



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK BASINÇ ALTINDAKİ HİDROLİK
SİLİNDİRLERİN YORULMA
PERFORMANSLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Mevlüt AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Temmuz-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mevlüt Aydın tarafından hazırlanan “Yüksek Basınç Altındaki Hidrolik Silindirlerin Yorulma Performanslarının İyileştirilmesi” adlı tez çalışması 09/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

.....

Üye

Prof. Dr. Haydar LİVATYALI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan Kesen
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından **201010023** nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Mevlüt AYDIN

Tarih: 09/07/2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK BASINÇ ALTINDAKİ HİDROLİK SİLİNDİRLERİN YORULMA PERFORMANSLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Mevlüt AYDIN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

2021, 108 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ
Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI

Sanayide kullanılan yapısal parçalar genellikle değişken yüklemeler altında çalışırlar. Bu yüklemeler altında, bir süre sonra, genelde malzemenin yüzeyinden başlayarak ilerleyen çatlaklar büyüyerek malzemenin akma dayanımlarının çok altındaki gerilmelerde bile yorulup kırılmasına sebep olur. Ultra yüksek basınç altında çalışan hidrolik silindirlere de yorulma önemli bir problemdir. Yorulma, genelde yüzeyde başladığından, tekrarlı yüklere maruz kalan malzemelerin yüzeylerindeki kusurlar malzemenin beklenilenden erken yorulmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle, yüzeydeki kusurları en aza indirmek için çeşitli parlatma ve kaplama gibi yüzey işlemleri geliştirilmiştir. Bu işlemlerden en yaygın olanlardan biri de ezerek parlatma işlemidir.

Ezerek parlatma işlemi, malzeme üzerinden talaş kaldırmadan, ön işlem sonunda oluşan pürüzlülükleri plastik deformasyona uğratarak birbirleri üzerine yığarak, yüzeyi daha pürüzsüz hale getiren işlemdir. Pürüzlerin ezilmesiyle yüzeyde kalıntı basma gerilmeleri oluşur ve bu da yüzeyde oluşacak çatlağın gecikmesini sağlar.

Bu yüksek lisans tezinde ilk olarak yüksek basınçlarda çalışan katmanlı hidrolik silindirlere uygulanan yüzey işlemlerinin yorulma ömrüne olan etkisi incelenmiştir. Deneyler sırasında oluşan problemlerden dolayı tezdeki yöntem değiştirilmiş ve AISI 4340 malzemenin yüzey özelliklerine ve yorulma ömrüne ezerek parlatma işleminin etkisi araştırılmıştır. Standart yorulma testi numunelerine farklı ezme miktarı, ilerleme hızı ve parlatma hızı parametrelerinde ezerek parlatma işlemi uygulanmış ve sonuçta oluşan yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve yorulma ömürleri ölçülmüştür. Ezerek parlatma işlemi parametrelerinin en düşük yüzey pürüzlülüğü ve en yüksek yorulma ömrü için optimum seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca tornalama işleminde oluşan takım izlerinin, ezerek parlatma yöntemiyle azaltıldığı, 3D yüzey topografya görüntüleriyle gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 4340, Ezerek parlatma, Yorulma, Yüzey pürüzlülüğü

ABSTRACT

MS THESIS

IMPROVEMENT OF THE FATIGUE PERFORMANCE OF HYDRAULIC CYLINDERS UNDER HIGH PRESSURE

Mevlüt AYDIN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ

2021, 108 Pages

**Jury
Asst. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ
Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI**

In industry, structural parts generally operate under variable loads. Under these loads, after a while, cracks that generally start from the surface of the material grow and cause the material to fatigue and break even at stresses far below the yield strength. Fatigue is an important problem for the hydraulic cylinders operating under ultra-high pressures. Since fatigue generally starts at the surface, defects on the surfaces of materials exposed to variable loads may cause the material to fatigue earlier than expected. Therefore, various surface treatments such as burnishing and coating have been developed to minimize surface imperfections. One of the most common of these processes is the burnishing process.

Roller burnishing is a process that makes the surface smoother by plastically deforming the roughnesses formed at the end of the pre-treatment and massing them on each other, without removing any chips from the material. With the burnishing of the roughness, residual compressive stresses occur on the surface and this ensures the delay of the crack that will occur on the surface.

