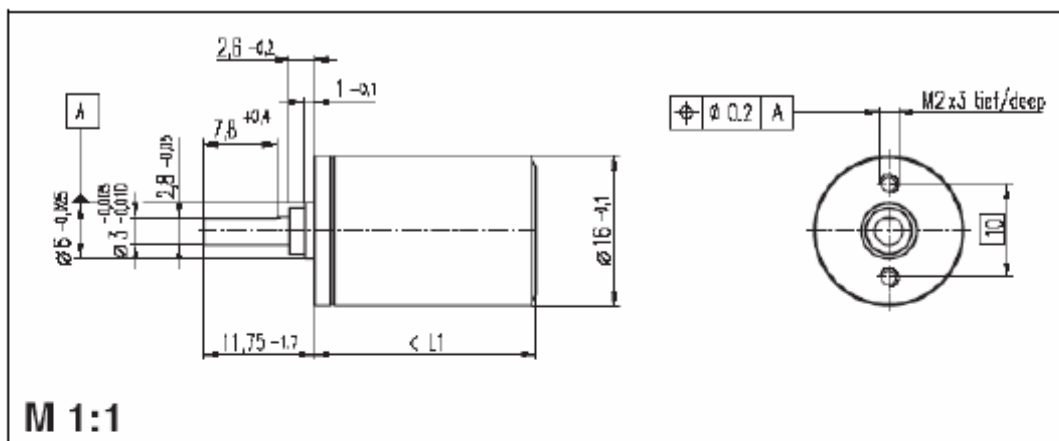
MAXON RE-16 Brushes DC Motor – 4.5 WATT



Motor Data		
1	Assigned power rating	W 4.5
2	Nominal voltage	Volt 12.0
3	No load speed	rpm 13900
4	Stall torque	mNm 28.8
5	Speed / torque gradient	rpm / mNm 490
6	No load current	mA 46
7	Starting current	mA 3550
8	Terminal resistance	Ohm 3.38
9	Max. permissible speed	rpm 16000
10	Max. continuous current	mA 614
11	Max. continuous torque	mNm 4.98
12	Max. power output at nominal voltage	mW 10200
13	Max. efficiency	% 78
14	Torque constant	mNm / A 8.11
15	Speed constant	rpm / V 1180
16	Mechanical time constant	ms 7
17	Rotor inertia	gcm ² 1.27
18	Terminal inductance	mH 0.11
19	Thermal resistance housing-ambient	K / W 30
20	Thermal resistance rotor-housing	K / W 8.5
21	Thermal time constant winding	s 10

