

**T.C.**  
**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÖNEL EĞMELİ YORULMA TEST CİHAZI TASARIMI VE İMALATI**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mustafa ÇİPİL**

**ŞUBAT-2024**  
**GÜMÜŞHANE**



**T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÖNEL EĞMELİ YORULMA TEST CİHAZI TASARIMI VE İMALATI**

**DESIGN AND MANUFACTURING OF ROTATING BENDING FATIGUE  
TEST MACHINE**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mustafa ÇİPİL**

**ŞUBAT-2024  
GÜMÜŞHANE**



**T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÖNEL EĞMELİ YORULMA TEST CİHAZI TASARIMI VE İMALATI**

**DESIGN AND MANUFACTURING OF ROTATING BENDING FATIGUE  
TEST MACHINE**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mustafa ÇİPİL**

**Danışman: Doç. Dr. Filiz KARABUDAK**

**ŞUBAT-2024  
GÜMÜŞHANE**



## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

**Yüksek Lisans Tezi** olarak hazırlamış olduğum “**Dönel Eğmeli Yorulma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmalarını kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

09/02/2024

Mustafa ÇİPİL

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince bana yön gösteren, bizlerden yardımlarını ve bilgi birikimlerini esirgemeyerek, çalışmanın tamamlanabilmesi için büyük bir özveri ve sabırla elinden geleni yapan, her fırsatta bizleri yüreklendiren, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım tez danışmanım sayın Doç. Dr. Filiz KARABUDAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Araştırmalarımnda benden engin tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen başta Dr. Hamid ZAMANLOU olmak üzere, Öğr. Gör. Kurtuluş DEMİR ve Öğr. Gör. Hakan ŞAHİN'e teşekkürü bir borç bilirim. Yine bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen annem-babam Fadime-Miktat ÇİPİL'e, aileme ve de özellikle tezin son aşamalarının hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakarlık ve desteklerinden dolayı eşim Saliha ÇİPİL'e ve biricik kızım Defne ÇİPİL'e sonsuz teşekkür ederim.

**Mustafa ÇİPİL**  
**GÜMÜŞHANE – 2024**

## ÖZET

Yorulma mukavemeti, kullanılmakta olan tüm malzemeler için önemli bir kriterdir. Geçmiş yıllarda malzemelerin statik olarak taşıdıkları yükleri, servis şartlarında taşıyamadıkları görülmüştür. Bu durum literatüre giren “çevrimsel yükleme” olgusu ile açıklanmaktadır. Çevrimli yüklemeler, malzemenin yüzeyinde bir çatlak oluşturarak ya da mevcut bir süreksizlikten faydalanarak hasara sebep olurlar. Yorulma dayanımının belirlenmesinde birçok test yöntemi ve cihaz mevcuttur. Bunların tamamı belirli bir yükün, farklı şekillerde, tekrarı esasına dayanmaktadır. Uygulanan testler arasında en az maliyetli ve en basit olan yöntem dönen eğmeli yorulma testidir.

Bu çalışma kapsamında R.R. Moore tipi dönen eğmeli yorulma test cihazı tasarımı yapılmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. AA6063 ve C45 yorulma test numuneleri standartlarına göre hazırlanmış ve yorulma deneyine tabi tutularak üretimi yapılan dönel eğmeli test cihazının standartlara uygunluğu literatür çalışmaları ışığında değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dönel eğmeli yorulma cihazı, İmalat, Tasarım, Yorulma

## SUMMARY

Fatigue strength is an important criterion for all materials used. In the past years, it has been observed that materials cannot carry the loads they carry statically under service conditions. This situation is explained by the phenomenon of "cyclic loading" in the literature. Cyclic loadings cause damage by creating a crack in the surface of the material or by exploiting an existing discontinuity. There are many test methods and devices for determining fatigue strength. All of these are based on the repetition of a certain load in different ways. Among the tests applied, the least costly and simplest method is the rotating bending fatigue test.

In this study, a rotating bending fatigue test device was designed and manufactured. Fatigue life of AA 6063 aluminum alloys, which were prepared according to the fatigue test sample standards and with specific properties, were subjected to fatigue test and calculated.

**Keywords:** Rotational bending fatigue device, Manufacturing, Design, Fatigue

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY .....	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY .....	VII
İÇİNDEKİLER .....	VIII
TABLolar DİZİNİ .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
EKLER DİZİNİ.....	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ.....	3
2.1. Yorulma Olayı .....	6
2.2. Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler .....	7
2.2.1. Malzemenin Yapısı ve Kimyasal Bileşenlerinin Yorulmaya Etkisi .....	7
2.2.2. Malzemenin Yüzey Yapısının Yorulmaya Etkisi .....	8
2.2.3. Çentiğin Yorulmaya Etkisi .....	8
2.2.4. Gerilmelerin Yorulmaya Etkisi.....	14
2.2.5. Korozyon Ortamının Yorulmaya Etkisi .....	15
2.2.6. Sıcaklığın Yorulmaya Etkisi.....	15
2.3. Yorulmada Çatlak Oluşumu ve Kırılma .....	16
2.3.1. Çatlak Oluşumu .....	16
2.3.2. Kırılma.....	16
2.3.3. Yorulma Kırıklarının Görünümü.....	17
2.4. Yorulma Deney Türleri.....	18
2.4.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	18

2.4.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi .....	19
2.4.3. Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi .....	19
2.4.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi .....	19
2.5. Yorulma Deneyi Cihaz Türleri .....	19
2.6. Yorulma Deneyinde Kullanılan Numune Özellikleri .....	21
2.6.1. A Tipi Deney Numunesi .....	21
2.6.2. B Tipi Deney Numunesi .....	22
3. MATERYAL VE METOD .....	23
3.1. Yorulma Deney Cihazının Tasarımı .....	23
3.2. Yorulma Deney Cihazının İmalatı .....	23
3.3. Motor Tipi ve Özellikleri .....	29
3.4. Kardan Şaft ve Pens Tutucu Kama Boyutları .....	29
3.5. Dönel Eğmeli Yorulma Cihazında Uygulanan Yükün Hesaplanması .....	30
3.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	31
3.6.1. AA 6063 Deney Numunesi .....	32
3.6.2. C45 İmalat Çeliği Deney Numunesi .....	33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	34
4.1. Döner Eğmeli Yorulma Cihazı Üretimi .....	34
4.2. Dönel Eğmeli Yorulma Cihazında Yorulma Testleri .....	35
4.2.1. Döner Eğmeli Yorulma Cihazında AA 6063 Alüminyum Alaşım Testi .....	35
4.2.2. Döner Eğmeli Yorulma Cihazında C45 İmalat Çeliği Deneyi .....	37
5. SONUÇLAR .....	42
KAYNAKÇA .....	43
EKLER .....	47
ÖZGEÇMİŞ .....	64

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. Elektrik Motor Özellikleri (www.gamak.com).....	29
Tablo 2. AA 6063 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi [%] (Jayaraman, 2014)....	32
Tablo 3. AA 6063 alüminyum alaşımı mekanik özellikleri (Jayaraman, 2014). ....	32
Tablo 4. C45 imalat çeliğinin kimyasal bileşimi [%] (Tanasković, ve Ark., 2020). ....	33
Tablo 5. C45 İmalat çeliğinin mekanik özellikleri (Tanasković, ve Ark., 2020). ....	33
Tablo 6. AA 6063 alüminyum alaşım yorulma deney verileri.....	35
Tablo 7. C45 imalat çeliği yorulma deney verileri .....	38



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Eğilmeye zorlanan dönen bir mil.....	2
Şekil 2. Vickers sertlik deneyi (Herrmann, 2011). ....	5
Şekil 3. Çekme kuvveti etkisinde faturalı yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	9
Şekil 4. Döndürme kuvveti etkisinde faturalı yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	10
Şekil 5. Eğilme kuvveti etkisinde faturalı yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	10
Şekil 6. Döndürme kuvveti etkisinde enine delikli yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	11
Şekil 7. Eğilme kuvveti etkisinde enine delikli yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	11
Şekil 8. Çekme kuvveti etkisinde oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	12
Şekil 9. Eğilme kuvveti etkisinde oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	12
Şekil 10. Döndürme kuvveti etkisinde oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	13
Şekil 11. Döndürme kuvveti etkisinde düztabanlı oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	13
Şekil 12. Eğilme ve/veya çekme kuvveti etkisinde düztabanlı oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006). ....	14
Şekil 13. Mikro çatlakların ve makro çatlakların oluşumunu gösteren SEM görüntüsü (Zhang ve Ark., 2007). ....	17
Şekil 14. <b>a.</b> Keskin çevresel çentikli 4130 çelik şaftın tek yönlü eğilme kırılma yorulması <b>b.</b> Dönel bükülmeye maruz kalan 4150 çelik şaftın yorulma kırılması (Milella, 2012). ....	18
Şekil 15. Dönel eğmeli yorulma test cihazı .....	20
Şekil 16. Bir elektrohidrolik aksenal basma-çekme gerilmesi uygulayan test cihazı (Boyer, 1986). ....	20
Şekil 17. A tipi dairesel kesitli deney numunesi (ASTM, 2007). ....	21
Şekil 18. B tipi dairesel kesitli deney numunesi (ASTM, 2007). ....	22
Şekil 19. Ağırlıkların hassas terazide tartılması. ....	25
Şekil 20. Sistemin elektrik şeması .....	26
Şekil 21. Sistem kontrol ve sayıcı devre şeması .....	26
Şekil 22. Yataklara etki eden yükler .....	27
Şekil 23. Ağırlık sistemi mekanizmasının hassas terazi ile ölçümü .....	28
Şekil 24. DIN 6885 kama yuvası açma tablosu (www.odakkama.com). ....	29
Şekil 25. Yorulma deney numunelerinin CNC Torna tezgahında işlenmesi .....	31
Şekil 26. Yorulma deneylerinde kullanılan numune boyutları (ASTM, 2013). ....	32

Şekil 27. Dönel eğmeli yorulma test cihazı imalat resmi <b>a.</b> ön görünüş <b>b.</b> üst görünüş.	34
Şekil 28. Alüminyum AA 6063 Wöhler diyagramı .....	36
Şekil 29. AA 6063 Alüminyum Alaşımının yorulma hasarı yüzey görüntüsü .....	37
Şekil 30. C45 İmalat çeliği Wöhler diyagramı.....	38
Şekil 31. C45 İmalat çeliği yorulma hasarı yüzey görüntüsü .....	39



## EKLER DİZİNİ

Ek 1. Dönel Eğmeli Yorulma Test Cihazı Genel Montaj Resmi .....	47
Ek 2. Sac Levha Teknik Resim Çizimi .....	48
Ek 3. Yatak Teknik Resim Çizimi .....	49
Ek 4. Pens Tutucu Teknik Resim Çizimi .....	50
Ek 5. Pens Teknik Resim Çizimi .....	51
Ek 6. Pens Somunu Teknik Resim Çizimi .....	52
Ek 7. Yatak Destek Ayağı Teknik Resim Çizimi .....	53
Ek 8. Kutu Profil Teknik Resim Çizimi.....	54
Ek 9. Kardan Şaft Motor Bağlantı Parçası Teknik Resim Çizimi .....	55
Ek 10. Kardan Şaft Pens Tutucu Bağlantı Parçası Teknik Resim Çizimi.....	56
Ek 11. Kardan Şaft İstavrozu Teknik Resim Çizimi.....	57
Ek 12. Kardan Şaft Kayıcı Kovan Teknik Resim Çizimi .....	58
Ek 13. Kardan Şaft Kayıcı Mil Teknik Resim Çizimi .....	59
Ek 14. Tur Sayıcı Pul Teknik Resim Çizimi.....	60
Ek 15. Ağırlık Teknik Resim Çizimi .....	61
Ek 16. Numune Teknik Resim Çizimi .....	62
Ek 17. R. R. Moore Tipi Yorulma Cihazı Yükleme Katsayıları.....	63

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Ampirik malzeme sabiti
Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
d	: Taban köşegen uzunluğu
D	: Çap
E	: Elastisite modülü
F	: Kgf cinsinden uygulanan yük
Fe	: Demir
gr	: Gram
Hp	: Beygir gücü
K	: Gerilme şiddet faktörü
K <sub>ç</sub>	: Çentik faktörü
K <sub>t</sub>	: Teorik gerilme yığılma faktörü
Kw	: Kilowatt
L	: Uzunluk
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
Mn	: Manganez
n	: Ampirik malzeme sabiti
N	: Çevrim sayısı
P	: Fosfor
q	: Çentik hassasiyet faktörü
R	: Yarıçap
S	: Gerilme büyüklüğü
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
V	: Volt
VSD	: Vickers sertlik değeri
W	: Ağırlık

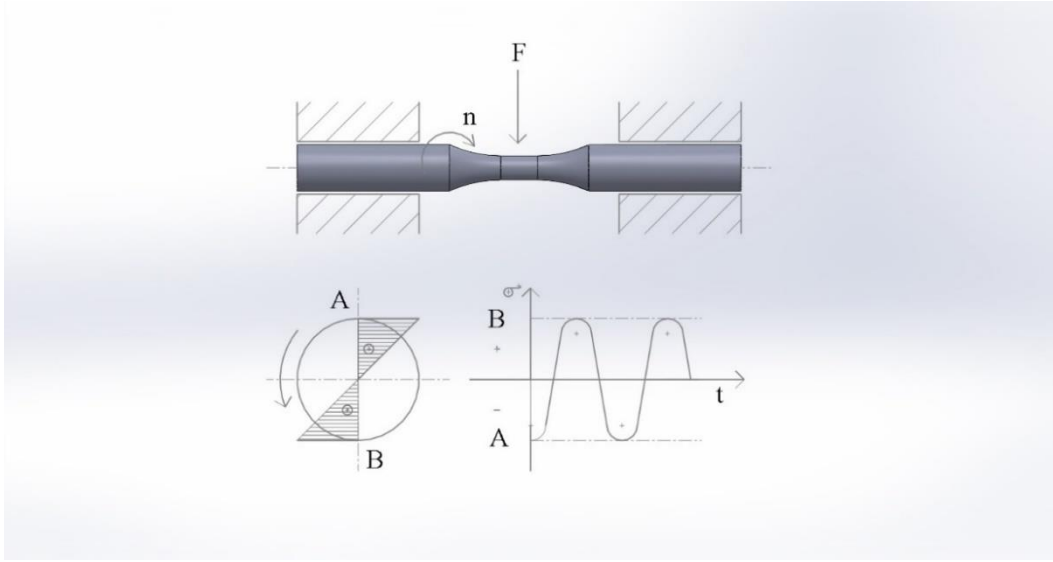
Zn	: Çinko
$\alpha$	: Tepe açısı
$\alpha$	: Lineer ısı genleşme katsayısı
$\sigma$	: Gerilme
$\Delta T$	: Sıcaklık farkı
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece



## 1. GİRİŞ

Şiddeti ve/veya yönü değişken gerilmelere maruz kalan metal ve alüminyum parçaların dayanımlarını önceden bilmek çok önemli bir husustur. Mühendislik ana biliminde makine ekipmanlarına etki eden yükler statik ve dinamik yükler adı altında iki grupta incelenmektedir. Uygulama alanlarında makine ekipmanlarına büyüklüğü ve yönü farklı, düzenli ve/veya düzensiz sürekli değişkenlik gösteren kuvvetler ile eğilme ve burulma momentleri etki etmektedir (Swanson, 1974). Art arda tekrarlanan yükleme ve yükün kaldırılmasının veya yönü değişken gerilmelere maruz kalmanın metallerde meydana getirdiği dayanım azalması yorulma olayı olarak adlandırılmıştır. Bu değişkenlik gösteren kuvvetler makine eleman ve ekipmanlarının akma sınırının çok altında kırılmalara neden olabilir. Günümüzde çokça rastlanan bu kırılmalara yorulma kırılması adı verilmektedir (Orowan, 1939).

Tekrarlı yükler altında malzemenin mukavemetinde azalma meydana gelir, bu durum neticesinde çekme mukavemetinin çok altındaki gerilmeler de kırılma oluşabilir. Bu duruma neden olan olay yorulma olayıdır. Yorulma kırılması gevrek bir kırılma olayı olduğundan, kırılmanın nerede ve ne zaman gerçekleşeceğini kestirmek oldukça zordur. Geçmişten günümüze birçok kazalara neden olduğu için yorulma üzerine yoğun çalışmalar yapılmış ve günümüzde de yapılmaya devam etmektedir. Bununla beraber epey farklı etkenlerin rol oynadığı bu karışık olayı yakından tanımakla yorulma kırılmalarının önüne geçmek mümkündür. Örneğin, statik bir yük altında eğilmeye zorlanan silindirik milin, (Şekil 1) üst tarafında ki ipçikler sürekli basmaya, alt tarafında ki ipçikler ise çekmeye çalışır. Milin yarım tur dönmesi durumunda, ipçiklerde ki gerilmeler yön değiştirecektir. Milin dönmeye devam etmesiyle birlikte malzemenin ipçikleri pozitif ve negatif değerler arasında periyodik olarak değişim gösteren gerilmelere, yani tam değişken zorlanmalara maruz kalacaktır (Swanson, 1974).



Şekil 1. Eğilmeye zorlanan dönen bir mil

Dönmeye zorlanan millerde meydana gelen gerilmelere maruz kalan makine elemanlarında gerilmelerin maksimum değeri yerine, periyodik olarak değişimleri önemlidir. Periyodik olarak değişen bu gerilmeler, makine ekipmanlarının tane sınırlarında yıpranmalara ve ayrılmalara sebep olur. Bu durum neticesinde kırılma, akma sınırının altında ki gerilmelerde meydana gelecektir. Makine elemanın kopması için geçen zaman yorulma ömrü olarak adlandırılmaktadır. Genellikle kopma olayı malzemenin iç yapısında ki bir hatadan veya yüzeyde bulunan zayıf bir noktadan başlamaktadır. Bu nokta etrafında makine elemanı önce yorulur ve çatlaklar oluşmaya başlar. Zamanla oluşan bu çatlaklar giderek derinleşir ve sonunda çatlak dışındaki bölgede gerilme, malzemenin mukavemet dayanımını aşınca birdenbire kırılma meydana gelir (Tauscher, 1983).

## 2. LİTERATÜR BİLGİSİ

Yorulma dayanımı üzerine yapılan ilk çalışmalar Alman bilim adamı August Wöhler tarafından 1850-1870 yılları arasında ki yapmış olduğu araştırmalarla literatüre girmiştir (Marzoli ve Ark. 2006). Wöhler, 1842 yılında Fransa'nın Versailles kentinde meydana gelen tren kazasını incelemiş ve bu kazaya tekrarlı çevrimsel gerilmelere maruz kalan lokomotif aksının kırılmasının neden olduğunu gözlemlemiştir. Wöhler, araştırmalarında aks yüzeyinde çatlakların oluştuğunu ve bu çatlakların bazı bölgelerde büyüdüğünü keşfetmiştir. Çatlakların bir süreden sonra aniden yayıldığını ve aksın kırıldığını keşfetmiştir. Wöhler, lokomotiflerde bulunan akslara tekrarlanan yükleri uygulamak ve yük seviyesi ile tekrarlanan çevrim sayısı arasında ki ilişkiyi nitelendirebilmek için Wöhler eğrisini çizmiştir. Bu sayede çevrimsel gerilmelere maruz kalan malzemelerin yorulma ömürleri daha tutarlı bir şekilde tahmin edilebilir hale gelmiştir (Tauscher, 1983).

Daha sonra ki çalışmalarda yorulma dayanımına etki eden malzemelerin yapısı, şekli, uygulanan ısı işlem ve kullanım ortamı gibi çeşitli faktörlerin etkileri incelenmiştir. Bu alanda metallerin yapısı ile ilgili ilk çalışmaları 1903 yılında Ewing ve Humfrey yapmıştır (Ewing ve Humfrey, 1903).

1920'li yılların başında metal ve metal alaşımlarının sıcaklık ve korozyona bağlı olarak yorulma dayanımları incelenmiştir. Bu alanda en büyük çalışmalardan bir tanesini gerçekleştiren Mc. Adam, karbon çeliklerinin ve dökme demirlerin farklı sıcaklıklarda ki yorulma dayanımını incelemiştir. Adam'ın yapmış olduğu çalışma sonucunda karbon çeliklerinin ve dökme demirlerin yorulma dayanımlarının 100 °C de minimum seviyede olup, 350 °C de ise maksimum seviyede olduğunu tespit etmiştir. 350 °C'nin üzerinde ki sıcaklıklarda ise malzemenin yorulma dayanımının giderek düştüğü görülmüştür. Mc. Adam yapmış olduğu çalışmaların devamında korozyonun metallerin yorulma dayanımına etkilerini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmalar sonucunda metallerin yorulma dayanımının korozif ortamda önemli ölçüde azaldığını gözlemlemiştir. Korozif ortamdaki çatlak dislokasyonlarının açık havadakine oranla daha çabuk büyüdüğünü ve hızla yayıldığını, bunun sonucunda da yorulma kırılmalarının çok daha erken gerçekleştiğini görmüştür (McAdam, 1927).

Sıcaklığın metallere üzerinde ki etkiyi araştırmalarına katan bir diğer bilim adamı ise Teed ve arkadaşları olmuştur. 1950 yılında Teed ve arkadaşları ortam sıcaklığının

metal ve alaşımlarının üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Ortam sıcaklığı arttıkça metal ve alaşımlarının yorulma dayanımının azaldığı görülmüştür (Teed, 1950).

1958 yılında Thompson yorulma ile ilgili çalışmalarında elektron mikroskobu kullanmıştır. Yapmış oldu çalışmalar neticesinde elde etmiş olduğu bulgulara göre malzemedeki yorulma çatlaklarının metalik malzemenin yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmelerinden kaynaklandığı bulunmuştur (Thompson, 1958).

1960'lı yıllardan sonra yapılan araştırmalarda yorulma olayı ile ilgili ortaya atılan fikirlerin çoğu yüzey dislokasyonlarının hareketleriyle ilişkilendirilmesi konuya farklı bir bakış açısı geliştirmiştir. Fakat bu zamana kadar yapılan çalışmalarla yorulma olayı tam anlamıyla izah edilememiştir. Almen ve Black yüzeye uygulanan işlemler ile ilgili yapılan çalışmalarda, yüzeyde meydana gelen çeşitli basma gerilmelerinin metalik malzemelerin yorulma dayanımlarını artırdığını ileri sürmüştür (Almen ve Black, 1963).

1963 yılında Paris ile Erdoğan, yorulma çatlak ilerlemesi ve kırılma mekaniği üzerine yapmış oldukları çalışmalarda elde edilen bulgu ve verilere göre yorulma çatlak büyüme hızı ile ilgili bir parametre bulmuştur. Paris ve Erdoğan' a göre yorulma çatlak büyüme hızı, gerilme şiddet faktörüne bağlı olarak aşağıdaki eşitlikle elde edilir;

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^n \quad (\text{Eşitlik 1})$$

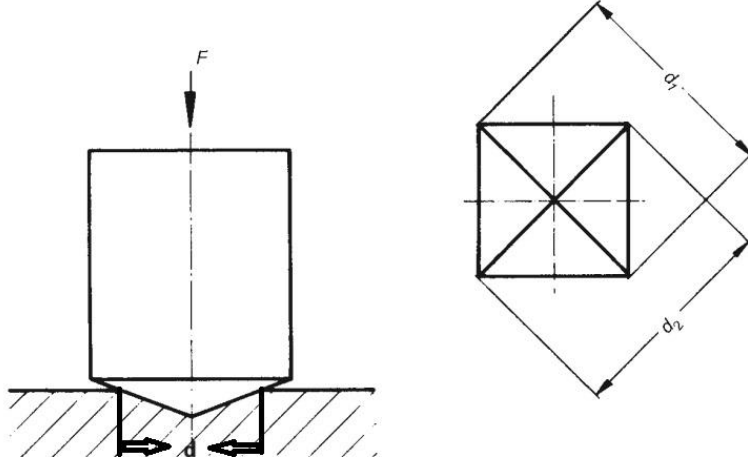
Bu eşitlikte:

A: Ampirik malzeme sabiti

n: Ampirik malzeme sabiti

K: Gerilme şiddet faktörünü ifade etmektedir (Paris ve Erdoğan, 1963).

1977 yılında Fujita K. ve arkadaşları yüzeylerinde sertleştirme işlemi yapılmış çelik ve çelik alaşımlarının yorulma dayanımlarını incelemiştir. Yüzey sertleştirme ile ilgili yapmış oldukları birden fazla deneyin neticesinde yüzey sertliği ile yorulma dayanımının orantılı bir şekilde değişmediği saptanmıştır. Yüksek sertleştirme durumunda malzemenin yorulma dayanımının düştüğü görülmüştür. Fujita K. ve arkadaşları en iyi verimi alabilmek ve optimum sertleştirme düzeyini yakalayabilmek için Vickers sertlik değeri adında bir ölçüm metodu geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, çelik veya çelik alaşımı bir malzemenin üzerine piramit şeklindeki elmas bir ucun bastırılarak yük uygulanması sonucunda malzemedeki deformasyonun ölçülmesi sağlanmıştır (Herrmann, 2011).



Şekil 2. Vickers sertlik deneyi (Herrmann, 2011).

$$\text{VSD} = \frac{2 F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} = \frac{1,8544 F}{d^2} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Bu eşitlikte:

F: Kgf cinsinden uygulanan yük

$\alpha$ : Tepe açısı

d: Taban köşegen uzunluğu  $[(d_1 + d_2)/2]$  şeklinde ifade edilir (Fujita ve Ark., 1977).

1991 yılında Topuz ve Uçan 36Mn5 alaşımlı çelik dökümün çatlak ilerlemesi ve yorulma kırılması üzerine çalışmalar yapmıştır. Yapmış oldukları çalışmada 36Mn5 çeliğinden yapılmış küçük silindirik numune parçalarını döndürerek, yorulma kırılması tokluklarını hesaplamaya ve analiz etmeye çalışmışlardır. Malzemenin kırılma tokluğunu hesaplamak için dönen eğmeli yorulma testini kullanmışlar ve yapmış oldukları analizler sonucunda başarılı sonuçlar almışlardır (Uçan ve Topuz, 1991).