In this master's thesis, firstly, the effect of surface treatments applied to multi layer hydraulic cylinders operating at high pressures on fatigue life was investigated. Due to the problems occurred during the experiments, improving the surface properties and fatigue life of AISI 4340 material used in the aerospace and hydraulic industry, by means of the roller burnishing was aimed. The effects of the burnishing depth, feed rate and burnishing speed, which are the parameters of the roller polishing process, on the surface roughness, microhardness and fatigue life were investigated. The roller burnishing process parameters have been optimized for the lowest surface roughness and the highest fatigue life. In addition, it has been shown with 3D surface topography images that the tool marks formed in the turning process are reduced by the burnishing operation.

Keywords: AISI 4340, Roller burnishing, Fatigue, Surface roughness

ÖNSÖZ

Malzemelerin yorulması, sanayide sıkça rastlanan ve hem kullanılan sisteme zarar veren hem de maddi kayıplara yol açabilecek hasarlardır. Bu hasarların çözümü için literatürde çeşitli yollar araştırılmıştır. Malzeme yüzeyinde bulunan mikro veya makro seviyedeki kusurların veya çentiklerin yorulmaya sebep olduğu bilindiğinden, malzemelerin yüzeylerine ekstra işlemlerin yapılması gereksinim hale gelmiştir. Yapılan yüksek lisans tezinde, ezerek parlatma işlemi ile, savunma sanayinde ve yüksek basınçlı sistemlerde sıkça kullanılan AISI 4340 çeliğinin yorulma ömrünün artırılması gerçekleştirilmiştir. Parlatma işleminin malzeme yüzey özellikleri ve yorulma ömründe oluşturduğu olumlu etki sanayi ve literatüre aktarılması planlanmıştır. Böylelikle hem literatüre hem de sanayideki yorulma sorununun çözülmesine katkı sağlanmıştır.

Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'nün 201010023 Nolu BAP tez projesi kapsamında verdiği destek için teşekkür ederim.

Tez çalışmamda beni akademik olarak her zaman yönlendiren saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney numunelerinin hazırlanmasında gerekli talaşlı imalatlar ve ezerek parlatma prosesinin uygulanmasında yardımcı olan HMS Özceylanlar Firmasına, hidrolik silindir yorulma deneylerinde basınç yükseltici ve hidrolik üniteyi temin eden, TÜRKAV Firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının ilerleyişine yön vermemde destek olan, değerli bilgi ve tecrübelerini her zaman aktaran Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI ve Doç. Dr. Murat Dilmeç'e ve yardımı ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen Öğr. Gör. Mehmet HALKACI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalar esnasında, saat fark etmeksizin her türlü işin yapılmasında her zaman yanımda destekçim olan sevgili arkadaşlarım Mak. Müh. Yusuf Furkan YAPAN ve Mak. Müh. Dede Can EVCEN'e sonsuz teşekkür ederim.

Gösterdikleri sabır, anlayış ve destekle beni her zaman motive eden Babam Murat Aydın, Annem Meral Aydın ve kardeşlerim Ceren, Elif ve Rümeyza'ya çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, eksikliğini hiçbir zaman hissettirmeyen, çalışmalarımda hem akademik hem de manevi şekilde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgilim Aysel'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mevlüt AYDIN

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Katmanlı ve Basınçlı Silindirlerde Oluşan Gerilmeler	4
2.2. Silindirlerin Sıvı Basıncıyla Yorulması	7
2.3. Bilyalı dövme işlemi	12
2.4. Ezerek Parlatma İşlemi	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1. Hidrolik Silindirlere Uygulanan Yorulma Deneyleri.....	33
3.1.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması	33
3.1.2. Yorulma Deney Düzenekinin Tasarımı.....	47
3.1.3. Proses parametrelerinin belirlenmesi	50
3.1.4. Yorulma Deneylerinin Yapılması	51
3.2. Eksenel Yorulma Testleri.....	52
3.2.1. Yorulma test numunelerinin hazırlanması	52
3.2.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri	57