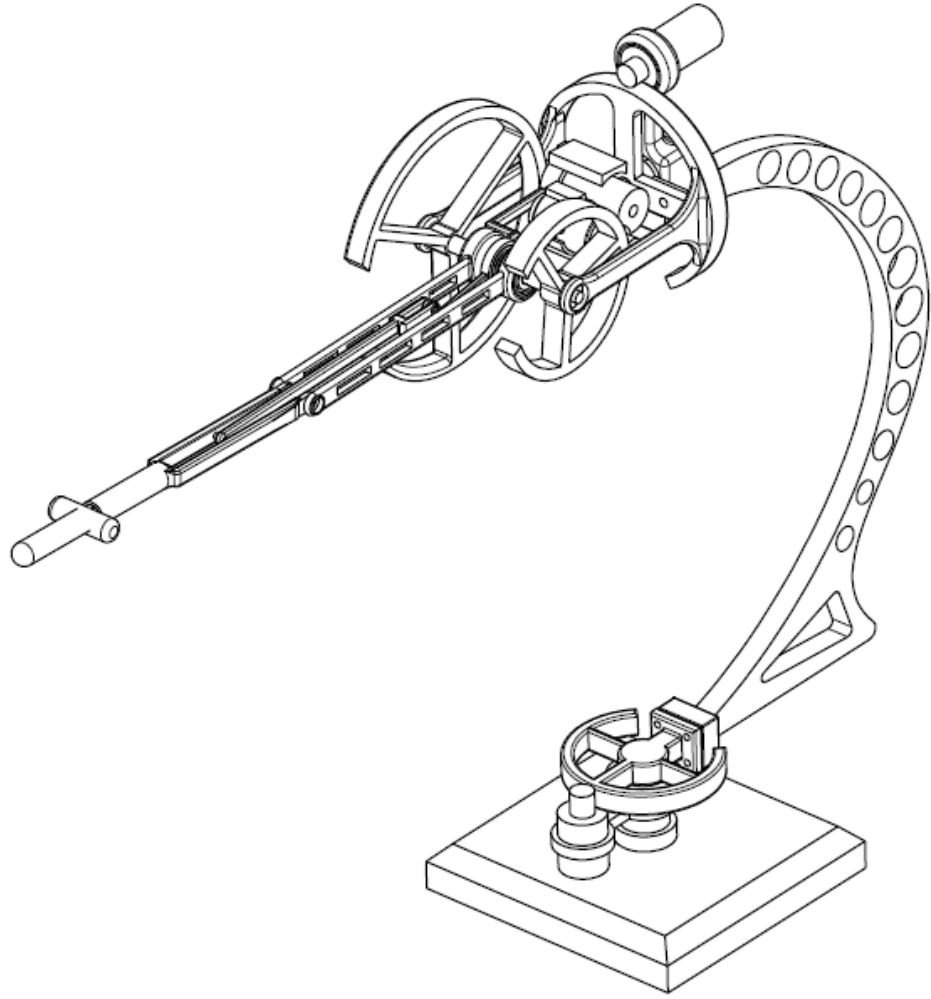
DIŐLİ KUTUSU ve ÖZELLİLERİ

MAXON PLENATARY GEARHEAD GP 16 A

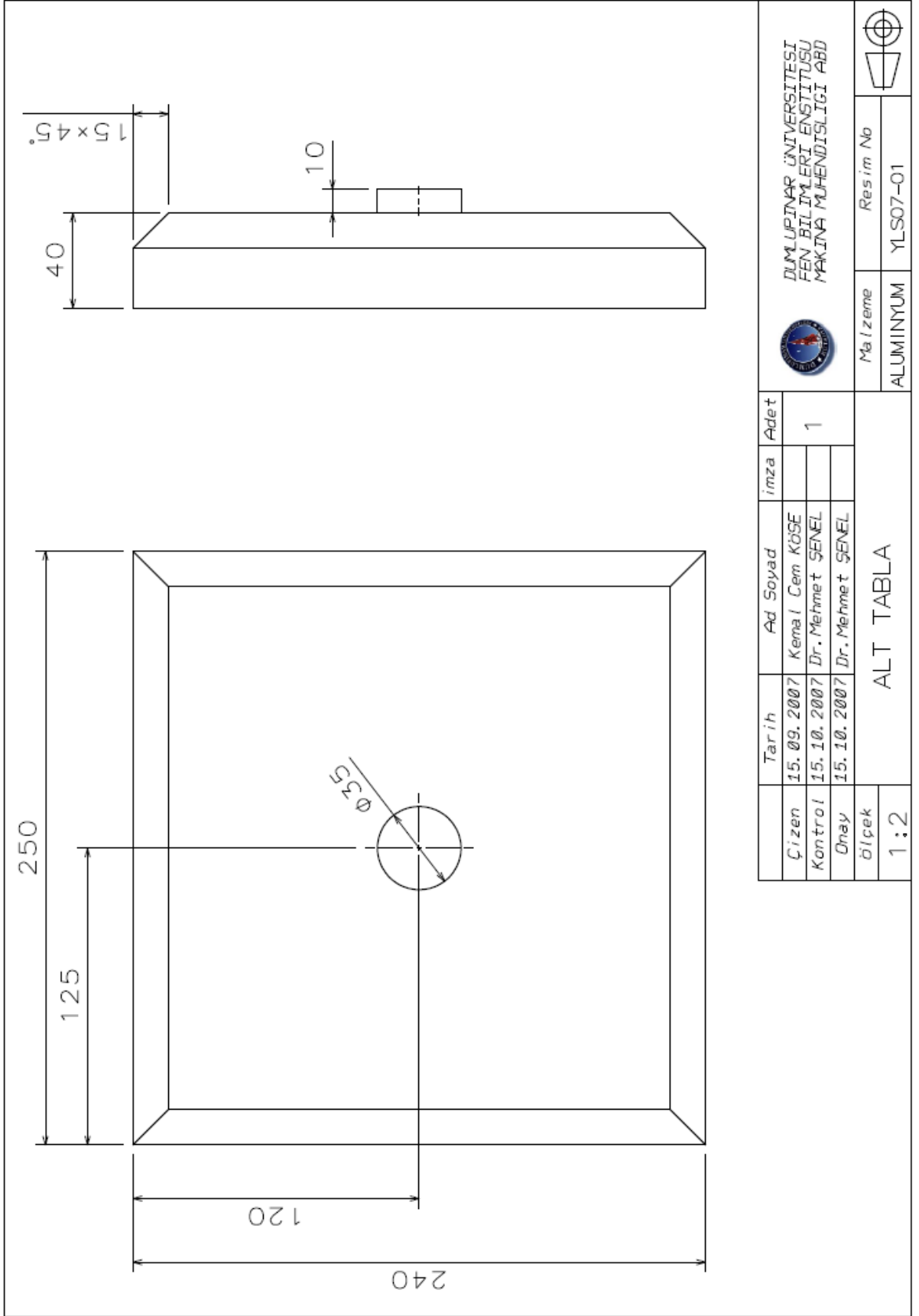


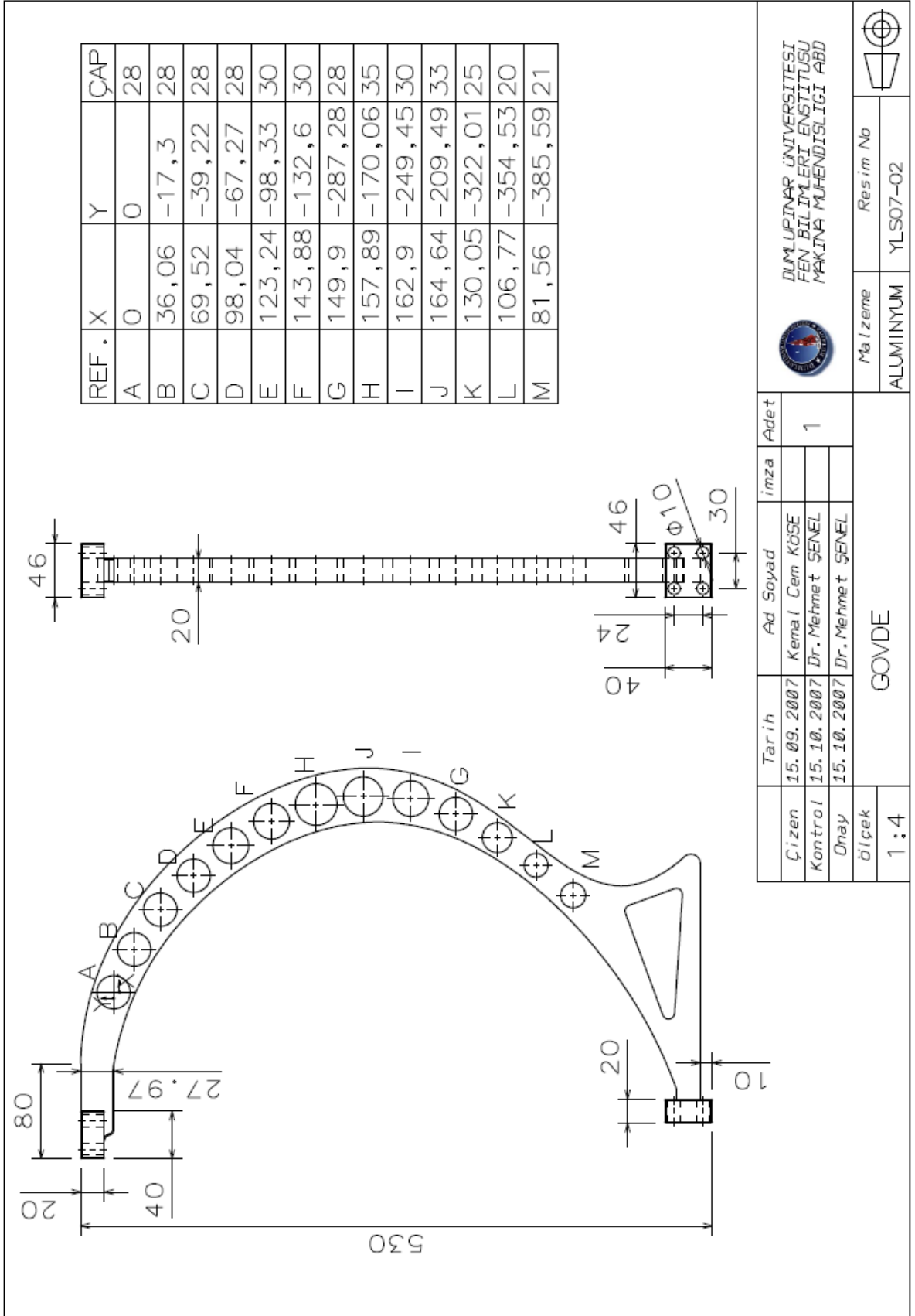
		110321	110322
Gearhead Data			
1	Reduction	5.4 : 1	19 : 1
2	Reduction absolute	$\frac{27}{5}$	$\frac{3249}{169}$
3	Max. motor shaft diameter	mm 1.5	2
4	Number of stages	1	2
5	Max. continuous torque	Nm 0.10	0.15
6	Intermittently permissible torque	Nm 0.150	0.225
7	Max. efficiency	% 90	81
8	Weight	g 20	23
9	Average backlash no load	° 0.7	0.8
10	Mass inertia	gcm ² 0.08	0.05
11	Gearhead length L1	mm 15.5	19.1