1991 yılında Kaynak ve Ankara yorulma kırılması üzerine yaptıkları çalışmada, 2024-T3 alüminyum alaşımının yorulma çatlak büyümesini incelemişlerdir. Çeşitli numuneler üzerinde farklı yükleme oranlarıyla yorulma çatlak büyümesini araştırmışlar ve yapılan çalışmalar sonucunda yükleme oranı arttıkça, yorulma çatlak uzunluklarının da arttığı gözlemlenmiştir (Kaynak ve Ankara, 1991).

Elektron mikroskobu yorulma kırılmalarının incelenmesinde önemli yere sahiptir. Birçok bilim adamı çalışmalarında elektron mikroskobunu kullanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalardan bir tanesi de 1991 yılında Gürbüz'ün yapmış olduğu çalışmalardır. Gürbüz Alüminyum alaşımlarının yorulma olayını incelemiştir. Elektron mikroskobu yardımı ile alüminyum alaşımlarının çatlak oluşumunu, oluşan bu çatlağın zamanla

ilerlemesini ve çatlak yığımlarının ilerleyerek kırılmaya neden oluşunu incelemiştir (Gürbüz, 1991).

Yeşildal ve arkadaşları 2003 yılında yapmış oldukları çalışmada X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin yorulma mukavemetlerini farklı sıcaklıklarda (50-600°C) ve yüklerde incelemiştir. Çalışmalarında R.R. Moore tipi bir dönel eğmeli yorulma test cihazı kullanmıştır (Yeşildal, Şen ve Kaymaz, 2003).

Paepegem ve Degrieck 2001 yılında fiber takviyeli kompozit malzemelerin yorulma dayanımlarını incelemek amacıyla bilimsel çalışmalar yapmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışma esnasında, çalışmanın amacına uygun bir düzlemsel eğme gerilmeli yorulma test cihazı tasarlamışlardır. Tasarımını yapmış oldukları bu cihaz ile minimumdan maksimuma doğru, tek yönde veya çift yönde eğme gerilmesi uygulanmıştır (Van Paepegem ve Degrieck, 2001).

Burhan ve Çavdar 2010 yılında eksantrik yayların yorulma dayanımlarını incelemek amacıyla bir eksantrik yay yorulma test cihazı tasarlamışlardır. Yapmış oldukları bu çalışmada farklı çap ve boyutlardaki bası yaylarının değişken yükler altındaki yorulma dayanımlarını ve şekil değişimlerini incelemiştir (Burhan ve Çavdar, 2010).

Küçük ve arkadaşları 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada R.R. Moore tipi bir yorulma test cihazı tasarlamışlardır. Tasarımı yapılan cihaz 1.5Hp gücündeki bir motor yardımıyla dakikada maksimum 5000 devir/dakika lık dönme hızına ulaşabilmektedir (Küçük ve Ark., 2014).

## 2.1. Yorulma Olayı

Metallerde yorulma mekanizması 1850'li yılların başında A. Wöhler ile başladı ve mevcut çalışmalar 1920'li yıllardan itibaren hız kazanarak, metalografi ve X ışını difraksiyonu yolu ile araştırmalar yapılarak, malzemenin yapısındaki değişimler incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda makine elemanlarında gerçekleşen kırılma olayının %90-95 kısmının yorulmalardan kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. (Tauscher H., 1983) Metallerin mekanik özelliklerini belirleyen yorulma deneylerinde daha çok, yüksek hızla dönen yorulma deney düzeneği kullanılmakta ve deney numuneleri hassas bir şekilde incelenmektedir. Test sonuçları logaritmik ölçekli kâğıda çizilerek, Wöhler eğrisi (S-N diyagramı) elde edilir ve yorumlanır. Bununla birlikte, elektron mikroskopları yardımı ile malzemenin tanecik yapısındaki kaymalar ve dislokasyonlar belirlenebilmektedir (Thompson, 1958).

Makine elemanlarında meydana gelen gerilmeler, yorulmaya maruz kalan makine ekipmanının kritik kesitinde ki merkezinden, yüzeye doğru simetrik bir dağılım göstermeyebilir. Makine ekipmanının yüzey kalitesi, şekli, ortam sıcaklığı, ortamın korozyif özellikleri, uygulanan kuvvet, gerilme, frekans, parçanın mikroyapı boyutu, faz dağılımı gibi iç ve dış etmenlerden dolayı ekipmanda yerel gerilme yığılımları olur (Kurban, 1993).

Basma ve çekme gerilmelerine maruz kalan parçalarda yorulma çatlakları oluşur ve oluşan bu çatlakların ilerlemesini durdurmak imkansızdır fakat çatlak ilerlemesini yavaşlatmak mümkündür. Parçaya uygulanan kuvvet azaltılır ve oluşan maksimum gerilme, malzemenin kırılma tokluğunun altında kalırsa çatlak ilerlemesi yavaşlar. Yorulma çatlaklarının devam etmesi durumunda parçanın yüzey kesitinde küçülme meydana gelecektir ve gerilme artacaktır. Çatlak ilerleme hızı, çatlak derinliğinin karesi ile doğru orantılı bir şekilde değişiklik gösterir (Yahşi, 1984).

## **2.2. Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler**

Bir makine eleman ve ekipmanının yorulmaya karşı emniyetli olabilmesi için çalışma esnasında doğabilecek anma gerilmelerinin malzemenin yorulma dayanımının altında olması yeterli olmayabilir. Diğer bir değişle, zorlanma şartlarına bağlı olarak malzemenin yorulma dayanımını indirgeyici ve artırıcı bazı iç ve dış faktörler olabilir. Yorulma hasarlarının oluşumunda aynı anda birden çok faktörün etkisi söz konusudur. Ancak bazı durumlarda tek bir faktörün etkisi bile kırılmalara neden olmaktadır (Naito, Ueda ve Kikuchi, 1984).

### **2.2.1. Malzemenin Yapısı ve Kimyasal Bileşenlerinin Yorulmaya Etkisi**

Malzemelerin statik çekme dayanımları arttıkça yorulmaya karşı gösterdikleri direnç de artmaktadır. Çeliklerin kimyasal bileşimine alaşım elementleri ilave edilerek statik çekme mukavemetleri artırılmaktadır. Malzemeye alaşım katarak sadece yorulma dayanımını artırmak mümkün değildir. Bunun için öncelikle çekme dayanımını artırmak gerekmektedir (Tekin, 1986).

Karbon dışındaki alaşımlar çeliklerin iç yapısını değiştirerek malzemenin yorulma dayanımını artırır. Özellikle malzemeye uygulanan menevişleme ve su verme yöntemleri malzemenin yorulma dayanımını artırdığı gibi statik çekme dayanımlarını da artırmaktadır. Isıl işlem uygulanacak çeliklerde, alaşım elementlerinin kullanım amacı çeliklerin su emme yüzeylerini artırarak, yüzey sertliğinin mümkün oldukça derinlere inmesini sağlamak ve malzemenin yorulma dayanımını artırmaktır. Soğuk işlem ile yüzey

pürüzlülüğü ve sertliği artırılan sünek malzemelerin, sıcak işlem gören sünek malzemelere oranla yorulma dayanımı daha yüksektir (Kayalı ve Ark., 1996).

Malzemenin iç yapısındaki segregasyon ve inklüzyonlar malzemenin yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü azaltır. Örneğin vakumlanarak ergitilip dökümü yapılan çeliklerin iç yapısında inklüzyonlar görülmediğinden yorulma dayanımları çok daha yüksektir (Kayalı ve Ark., 1996).

### **2.2.2. Malzemenin Yüzey Yapısının Yorulmaya Etkisi**

Malzemelerde yorulma olayı genellikle yüzeyden başlayarak zamanla iç kesimlere doğru yayılır. Bunun nedeni malzemenin maruz kaldığı eğme ve burulma gerilmeleri en fazla yüzeylerde oluşmaktadır. Bu nedenden dolayı gerilmelere maruz kalan makine elemanlarının yüzey yapıları çok önemlidir. Makine ekipmanlarının imalatında veya yüzeye uygulanan işlemleri esnasında, malzemenin yüzeyinde meydana gelen çatlak, keskin köşe, girinti, çıkıntı gibi yüzey deformasyonları yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü yüksek oranda etkileyecektir. Malzemelerde yüzey pürüzlülüğünün minimum seviyeye indirilmesi ve yüzey sertliğinin artırılması yorulma çatlaklarının oluşum sürelerini uzatarak, malzemelerin yorulma dayanımını yüksek oranda artıracaktır (Crane ve Charles, 1997).

### **2.2.3. Çentiğin Yorulmaya Etkisi**

Makine ekipmanlarının yüzey kesitinde oluşan çentikler, delikler ve yüzeydeki ani değişimler malzemenin yorulma mukavemetini ve yorulma ömrünü yüksek oranda azaltacaktır. Parça yüzey kesitinde meydana gelen bu tür süreksizlikler gerilme yığılmalarına ve bunun neticesinde çatlak oluşumlarına neden olacaktır. Makine ekipmanlarındaki ani kesit daralmalarında, yağlama kanallarında, dişli yataklarında, vida yataklarında ve benzeri kısımlarda daima çentik etkisi gözlemlenir. Bu nedenle makine ekipmanlarının dizaynında bu tür faktörler göz önünde bulundurularak imalatları yapılmalıdır (Tauscher, 1983).

Mühendislik ana biliminde yorulma dayanımının belirlenmesinde gerilme yığılmalarının da etkisi irdelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda bununla ilgili bazı faktör ve katsayılar oluşturulmuştur. Bunun neticesinde aşağıda ki eşitlik elde edilir;

$$K_{\phi} = 1 + q(K_t - 1) \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Buradan;

$$q = \frac{K_{\phi} - 1}{K_t - 1} \quad (\text{Eşitlik 4})$$

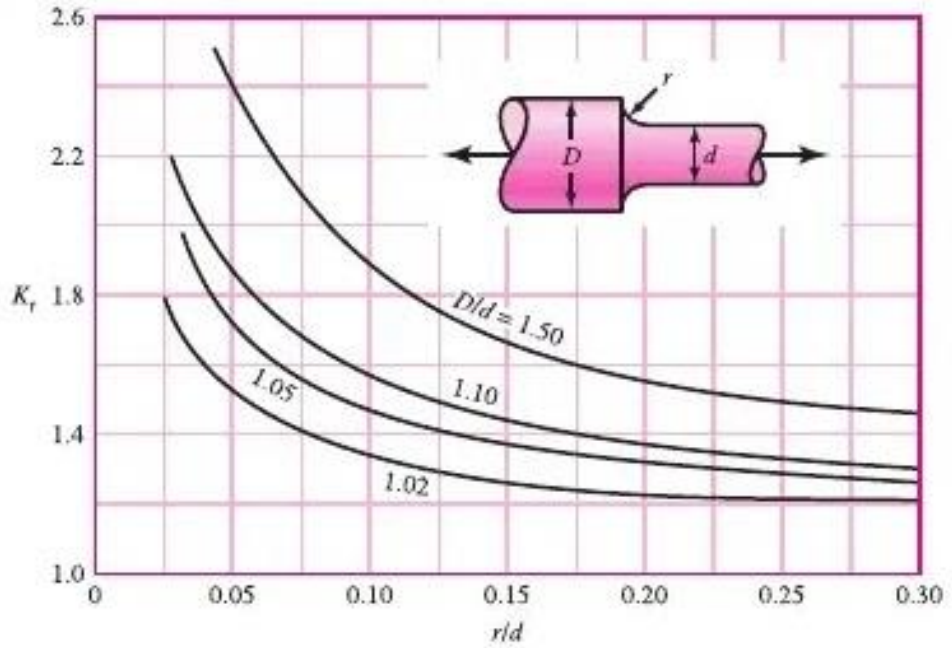
Bu eşitlikte:

$K_{\phi}$ : Çentik faktörü

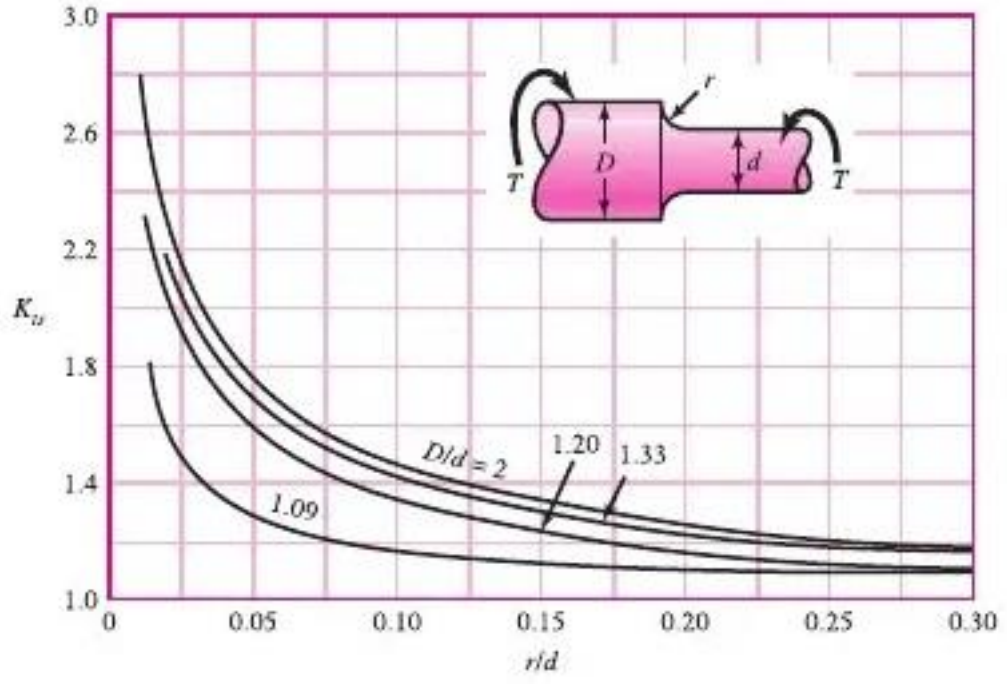
$q$ : Çentik hassasiyet faktörü

$K_t$ : Teorik gerilme yığılma faktörü şeklinde ifade edilir (Leis ve Ark., 1973).

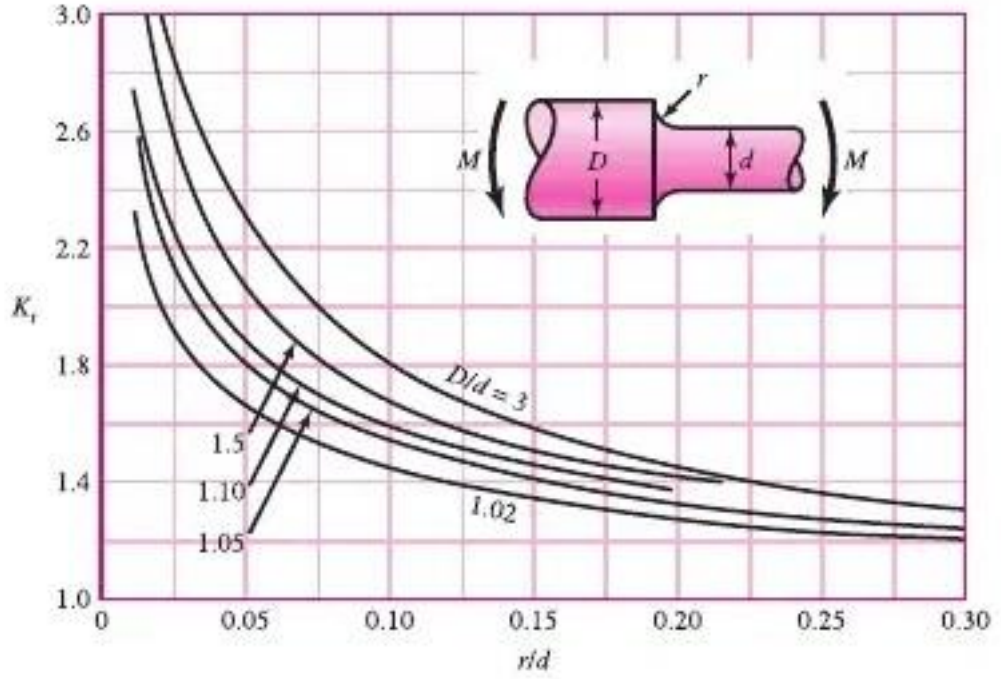
Aşağıdaki şekillerde farklı geometrik şekillere ait millerin teorik gerilme yığılma faktörü değerleri bulunmaktadır.



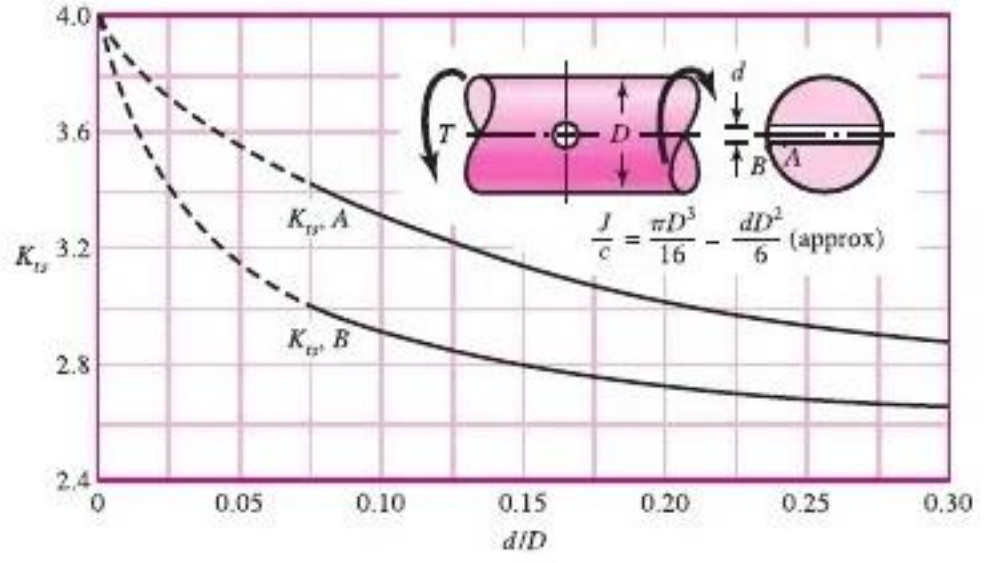
Şekil 3. Çekme kuvveti etkisinde faturalı yuvarlak mil (Shigley, 2006).



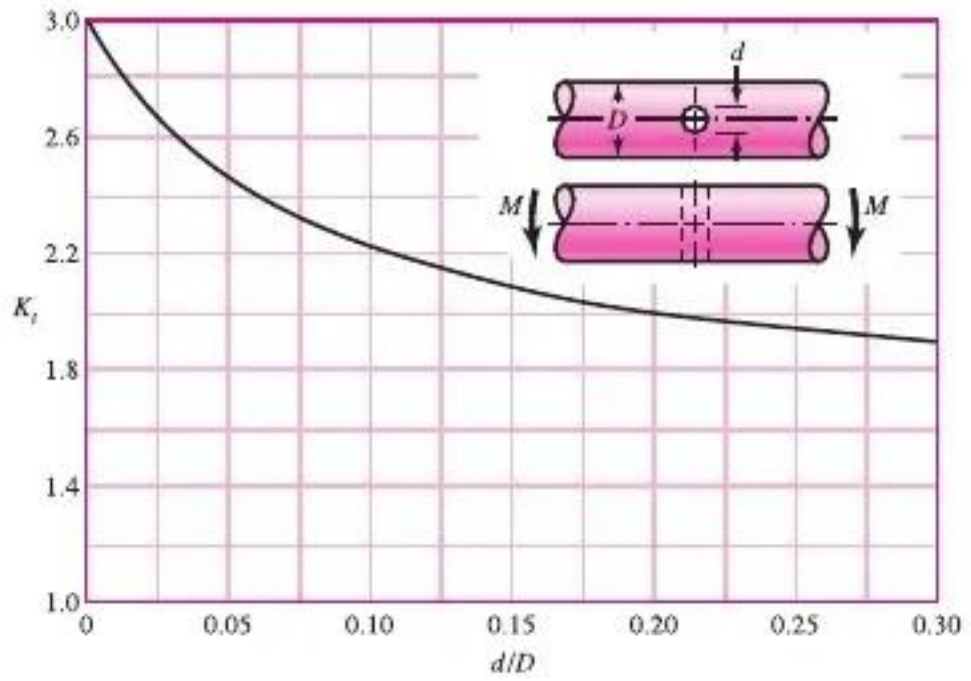
Şekil 4. Döndürme kuvveti etkisinde faturalı yuvarlak mil (Shigley, 2006).



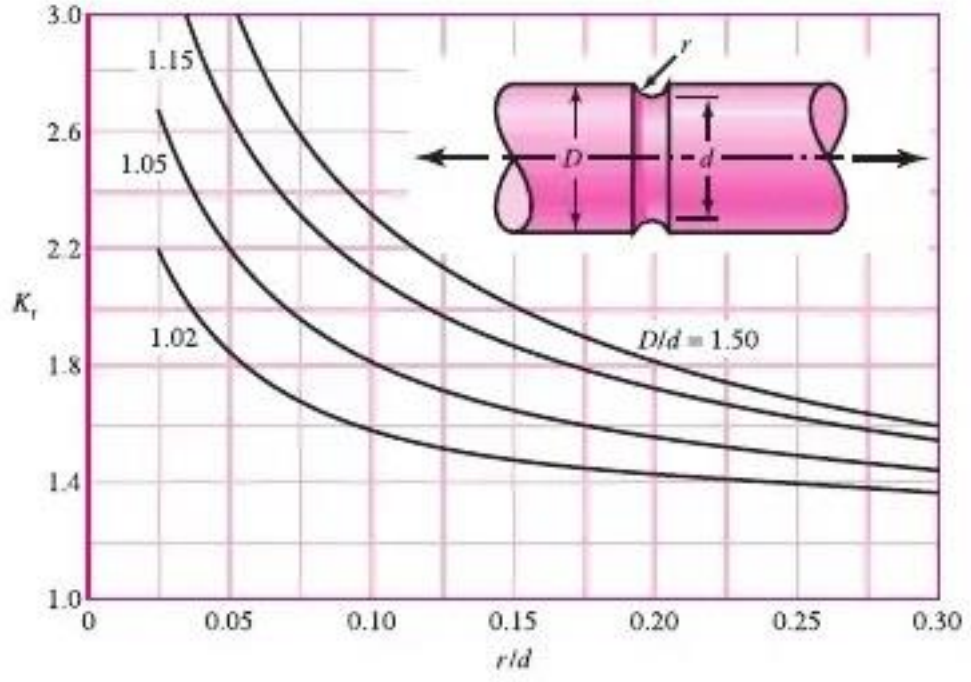
Şekil 5. Eğilme kuvveti etkisinde faturalı yuvarlak mil (Shigley, 2006).



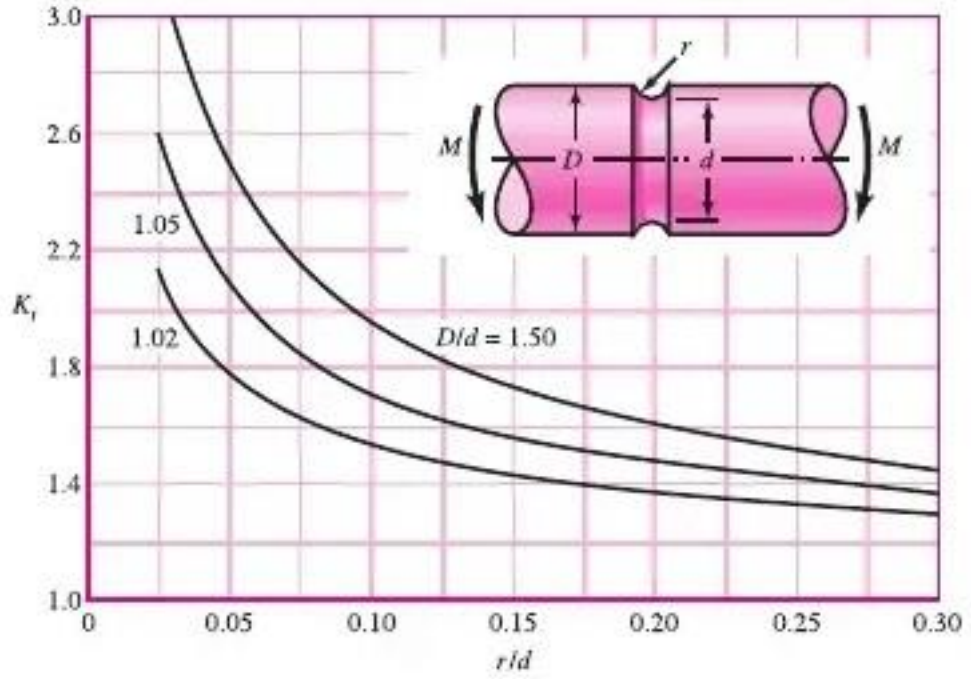
Şekil 6. Döndürme kuvveti etkisinde enine delikli yuvarlak mil (Shigley, 2006).



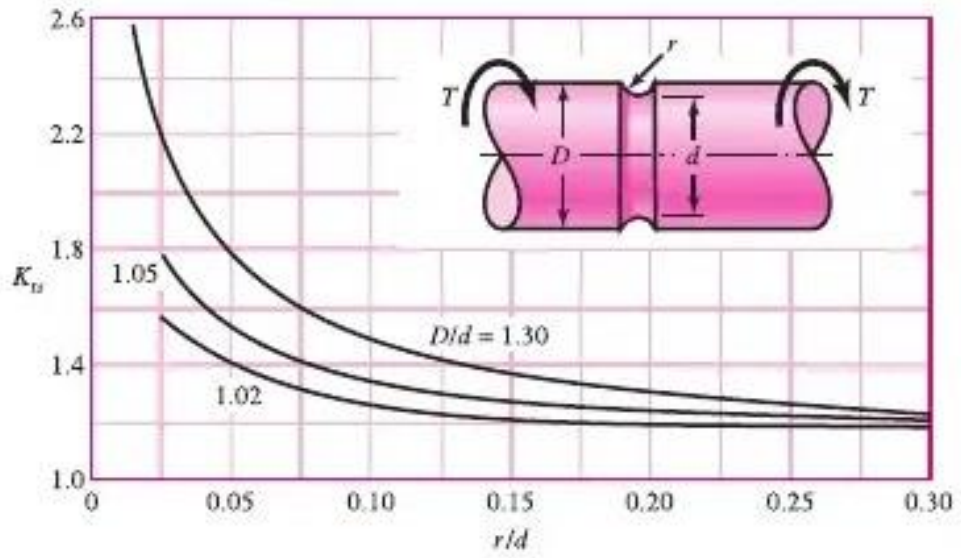
Şekil 7. Eğilme kuvveti etkisinde enine delikli yuvarlak mil (Shigley, 2006).