3.2.3. Mikrosertlik ölçümleri.....	58
3.2.4. Yorulma testlerinin yapılması	59
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	64
4.1. Hidrolik Silindirde Analitik ve Nümerik Yöntemlerle Hesaplanan Gerilmelerin Karşılaştırılması ve Silindir Boyunun Seçimi	64
4.2. Katmanlı Hidrolik Silindirlerin Yorulma Deney Sonuçları	66
4.3. Eksenel Yorulma Test Numunelerinin Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları	70
4.4. Eksenel Yorulma Test Numunelerinin Mikrosertlik Ölçümleri.....	78
4.5. Eksenel Yorulma Test Numunelerinin Yorulma Testi Sonuçları	80
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	86
5.1 Sonuçlar	86
5.2 Öneriler	87
KAYNAKLAR	89
EKLER.....	92
EK-A Bilyalı Dövme İşlemi Literatür Araştırması.....	92
EK-B Hidrolik Silindir Yorulma Testlerinde Karşılaşılan Problemler.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	107

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Almen yoğunluğu
S-N	: Gerilme-Çevrim
N	: Newton
r	: Radyus
δ	: Sıklık toleransı
p	: Sıkı geçme basıncı
E	: Elastiklik modülü
a	: İç silindir iç çapı
b	: İç silindir dış çapı
c	: Dış silindir dış çapı
ν	: Poisson oranı
σ_r	: Radyal gerilme
σ_t	: Teğetsel gerilme
C	: Gerilme sabiti
p_0	: Dış basınç
p_i	: İç basınç
°	: Derece
%	: Yüzde
R_a	: Aritmetik ortalama sapma
R_z	: 5 tane en yüksek 5 tane en alçak noktanın ortalaması
F	: Kuvvet
A	: Kesit alanı

Kısaltmalar

P	: Basınç
ÇD	: Çekme dayanımı
MPa	: Megapaskal
AISI	: American Iron and Steel Institute
Psi	: İnçkare başına libre
HRC	: Rockwell sertliği
Kg	: Kilogram
Dk.	: Dakika
Mm	: Milimetre
EP	: Ezerek parlatma
CNC	: Computer numerical control
FT	: Finitör tormalama
LBP	: Low plasticity burnishing
EP	: Ezerek parlatma

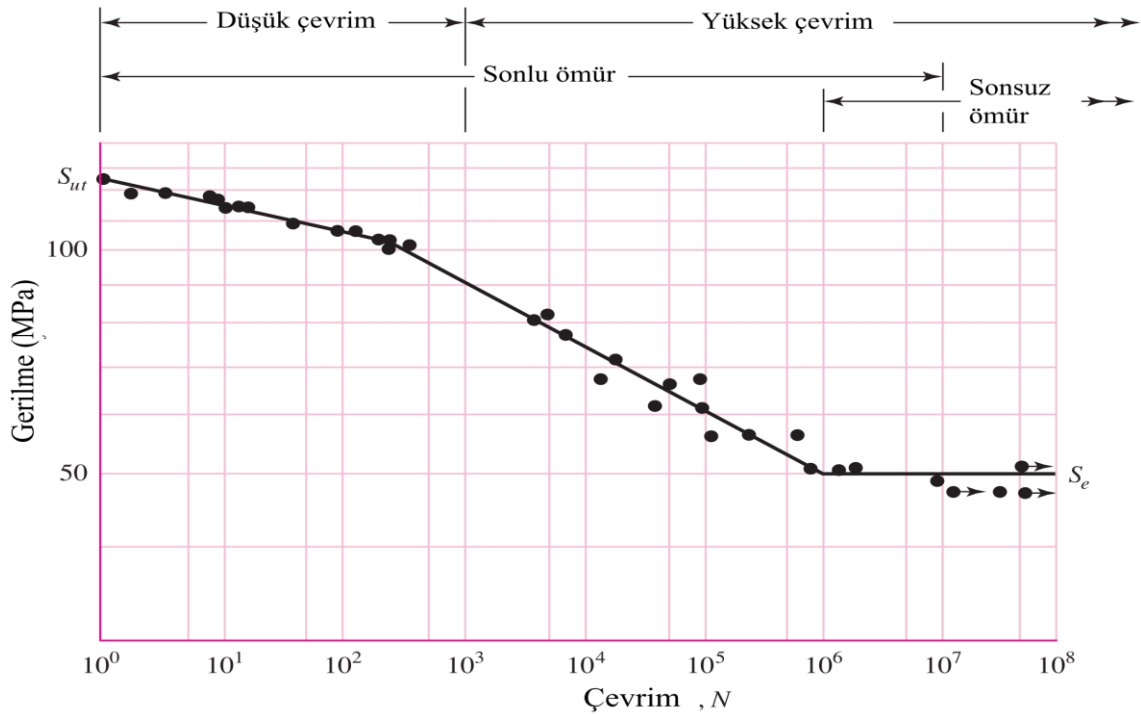
RB	: Roller burnishing
Ar. Ge.	: Araştırma Geliştirme
BY	: Basınç yükseltici
ASTM	: American Society for Testing and Materials
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
3B	: Üç boyutlu
GPa	: Gigapaskal
BD	: Bilyalı dövme
dev	: Devir
ÇEBY	: Çift etkili basınç yükseltici
TEBY	: Tek etkili basınç yükseltici
PLC	: Programmable logic controller
D	: Kesit çapı
D _k	: Kavrama çapı
L	: Kesit uzunluğu
R	: Gerilme oranı
Hz	: Hertz
kN	: Kilonewton
ms	: Milisaniye
µm	: Mikrometre
p-değeri	: İstatiksel anlamlılık değeri
ANOVA	: Analysis of variance