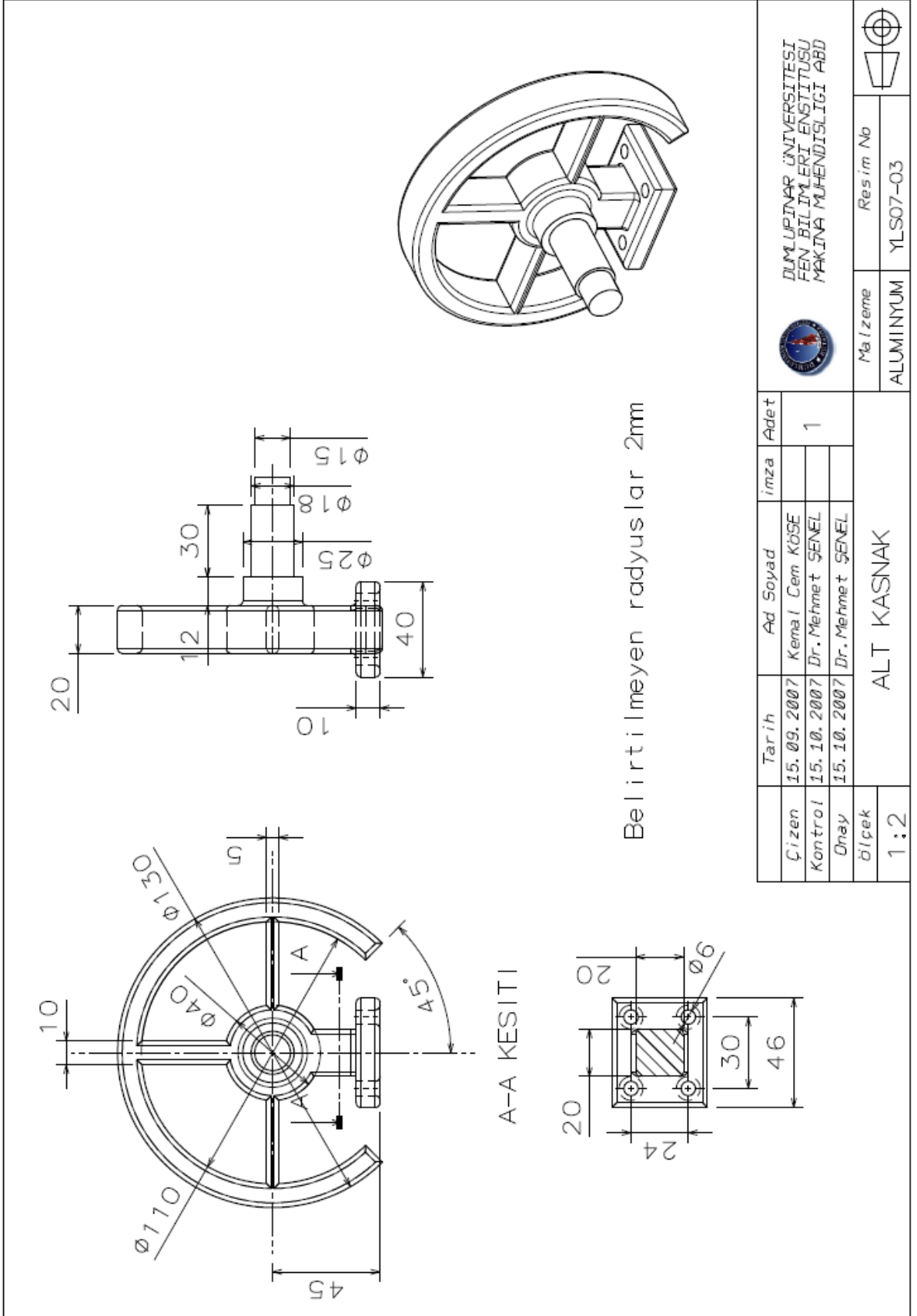
TEKNİK RESİMLER

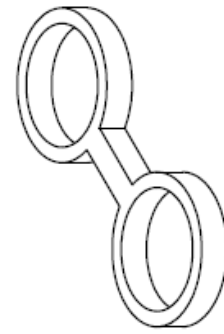
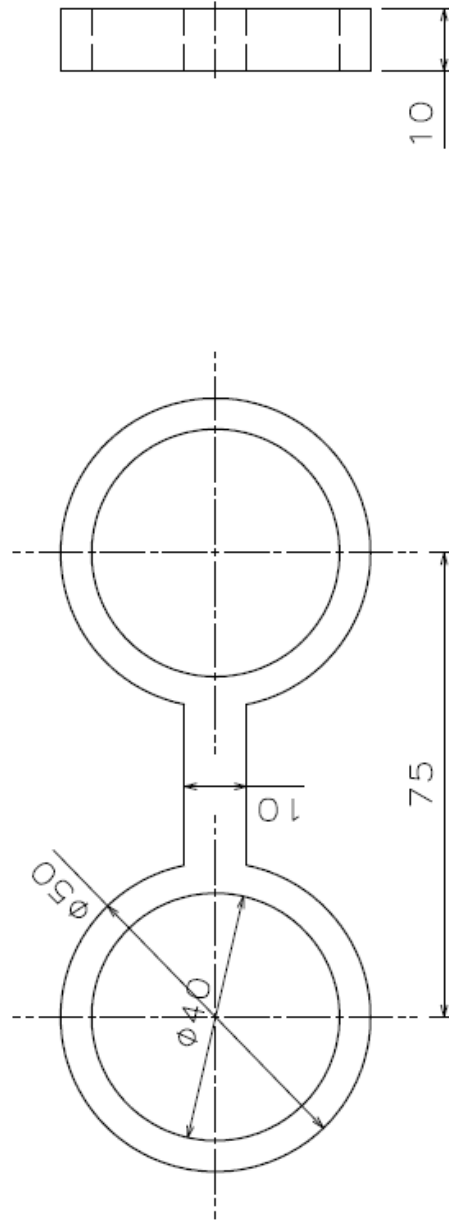