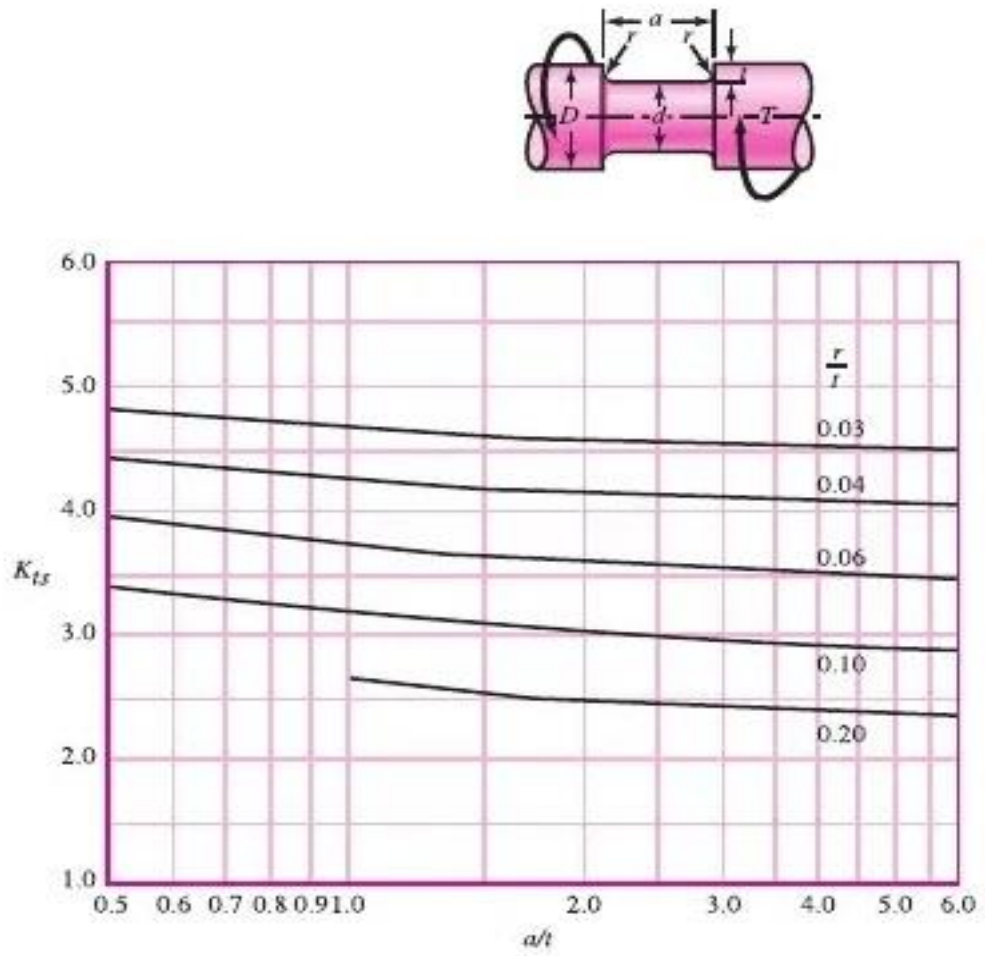
Şekil 8. Çekme kuvveti etkisinde oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006).



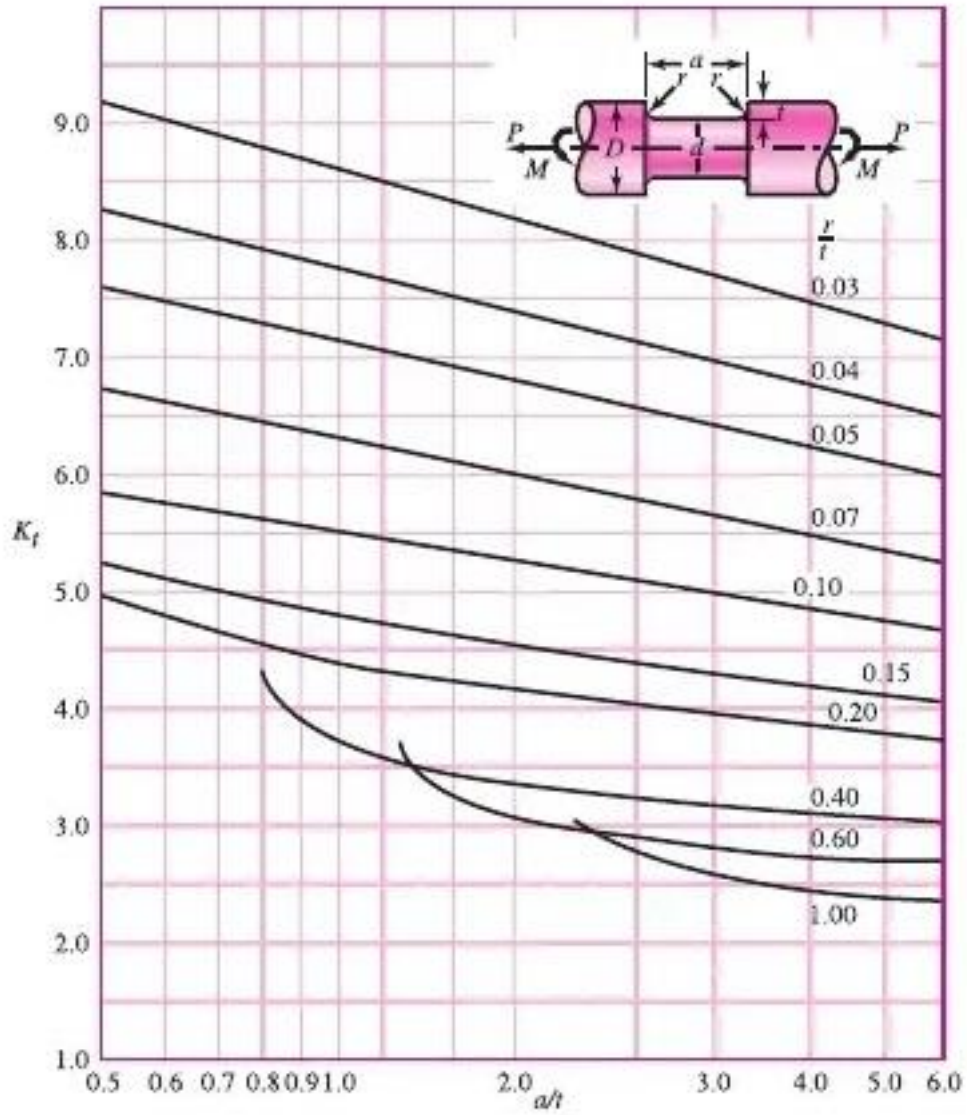
Şekil 9. Eğilme kuvveti etkisinde oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006).



Şekil 10. Döndürme kuvveti etkisinde oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006).



Şekil 11. Döndürme kuvveti etkisinde düztabanlı oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006).



Şekil 12. Eğilme ve/veya çekme kuvveti etkisinde düztabanlı oluk kanalı açılmış yuvarlak mil (Shigley, 2006).

#### 2.2.4. Gerilmelerin Yorulmaya Etkisi

Yorulma deneylerinde numuneye uygulanan gerilme türünün etkisi önemli bir unsurdur. Numuneye uygulanan gerilme eksenel veya düzlemsel eğme gerilmesi ise elde edilen veriler birbirine çok yakın değerler çıkacaktır ve doğru sonuçlar alınacaktır. Eğer numuneye uygulanan gerilme burulma gerilmesi ise elde edilen veriler birbirinden çok farklı olabilmektedir. Burulma gerilmesi ile elde edilen sonuçların hata oranı eksenel ve düzlemsel eğme gerilmelerinde elde edilen sonuçlara oranla demir dışı metallerde yüzde 52, karbonlu çeliklerde yüzde 48-64, alaşımlı çeliklerde ise hata oranı yüzde 44-71 aralığında değişim göstermektedir (Kayalı ve Ark., 1996).

Malzemelere uygulanan gerilmelerde ortalama gerilme, ortalama gerilme genliği ve gerilme oranlarının etkisi de 6nemlidir. Malzemeye uygulanan gerilme (y6k) arttıka malzemenin kırılmadan 6nce dayanabileceği 6evrim sayısına bağlı gerilme genliği değeri azalmaktadır. Malzemeye uygulanan gerilme azaldık6a malzemenin yorulma 6mr6 artacak ve buna bağlı olarak numune y6ksek 6evrim oranlarında kırılmaya uğrayacaktır. Gerilme genliğinin minimum olduğu durumlarda ise numune sonsuz 6evrim oranına sahip olmaktadır (McClung, 2007).

### **2.2.5. Korozi Ortamın Yorulmaya Etkisi**

Bir makine elemanın kimyası korozyondan etkileniyor ve aynı zamanda mekanik etkenlerden dolayı malzemede yorulma olayı ger6ekleşiyorsa bu olay korozyonlu yorulma olayı olarak adlandırılır. Bir malzemenin yorulma olayına maruz kalmadan 6nce korozyona uğraması o malzemenin yorulma dayanımını azalmasına neden olmaktadır. Bu etkileşimde korozyonun ger6ekleştiği y6zeyde meydana gelen p6r6zler malzemede 6entik etkisi yaparak, yorulma dayanımı ve yorulma 6mr6n6n azalmasına sebep olurlar. Korozyon malzemedeki 6atlakların ilerleme hızını artırarak, yorulma kırılmalarının daha kısa s6rede ger6ekleşmesine neden olmaktadır (Dolley ve Lee, 2000).

### **2.2.6. Sıcaklığın Yorulmaya Etkisi**

Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık azaldık6a malzemenin yorulma mukavemetinin arttığı g6r6lmektedir. Malzemelerde oluşan 6entik hassasiyeti sıcaklık ile ters orantılı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak sıcaklığın oda sıcaklığının altına d6şmesi malzemenin 6entik hassasiyetinin artmasına neden olmaktadır. Oda sıcaklığının 6zerinde yapılan deneylerde d6ř6k karbonlu 6elikler dışında sıcaklık arttıka malzemelerin yorulma dayanımının d6řt6đ6 g6r6lmektedir. D6ř6k karbonlu 6eliklerde ise 200°C ile 300°C arasında yorulma dayanımında artış g6r6lmektedir. Bu durum d6ř6k karbonlu 6eliklerde bu sıcaklıklarda deformasyon yaşlanmasına uğrayarak 6ekme dayanımlarının artmasına neden olmaktadır. D6ř6k karbonlu 6eliklerde sıcaklık 400°C'lere ulaştığında ise s6r6nme olayı meydana gelir ve s6r6nmeye bağlı olarak kopmalar ger6ekleşir (Kayalı ve Ark., 1996).

Oda sıcaklığında malzemenin tane boyutu k66c6ld6k6e yorulma dayanımı artmaktadır. Malzemede s6r6nme olayının başladığı sıcaklıklarda ise tam tersi etki ile b6y6k taneli 6elikler, k66k taneli 6eliklere oranla daha y6ksek mukavemet g6sterirler. Makine elemanlarında sıcaklık değişiminden kaynaklanan termal gerilmeler, yorulma

kırılmalarına sebep olabilirler. Sıcaklığın  $\Delta T$  kadar değişmesiyle, malzemede oluşan gerilme aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir;

$$\sigma = \alpha.E.\Delta T \quad (\text{Eşitlik 5})$$

E: Elastisite modülü

$\alpha$ : Lineer ısı genleşme katsayısı

$\Delta T$ : Sıcaklık farkı şeklinde ifade edilir (Tekin, 1986).

### **2.3. Yorulmada Çatlak Oluşumu ve Kırılma**

Malzemelerde meydana gelen plastik deformasyon, malzemenin iç yapısında çeşitli yapısal değişikliklere neden olur. Bu durum bölgesel gerilmelere ve yapı bozukluklarına neden olmaktadır. Pratikte ani kırılma işlemi ansızın oluşan bir kritik şart işlemidir (Krabtsov ve Ark., 1982).

Malzemenin kafes yapısındaki değişimler, çeşitli teorilerin temelini teşkil etmektedir. Yorulmada kayma düzlemleri içerisinde bulunan ve düzlemsel hasara neden olan yabancı maddeler sıkılarak dışarı çıkartılır. Kayma düzlemlerinin hareketi atomların kararlı bir kristal yapıya sahip olmasını engeller ve bu durum sürtünme teorisinin temelini oluşturur (Caddell, 1980).

#### **2.3.1. Çatlak Oluşumu**

Makine elemanlarında bir yük altında belirli bir çevrim sayısından sonra malzemede meydana gelen kayma bantları çatlak oluşumuna neden olur. Malzemenin yüzeyinde oluşan bu kayma bantları, zamanla yüzeyden merkeze doğru kayma eğilimi gösterir. Malzemeye uygulanan tekrarlı yüklemeler sonucunda meydana gelen kayma bantları zamanla artarak devam etmektedir. Yüzeğe uygulanan elektrolitik parlatma, yüzeyde bulunan kayma bantlarını ortadan kaldırarak, yüzeyde düzgün ve pürüzsüz bir yapı oluşturur. Bu durum yüzeyde ki kayma bantlarını ortadan kaldırırsa da iç kısımlardaki kalıcı kayma bantlarını ortaya çıkarır. Zamanla bu kayma bantlarında çatlaklar oluşur (Carpinteri, 2012).

#### **2.3.2. Kırılma**

Malzemelerin tekrarlı yükler altında zorlanması sırasında, malzemede meydana gelen kalıcı şekil değişimlerinin birikimi sonucu ve malzemenin yorulma dayanımının aşılması sonucu malzemede mikroskobik boyutlarda küçük çatlaklar oluşur. Zorlanma

esnasında dışarıdan verilen enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak oluşan mikro çatlaklar zamanla makro çatlaklara dönüşür. Oluşan mikro ve makro çatlaklar zamanla birleşir ve bu birleşim sonucunda bu çatlaklar yorulma kırılmasına neden olurlar (Zhang, ve Ark., 2007).

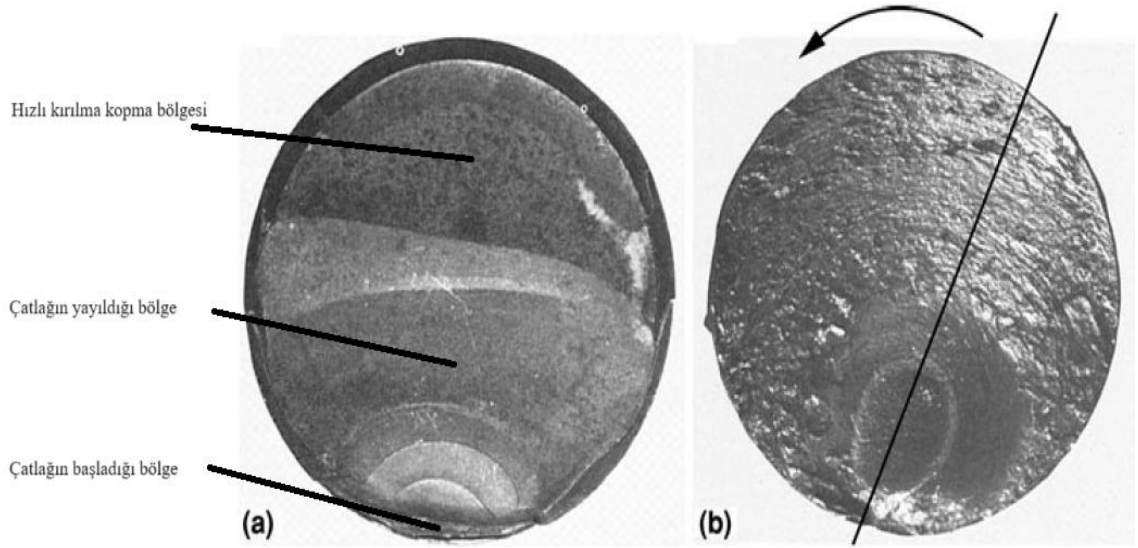


Şekil 13. Mikro çatlakların ve makro çatlakların oluşumunu gösteren SEM görüntüsü (Zhang ve Ark., 2007).

Yorulma kırılmalarında hasar oluşumu mikro çatlaklar şeklinde başlayıp ilerlediğinden, malzemeye dışarıdan bakıldığında herhangi bir kalıcı şekil değiştirme ve hasar görünmez. Hasarın ilk oluştuğu nokta genellikle malzemenin yüzeyinde veya yüzeyin hemen altında ki katmandadır, fakat malzemenin imalatı sırasında malzeme hatalarının durumuna göre malzemenin iç kısımlarından da oluşabilir (Zhang ve Ark., 2007).

### **2.3.3. Yorulma Kırıklarının Görünümü**

Yorulmaya maruz kalarak kopan bir malzeme incelendiğinde kırılmanın başladığı nokta genellikle belirlenebilmektedir. Aşağıda 4130 ve 4150 çelikten imal edilmiş şaftların kırılan kesitlerinin durumu görülmektedir.



Şekil 14. **a.** Keskin çevresel çentikli 4130 çelik shaftın tek yönlü eğilme kırılma yorulması **b.** Dönel bükülmeye maruz kalan 4150 çelik shaftın yorulma kırılması (Milella, 2012).

Yorulma olayında çatlak oluşma bölgesi genellikle mat ve düzgün görümlü iken, ani kırılmanın gerçekleştiği bölgede ise kaba taneli kristalleşmeler görülmektedir.

#### 2.4. Yorulma Deney Türleri

Bir makine elemanı çalışma esnasında birbirinden farklı türlerde ve şiddette gerilmelere maruz kalabilir. Bu ekipmanların tekrarlı yükler altında göstermiş oldukları direnci bulabilmek için yorulma testleri yapılır. Bu testlerde elde edilen sonuçlara göre malzeme hakkında teknik yorumlar yapılabilmektedir (Weibull, 2013).

Deneylerde kullanılan düzenek ve gerilme türüne göre yorulma deneylerinin adları verilmiştir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyi türleri şunlardır;

- 1) Eksenel gerilmeli yorulma deneyi
- 2) Eğme gerilmeli yorulma deneyi
- 3) Burma gerilmeli yorulma deneyi
- 4) Bileşik gerilmeli yorulma deneyi

##### 2.4.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi

Yorulma deneylerinde en basit olarak bilinen bu sistemde numune eksenine dik yönde basma ve çekme gerilmeleri uygulanır. İçten yanmalı motorların rot bağlantılarında eksenel bir gerilmeye rastlanılmaktadır (Kayalı, 1996).

### **2.4.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi**

Bu deney türü düzlemsel eğmeli ve dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyinde numune tarafsız bir eksen üzerinde tekrarlı eğme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bu tür gerilmelere en güzel örnek, ağır vasıta yük araçlarının altında bulunan makaslarda oluşan gerilmelerdir.

Dönel eğme gerilmeli yorulma deneyinde ise tarafsız bir eksen üzerinde sürekli dönen bir numunenin tekrarlı eğme gerilmelerine maruz kalması olayıdır. Bu tür gerilmeye verilebilecek en güzel örnek araçların akslarında meydana gelen gerilmelerdir. Alman bilim adamı August Wöhler' de çalışmalarına bir tren aksının yorulmasını inceleyerek başlamıştır (Kayalı, 1996).

### **2.4.3. Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi**

Bu deney türünde sabit bir eksen üzerinde numuneye tekrarlı burma (dönme) gerilmeleri uygulanmaktadır. Bu tür gerilmelere örnek olarak araçlarda ki süspansiyon sistemleri verilebilir (Kayalı, 1996).

### **2.4.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi**

Makine elemanlarına birden fazla gerilmenin etki ettiği durumlarda meydana gelir. Uygulama alanında en fazla rastlanan bileşik gerilme türü eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu gerilmelerdir. Ayrıca aksel ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu bileşik gerilmeye de sıkça rastlanmaktadır. Motorlu taşıtların krank mili başlıklarında meydana gelen gerilme bileşik gerilmenin meydana geldiği bir gerilme türüdür. Burada hem eğme hem de burma gerilmesi söz konusudur (Kayalı, 1996).

## **2.5. Yorulma Deneyi Cihaz Türleri**

### **1) Dönel Eğmeli Yorulma Test Cihazları**

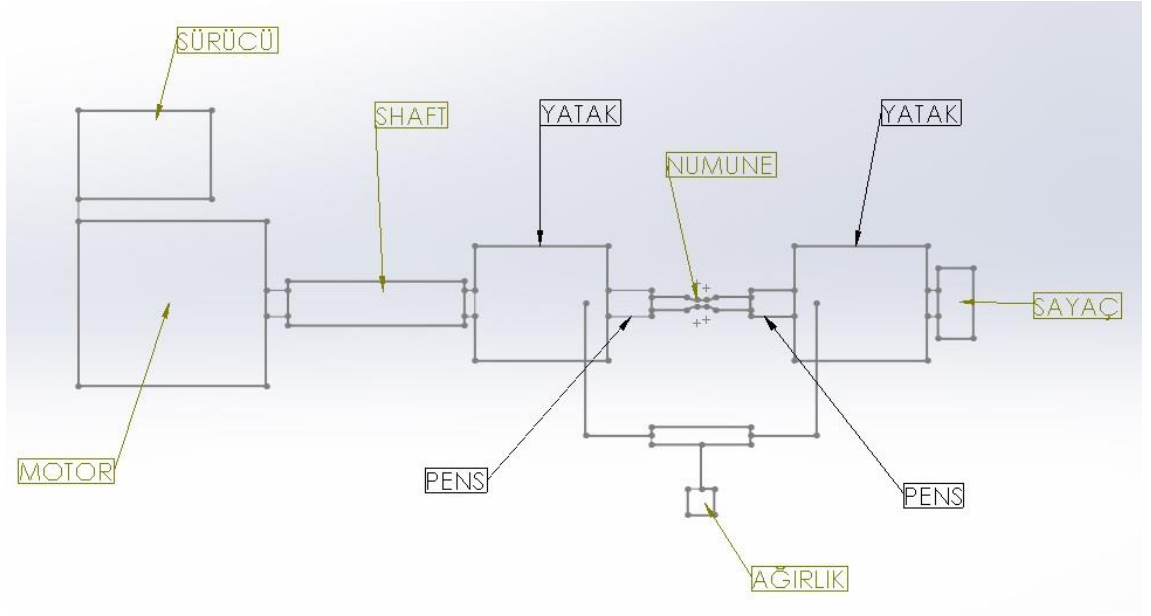
- a) Tek taraflı sabit eğmeli yorulma test cihazı
- b) Çift taraflı sabit eğmeli yorulma test cihazı

### **2) Aksel Basma – Çekme Gerilmeli Yorulma Test Cihazları**

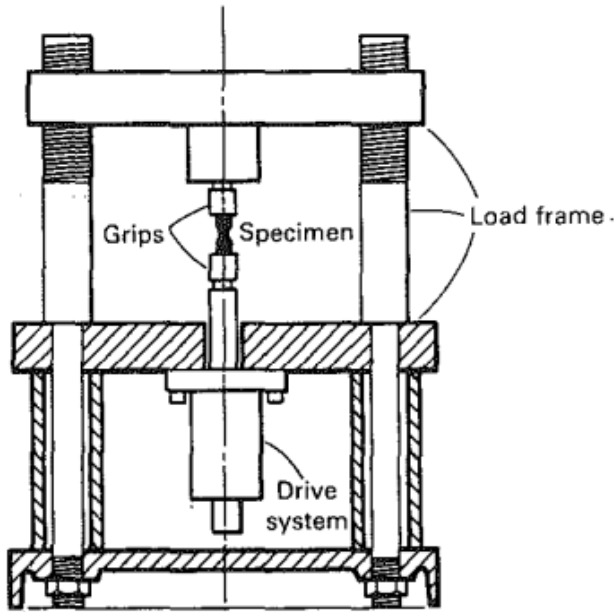
### **3) Burma Gerilmesi Uygulayan Yorulma Test Cihazı**

### **4) Bileşik Gerilmeli Yorulma Test Cihazı**

Yukarıda belirtilen her bir grup için farklı cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlardan bazılarının çalışma prensibi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 15. Dönel eğmeli yorulma test cihazı



Şekil 16. Bir elektrohidrolik aksenal basma-çekme gerilmesi uygulayan test cihazı (Boyer, 1986).

Yorulma deneylerinde kullanılan cihazlar çalışma şekline göre hidrolik, elektrohidrolik, mekanik ve elektromekanik cihazlar olarak da sınıflandırılabilir. Test edilecek numuneye uygulanacak gerilme türüne göre uygun deney cihazı seçilerek deney yapılır. Kullanılan cihazlarda deney esnasında istenilen tür ve boyutta gerilmelerin meydana gelmesi önemli bir kriterdir. Deney esnasında numuneye uygulanan yükte meydana gelecek değişim, cihazın çalışma kapasitesinin %2'sini aşmamalıdır (Hertzberg ve Hauser, 1977).

## 2.6. Yorulma Deneyinde Kullanılan Numune Özellikleri

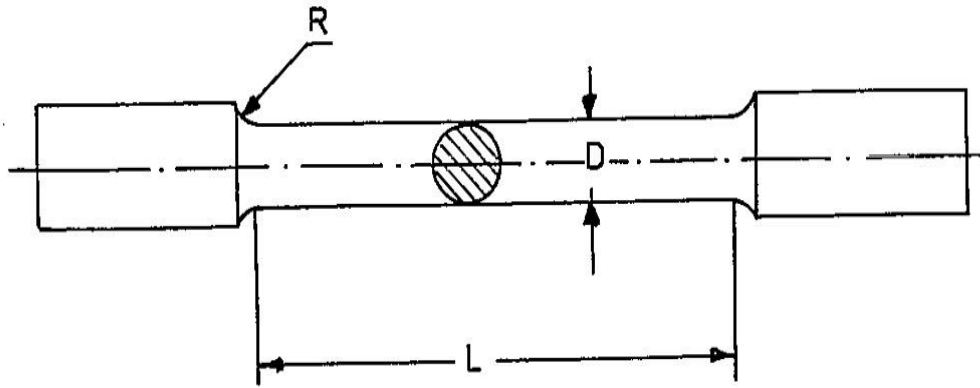
Deneylerde kullanılacak numunenin boyutu ve tipi, deney cihazının çalışma prensibine, kapasitesine ve büyüklüğüne göre değişim göstermektedir. Numuneler belli standartlara göre üretilmektedir. ASTM E-466 standartlarına göre dönel eğmeli yorulma testlerinde iki çeşit numune kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan numuneler için iki önemli faktör söz konusudur;

1) Yorulma sonucu meydana gelen kırılma deney numunesinin daraltılmış kesitinde meydana gelmelidir.