1. GİRİŞ

Malzemelerde yorulma 1800'lü yıllarda, Avrupa'daki birkaç araştırmacının, köprü ve demiryolu bileşenlerinin, tekrarlanan yüklemeye maruz kaldıklarında çatladığını gözlemlmeleriyle keşfedilmiştir. Teknoloji geliştikçe ve artan makineleşmeyle birlikte metal kullanımı da önemli oranda artmıştır. Bununla birlikte, tekrarlanan yüklere maruz kalan makine parçaları için yorulma daha çok dikkate alınması gereken bir faktör haline gelmiştir (Hoepfner, 1997).

Malzemelerde yorulmanın ilk sistematik deneysel çalışmaları Alman demiryolu mühendisi olan August Wöhler tarafından yapılmıştır. Wöhlerin yorulma araştırmalarına yaptığı katkılarından dolayı, standart test numunelerine, tekrarlı bir şekilde sabit genlik ve ortalama gerilme uygulanan Gerilme-Ömür (S-N) yorulma testleri bazen klasik Wöhler testleri olarak adlandırılır. Wöhler testi malzemelerin yorulmasında kullanılan en yaygın testtir. Bu testler sonucunda elde edilen Çizelge 1.1'deki S-N eğrileri sayesinde, bir malzemenin belirli bir gerilmede tekrarlı yüklemeye ömrünün ne kadar olduğu ve malzemenin yorulma dayanımı tespit edilebilmektedir (Lee, Y. ve ark., 2005).

Çizelge 1.1. Wöhler eğrisi (Shigley, 2011)



Standart olarak, eksenel, dönen eğilmeli, burulmalı ve bileşik gerilmeli yorulma testleri olsa da literatürde ve sanayide kullanılan standart olmayan ve kullanılan sistemlere özel yorulma testleri mevcuttur. Metalik malzemelerde meydana gelen hasarların %80-90 civarının yorulmadan kaynaklandığı bilinmektedir. Sanayide 200 MPa bar ve üzerinde ultra yüksek basınçları oluşturan Basınç Yükselticiler (BY), çevrimsel yükleme altında çalışmaktadır. Bu nedenle BY'lerde karşılaşılan en önemli problemlerde biri de yorulmadır. BY'ler sanayide, su jeti ile kesme, hidroşekillendirme, endüstriyel temizlik, basınç test sistemleri, patlatma test sistemleri, sızıntı test sistemleri, izostatik presleme ve yiyecek pastörizasyonunda kullanılmaktadır. Klasik hidrolik sıvı basıncını piston ve milinin alan oranı kadar artırarak 600 MPa gibi ultra yüksek basınçlara çıkaran bu sistemler, tekrarlı ve oldukça yüksek gerilmelere maruz kalmaktadır. Belli çevrimden sonra basınç yükselticilerde yorulmalar meydana gelmektedir. En yüksek gerilme silindir iç yüzeyinde olduğundan ve yorulma çatlağı genelde yüzeyde başladığından (Dieter, G.E., 1988) bu yüzeyin çentiklerden ve diğer kusurlardan arındırılması gerekmektedir. Bu amaçla silindir iç yüzeylerine bilyeli dövme, ezerek parlatma, taşlama, polisaj, lazer kaplama vb. gibi yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bu işlemler yüzeyde kalıntı basma gerilmeleri oluşturmaları ve/veya daha pürüzsüz yüzeyler elde edilmesini sağlamaları nedeniyle yorulma ömrünü de artırır.