	Tarih	Ad Soyad	imza	Adet			
Çizen	15.09.2007	Kemal Cem KöSE		1	 DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ABD		
Kontrol	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL					
Onay	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL					
ölçek	DOKUNSA L CİHAZ				Malzeme	Resim No	
1:5					ALUMİNYUM	YLS07-00	





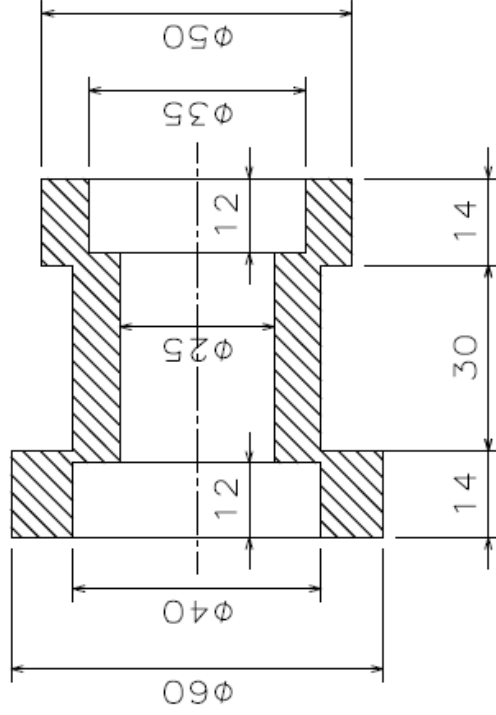
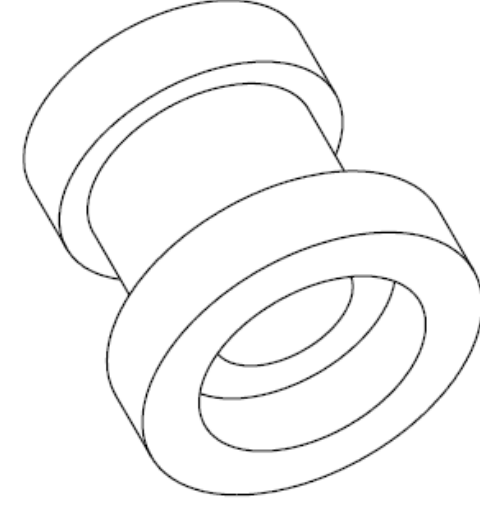