2) Oluşabilecek maksimum gerilme cihaz çalışma kapasitesinin %25'inde olurken minimum gerilme ise %2,5'inde olmalıdır.

### 2.6.1. A Tipi Deney Numunesi

Dönel eğmeli yorulma test cihazlarında kullanılan numunelerden, A tipi dairesel kesitli deney numunesi Şekil 17'deki gibidir.

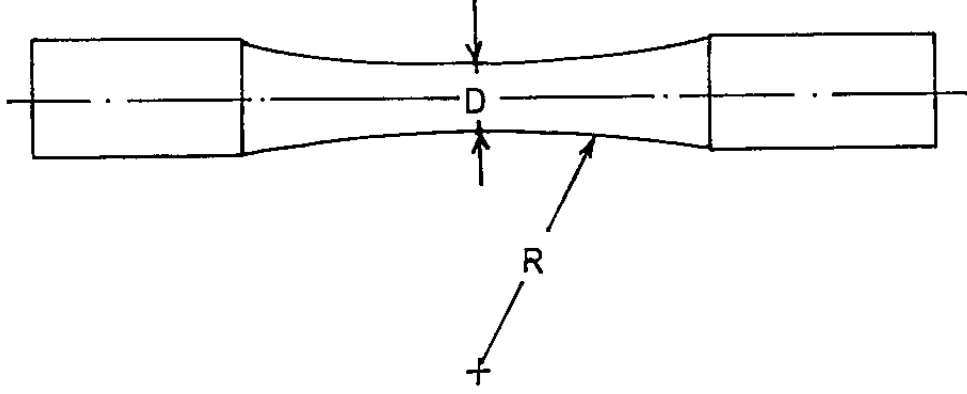


Şekil 17. A tipi dairesel kesitli deney numunesi (ASTM, 2007).

Bu tip numunelerde standartlara göre küçültülmüş kesitin çapı (D) 5 mm ile 25 mm aralığında olmalıdır. Numune kesitinin küçültülmüş kesite oranı en az 1,5 olacak şekilde ayarlanmalıdır. Çentik etkisini minimum seviyeye düşürebilmek için R yarıçapının D çapına oranı en az 8 olmalıdır. Küçültülmüş kısmın uzunluğu (L) küçültülmüş kısmın çapının (D) en az 3 katı olmalıdır. Ancak basma gerilmelerinin uygulanacağı durumlarda bu oran 4 katından fazla olmamalıdır (ASTM, 2007).

### 2.6.2. B Tipi Deney Numunesi

Dönel eğmeli yorulma test cihazlarında kullanılan numunelerden, A tipi dairesel kesitli deney numunesi Şekil 18'deki gibidir.



Şekil 18. B tipi dairesel kesitli deney numunesi (ASTM, 2007).

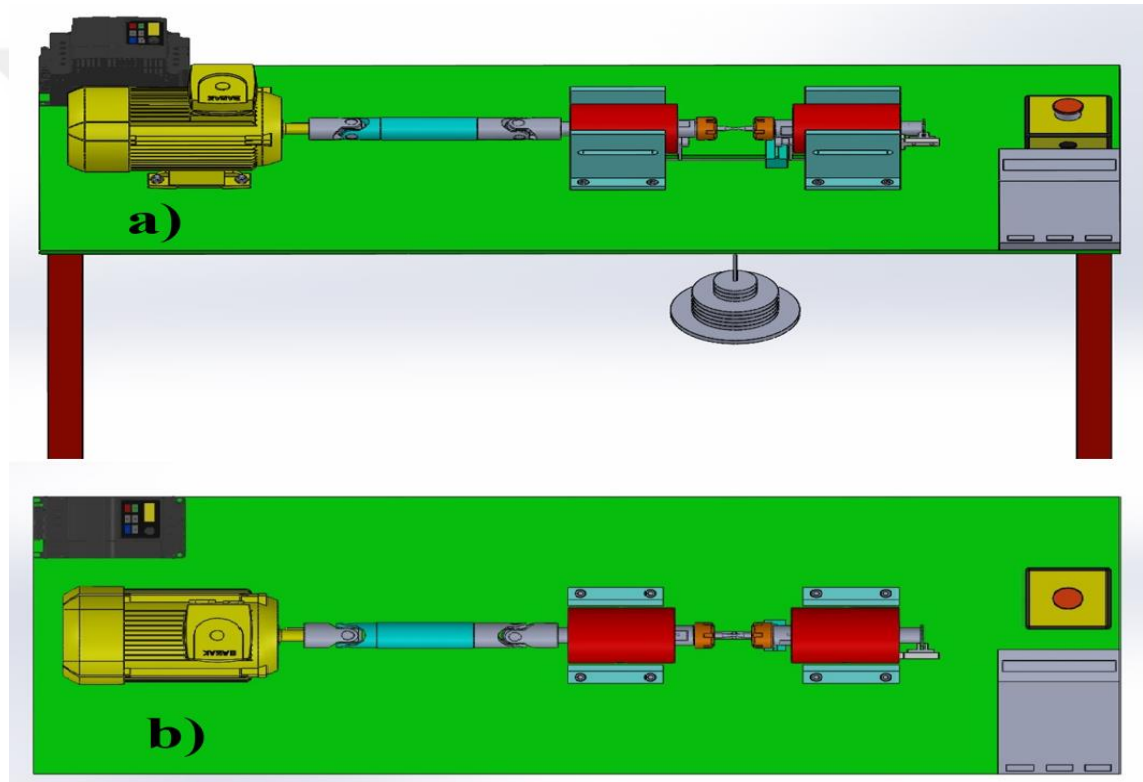
Bu tip numunelerde standartlara göre küçültülmüş kesitin çapı (D) ile radyus verilmiş bölge arasında  $R/D \geq 3$  oranı vardır.

Bu tür numuneler hazırlanırken mümkün oldukça az paso verilerek keskin uçlu elmaslar ile işleme yapılmalıdır. Aksi takdirde numunede ısınmalar ve iç gerilmeler meydana gelecektir. Numunenin yüzeyinde çentiklerin ve enine çizgilerin olmamasına dikkat edilmeli ve kaba paso işleminden sonra numunede ince taşlama işlemi yapılmalıdır. Bu durum numunenin yorulma kırılması ömrünü uzatacaktır (ASTM, 2007).

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1. Yorulma Deney Cihazının Tasarımı

Dönel eğmeli yorulma test cihazının tasarımı yapılırken günümüzde kullanılmakta olan cihazlar incelenerek tasarıma başlanmıştır. Başlangıçta tasarlanacak R. R. Moore tipi dönel eğmeli yorulma cihazında üretimi yapılabilecek elemanları, incelenen Dönel eğmeli yorulma cihaz elemanlarının ölçüleri dikkate alınarak Solidworks yazılımında modellenmiştir (Ek.1-Ek16). Bir sonraki aşamada tasarlanan parçalar üretilmiştir.



Şekil 19. Dönel eğmeli yorulma test cihazı Solidworks katı model tasarım resmi a. ön görünüş b. üst görünüş

#### 3.2. Yorulma Deney Cihazının İmalatı

Öncelikle sisteme uygun olacak şekilde, sisteme tahrik gücünü verecek 1,5 Hp (1.1 Kw) gücünde ve 2900 d/d'lık elektrik motorunun seçimi yapılmıştır. Bu elektrik motorunun istenilen frekans ve çevrim oranında dönebilmesi için, elektrik motoruna 1.5 Kw'lık 220V bir AC sürücü bağlantısı yapılmıştır. Daha sonra numuneleri bağlamak için matkap mandreni veya torna aynası takılması düşünülmüştür. Fakat numune bağlamada güçlükler ve zaman kaybı olacağı göz önünde bulundurulduğunda bu sistemden

vazgeçilmiş ve numune sabitleme elemanı olarak pens tutucu kullanılmasına karar verilmiştir. Pens tutucu olarak farklı numune çapları da göz önünde bulundurularak ER25 pens tutucu kullanılmasına karar verilmiştir. Böylelikle pens başlıkları değiştirilerek 1mm ile 16mm çapındaki numunelerin bağlanması sağlanacaktır. Deneylede kullanacağımız numune çapına uygun pens seçilmiştir. Motordan almış olduğu döndürme kuvvetini penslere aktaracak sistemler hakkında çalışma yapılmıştır. Bu sistem dönmekte olan bir milin radyal yönde hareket ederek eksenel kaçıklıkların sönmülmesine olanak sağlaması gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenden dolayı sisteme karşılıklı iki noktadan mafsallı bir kardan şaft bağlanmasına karar verilmiştir. Kardan şaft standartları göz önünde bulundurularak imalatı yaptırılmıştır. Kardan şaftın mafsallarından bir tanesi elektrik motorunun çıkış mili çapına göre işlenmiş ve kama kanalı açılmıştır. Kardan şaftın diğer mafsalı ise bağlanacağı pens tutucunun mil çapına göre işlenmiş ve standartlara göre kama kanalı açılmıştır. Pens tutucunun kardan şafta bağlanacağı bölüme freze yardımı ile kama standartlarına uygun bir şekilde kama kanalı açılmıştır. Pens tutucu milinin dış çapı ve motorun döndürme momenti göz önünde bulundurularak rulman seçimi yapılmıştır. Rulman olarak oynak bilyalı rulman kullanılmıştır. Oynak bilyalı rulmanın seçilmesinin nedeni bu tür rulmanların açısız yönde oynaklık kazandırarak, eksenel kaçıklıkları, millerdeki esnemeyi ve yuva deformasyonlarını absorbe etmesidir. Torna tezgahında pens tutucuların takılabilmesi için, içi dolu C45 imalat çeliğinden 2 adet yatak yapılmıştır. Yataklar yapılırken, yatak boyunun pens tutucu boyunu geçmemesine dikkat edilmiştir. Bunun nedeni pens tutucunun bir ucuna kardan şaft bağlantısı yapılabilmesi için bir kısmının dışarıda kalması gerekmektedir. Yatakların iç kısmı seçilen rulman çapına göre tornada hassas bir şekilde işlenmiştir. Yataklara 2'şer adet oynak bilyalı rulman montajı yapılmıştır. Pens tutucular bu rulmanlara geçirilerek bir dış segman ile sabitlenmiştir.

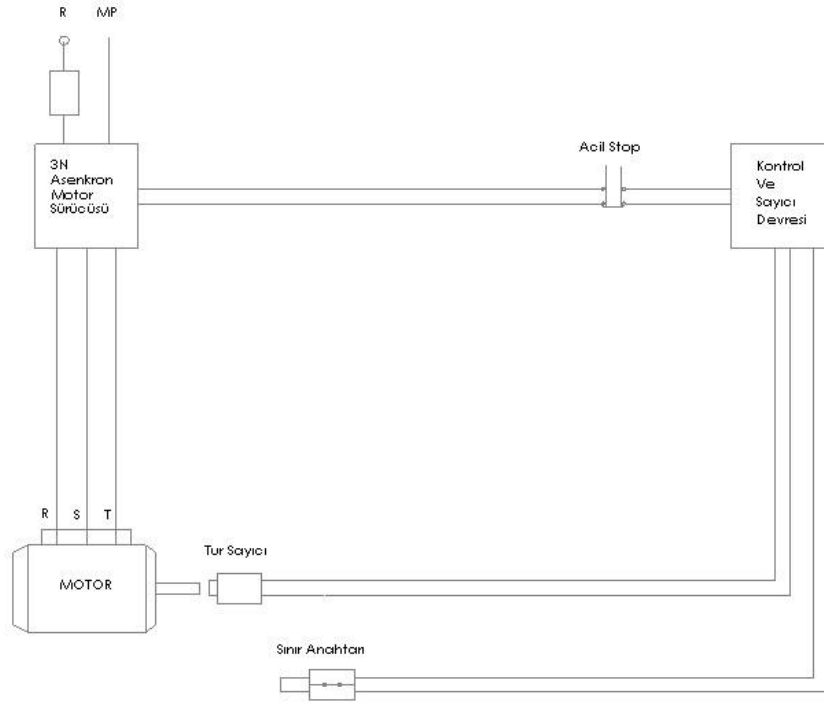
Sistemin düzgün bir şekilde çalışabilmesi için en önemli unsurlardan bir tanesi, çalışan hareketli parçaların aynı eksen üzerinde olmaları gerekmektedir. Yani elektrik motor mili, kardan şaft ve pens tutucu yataklarının merkezlerinin aynı eksen üzerinde olmasına dikkat edilmiştir. Öncelikle bilgisayar destekli 3 boyutlu katı modelleme programı olan Solidworks üzerinde parçaların 3 boyutlu katı modellerinin çizimleri yapılmıştır. Daha sonra program üzerinde montaj yapılarak, gerekli olan tezgâh ölçülerinin boyutlandırılması yapılmıştır. Ayrıca program yardımı ile motor ve yatakların bağlantılarının yapılacağı noktaların ölçüleri alınmıştır. Tezgâh malzemesi olarak, 1250 mm x 450 mm x 10 mm ölçülerinde yüksek mukavemet ve sertliğe sahip hardox 450 malzemesi kullanılmıştır. Motor ve yatak bağlantılarının yapılacağı noktalar freze

yardımı ile hassa bir şekilde işlenmiştir. Tezgâh ayağı olarak 40x40x2 mm kutu profil kullanılmış ve hardox saca birleştirmede kaynak konstrüksiyonu kullanılmıştır. Yorulma deneylerinde kullanacağımız ağırlıklar, kendi imkanlarımızla dolu millerden torna yardımı ile hassas bir şekilde işlenerek yapılmıştır ve hassas terazide tartılmıştır.

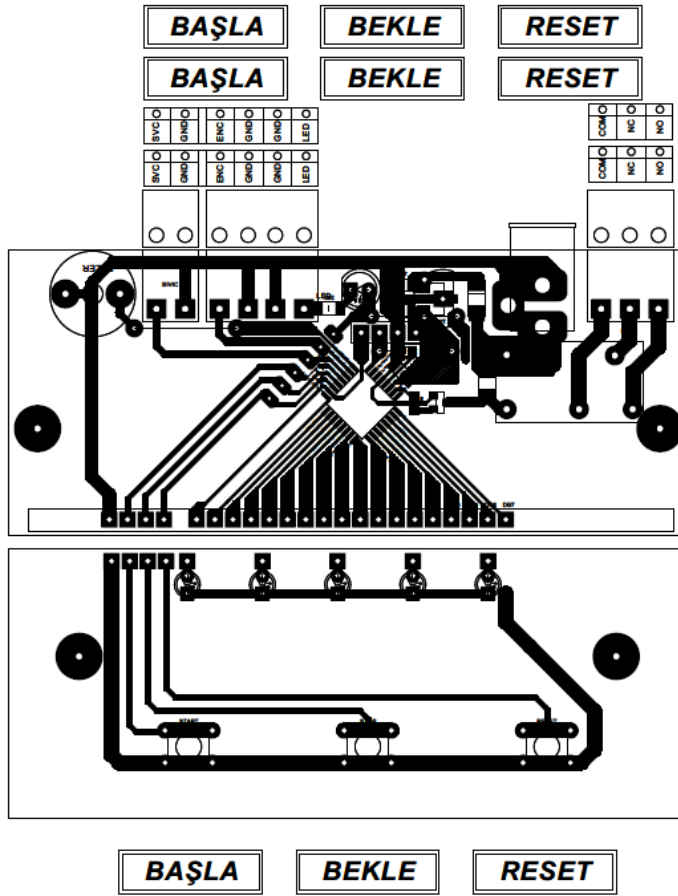


Şekil 19. Ağırlıkların hassas terazide tartılması

Sistemin elektrik donanımı tasarlanırken, elektrik motorunun frekans ve gerilimini değiştirerek, hız kontrolünü sağlayan elektronik bir AC motor sürücüsü yerleştirilmiştir. Buna bağlı olarak sisteme bir adet acil star-stop butonu ve yorulma kırılması sonucunda cihazın boş yere çalışmasını önlemek amacıyla pens tutucu yatağının altına bir devre kesme switch'i yerleştirilmiştir. Deney süresince dönme (tur) sayısını hesaplamak için sistemin arka tarafına bir sensör yerleştirilmiştir. Bu sensör her bir turda elde etmiş olduğu dönme verilerini elektronik bir dijital ekrana aktarmaktadır. Bu dijital ekran 10 haneli olup  $1 \times 10^9$  dönmeyi ve bu süre zarfında geçen zamanı ölçebilmektedir.

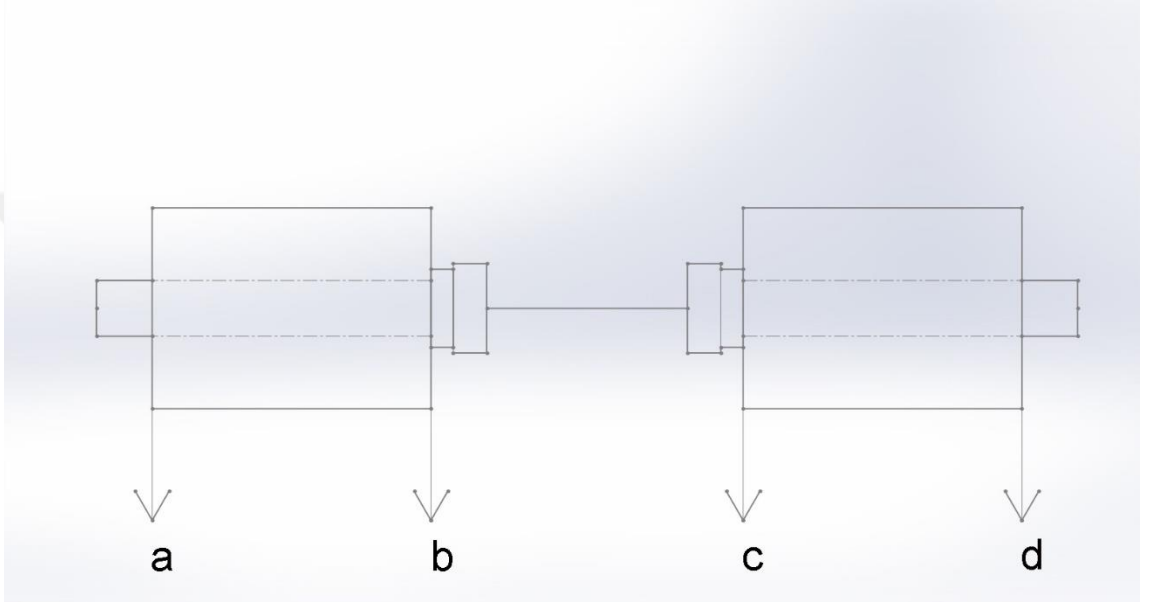


Şekil 20. Sistemin elektrik şeması



Şekil 21. Sistem kontrol ve sayıcı devre şeması

Yorulma deneyine başlayabilmek için sistemdeki yük ve momentlerin dengelenmesi gerekmektedir. Sistemde birlikte çalışan tüm hareketli parçaların yapmış oldukları yük ve momentleri incelenmiştir. Kardan şaftın bağlı olduğu yatağa mafsallardan dolayı etki eden yük bulunmuştur. Numunenin bağlandığı diğer yatakta ise pens sıkma bileziğinin ağırlığından dolayı etki eden yük ölçülmüştür. Sistemin moment dengesinin sağlanabilmesi için gerekli olan yük hesaplanmıştır. Yapılan yük hesabının şematik gösterimi şekil 22’ de verilmiştir.



Şekil 22. Yataklara etki eden yükler

Yatakların aksenal olarak dengede olabilmesi için aşağıda ki eşitliğin sağlanması gerekmektedir.

$$a + d = b + c$$

(Eşitlik 6)

Burada:

- a: Kardan şaft mafsallının yatağa etki etmiş olduğu yük.
- b: Pens ve pens tutucu başlığının yatağa etki etmiş olduğu yük.
- c: Pens ve pens tutucu başlığının yatağa etki etmiş olduğu yük.
- d: Tur sayıcı sensörünün yatağa etki etmiş olduğu yük.

Yapılan ölçümler sonucu;

a: 1700 gr

b: 400 gr

c: 400 gr

d: 100 gr olarak bulunmuştur.

Ayrıca ağırlık sistemine bağlanmış olduğumuz ağırlık kancası mekanizmasının da etki ettiği yükler göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan ölçümler sonucunda ağırlık mekanizmasının etki etmiş olduğu yük 184 gr olarak bulunmuştur.



Şekil 23. Ağırlık sistemi mekanizmasının hassas terazi ile ölçümü

Yukarıda denge diyagramında gösterildiği gibi yataklara etki eden yükler ve ağırlık sistemi mekanizmasının ağırlığı da göz önünde bulundurulduğunda iki pens arasına bağlanan numuneye etki eden net yük aşağıdaki gibi olacaktır.

$$1700 + 100 - 400 - 400 - 184 = 816 \text{ gr. Yukarı doğru olacaktır.}$$

Yapılan incelemeler sonucunda ağırlık mekanizmasına 816 gr ağırlığında bir yük bağlandığında sistem dengeye gelmiştir. Deney yapılırken bu değer göz önünde bulundurularak çalışmalar yürütülmüştür.

### 3.3. Motor Tipi ve Özellikleri

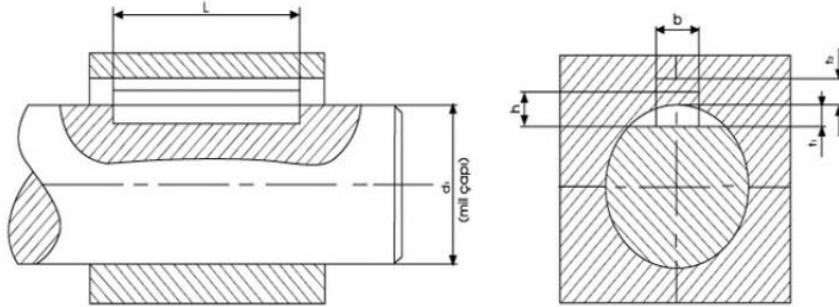
GAMAK Motor/ AGM3EL 80 M 2b / 1.1 kW / 230-400 V üç fazlı asenkron motor seçilmiştir.

Tablo 1. Elektrik Motor Özellikleri (www.gamak.com).

Anma Gücü	Gerilim	Hız	Akım	Güç Katsayısı	Verim	Moment	Kalkış Akımı	Kalkış Momenti	
kW	HP	V	d/dk	A	cosØ	μ (%)	N.m	A	N.m
1.1	1.5	230	2900	4,00	0,83	82,5	3,6	13,6	9,4
1,1	1,5	400	2900	2,30	0,83	82,7	3,6	13,6	9,4
1,27	1,7	460	3480	2,30	0,83	84,0	3,6	13,6	9,4

### 3.4. Kardan Şaft ve Pens Tutucu Kama Boyutları

Parçalarda meydana gelecek ısıl genişlemelerin dengeli olabilmesi için kullanılan malzemelerin birbirine yakın ısıl genişleme katsayılarına sahip malzemelerin kullanılmasına dikkat edilmiştir. Bu nedenden dolayı kama malzemesi olarak St37 kullanılmıştır. Pens milinin standartlardaki çapı 25 mm olduğundan, kama standartları tablosuna bakılarak pens miline freze yardımı ile kama kanalı açılmıştır.



Mil Çapı Shaft Diameter (d) min - max	b x h	t1	t2	TOLERANS / TOLERANCE		Kama Boyu (l) min - max
				t1	t2	
8 - 10	3 x 3	1.8	1.4	+0.1	6 - 36	
11 - 12	4 x 4	2.5	1.8		8 - 45	
13 - 17	5 x 5	3	2.3		10 - 56	
18 - 22	6 x 6	3.5	2.8		14 - 70	
23 - 30	8 x 7	4	3.3		18 - 90	
31 - 38	10 x 8	5	3.3	+0.2	20 - 110	
39 - 44	12 x 8	5	3.3		28 - 140	
45 - 50	14 x 9	5.5	3.8		36 - 160	
51 - 58	16 x 10	6	4.3		45 - 180	
59 - 65	18 x 11	7	4.4		50 - 200	
66 - 75	20 x 12	7.5	4.9		56 - 200	
76 - 85	22 x 14	9	5.4		63 - 250	
86 - 95	25 x 14	9	5.4	70 - 280		
96 - 110	28 x 16	10	6.4	80 - 320		
111 - 130	32 x 18	11	7.4	90 - 360		
131 - 150	36 x 20	12	8.4	+0.3	100 - 400	
151 - 170	40 x 22	13	9.4		110 - 400	

Şekil 24. DIN 6885 kama yuvası açma tablosu (www.odakkama.com).

Şekil 24'e göre pens tutucu milinin kama ölçüleri;

Pens tutucu mil çapı ( $\emptyset$ ): 25 mm

b: 8 mm

h: 7 mm

t<sub>1</sub>: 4 mm

t<sub>2</sub>: 3,3 mm olarak işlendi.

Pens tutucu mili kama boyu ise Şekil 24'e göre 18-90 mm aralığında olması gerektiğinden 30 mm olarak işlenmiştir.

Kardan şaft kama yatakları işlenirken elektrik motor mil çapı ve pens tutucu mil çapları göz önünde bulundurularak kama kanalları açılmıştır. Kardan şaft motor mili tarafı çap 19 mm olduğundan, standartlara göre kama ölçüleri;

b: 6 mm

h: 6 mm

t<sub>1</sub>: 3,5 mm

t<sub>2</sub>: 2,8 mm olarak işlenmiştir.