Yüksek lisans tez çalışmasında önce BY'lerin yorulma ömrüne etki eden üretim parametrelerinin etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Özellikle silindir içerisine uygulanan bilyeli dövme ve ezerek parlatma yüzey işlemleri ile BY'lerin yorulma performanslarının iyileştirilmesi planlanmıştır. Farklı yüzey işlemleri ile üretilen katmanlı silindirik numunelerin içerisinde çevrimsel olarak 400 MPa basınç uygulanarak yorulma ömürleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Ancak deneysel çalışmada karşılaşılan problemlerden dolayı deneylerin çok uzun süre alması sebebiyle tezdeki yöntem değiştirilmiştir. Tezin amacı ezerek parlatma yüzey işlemi parametrelerinin AISI 4340 malzemenin eksenel yorula ömrüne ve yüzey özelliklerine etkisinin araştırılması olarak değiştirilmiştir. Bu kapsamda ezme miktarı, parlatma hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin etkileri belirlenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde detaylı literatür taraması sunulmuştur. Bu taramada, katmanlı silindirlerin sıvı basıncıyla yorulması, bilyalı dövme ve ezerek

parlatma işlemlerinin malzemelerin yorulması ve yüzey özellikleri üzerindeki katkıları araştırılmıştır.

Üçüncü bölüm iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda katmanlı silindir numunelerinin gerilme analizleri, tasarımı, üretimi ve iç basınçta yorulma deneyleri anlatılmıştır. Deneylerde oluşan problemlerden dolayı eksenel yorulma testlerine geçilmiştir. İkinci bölümde, eksenel yorulma test numunelerinin tasarımının, üretiminin, yüzey pürüzlülük ölçümlerinin, sertlik ölçümlerinin ve yorulma testlerinin nasıl yapıldığı anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde ilk olarak katmanlı silindirlerin gerilme analizleri ve analitik olarak hesaplanan gerilme değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Daha sonra bu silindirlerin ultra yüksek basınçta yorulma testlerine ait sonuçlar ve deney esnasında karşılaşılan problemler anlatılmıştır. Ardından ezerek parlatılan numunelerin yorulma performanslarına ve yüzey özelliklerine, parametrelerin ne kadar etki ettiği gösterilmiştir.

Beşinci ve son bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve konuyla ilgili öneriler sıralanmıştır.

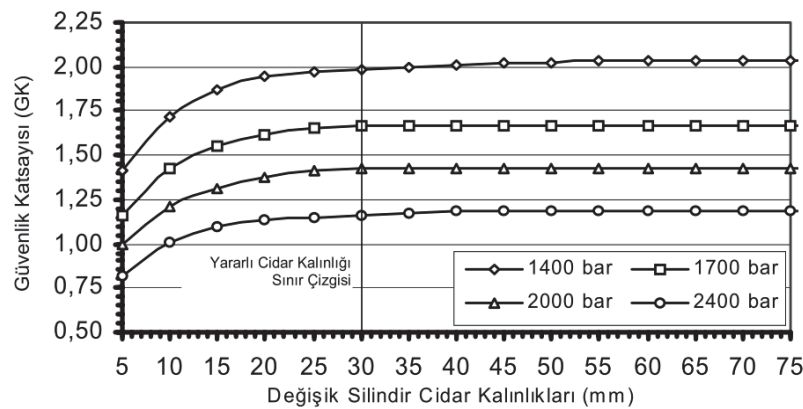
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde yüzey işlemlerine bağlı olarak yorulma ile ilgili çalışma yapılsa da hidrolik silindirler için aynı şey söz konusu değildir. Ultra yüksek basınçta silindirlerin yorulması için kurulan sistemin üretimi zor ve mali açıdan da zorlayıcıdır. Yine de literatürde, az sayıda deneysel ve analitik çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde hidrolik silindirlerin yorulması ve çok katmanlı silindirler üzerine gelen gerilmeleri hesaplayan, yüzey işlemlerinin malzeme ve yorulma üzerindeki etkisini inceleyen, basınçlı, eksenel ve dönel eğilmeli yorulma testi yapan çalışmalar taranmıştır.