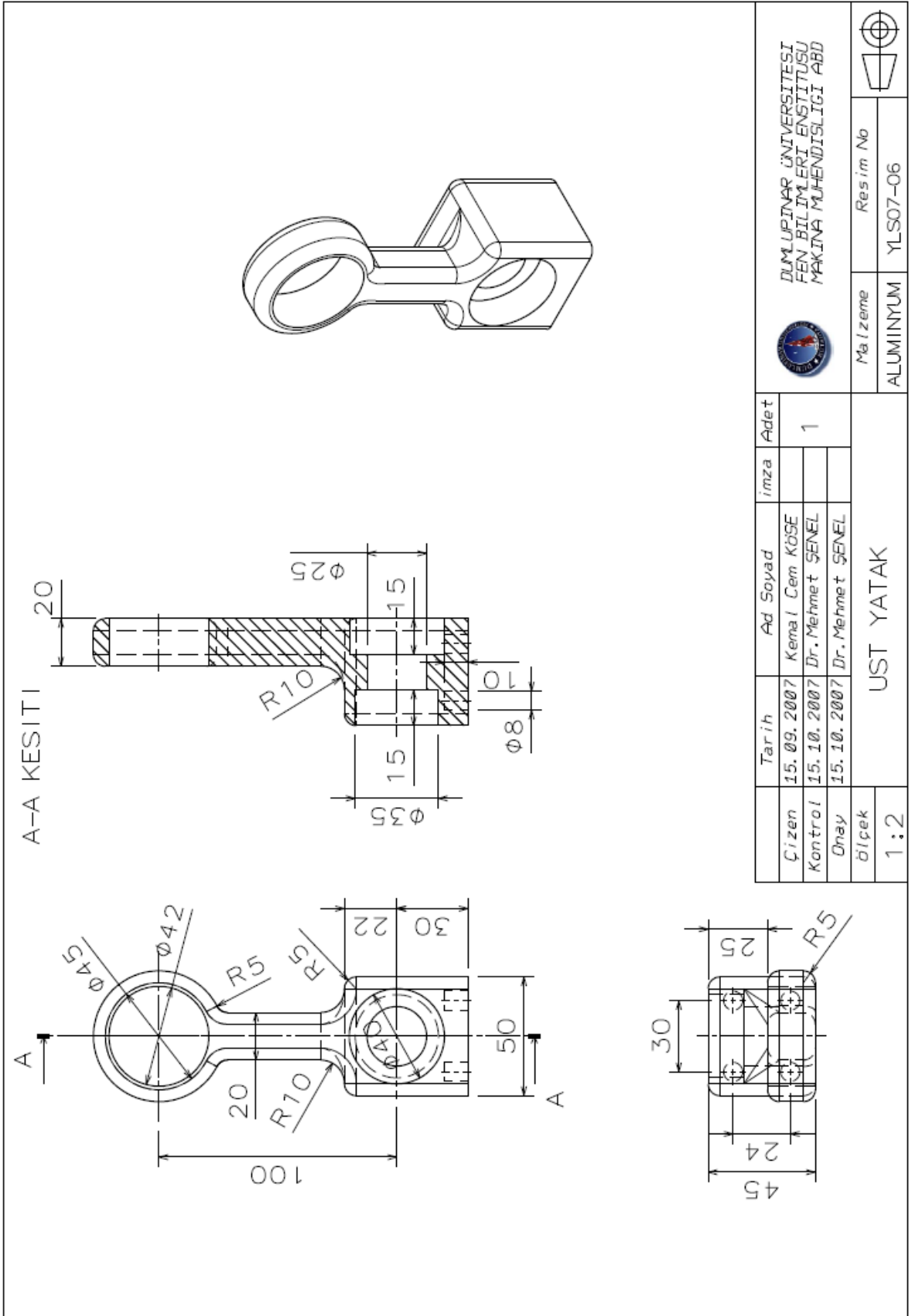
izometrik görünüş
ölçek:1:2

Çizim	Tarih	Ad Soyad	İmza	Adet
Çizen	15.09.2007	Kemal Cem KÖSE		1
Kontrol	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
Onay	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
Ölçek	ALT BAĞLAMA PARÇASI I			
1:1				

		Malzeme	Resim No
		ALUMİNYUM	YLS07-04



Çizen	Tarih	Ad Soyad	imza	Adet
Kontrol	15.09.2007	Kemal Cem KÖSE		1
Onay	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
ölçek	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
ALT YATAK				
1 : 1				
		Mühür		Resim No
		ALUMINYUM		YLS07-05
				
		DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ABD		

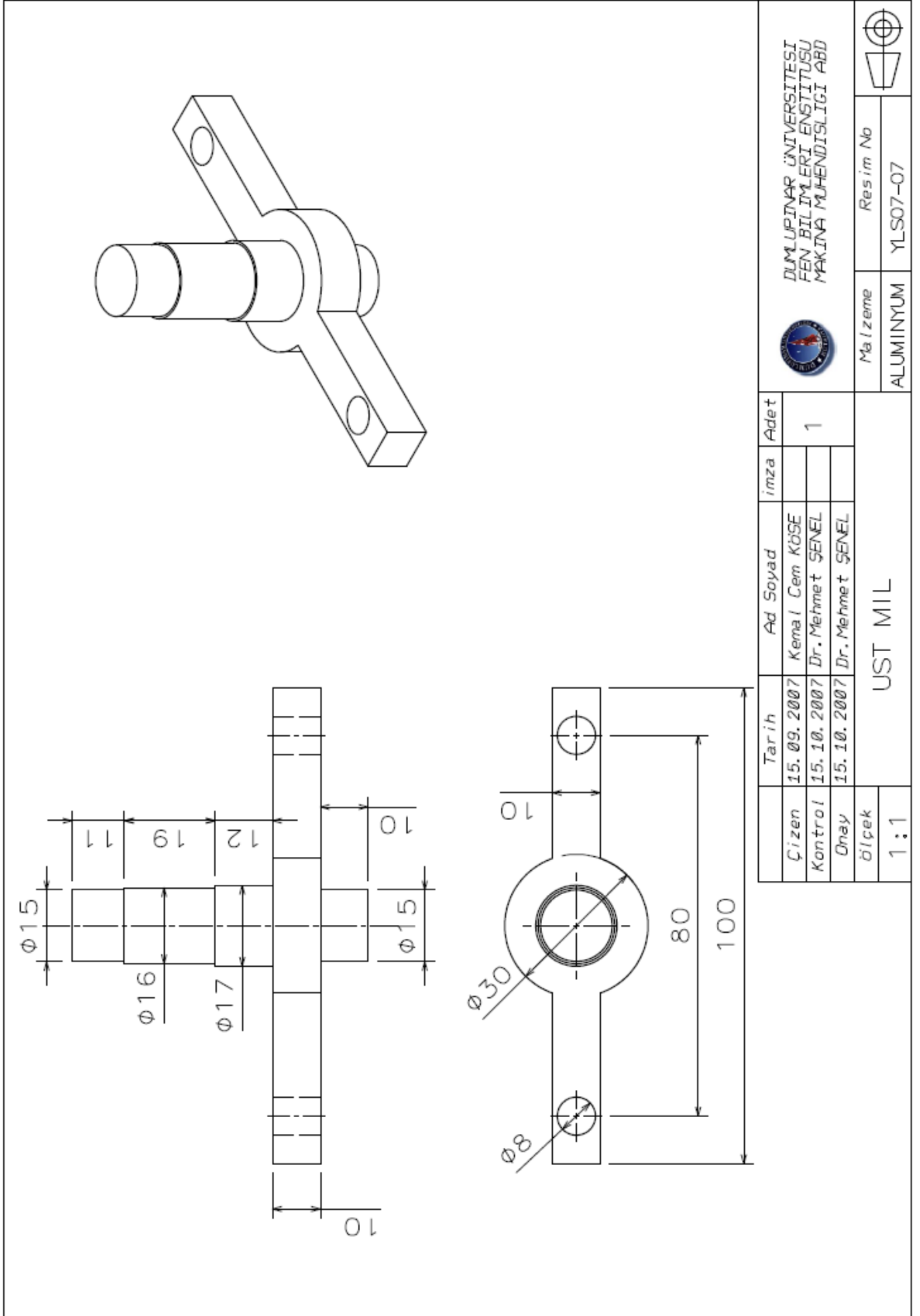


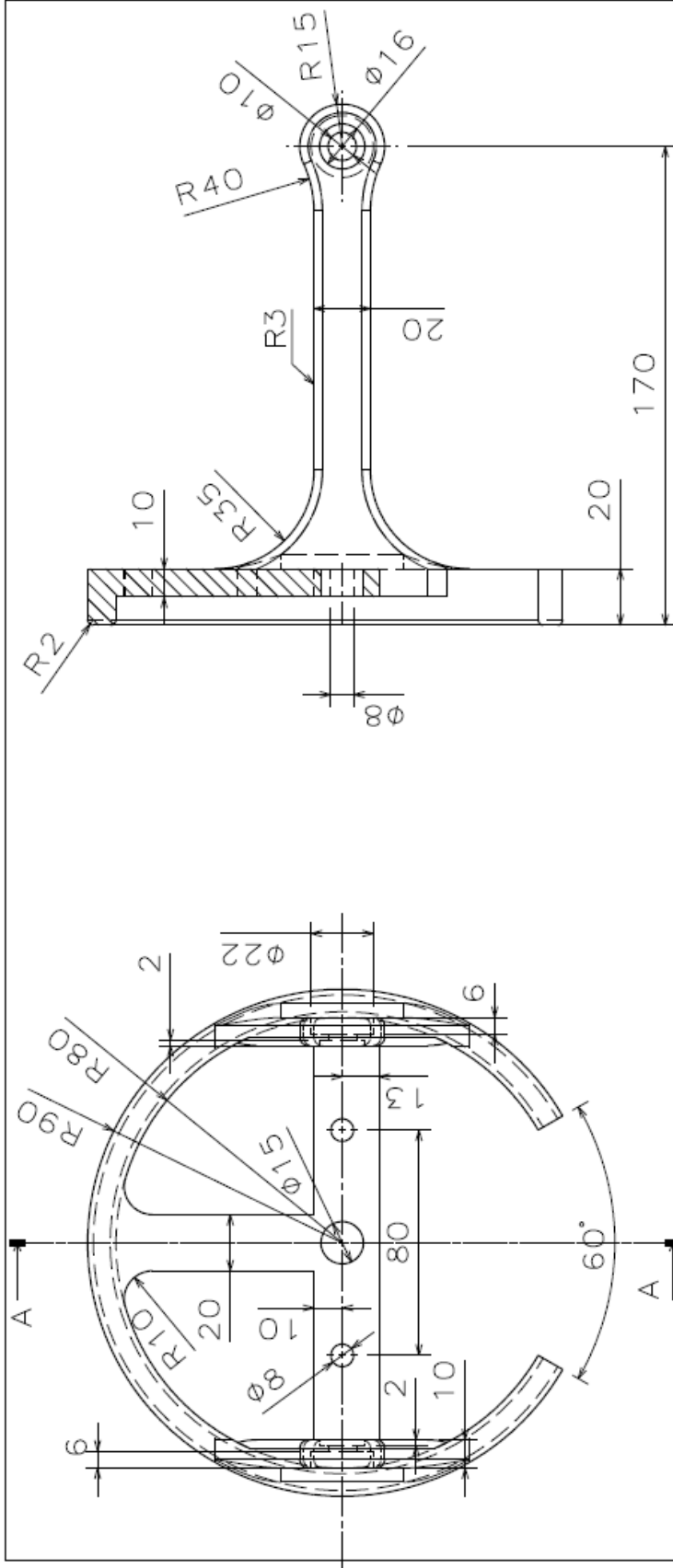
A-A KESİTİ

Çizim	Tarih	Ad Soyad	İmza	Adet
Çizim	15.09.2007	Kemal Cem Köse		1
Kontrol	15.10.2007	Dr. Mehmet Şenel		
Onay	15.10.2007	Dr. Mehmet Şenel		
ölçek	1:2			
UST YATAK				
Malzeme		Resim No		
ALUMINYUM		YLS07-06		