Kardan şaft motor mili bağlantı noktası için kama boyu Şekil 24'e göre 14-70 mm aralığında olması gerektiğinden 26 mm olarak işlenmiştir.

Kardan şaft pens tutucu mili tarafı çap 25 mm olduğundan, standartlara göre kama ölçüleri;

b: 8 mm

h: 7 mm

t<sub>1</sub>: 4 mm

t<sub>2</sub>: 3,3 mm olarak işlenmiştir.

Kardan şaft pens tutucu mili bağlantı noktası için kama boyu tabloya göre 18-90 mm aralığında olması gerektiğinden 26 mm olarak işlenmiştir.

### 3.5. Dönel Eğmeli Yorulma Cihazında Uygulanan Yükün Hesaplanması

Tasarladığımız cihazda numuneye gelen gerilme R. R. Moore tipi dönel eğmeli yorulma cihazlarında kullanılan aşağıda ki Eşitlik 7 ile hesaplanmaktadır;

$$\sigma = \frac{16 W L D}{\pi D^3} \quad (\text{Eşitlik 7})$$

L: Moment kolu (yük tatbik noktası ile yatak mesnedi arasındaki sabit mesafe; 4 inç=101,6 mm)

$\sigma$ : Numunenin en dış noktasındaki gerilme

D: Numunenin en düşük çapı

W: Numuneye uygulana toplam yük

Yukarıdaki eşitlikte her numune için ayrı ayrı hesap yapmak yerine belli bir çap değeri için seçilecek gerilmeye karşılık gelen katsayı değeri (Ek 17) ile hesapladığımız W yük değeri çarpılarak yüke karşılık gelen gerilme değeri elde edilir. Ek 17’de verilen tablo İngiliz birim sistemiyle oluşturulmuştur. Deney numunelerimizin çap değerlerine karşılık gelen yük katsayılarını bulmak için mm cinsinden olan çap değerini inç birim sistemine dönüştürerek Dia. Çap değerleri elde edilmektedir. Daha sonra bu çapa karşılık gelen yük katsayısı bulunmaktadır. Burada yatakların ve yükleme kancasının ağırlıkları toplam yükten çıkartılarak hesaplama yapılmalıdır (Yeşildal, 1999).

### 3.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Yorulma deneyinde kullanılacak numuneler 8 mm çapındaki AA 6063 alüminyum alaşımı ve C45 imalat çeliğinden oluşan millerden işlenerek yapılmıştır. 8 mm çapındaki miller 90 mm boylarında kesilmiş ve CNC torna tezgahında işlenerek Şekil 25’deki gibi hazırlanmıştır. Deney numunelerinin ASTM E-466 standartlarına göre boyutları Şekil 26’da görülmektedir. Alüminyum AA 6063 numuneleri her bir ağırlıkta 3 er adet test edilecek şekilde toplam 24 adet numune hazırlanmıştır. C45 imalat çeliği numuneleri de yine aynı şekilde her bir ağırlıkta 3 er adet test edilecek şekilde toplam 27 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 300 kum ve 1200 kum zımparalar yardımı ile yüzey pürüzlülüğü minimum seviyelere düşürülmeye çalışılmıştır.



Şekil 25. Yorulma deney numunelerinin CNC Torna tezgahında işlenmesi

### 3.6.1. AA 6063 Deney Numunesi

Alüminyum AA 6063, karakteristik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda yüksek korozyon ve yorulma dayanımına sahip, kaynak edilebilme kabiliyeti yüksek, iyi soğuk şekillenebilen özelliklere sahip bir metaldir.

Uygulama alanları; kapı, pencere, bina iskelet sistemleri, lamba, merdiven ve pencere korkulukları, elektronik sistemler, radyatör sistemleri, eşanjör uygulamaları gibi hayatımızın pek çok alanında kullanılmaktadır.

Kimyasal özellikleri:

Tablo 2. AA 6063 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi [%] (Jayaraman, 2014).

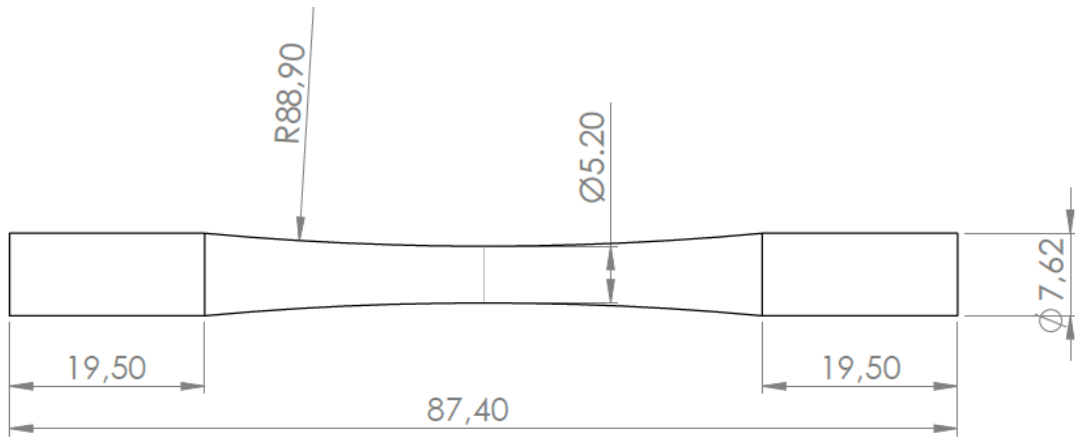
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer
0.35	0.2-0.6	0.1	0.1	0.45-0.9	0.1	0.1	0.15	0.15

Mekanik özellikleri:

Tablo 3. AA 6063 alüminyum alaşımı mekanik özellikleri (Jayaraman, 2014).

Temper	Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%50)	Sertlik (Brinel)
0	50	100	26	25
T1	90	150	24	45
T4	90	160	21	50
T5	110-175	150-215	12	60
T6	170-210	205-245	12	75
T8	240	260	9	80

Numune ölçüsü:



Şekil 26. Yorulma deneylerinde kullanılan numune boyutları (ASTM, 2013).

### 3.6.2. C45 İmalat Çeliği Deney Numunesi

C45 imalat çeliğinin yapısında az miktarda mangan, kükürt, silisyum ve fosfor gibi elementler bulundurulur. Sıcak haddelenmiş veya tavllanmış şekilde tedarik edilen, orta gerilimli bir imalat çeliğidir. İyi işlenebilirlik, kaynak edilebilme kabiliyeti yüksek, darbelere karşı göstermiş olduğu direnç yüksek ve yüzey sertleştirmeye uygun bir karakteristik özelliğe sahiptir.

Uygulama alanları; cıvatalarda, saplamalarda, araç akslarında, mil yapımında, makine ve aparatları başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Kimyasal özellikleri:

Tablo 4. C45 imalat çeliğinin kimyasal bileşimi [%] (Tanasković, ve Ark., 2020).

C	Si	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>
0.42-0.5	0.15-0.4	0.5-0.8	0.045	0.045

Mekanik özellikleri:

Tablo 5. C45 İmalat çeliğinin mekanik özellikleri (Tanasković, ve Ark., 2020).

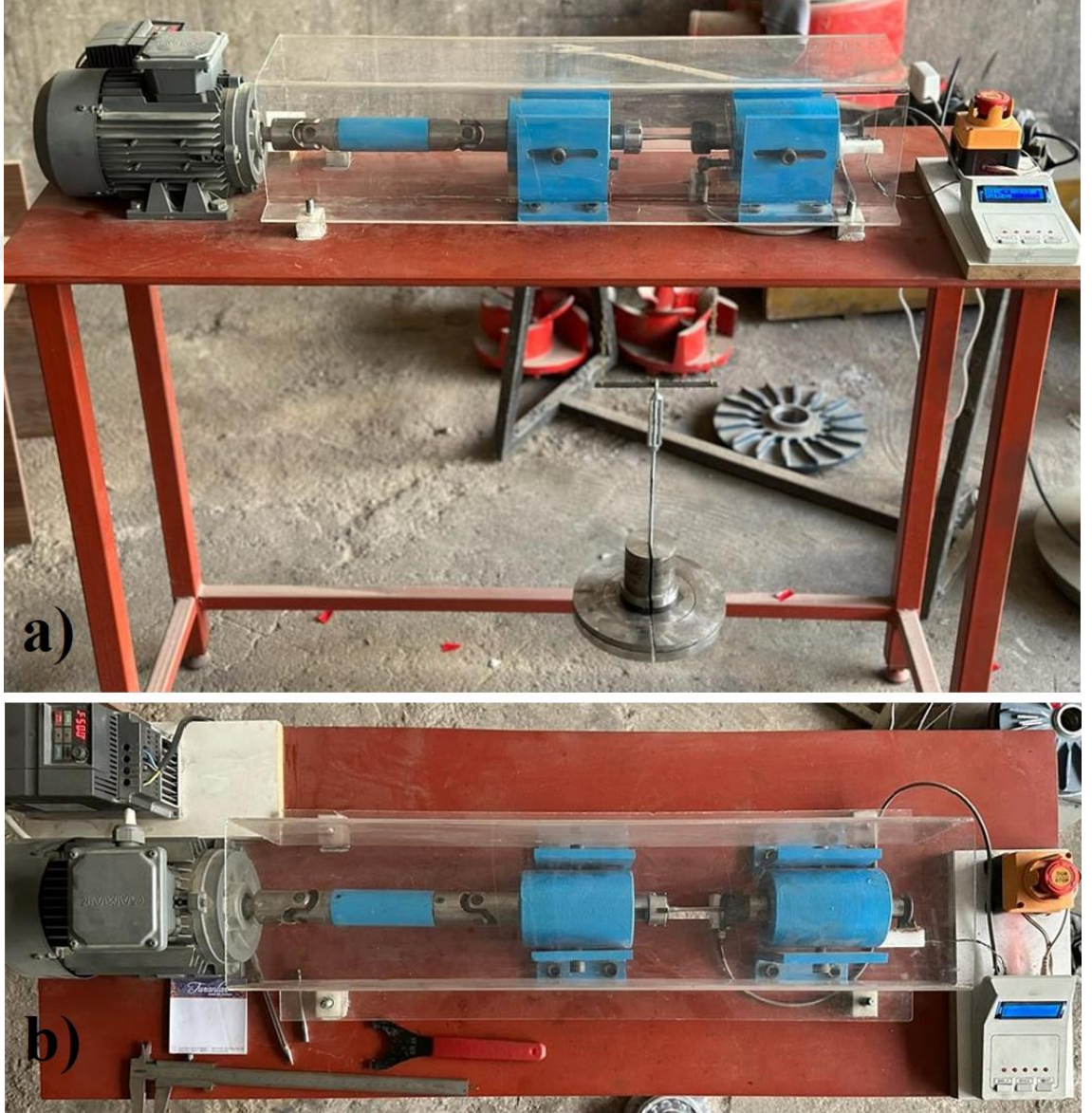
Akma dayanımı R <sub>p0.2%</sub> [MPa]	Çekme mukavemeti R <sub>m</sub> [MPa]	Uzama [%]	Tokluk [J]
325	500-700	20	21

Yorulma deneylerinde kullanılacak numunelerin ölçüleri numune standartlarına göre yapılmış olup şekil 26' da görülmektedir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Döner Eğmeli Yorulma Cihazı Üretimi

Solidworks yazılımında tasarımı yapılarak katı modeli oluşturulan parçaların (Ek1-Ek16) üretimi yapıldıktan sonra, satın alınan elektrik motoru ve diğer elektriksel aksamlar Şekil 27’de gösterildiği gibi montajlanarak cihaz üretimi tamamlanmıştır.



Şekil 27. Dönel eğmeli yorulma test cihazı imalat resmi **a.** ön görünüş **b.** üst görünüş

## 4.2. Dönel Eğmeli Yorulma Cihazında Yorulma Testleri

ASTM E-466 standartlarına uygun olarak üretilen AA 6063 ve C45 yorulma numuneleri, imalatı yapılan dönel eğmeli yorulma test cihazına bağlanmıştır. Numunelerin penslere bağlantısı esnasında, numunelerin daraltılmış kesitinin iki pensin ortasına gelmesine dikkat edilmiştir. Her bir ağırlıkta 3'er adet numune deneye tabi tutularak, numunelerde meydana gelen yorulma kırılmasına kadar geçen süre ve tur sayıları ölçülmüştür. Tablo 7 ve Tablo 8'de numunelere uygulanan ağırlığa karşılık gelen gerilme değerleri Ek 17'deki 5.2 mm çap değerine karşılık gelen 0.4167 yük katsayısıyla uygulanan yükün çarpılmasıyla elde edilmiştir.

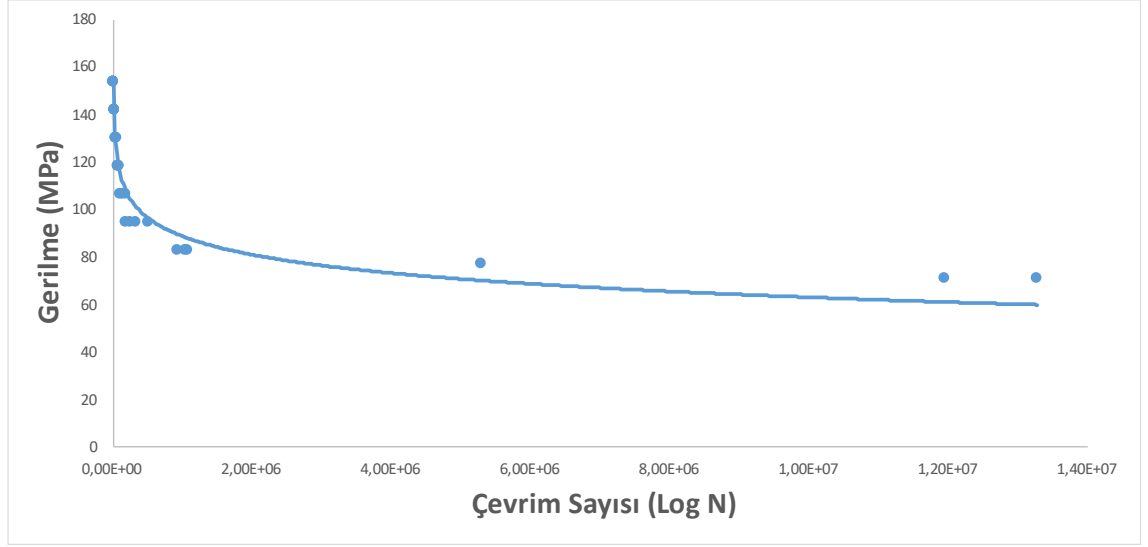
### 4.2.1. Döner Eğmeli Yorulma Cihazında AA 6063 Alüminyum Alaşım Testi

Numunelere uygulanan gerilme ve meydana gelen yorulma kırılmasına kadar elde edilen tur sayıları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. AA 6063 alüminyum alaşım yorulma deney verileri

Numene No	Kırılma Süresi	Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )	Kırılma Tur Sayısı
Al606314-1	00:00:49	153,6475	2448
Al606314-2	00:01:11	153,6475	3507
Al606314-3	00:01:45	153,6475	5196
Al606313-1	00:02:28	141,8765	7360
Al606313-2	00:03:31	141,8765	10486
Al606313-3	00:04:07	141,8765	12349
Al606312-1	00:09:11	130,1054	27559
Al606312-2	00:09:41	130,1054	29072
Al606312-3	00:14:31	130,1054	43609
Al606311-1	00:19:42	118,3343	59288
Al606311-2	00:20:33	118,3343	59681
Al606311-3	00:24:25	118,3343	73383
Al606310-1	00:33:07	106,5633	99255
Al606310-2	00:40:41	106,5633	122533
Al606310-3	00:56:32	106,5633	170083
Al606309-1	01:21:56	94,7922	246582
Al606309-2	01:45:36	94,7922	317817
Al606309-3	02:54:07	94,7922	504612
Al606308-1	05:07:13	83,0212	921836
Al606308-2	05:43:52	83,0212	1035594
Al606308-3	05:51:31	83,0212	1058240
Al606307-1	29:18:59	77,1356	5276992
Al606307-2	66:20:09	71,2501	11951624 (kırılmadı)
Al606307-3	73:43:02	71,2501	13269113 (kırılmadı)

Tasarımı yapılan dönel eğmeli yorulma test cihazından elde edilen veriler doğrultusunda bir Wöhler diyagramı Şekil 28'deki gibi çizilmiştir.



Şekil 28. Alüminyum AA 6063 Wöhler diyagramı

Şekil 27'de AA 6063 alüminyum alaşım numunelerinin karşılaştırmalı logaritmik S-N eğrileri gösterilmektedir. Yük numune kopana kadar veya  $1.0E+07$  çevrimi tamamlayana kadar uygulanmıştır. Eğriler 160-80 MPa aralığında keskin bir düşüş göstermiştir. AA 6063 Al alaşım malzemenin yorulma limit değeri 71.250 MPa olarak belirlenmiştir.

Literatürde AA 6063 alüminyum alaşımlarının yorulma özelliklerini inceleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur. Yahya ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada; oda sıcaklığında alınan AA 6063-T6 alaşımının düşük çevrimli yorulma davranışı, gerinim kontrollü basit destekli kiriş testi kullanılarak incelemiştir (Yahya ve ark., 2015).

Nanninga ve ark. (2010) yönlendirme ve ekstrüzyon dikiş kaynaklarının, frezelenen içi boş bir AA 6063 alüminyum alaşımli ekstrüzyon profillerinin yorulma ömrü üzerindeki etkisini incelemiştir (Nanninga ve ark., 2010).

Nanninga (2008) yayımladığı kitabında ve literatürdeki diğer çalışmaların ışığında AA 6063 Alüminyum alaşımının ortalama yorulma sınırının  $70 \pm 10$  MPa olduğu ve bunun altında  $10^7$  çevrime kadar arızalanmadığı bulunmuştur (Nanninga, 2008).

Sonuç olarak farklı gerinim genliklerindeki histerezis döngülerinden elde edilen AA 6063 Alüminyum alaşımlarındaki yorulma limit değeri/ömür değeri literatürde bildirilen sonuçlarla tutarlıdır ve sebep-sonuç ilişkisi çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir.



Şekil 29. AA 6063 Alüminyum Alaşımının yorulma hasarı yüzey görüntüsü

Şekil 29, aynı AA 6063 alaşım numunesinden alınmış karşılıklı iki kırılma yüzeyinde yorulma hasarının makro yüzey görüntüsü gösterilmektedir. Yorulma çatlak başlangıç bölgesi daire içerisinde alınmıştır.

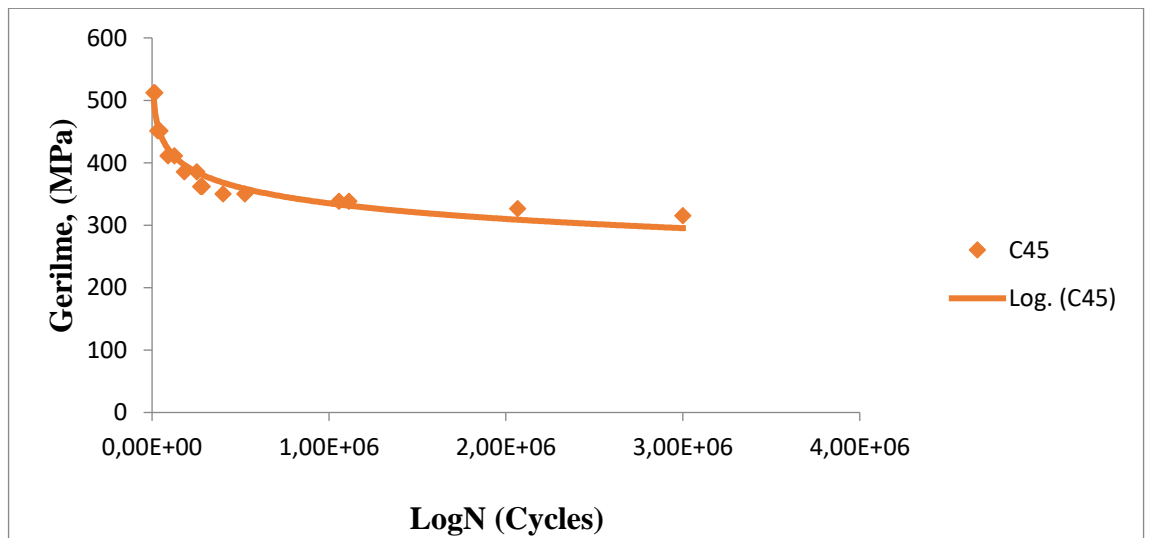
Alüminyum alaşımın yorulma hasarında kaymaya karşı direnci az olan atom düzlemlerinin kayması ile makro çatlaklar büyür ve kayma çatlakları maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimi gösterir. Kayma gerilmelerinin etkisiyle tanelerin kayma kırılması şeklinde, ani kopmasıyla sonuçlanır. Bu çalışmamızda yorulma kırılması hasarı bu şekilde gerçekleşmiştir ve AA 6063 malzemesinin yorulma hasarına benzer özellikler Patel ve ark. (2022) tarafından rapor edilmiştir (Patel ve ark., 2022).

#### 4.2.2. Döner Eğmeli Yorulma Cihazında C45 İmalat Çeliği Deneyi

Numunelere uygulanan gerilme ve meydana gelen yorulma kırılmasına kadar elde edilen tur sayıları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. C45 imalat çeliği yorulma deney verileri

Numene No	Kırılma Süresi	Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )	Kırılma Tur Sayısı
C452176-1	00:03:21	512,2765	10141
C452176-2	00:04:17	512,2765	12843
C452176-3	00:05:19	512,2765	15979
C451916-1	00:10:57	451,0670	32962
C451916-2	00:13:02	451,0670	39081
C451916-3	00:14:48	451,0670	44520
C451747-1	00:30:07	411,2808	90732
C451747-2	00:33:58	411,2808	101923
C451747-3	00:41:43	411,2808	125744
C451638-1	01:00:43	385,6199	182932
C451638-2	01:09:52	385,6199	209587
C451638-3	01:23:44	385,6199	252385
C451538-1	01:31:37	362,0778	274850
C451538-2	01:32:35	362,0778	277736
C451538-3	01:33:58	362,0778	283215
C451488-1	02:13:12	350,3067	401638
C451488-2	02:28:19	350,3067	444929
C451488-3	02:53:43	350,3067	523739
C451438-1	05:50:23	338,5356	1056323
C451438-2	05:59:08	338,5356	1077391
C451438-3	06:10:38	338,5356	1111879
C451388-1	10:11:47	326,7646	1835340
C451388-2	10:42:27	326,7646	1927361
C451388-3	11:24:52	326,7646	2065596
C451338-1	63:47:39	314,9935	11482950 (Kırılmadı)
C451338-2	65:58:25	314,9935	11875241 (Kırılmadı)
C451338-3	72:19:28	314,9935	13018377 (Kırılmadı)



Şekil 30. C45 İmalat çeliği Wöhler diyagramı

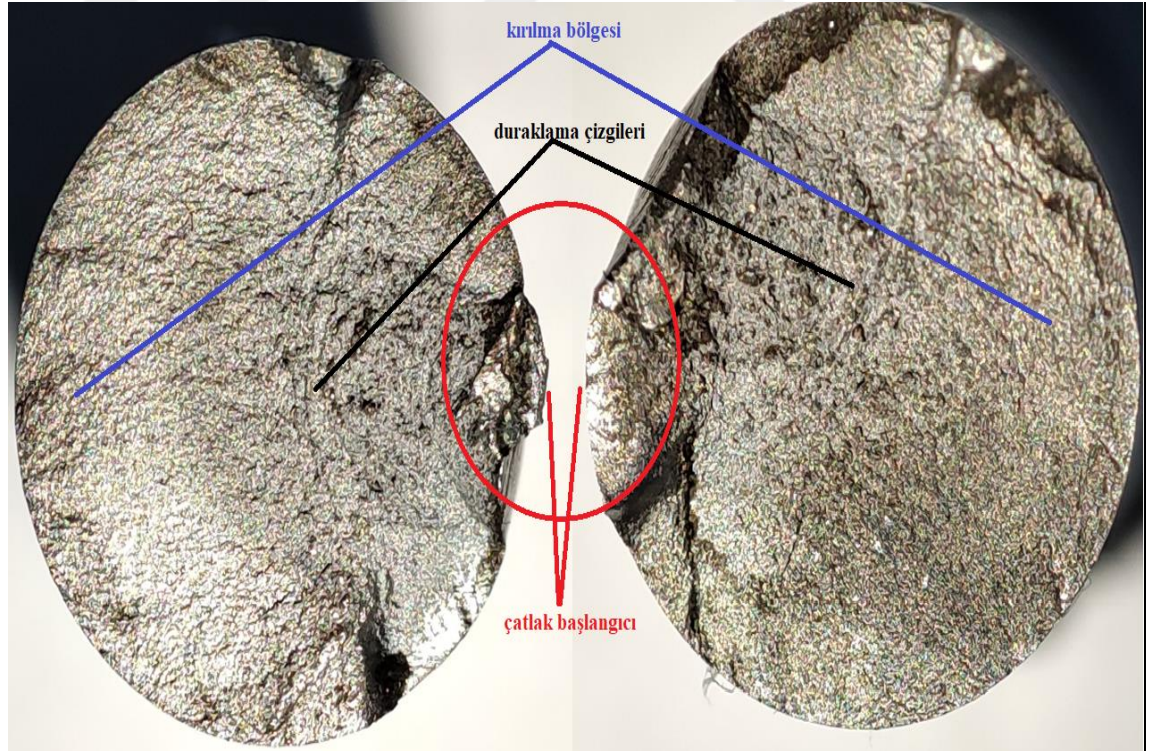
Şekil 30'da C45 imalat çeliği numunelerinin karşılaştırmalı logaritmik S-N eğrileri gösterilmektedir.

Eğriler 500-300 MPa aralığında keskin bir düşüş göstermiştir. C45 çeliğinin yorulma limit değeri 314,99 MPa olarak belirlenmiştir.

Literatürde C45 çeliğinin yorulma özelliklerini inceleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur. Sayid ve ark. (2021) otomobil aksları için ayrılmış C45 çelik alaşımının yorulma mukavemetini arttırmak için TIG kaynak yöntemiyle yüzey iyileştirme çalışması yapmışlardır. Yorulma testleri sonucunda C45 taban malzemenin yorulma limit değeri beklenildiği gibi nihai çekme dayanımının %55 oranında bir değer göstermiştir (Sayid ve ark., 2021).