2.1. Katmanlı ve Basınçlı Silindirlerde Oluşan Gerilmeler

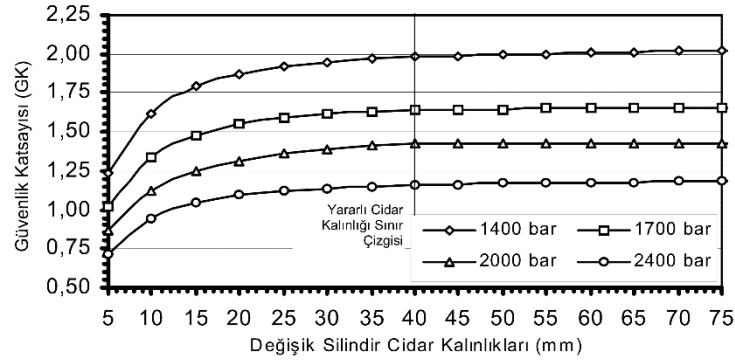
İç veya dış basınca sahip olan tek veya çok katmanlı silindirlerde çok eksenli gerilmeler meydana gelmektedir (Harvey, 1974). Bir sistem tasarımı ve malzeme seçimi yapılmadan önce mutlaka bu gerilmeler hesaplanmalıdır. Hem güvenlik hem de malzemenin uzun ömürlü olabilmesi için gelen gerilmelere göre malzeme cinsi ve boyutlandırmalar yapılmalıdır. Literatür araştırmasının ilk kısmında tek ve çok katmanlı silindirlerde iç ve dış basınçtan kaynaklanan gerilmeler incelenecektir.

Geren ve ark. (2000) su jetlerinde kullanılan, tek veya çok katmanlı olarak üretilen basınç yükselticilerin tasarım sınırlarını analitik olarak hesaplayıp uygun olan tasarım modellerini göstermişlerdir. 4 farklı iç silindir çapına (4,8,12 ve 16 mm) 4 farklı iç basınç (1400, 1700, 2000 ve 2400 bar) uygulandığında oluşan güvenlik katsayıları grafiğe dökülmüştür (Şekil 2.1).

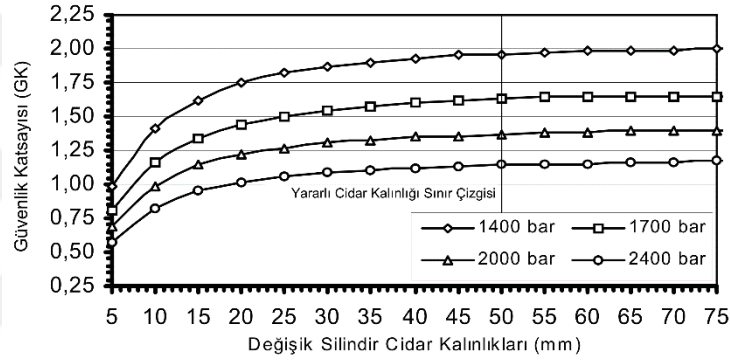


Şekil 2.1. Farklı Çalışma Basınçları, Farklı İç Yarıçaplar ve Değişik Silindir Cidar Kalınlıklarındaki Silindir Güvenlik Katsayısı Değişimi (Geren ve ark., 2020)

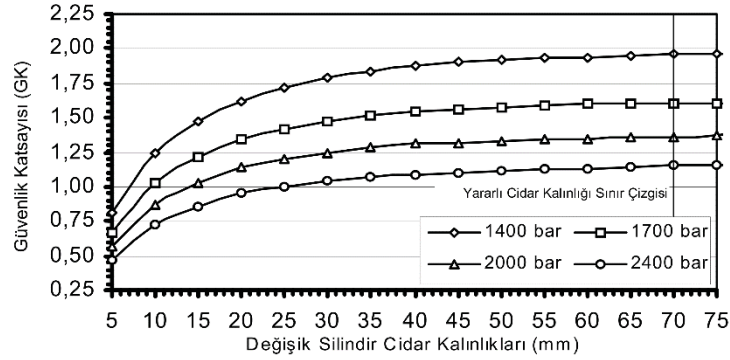
Şekil 2.2’de farklı iç yarıçaplara sahip farklı çalışma basınçları, farklı iç yarıçaplar ve değişik silindir cidar kalınlıklarındaki silindir güvenlik katsayısı değişim grafikleri verilmiştir.