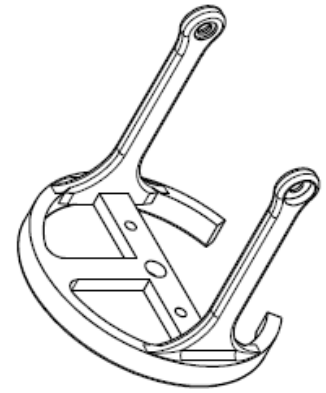
DÜMLÜPINAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ABD







A-A KESİTİ



Tarih	Ad Soyad	imza	Adet
15.09.2007	Kemal Cem KÖSE		1
15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
Ölçek	ANA TASIMA PARÇASI		
1:2			



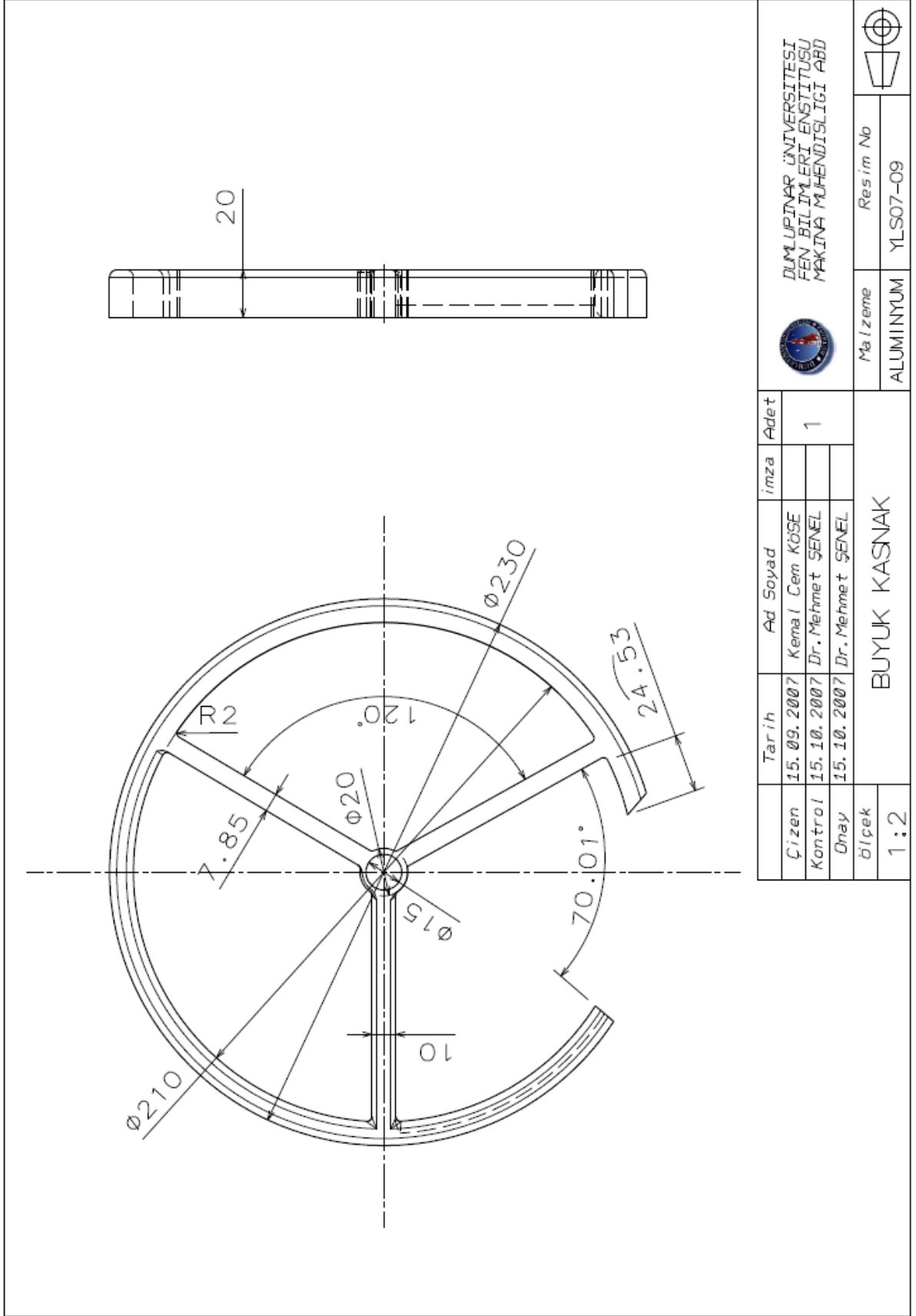
DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ABD