Chí Cômng ve ark. (2018) çalışmalarında su verme öncesi ve sonrası yorulma mukavemetini incelemişlerdir. Su verme öncesi C45 çeliğinin yorulma limit değeri 326,25 N/mm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur (Chí Cômng ve ark., 2018).

Literatürdeki çalışmaların ışığında C45 çeliğinin ortalama yorulma sınırının 300-350 MPa aralığında olduğu bulunmuştur ve farklı gerinim genliklerindeki histerezis döngülerinden elde edilen yorulma limit değeri/ömür değeri literatürde bildirilen sonuçlarla tutarlıdır.



Şekil 31. C45 İmalat çeliği yorulma hasarı yüzey görüntüsü

Şekil 31' de aynı C45 imalat çeliği numunesinden alınmış karşılıklı iki kırılma yüzeyinde yorulma hasarının makro yüzey görüntüsü gösterilmektedir. Yorulma çatlak başlangıç bölgesi daire içerisinde alınmıştır. Çatlak mekanizması şekilde gösterildiği gibi çatlak başlangıcı, duraklama çizgileri (hasarlı bölge) ve kırılma bölgesi olmak üzere 3 bölgeden oluşmaktadır.

Gevrek malzemelerin içinde mikro çatlaklar vardır. Ayrıca malzemelerin yüzeyindeki pürüzlülükler çentik gibi etki ederek gerilme yığılması oluşturur. Gerilme çatlak ilerlemesini sağlayacak kadar büyük ise çatlak ilerler ve parçanın yük taşıyan kesitini küçültür. Çatlak ilerlemesi ile küçülen kesit uygulanan gerilmeyi taşıyamayacak hale gelince ani olarak malzeme kırılır.

Bu çalışmamızda C45 imalat çeliğinin yorulma kırılması hasarı bu şekilde gerçekleşmiştir. Yorulma hasarına benzer özellikler Sayid ve ark. (2021) tarafından rapor edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada malzemelerin yorulma deneylerini yapmak üzere opsiyonel bir R. R. Moore tipi dönel eğmeli yorulma deney cihazı tasarlanarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu test cihazı, farklı özelliklerdeki dairesel kesitli çelik, metal, alüminyum vb. numunelerin, farklı yükler altında yorulma ömürlerini bularak, elde edilen sonuç ve bulguları grafiksel olarak izlememize olanak sağlamaktadır.

AA 6063 alüminyum alaşım malzemesi ve C45 imalat çeliği ile farklı yükler uygulanan cihazda yorulma analizi uygulaması yapılarak üretimin standartlara göre doğruluğu değerlendirilmiş ve literatür çalışmalarıyla tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



## KAYNAKÇA

- Almen, J. O. ve Black, P. H. (1963). Residual stresses and fatigue in metals. New York: McGraw-Hill
- ASTM, E. (2007). Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials. *West Conshohocken*.
- ASTM. (2013). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International.
- Burhan, M. ve Çavdar, K. (2010). Eksantrik yay yorulma cihazının tasarımı ve imalatı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 15(1).
- Boyer, H. E. (1986). Fatigue testing. *Report of ASM International, USA*.
- Caddell, R. M. (1980). Deformation and fracture of solids, Engewood Cliffla, New Jersey, 193-252.
- Carpinteri, A. (Ed.). (2012). *Handbook of fatigue crack propagation in metallic structures*. Newnes.
- Công, T. C., Thăng, N. V., Thủy, T. T. T., Dương, K. Đ. ve Blongher, N. (2018). Nghiên cứu sức bền mỏi của vật liệu thép C45 trước và sau khi tôi cứng Studying the fatigue strength of C45 steel material before and after quenching.
- Crane, F. A. A., Charles, J. A. ve Furness, J. (1997). *Selection and use of engineering materials*. Amsterdam: Elsevier.
- Dolley, Lee ve Wei. (2000). The effect of pitting corrosion on fatigue life. *Fatigue ve Fracture of Engineering Materials ve Structures*, 23(7), 555-560.
- Ewing, J. A. ve Humfrey, J. C. W. (1903). VI. The fracture of metals under repeated alternations of stress. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 200(321-330), 241-250.
- Fujita, K., Yoshida, A., Yamamoto, T. ve Yamada, T. (1977). The surface durability of the case-hardened nickel chromium steel and its optimum case depth. *Bulletin of JSME*, 20(140), 232-239.
- Gürbüz R. (1991). Yorularak kırılmış yüksek dayanıklı alüminyum alaşımlarının fraktografisi. Üçüncü ulusal kırılma konferansı, İTÜ, s141-147.
- Herrmann, K. (Ed.). (2011). *Hardness testing: principles and applications*. ASM international.

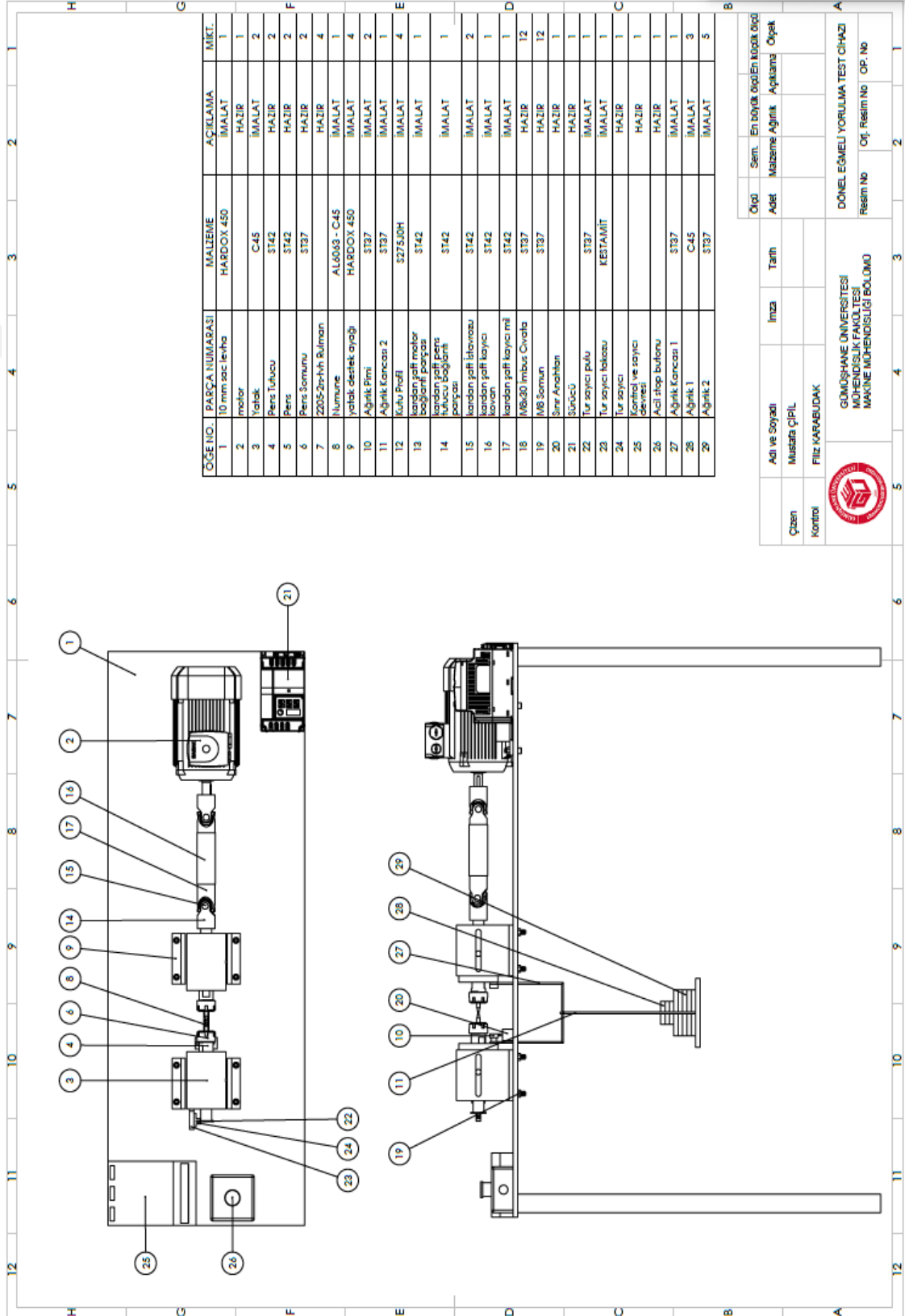
- Hertzberg, R. W. ve Hauser, F. E. (1977). Deformation and fracture mechanics of engineering materials.
- Jayaraman, P. (2014). Multi-response optimization of machining parameters of turning AA6063 T6 aluminium alloy using grey relational analysis in Taguchi method. *Procedia Engineering*, 97, 197-204.
- Kayalı, E. S. (1996). *Metalik malzemelerin mekanik deneyleri*. İTÜ.
- Kaynak C. ve Ankara A. (1991). Kısa yorulma çatlaklarının 2024-T3 alüminyum alaşımında büyümesi. Üçüncü ulusal kırılma konferansı, İTÜ, s105.
- Krabortsov, T. G., Ryzhova, D. I. ve Chumak, Y.U.V. (1982). Effect of Technological Defects on Fatigue Strength in Models of Shafts Welded With Low-Carbon Steel. *Svar. Proizvod.*, (11), 15-16.
- Kurban, O.A. (1993). Yorulma ömrüne etki eden faktörler. 5. Denizli malzeme sempozyumu, s396.
- Küçük, E., Özçelik, S., Bakacak, K.A., Sun, Y. ve Ahlatcı, H. (2014). Dönel eğmeli yorulma test cihazının tasarımı ve üretimi döner çubuk bükme yorulma test cihazı tasarım ve imalatı. I. Uluslararası Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Sempozyumu, Karabük Üniversitesi.
- Leis, B. N., Gowda, C. V. B. ve Topper, T. H. (1973). Cyclic inelastic deformation and the fatigue notch factor. *Cyclic Stress Strain Behavior-Analysis, Experimentation and Failure Prediction*, 133-150.
- Marzoli, L. M., Strombeck, A. V., Dos Santos, J. F., Gambaro, C. ve Volpone, L. M. (2006). Friction stir welding of an AA6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/20p reinforced alloy. *Composites science and technology*, 66(2), 363-371.
- McAdam, D. J. ve Relationships, S. S. C. (1927). Corrosion fatigue of metals. *Journal Transaction American Society Steel Treat*, 11, 355-79.
- McClung, R. C. (2007). A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 30(3), 173-205.
- Milella, P. P. (2012). *Fatigue and corrosion in metals*. Springer Science and Business Media.
- Naito, T., Ueda, H. ve Kikuchi, M., (1984). Fatigue behavior of carburized steel with internal oxides and nonmartensitic microstructure near the surface. *Metallurgical Transactions A*, 15, 1431-1436.
- Nanninga, N. E. (2008). *High cycle fatigue of AA6082 and AA6063 aluminum extrusions*. Michigan Technological University.

- Nanninga, N., White, C., Mills, O. ve Lukowski, J. (2010). Effect of specimen orientation and extrusion welds on the fatigue life of an AA6063 alloy. *International journal of fatigue*, 32(2), 238-246.
- Orowan, E. (1939). Theory of the fatigue of metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 171(944), 79-106.
- Paris, P. ve Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws.
- Patel, M., Chaudhary, B., Murugesan, J., Jain, N. K. ve Patel, V. (2022). Enhancement of tensile and fatigue properties of hybrid aluminium matrix composite via multipass friction stir processing. *Journal of materials research and technology*, 21, 4811-4823.
- Sayid, A. A., El-Kashif, E., Adly, M. A., Morsy, M. A. ve Abdelkawy, A. (2021). Fatigue behavior of surfaced C45 steel. *Journal of Engineering and Applied Science*, 68(1), 1-11.
- Shigley, J. E. (2006). Shigley's Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill Companies Inc. *Azikiwe University, Awka Nigeria. She is a PhD Researcher in the Department of Computer Science. She has authored so many publications in journals.*
- Swanson, S. R. (Ed.). (1974). *Handbook of fatigue testing* (Vol. 566). ASTM International.
- Tanasković, D., Arandelović, M., Đorđević, B., Jeremić, L., Sedmak, S. ve Gajin, M. (2020). Repair attempts of cold crack on forklift made of C45 steel: Case study. *Welding and Material Testing*, 29(4), 25-28.
- Tauscher, H. (1983). Çelik ve dökme demirlerin yorulma dayanımı malzeme davranışı biçim etkisi ve hesaplama yöntemleri.
- Teed, P. L. (1950). The properties of metallic materials at low temperatures, Vol. 1. New York.
- Tekin, E., (1986) *Mühendisler için çelik seçimi*. TMMOB Makine mühendisleri odası yayını, Ankara, 40-48.
- Thompson, N. ve Wadsworth, N. J. (1958). Metal fatigue. *Advances in Physics*, 7(25), 72-169.
- Uçan R. ve Topuz A., (1991). 36Mn5 Çeliğinde yorulma kırılma tokluğunun ve çatlak ilerleme parametrelerinin belirlenmesi. Üçüncü ulusal kırılma konferansı, İTÜ.
- Van Paepegem, W. ve Degrieck, J. (2001). Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites. *Composite structures*, 51(1), 1-8.

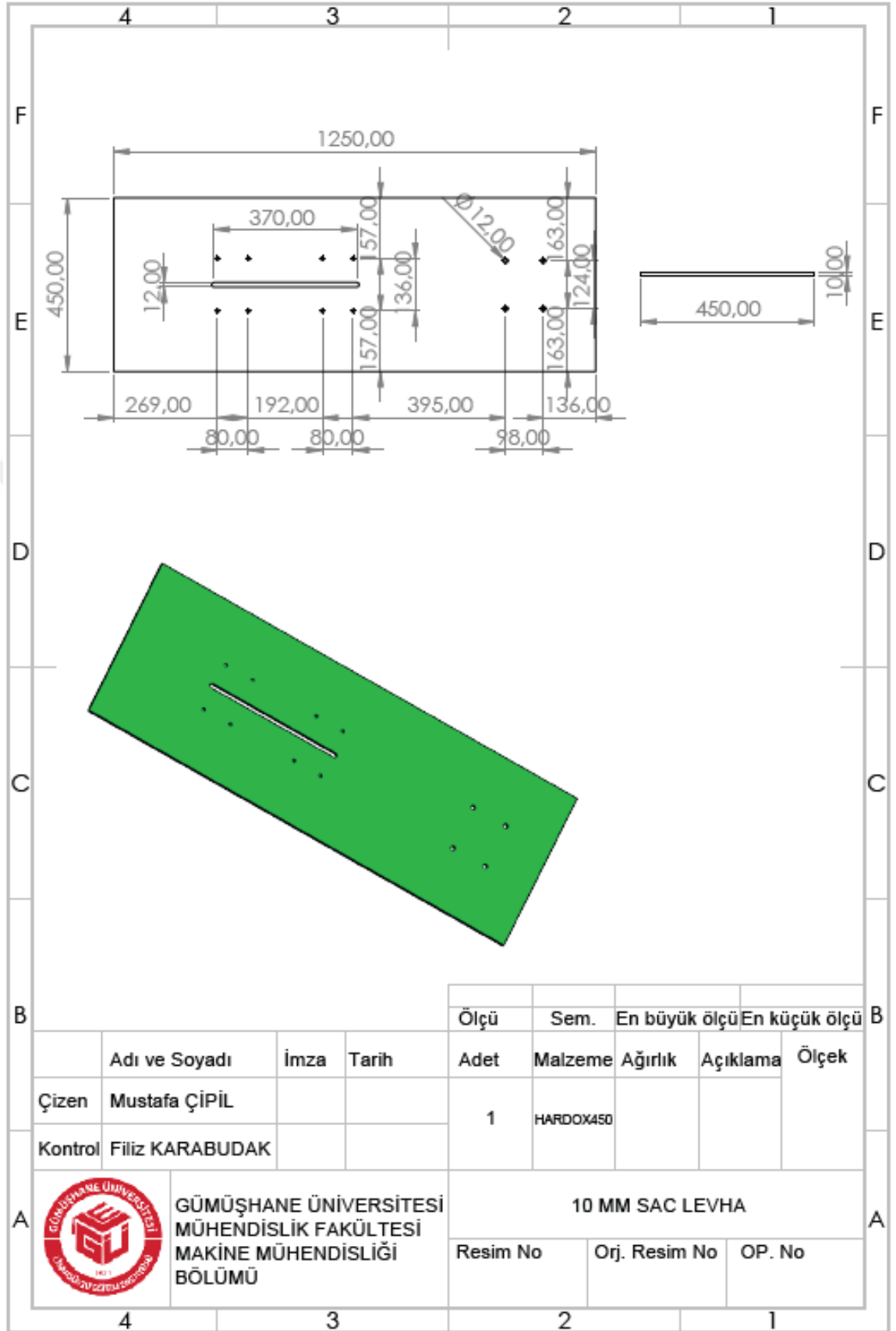
- Weibull, W. (2013). *Fatigue testing and analysis of results*. Amsterdam: Elsevier.
- Yahşı, O.S. (1984). Kırılma mekanizmasının statik tasarım ve yorulmaya karşı tasarımdaki rolü. 1. Ulusal makine tasarım ve imalat kongresi, ODTÜ, Ankara.
- Yahya, M. M., Mallik, N. ve Chakrabarty, I. (2015). Low cycle fatigue (LCF) behavior of AA6063 aluminium alloy at room temperature. *Int. J. Emerging Adv. Res. Technol.*, 5, 100.
- Yeşildal, R. (1999). X40CrMoV 5 1 sıcak iş takım çeliğinin yüksek sıcaklık yorulma mukavemetinin incelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Yeşildal, R., Şen S. ve Kaymaz, İ. (2003). X40CrMo 5 1 Çeliğinin 20-600oC Arasındaki Yorulma Davranışı. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(1), 159-171.
- Zhang, Z., Wu, F., He, G. ve Eckert, J. (2007). Mechanical properties, damage and fracture mechanisms of bulk metallic glass materials. *Journal of materials science and technology*, 23(6), 747.

## EKLER

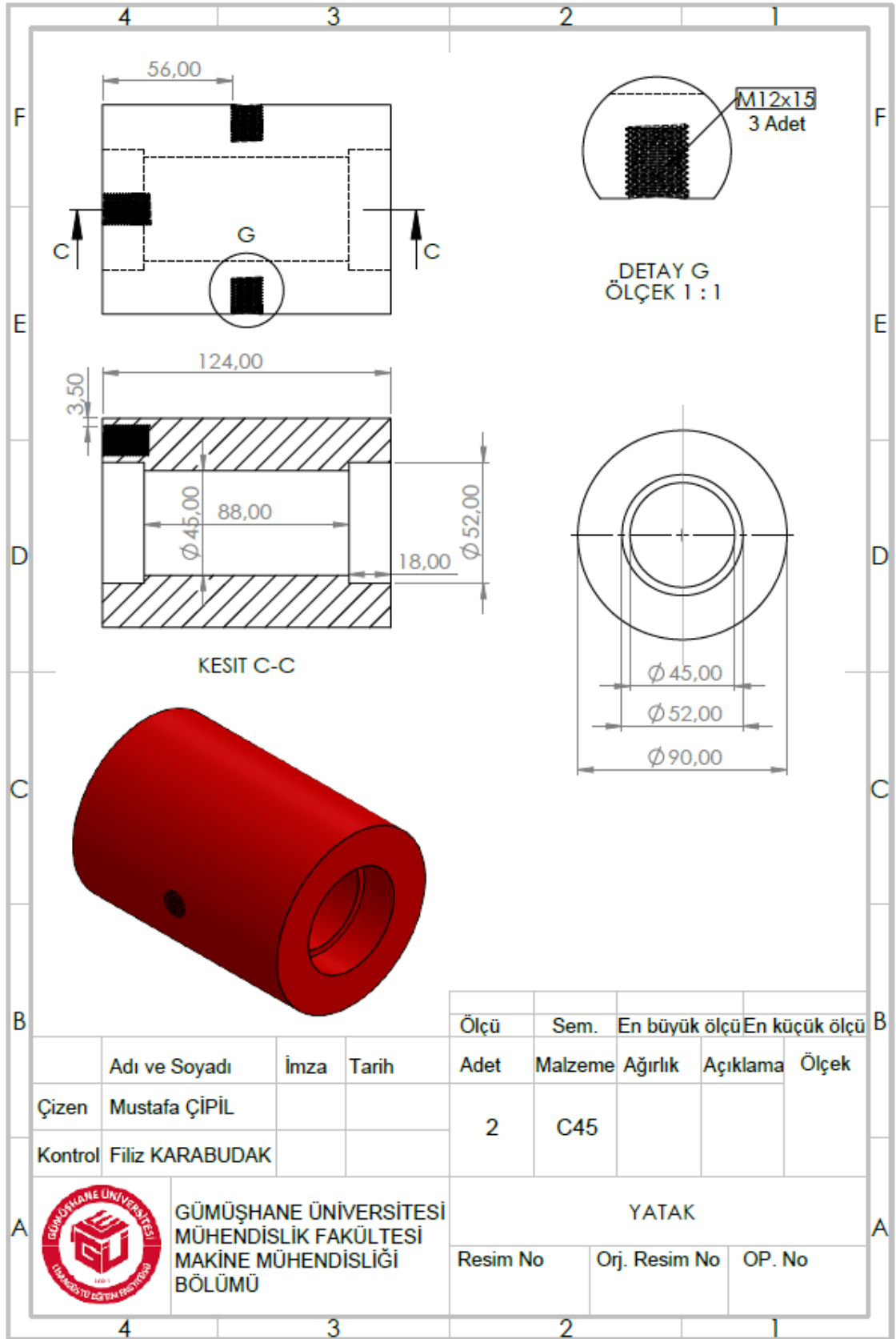
Ek 1. Dönel Eğmeli Yorulma Test Cihazı Genel Montaj Resmi