b) Silindir İç Yarıçapı $r_i = 8$ mm



c) Silindir İç Yarıçapı $r_i = 12$ mm



d) Silindir İç Yarıçapı $r_i = 16$ mm

Şekil 2.2 Farklı Çalışma Basınçları, Farklı İç Yarıçaplar ve Değişik Silindir Cidar Kalınlıklarındaki Silindir Güvenlik Katsayısı Değişimi (Geren ve ark., 2020)

Sonuç olarak iç yarıçap değeri arttırıldığında aynı cidar kalınlığı için güvenlik katsayısında azalma olmuştur. Tüm yarıçap değerleri için, belirli bir cidar kalınlığından sonra güvenlik katsayısı sabit kalmaktadır. Sabitliğin başladığı değer ise yararlı cidar

kalınlığı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca iç yarıçap değeri artırıldığında yararlı cidar kalınlığı artmakta ancak maksimum çıkabilecek iç basınç değerleri azalmaktadır. Çalışmadaki diğer araştırılan parametre ise silindirlere gelen dış basıncın güvenlik katsayısındaki değişime etkisidir. Sonuçlar, 2 farklı iç yarıçapa (6 ve 16mm) 4 farklı dış basınç (400,1000,1300 ve 1500 bar) uygulanarak hesaplanmıştır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi silindirlerin dışına gelen basınçta artış yapıldığında belirli bir seviyeye kadar güvenlik katsayısının arttığı ancak belli bir noktadan sonra güvenlik katsayısının düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi ise dış basınç nedeniyle silindir iç yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmenin, belirli bir seviyeden sonra minimum gerilmeyi arttırmasıdır. Minimum gerilme arttığında ortalama gerilmede de artış gözlenecektir ve sisteme gelen eşdeğer gerilme artacaktır. Bu artış malzemenin daha erken yorulmasına sebep olmaktadır. Son olarak katmanlı silindirlerin belirli sıkı geçme toleransında cidar kalınlıklarının değişimiyle maksimum ve minimum gerilme dağılımları hesaplanmıştır. Eşdeğer gerilmelerin hesaplanabilmesi için Lame denklemleri kullanılmıştır. Çalışmada hidrolik silindirlerde, basınçtan ve sıkı geçmeden kaynaklı oluşan gerilmeler de aynı denklemlerle hesaplanmıştır. Çıkan sonuçlarda, sıkılık toleransı değişmediğinden ve çapların artışından dolayı silindirlerin arasında sıkı geçmeden kaynaklı oluşan ara yüzey basıncında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma iç silindirdeki toplam basma gerilmelerini azaltır ve silindir iç yüzeyindeki maksimum gerilmeyi düşüren bir faktördür. Aynı iç basınçta cidar kalınlığı 2 katına arttırmak tasarım olarak ince cidara göre daha güvenilir gözükse de belli bir cidar kalınlığından sonra tasarıma etkisi olmamaktadır.

Öztürk, (2011), çelik-çelik ve çelik alüminyum malzemeleriyle tasarlanmış iki silindirin sıkı geçme işlemindeki farklı sıkılık değerlerinde oluşan ara yüzey basıncını analitik ve nümerik olarak hesaplamıştır. Ayrıca çalışmada, sıkı geçme işleminde oluşan gerilmelerin kalınlık dağılımı boyunca eşdeğer gerilme değerleri tespit edilip analitik değerlerle doğrulaması yapılmıştır. Çalışmada, silindirik elemanların sıkı geçme işlemindeki geometrisi basit olduğunda gerilme ve ara yüzey basınçlarının analitik yöntemlerle hesaplanmasının yeterli olabileceği ancak karmaşık geometrili montaj işlemlerinde sonlu elemanlar analiz sonuçlarının daha güvenilir olduğu belirtilmiştir.