Malzeme
ALUMİNYUM

Resim No

YLS07-08





Çizen	Tarih	Ad Soyad	imza	Adet
Kontrol	15.09.2007	Kemal Cem KÖSE		1
Onay	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
ölçek	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
BUYUK KASNAK				
1:2				

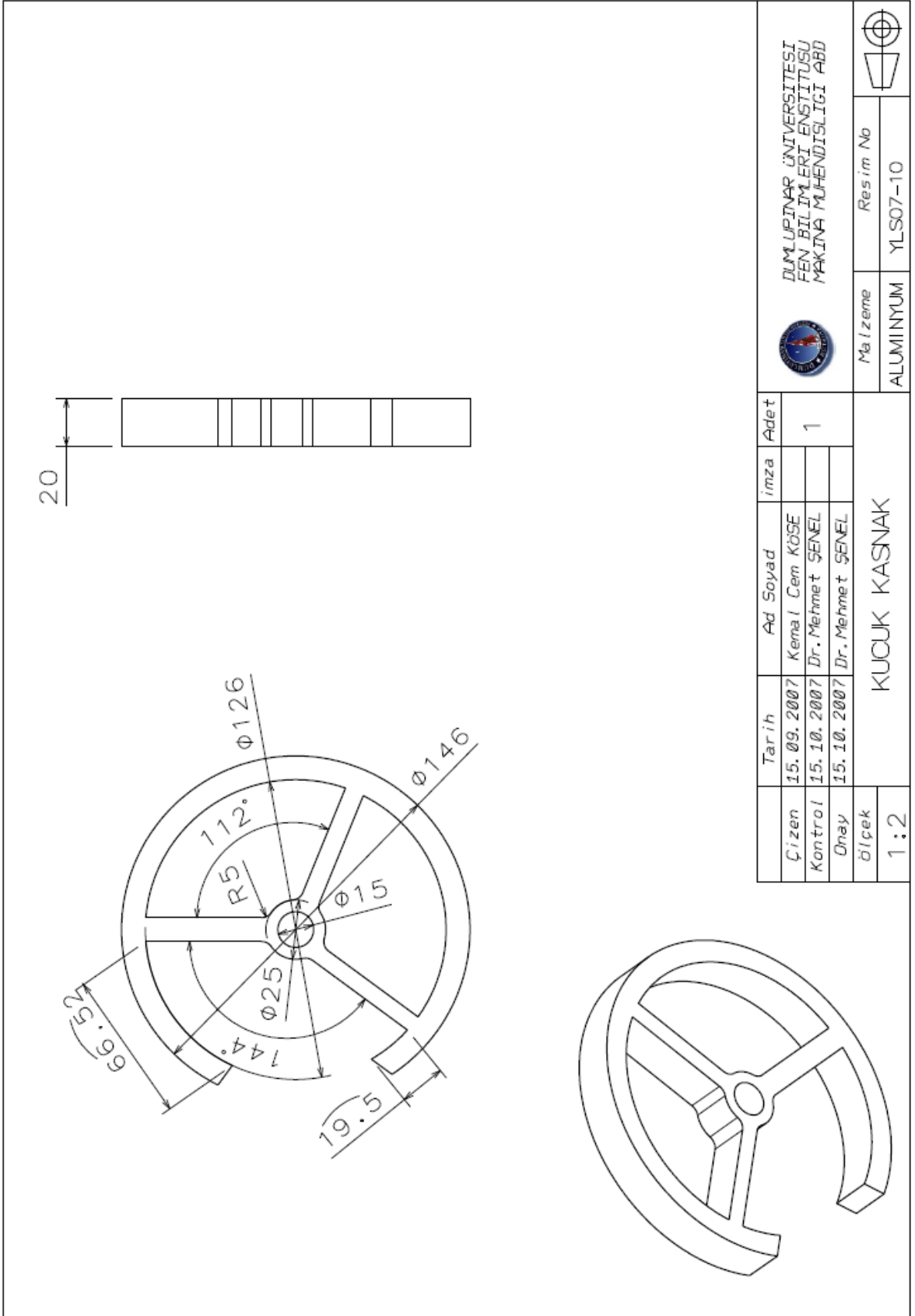


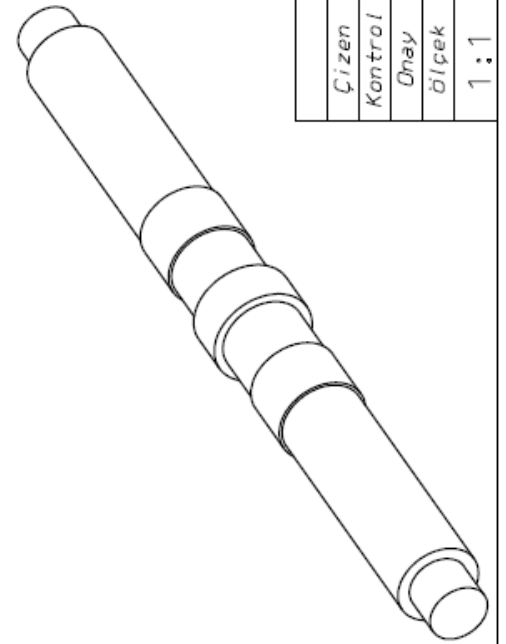
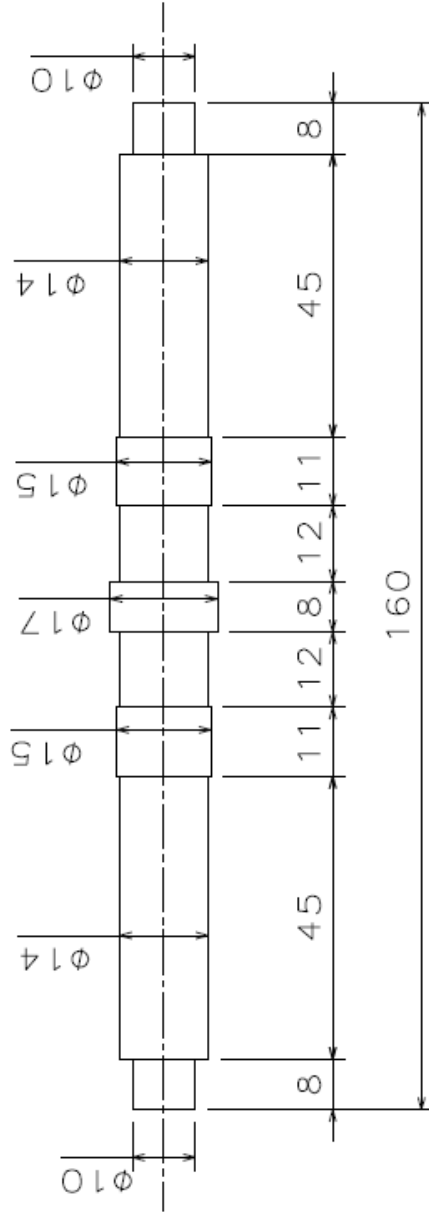
DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ABD





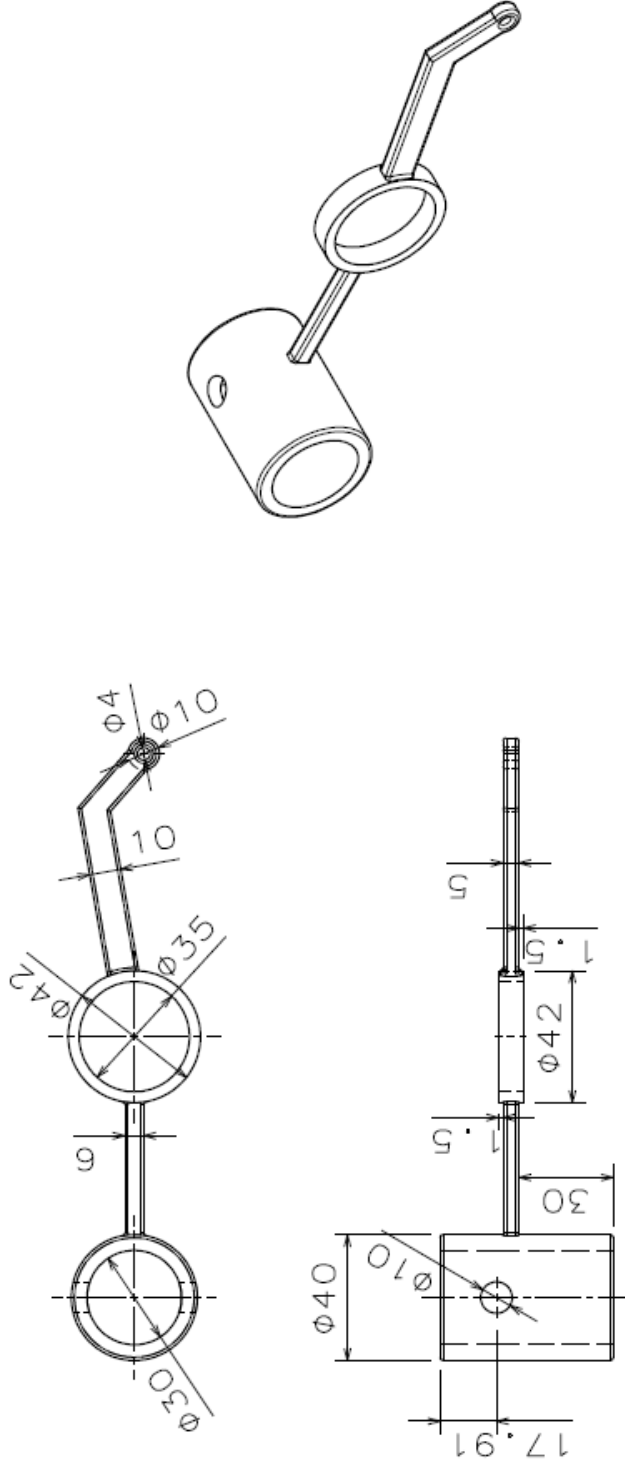
Malzeme
ALUMİNYUM

Resim No
YLS07-09

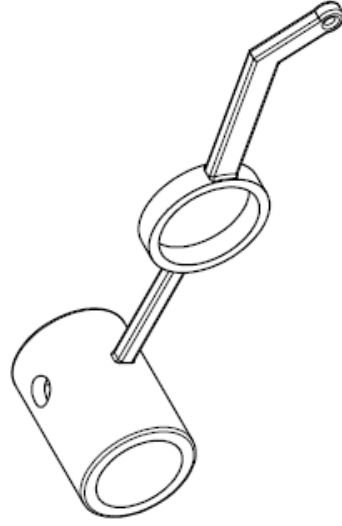





Çizen	Tarih	Ad Soyad	imza	Adet
Kontrol	15.09.2007	Kemal Cem KÖSE		1
Onay	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
Ölçek	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
1:1	ANA MIL			
Malzeme		ALUMINYUM		
Resim No		YLS07-11		
		DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ABD		
				



TUM RADYUSLAR 1 mm



Çizen	Tarih	Ad Soyad	İmza	Adet
Kontrol	15.09.2007	Kemal Cem KÖSE		1
Onay	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
ölçek	15.10.2007	Dr. Mehmet ŞENEL		
ARA KOL				
Malzeme			Resim No	
ALUMINYUM			YLS07-12	
		DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ABD		