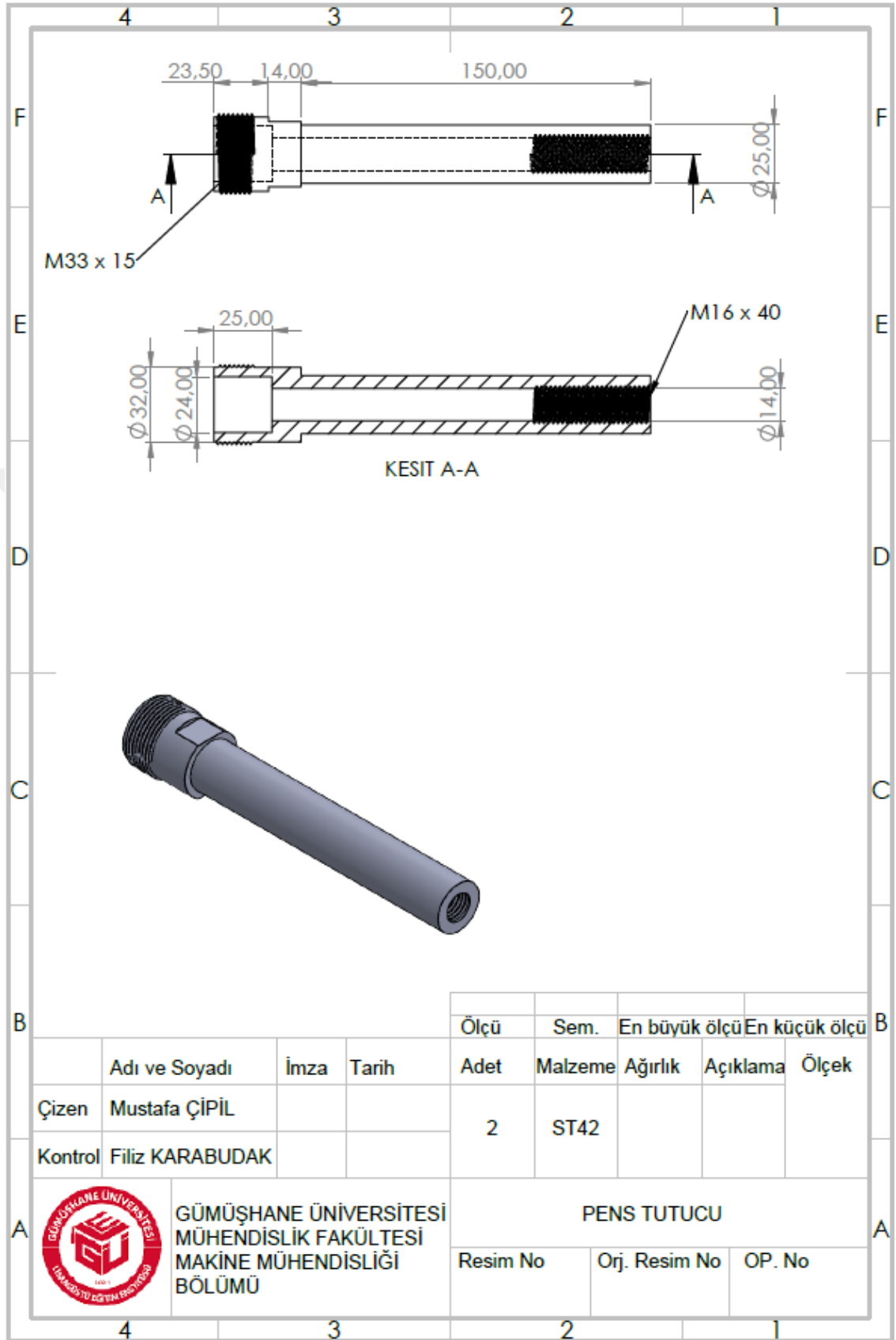
Ek 2. Sac Levha Teknik Resim Çizimi



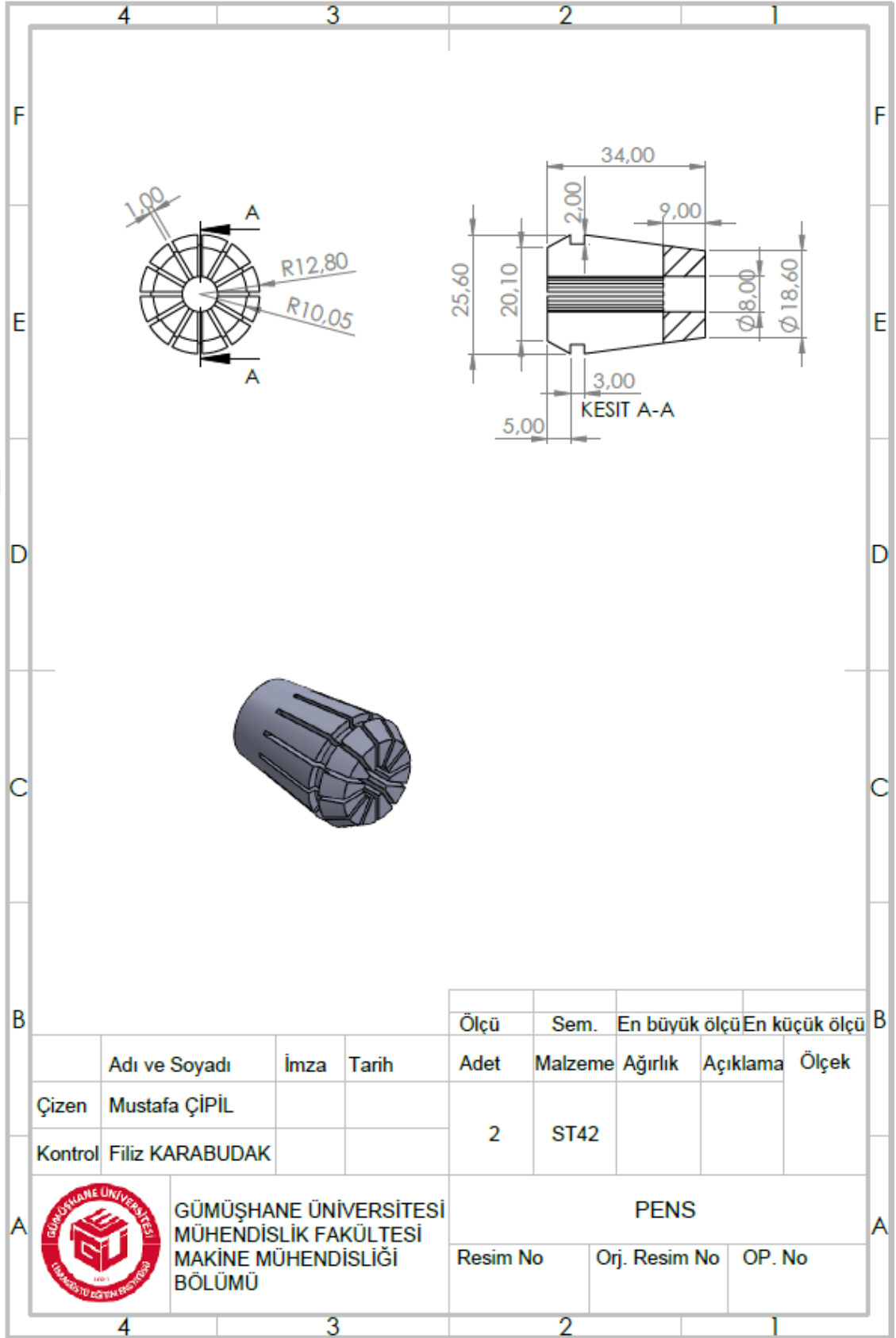
Ek 3. Yatak Teknik Resim Çizimi




Ek 4. Pens Tutucu Teknik Resim Çizimi

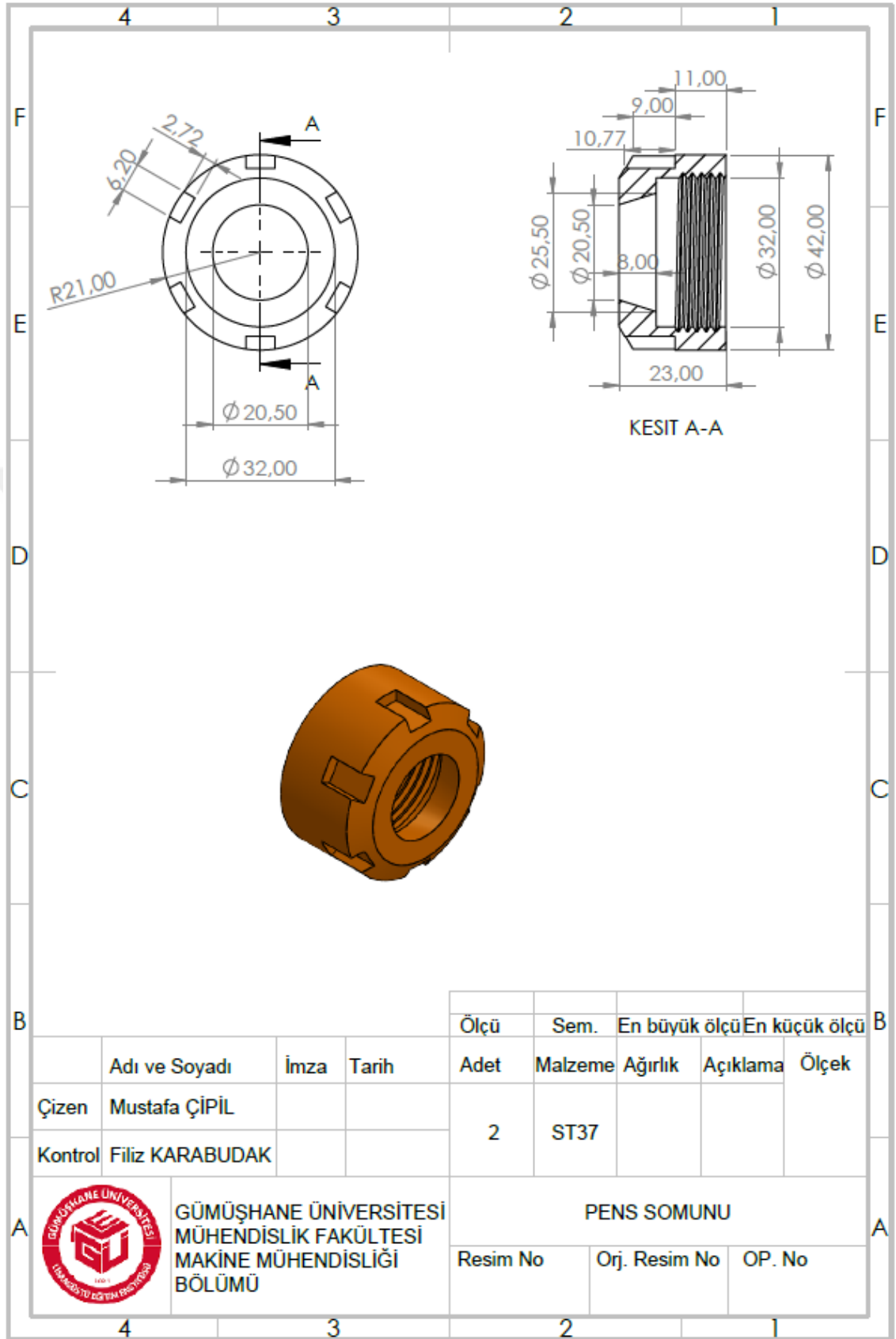


Ek 5. Pens Teknik Resim Çizimi

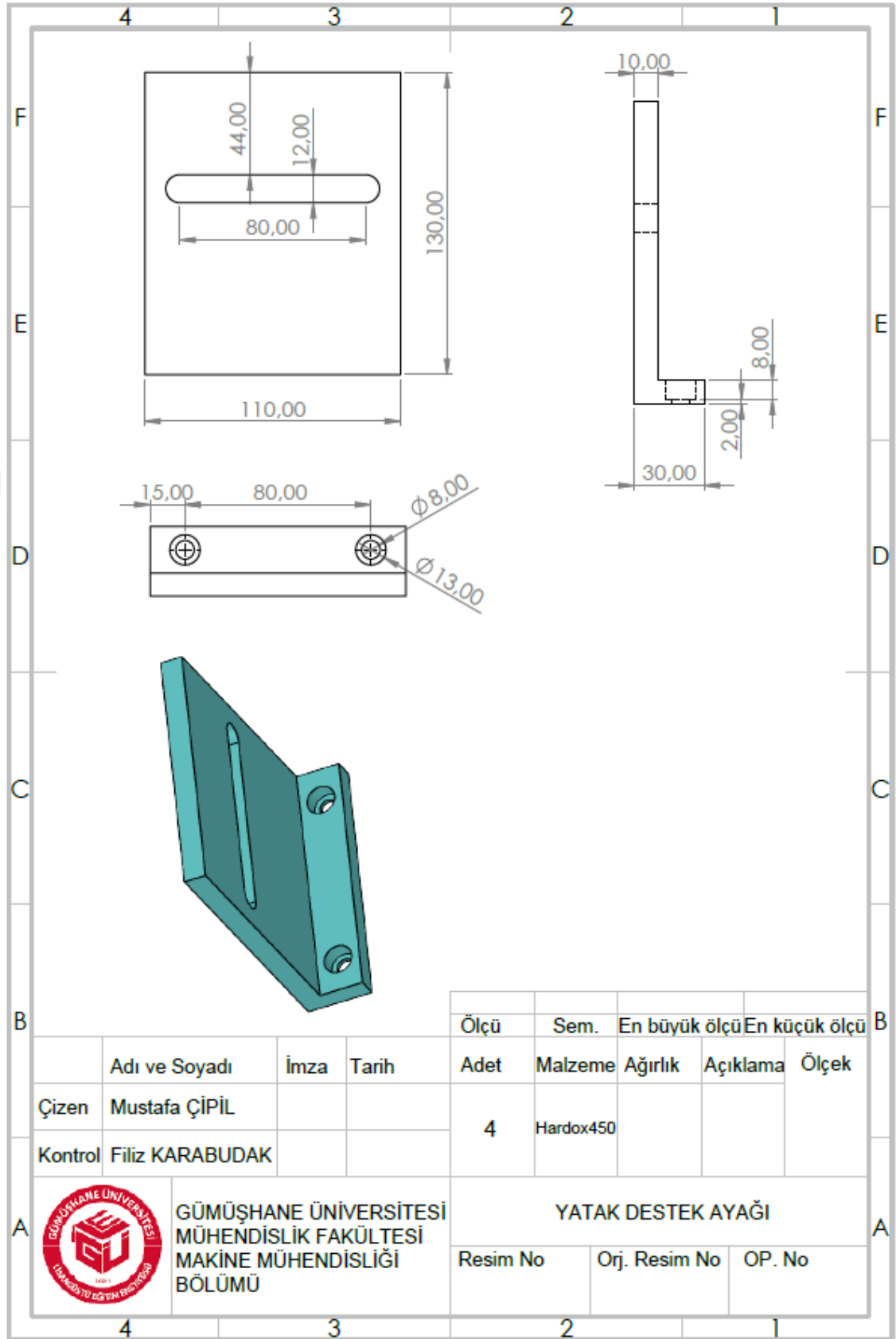


				Ölçü	Sem.	En büyük ölçü		En küçük ölçü
				Adet	Malzeme	Ağırlık	Açıklama	Ölçek
Çizen	Mustafa ÇİPİL	İmza	Tarih	2	ST42			
Kontrol	Filiz KARABUDAK							
 <b>GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ</b> <b>MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ</b> <b>MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ</b> <b>BÖLÜMÜ</b>				<b>PENS</b>				
				Resim No	Orj. Resim No	OP. No		

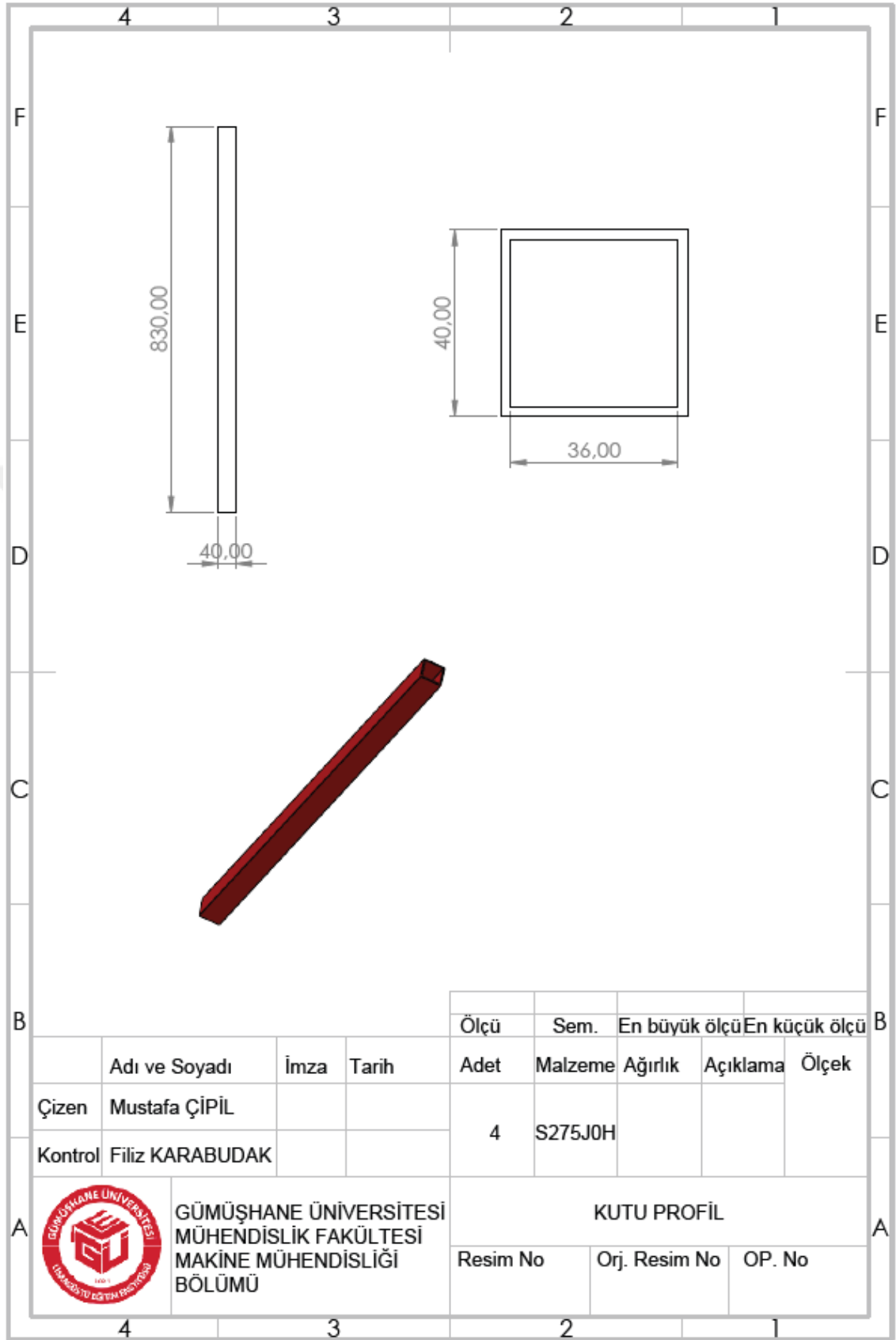
Ek 6. Pens Somunu Teknik Resim Çizimi



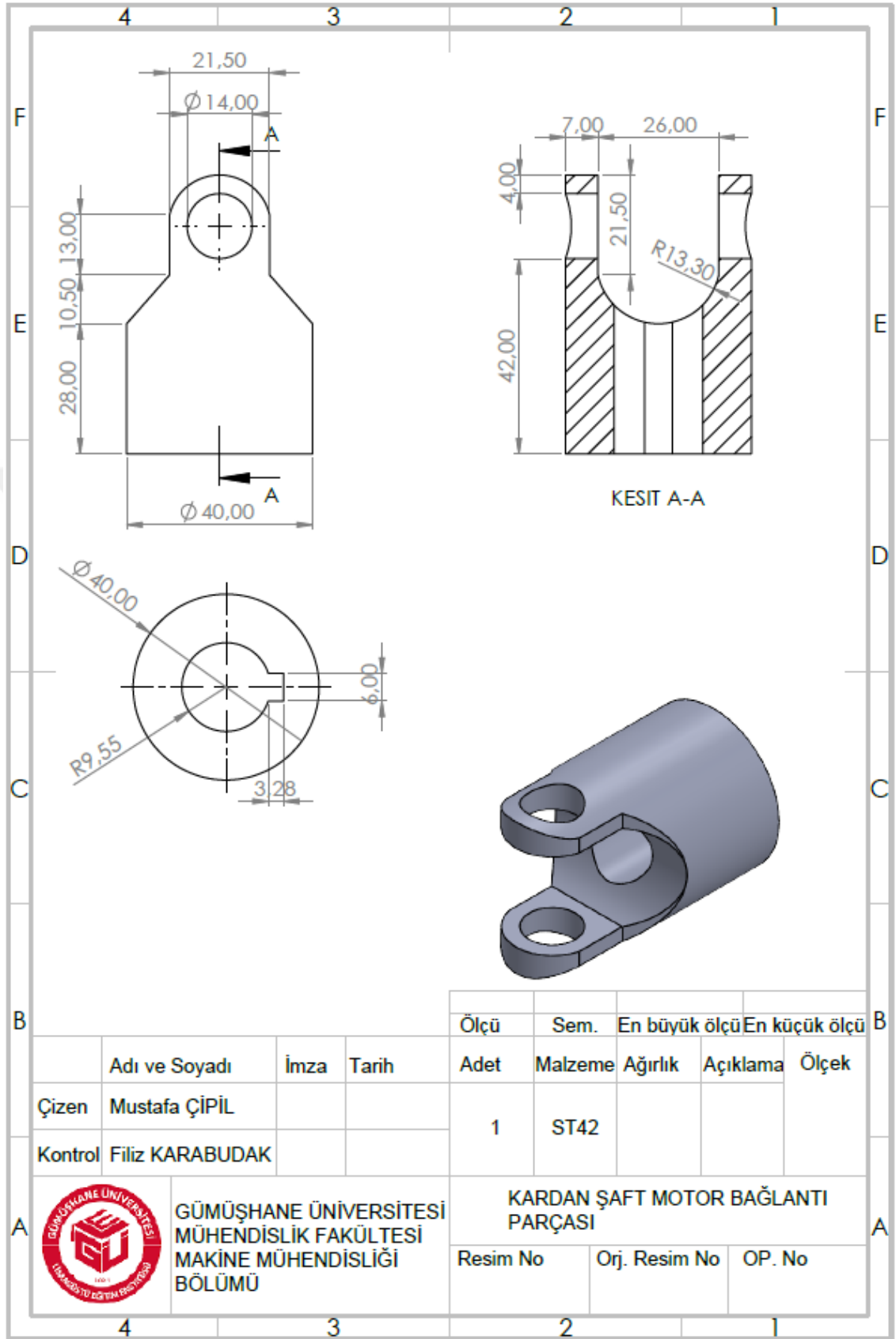
Ek 7. Yatak Destek Ayağı Teknik Resim Çizimi



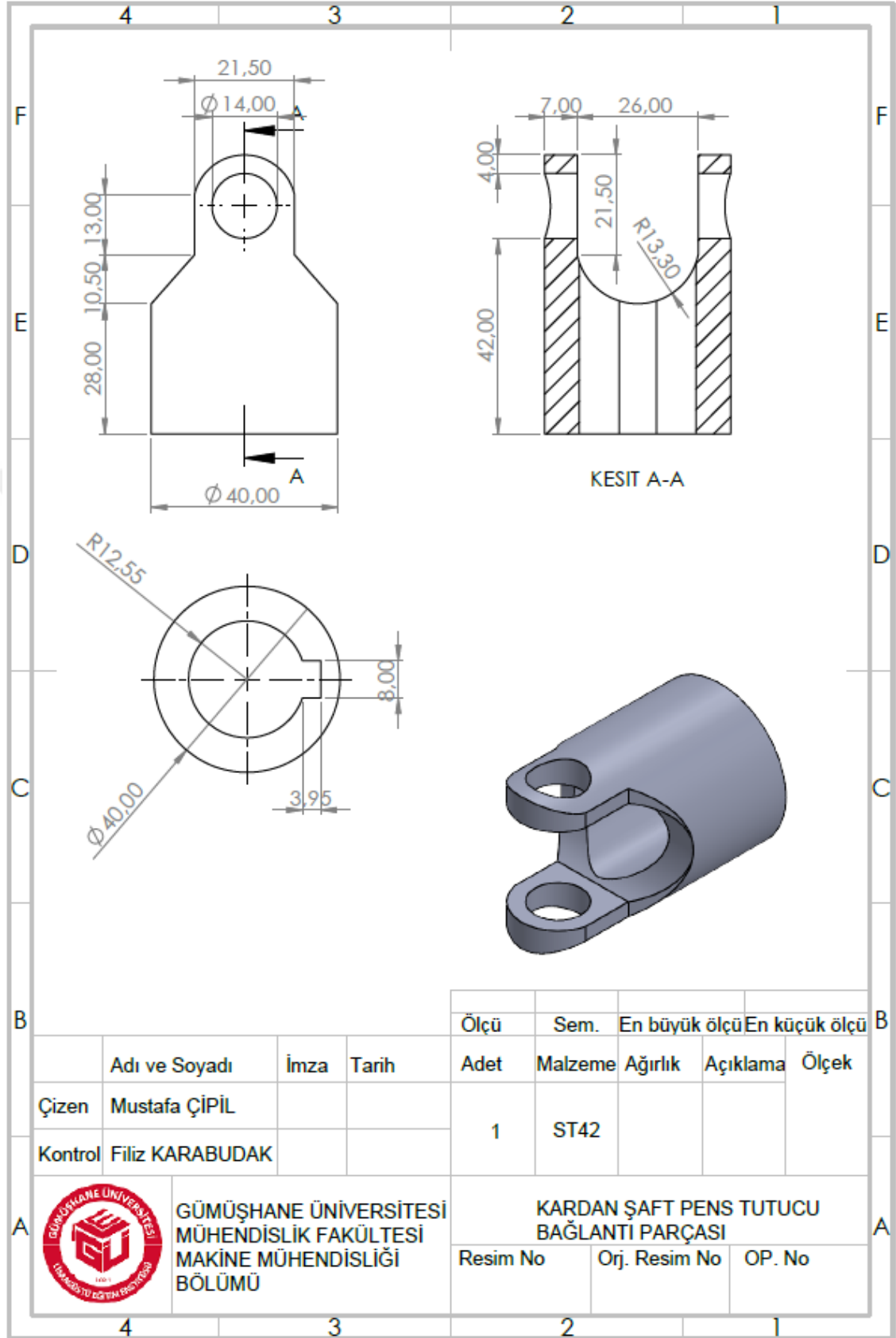
Ek 8. Kutu Profil Teknik Resim Çizimi



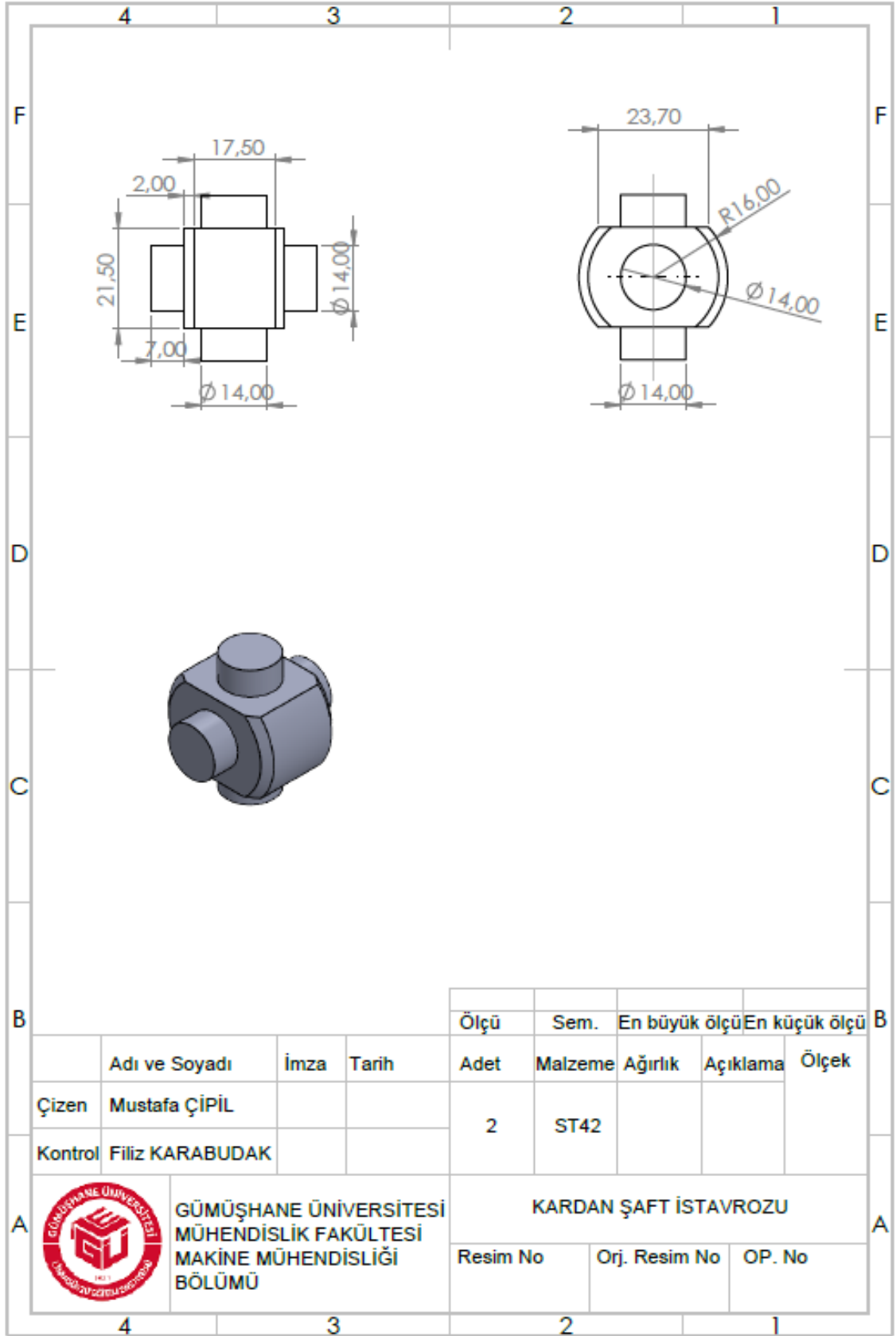
Ek 9. Kardan Şaft Motor Bağlantı Parçası Teknik Resim Çizimi



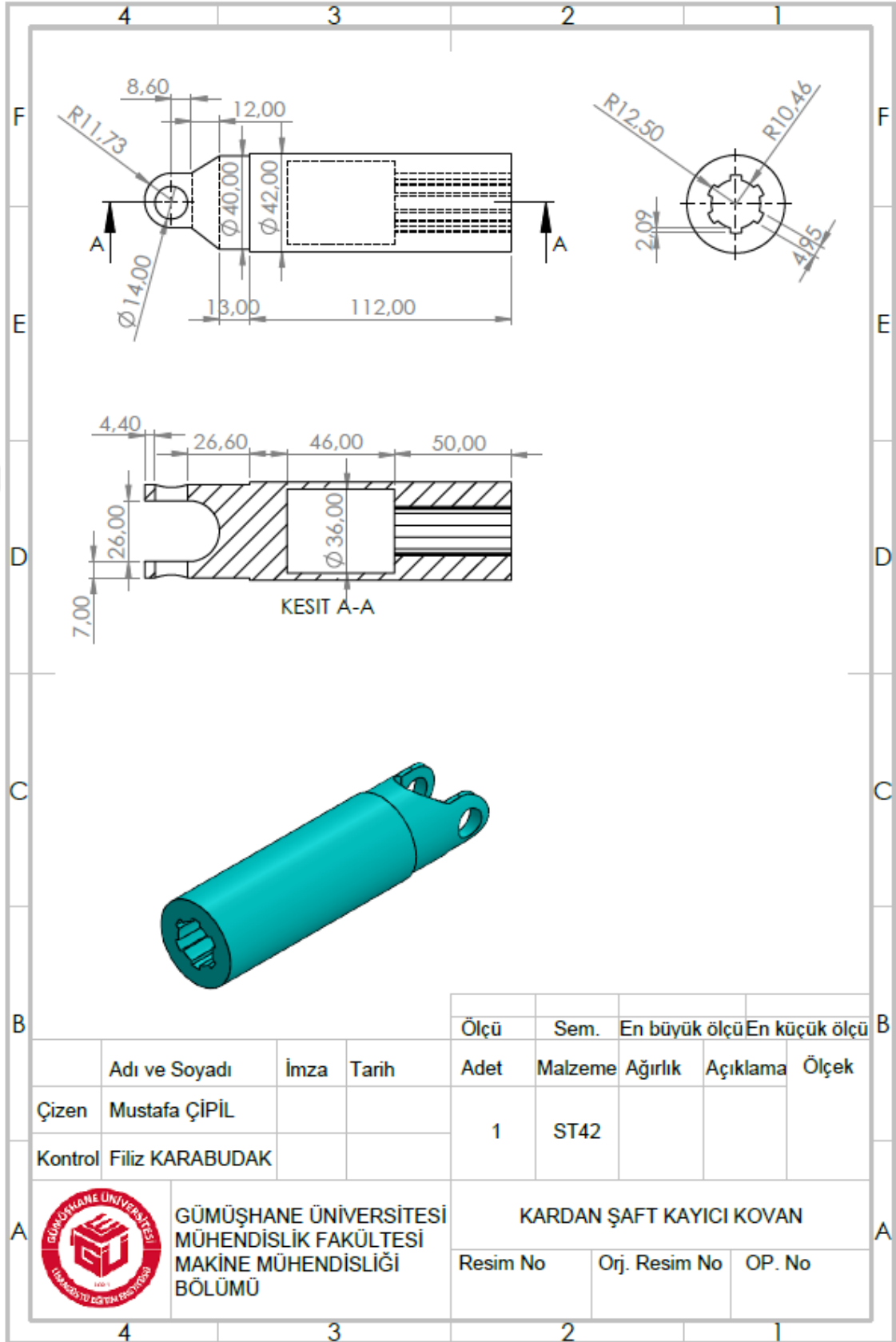
Ek 10. Kardan Şaft Pens Tutucu Bağlantı Parçası Teknik Resim Çizimi



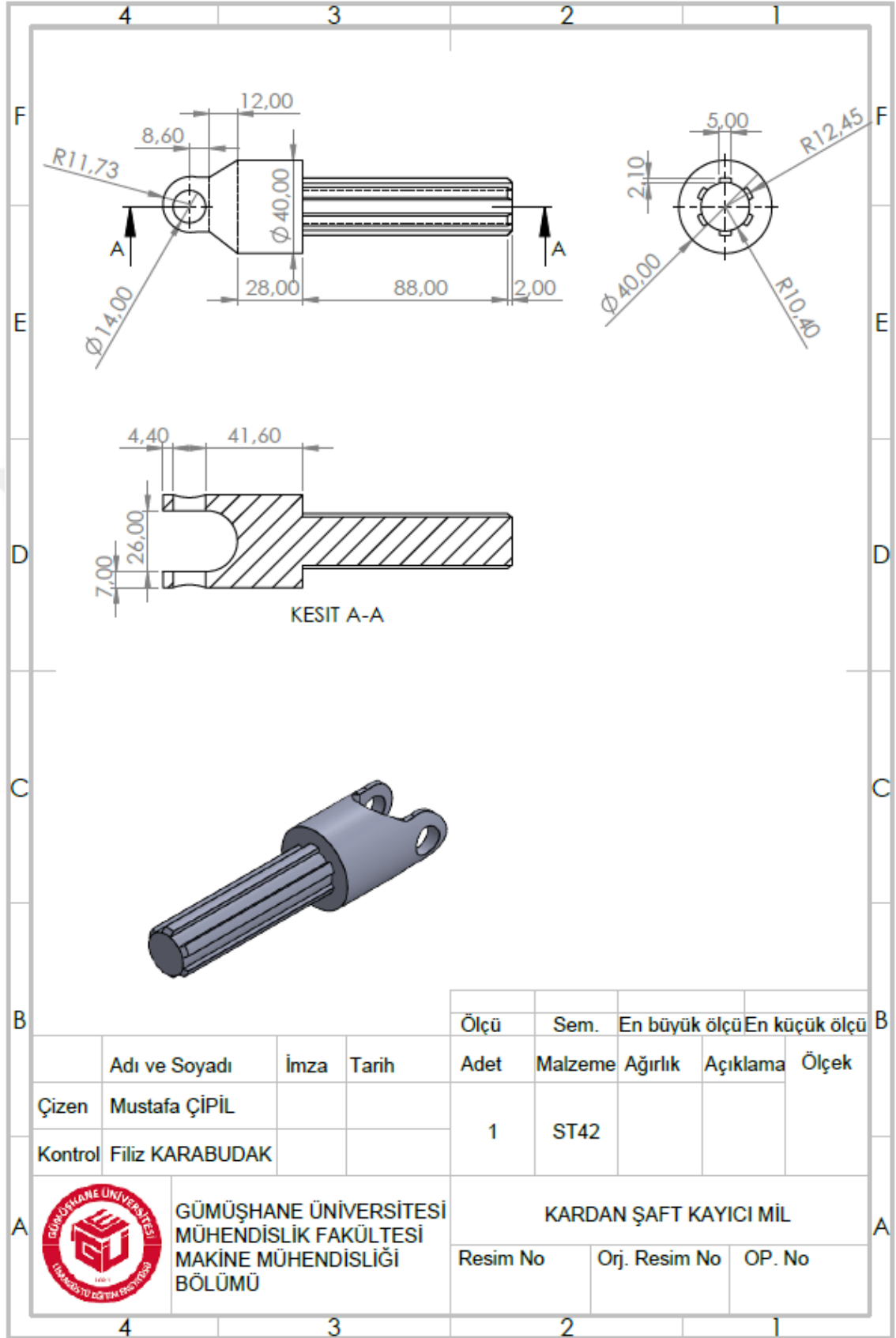
Ek 11. Kardan Şaft İstavrozu Teknik Resim Çizimi



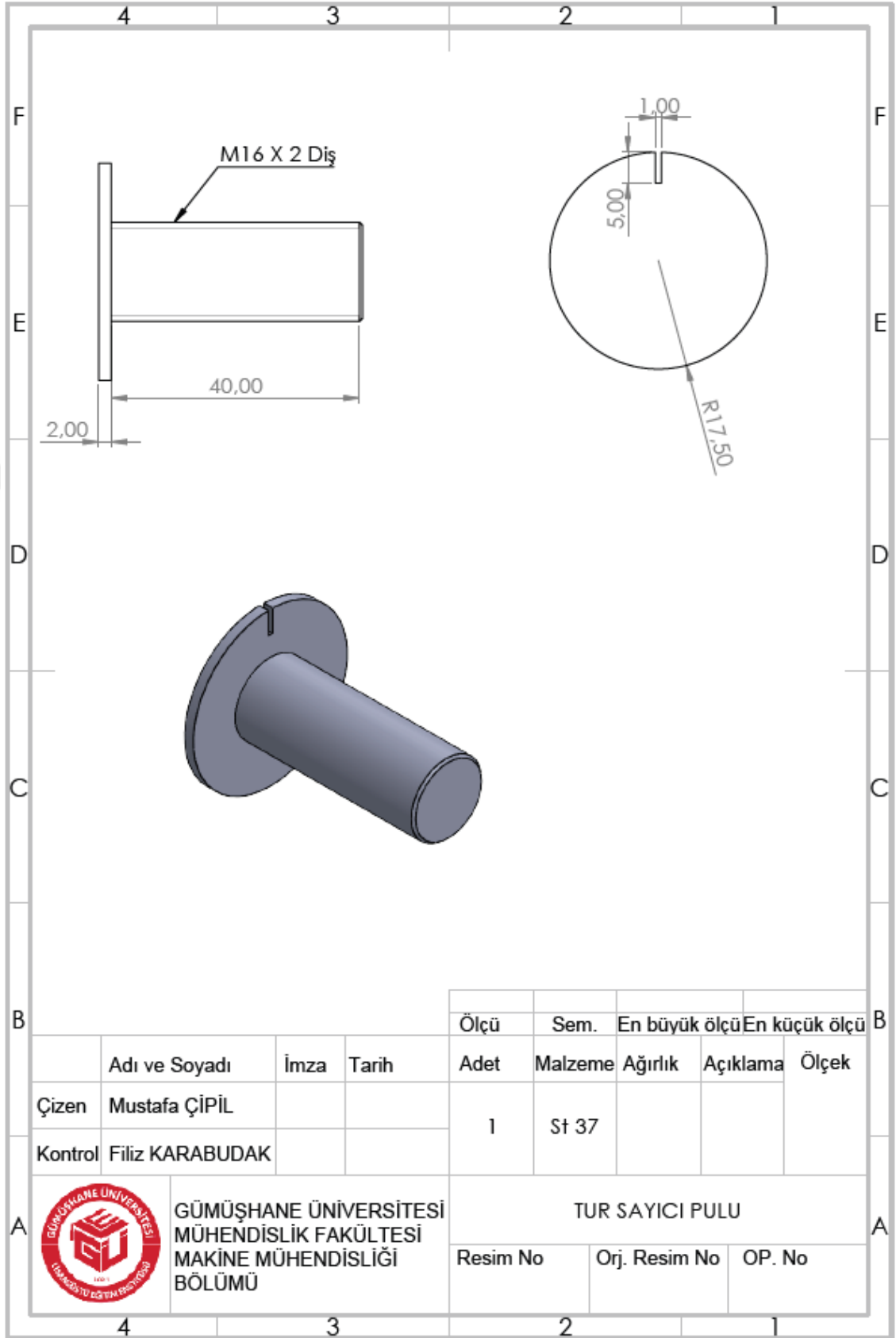
Ek 12. Kardan Şaft Kayıcı Kovan Teknik Resim Çizimi




Ek 13. Kardan Şaft Kayıcı Mil Teknik Resim Çizimi



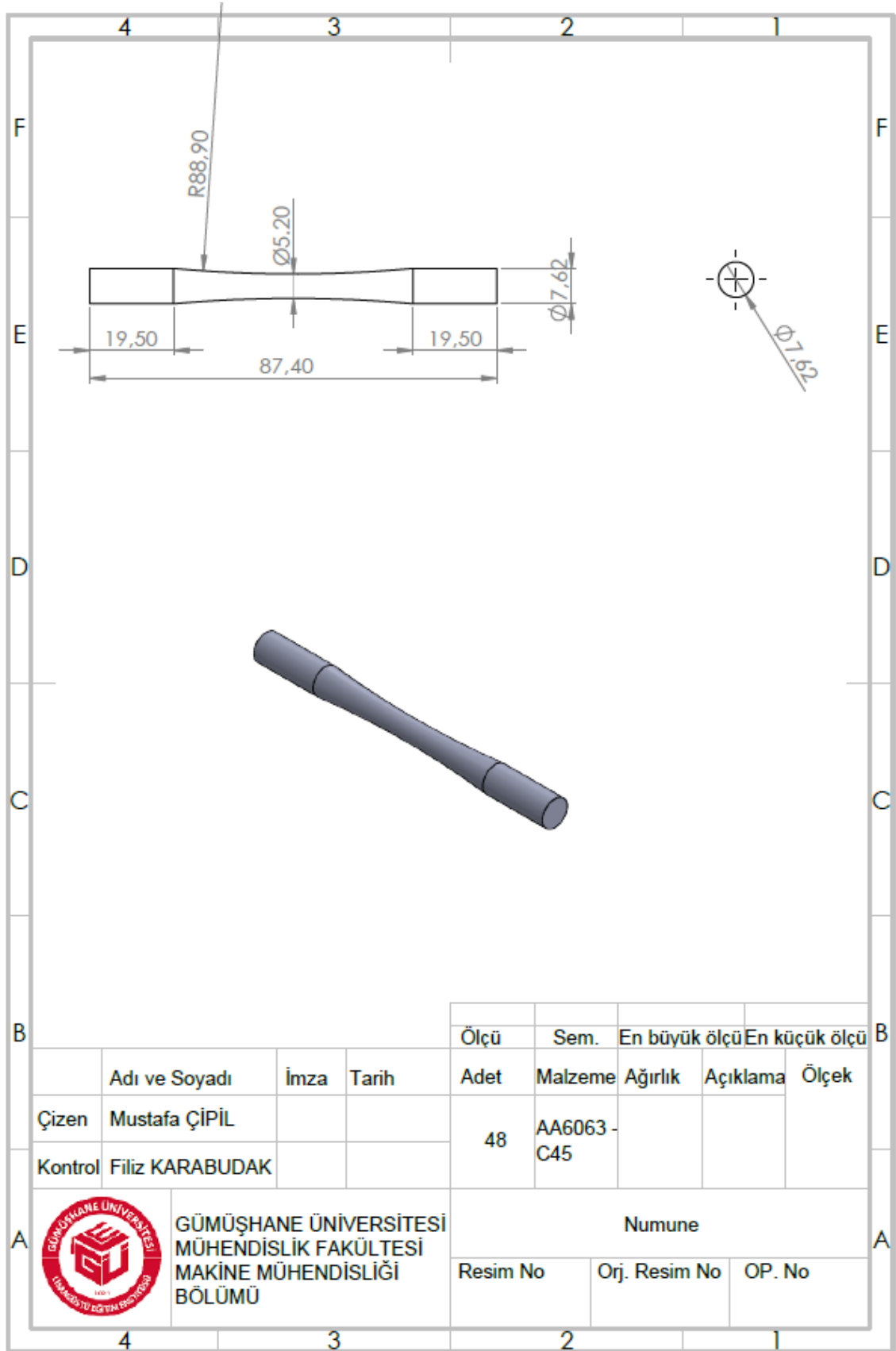
Ek 14. Tur Sayıcı Pul Teknik Resim Çizimi



Ek 15. Ağırlık Teknik Resim Çizimi

				4	3	2	1							
				F					F					
				E					E					
				D					D					
				C					C					
				B					B					
						Ölçü	Sem.	En büyük ölçü		En küçük ölçü				
		Adı ve Soyadı	İmza	Tarih	Adet	Malzeme	Ağırlık	Açıklama		Ölçek				
Çizen		Mustafa ÇİPİL			8	St37 ve C45								
Kontrol		Filiz KARABUDAK												
A		 GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ			AĞIRLIK								A	
		Resim No		Orj. Resim No		OP. No								
				4	3	2	1							

Ek 16. Numune Teknik Resim Çizimi



Ek 17. R. R. Moore Tipi Yorulma Cihazı Yükleme Katsayıları

Dia. Factor	Dia. Factor	Dia. Factor	Dia. Factor	Dia. Factor	Dia. Factor	Dia. Factor	Dia. Factor	Dia. Factor	Dia. Factor
.050 .0061	.100 .0491	.150 .1657	.200 .3927	.250 .7670	.300 1.3254	.350 2.1046	.400 3.1416	.450 3.1416	.500 3.1416
.051 .0065	.101 .0506	.151 .1690	.201 .3986	.251 .7762	.301 1.3387	.351 2.1227	.401 3.1652	.451 3.1652	.501 3.1652
.052 .0069	.102 .0521	.152 .1723	.202 .4046	.252 .7855	.302 1.3521	.352 2.1409	.402 3.1890	.452 3.1890	.502 3.1890
.053 .0073	.103 .0536	.153 .1758	.203 .4106	.253 .7949	.303 1.3655	.353 2.1592	.403 3.2128	.453 3.2128	.503 3.2128
.054 .0077	.104 .0552	.154 .1793	.204 .4167	.254 .8044	.304 1.3791	.354 2.1776	.404 3.2368	.454 3.2368	.504 3.2368
.055 .0082	.105 .0568	.155 .1828	.205 .4228	.255 .8139	.305 1.3928	.355 2.1961	.405 3.2609	.455 3.2609	.505 3.2609
.056 .0086	.106 .0585	.156 .1864	.206 .4291	.256 .8235	.306 1.4065	.356 2.2147	.406 3.2851	.456 3.2851	.506 3.2851
.057 .0090	.107 .0601	.157 .1899	.207 .4354	.257 .8332	.307 1.4203	.357 2.2334	.407 3.3094	.457 3.3094	.507 3.3094
.058 .0096	.108 .0618	.158 .1936	.208 .4417	.258 .8430	.308 1.4342	.358 2.2523	.408 3.3339	.458 3.3339	.508 3.3339
.059 .0101	.109 .0636	.159 .1973	.209 .4481	.259 .8528	.309 1.4482	.359 2.2712	.409 3.3585	.459 3.3585	.509 3.3585
.060 .0106	.110 .0653	.160 .2010	.210 .4546	.260 .8628	.310 1.4624	.360 2.2902	.410 3.3832	.460 3.3832	.510 3.3832
.061 .0111	.111 .0671	.161 .2048	.211 .4611	.261 .8728	.311 1.4766	.361 2.3094	.411 3.4079	.461 3.4079	.511 3.4079
.062 .0117	.112 .0689	.162 .2087	.212 .4677	.262 .8828	.312 1.4908	.362 2.3286	.412 3.4329	.462 3.4329	.512 3.4329
.063 .0123	.113 .0708	.163 .2126	.213 .4744	.263 .8930	.313 1.5052	.363 2.3479	.413 3.4579	.463 3.4579	.513 3.4579
.064 .0129	.114 .0727	.164 .2165	.214 .4811	.264 .9032	.314 1.5197	.364 2.3674	.414 3.4831	.464 3.4831	.514 3.4831
.065 .0135	.115 .0747	.165 .2205	.215 .4878	.265 .9135	.315 1.5343	.365 2.3869	.415 3.5084	.465 3.5084	.515 3.5084
.066 .0141	.116 .0766	.166 .2245	.216 .4947	.266 .9239	.316 1.5489	.366 2.4066	.416 3.5339	.466 3.5339	.516 3.5339
.067 .0148	.117 .0786	.167 .2286	.217 .5016	.267 .9343	.317 1.5637	.367 2.4264	.417 3.5594	.467 3.5594	.517 3.5594
.068 .0154	.118 .0807	.168 .2328	.218 .5086	.268 .9449	.318 1.5785	.368 2.4463	.418 3.5851	.468 3.5851	.518 3.5851
.069 .0161	.119 .0827	.169 .2369	.219 .5156	.269 .9555	.319 1.5935	.369 2.4663	.419 3.6109	.469 3.6109	.519 3.6109
.070 .0168	.120 .0848	.170 .2412	.220 .5227	.270 .9662	.320 1.6085	.370 2.4864	.420 3.6368	.470 3.6368	.520 3.6368
.071 .0176	.121 .0869	.171 .2455	.221 .5298	.271 .9769	.321 1.6236	.371 2.5066	.421 3.6628	.471 3.6628	.521 3.6628
.072 .0183	.122 .0891	.172 .2498	.222 .5371	.272 .9878	.322 1.6388	.372 2.5270	.422 3.6889	.472 3.6889	.522 3.6889
.073 .0191	.123 .0913	.173 .2542	.223 .5443	.273 .9988	.323 1.6541	.373 2.5474	.423 3.7143	.473 3.7143	.523 3.7143
.074 .0199	.124 .0936	.174 .2586	.224 .5517	.274 1.0100	.324 1.6696	.374 2.5679	.424 3.7407	.474 3.7407	.524 3.7407
.075 .0207	.125 .0959	.175 .2631	.225 .5591	.275 1.0209	.325 1.6851	.375 2.5886	.425 3.7682	.475 3.7682	.525 3.7682
.076 .0215	.126 .0982	.176 .2676	.226 .5666	.276 1.0320	.326 1.7006	.376 2.6093	.426 3.7949	.476 3.7949	.526 3.7949
.077 .0224	.127 .1005	.177 .2722	.227 .5742	.277 1.0432	.327 1.7163	.377 2.6303	.427 3.8217	.477 3.8217	.527 3.8217
.078 .0233	.128 .1029	.178 .2768	.228 .5818	.278 1.0546	.328 1.7321	.378 2.6512	.428 3.8486	.478 3.8486	.528 3.8486
.079 .0242	.129 .1054	.179 .2815	.229 .5895	.279 1.0661	.329 1.7481	.379 2.6723	.429 3.8755	.479 3.8755	.529 3.8755
.080 .0251	.130 .1078	.180 .2863	.230 .5972	.280 1.0776	.330 1.7641	.380 2.6935	.430 3.9028	.480 3.9028	.530 3.9028
.081 .0261	.131 .1103	.181 .2911	.231 .6051	.281 1.0891	.331 1.7801	.381 2.7148	.431 3.9301	.481 3.9301	.531 3.9301
.082 .0271	.132 .1129	.182 .2959	.232 .6129	.282 1.1008	.332 1.7963	.382 2.7363	.432 3.9575	.482 3.9575	.532 3.9575
.083 .0281	.133 .1155	.183 .3008	.233 .6209	.283 1.1126	.333 1.8126	.383 2.7578	.433 3.9850	.483 3.9850	.533 3.9850
.084 .0291	.134 .1181	.184 .3058	.234 .6289	.284 1.1244	.334 1.8289	.384 2.7795	.434 4.0127	.484 4.0127	.534 4.0127
.085 .0301	.135 .1208	.185 .3106	.235 .6370	.285 1.1363	.335 1.8454	.385 2.8012	.435 4.0405	.485 4.0405	.535 4.0405
.086 .0312	.136 .1235	.186 .3156	.236 .6452	.286 1.1484	.336 1.8620	.386 2.8231	.436 4.0685	.486 4.0685	.536 4.0685
.087 .0323	.137 .1262	.187 .3210	.237 .6535	.287 1.1619	.337 1.8787	.387 2.8451	.437 4.0965	.487 4.0965	.537 4.0965
.088 .0335	.138 .1288	.188 .3262	.238 .6617	.288 1.1726	.338 1.8955	.388 2.8672	.438 4.1247	.488 4.1247	.538 4.1247
.089 .0346	.139 .1318	.189 .3314	.239 .6701	.289 1.1849	.339 1.9123	.389 2.8895	.439 4.1530	.489 4.1530	.539 4.1530
.090 .0358	.140 .1347	.190 .3367	.240 .6786	.290 1.1972	.340 1.9293	.390 2.9118	.440 4.1815	.490 4.1815	.540 4.1815
.091 .0370	.141 .1376	.191 .3420	.241 .6871	.291 1.2096	.341 1.9464	.391 2.9342	.441 4.2100	.491 4.2100	.541 4.2100
.092 .0382	.142 .1406	.192 .3474	.242 .6957	.292 1.2221	.342 1.9635	.392 2.9568	.442 4.2387	.492 4.2387	.542 4.2387
.093 .0395	.143 .1435	.193 .3529	.243 .7043	.293 1.2347	.343 1.9809	.393 2.9795	.443 4.2676	.493 4.2676	.543 4.2676
.094 .0408	.144 .1466	.194 .3584	.244 .7131	.294 1.2474	.344 1.9982	.394 3.0023	.444 4.2965	.494 4.2965	.544 4.2965
.095 .0421	.145 .1497	.195 .3639	.245 .7219	.295 1.2602	.345 2.0157	.395 3.0251	.445 4.3256	.495 4.3256	.545 4.3256
.096 .0434	.146 .1528	.196 .3696	.246 .7308	.296 1.2730	.346 2.0333	.396 3.0482	.446 4.3548	.496 4.3548	.546 4.3548
.097 .0448	.147 .1559	.197 .3753	.247 .7397	.297 1.2860	.347 2.0510	.397 3.0714	.447 4.3842	.497 4.3842	.547 4.3842
.098 .0462	.148 .1591	.198 .3810	.248 .7487	.298 1.2991	.348 2.0687	.398 3.0946	.448 4.4137	.498 4.4137	.548 4.4137
.099 .0476	.149 .1624	.199 .3868	.249 .7578	.299 1.3122	.349 2.0866	.399 3.1181	.449 4.4433	.499 4.4433	.549 4.4433

## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve Ortaokul eğitimini tamamlamıştır. Özdemir Sabancı Emirgan Anadolu Lisesi'nden mezun olmuştur. 2010 yılında başladığı Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında Makine Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2015 yılında tamamladığı askerlik görevinden sonra özel sektörde çeşitli kuruluşlarda Makine Mühendisi olarak görev yapmıştır. 2020 yılında Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Evli ve bir çocuk babasıdır.