Özel ve ark. (2005), katmanlı silindirler arasındaki sıkı geçme değerini belirlemek için farklı göbek-mil bağlantıları için gerilme ve deformasyon değerlerini SEA ile

incelemişlerdir. Sıkı geçirilen parçaların uç kısımlarının merkez kısımlarına oranla daha tehlikeli olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. (2000) dişli çark göbek bağlantıları için kullanılan sıkı geçme işlemlerinde oluşan gerilme değerlerini, Lamé denklemleri ile analitik olarak belirleyip, SEA ile karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmada karmaşık geometri kullanılmıştır ve Lamé denklemlerinin karmaşık geometrilerde etkili bir yöntem olmadığını belirterek üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçlarının sıkı geçme işlemlerinde daha gerçekçi sonuçlar verdiğini vurgulamıştır.

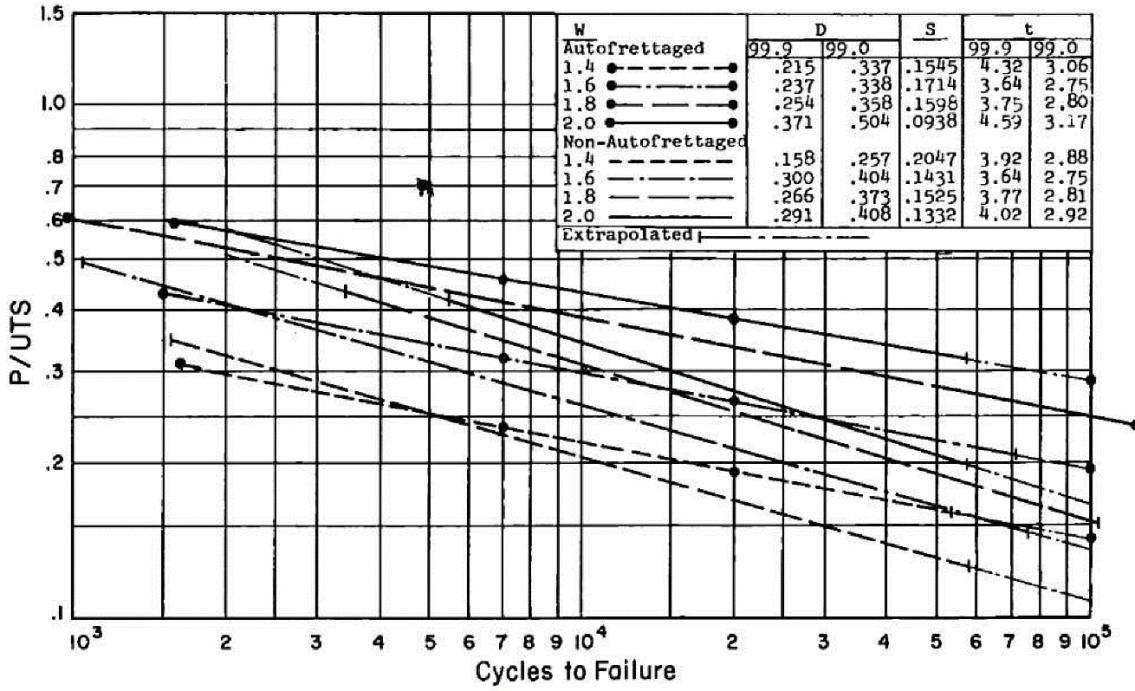
2.2. Silindirlerin Sıvı Basıncıyla Yorulması

Basınç yükselticilerde kullanılan çok katmanlı hidrolik silindirlerin yorulması konusunda literatürde doğrudan bir çalışma bulunamamıştır. Ancak basınçlı kapların yorulması, otofretaj işleminin silindirlere etkisi, ucu açık kalın cidarlı silindirlerin yüksek basınçla yorulması ve buna benzer basınçlı yorulma çalışmaları literatürde mevcuttur.

Bu çalışmada basınç yükselticilerde kullanılan çok katmanlı hidrolik silindirlerin yorulması incelenmektedir. Detaylı literatür taramasında aynı amaçla yapılan güncel bulunamamıştır. Ancak basınçlı kapların yorulması, otofretaj işleminin silindirlere etkisi, ucu açık kalın cidarlı silindirlerin yüksek basınçla yorulması ve buna benzer basınçlı yorulma çalışmaları literatürde mevcuttur.

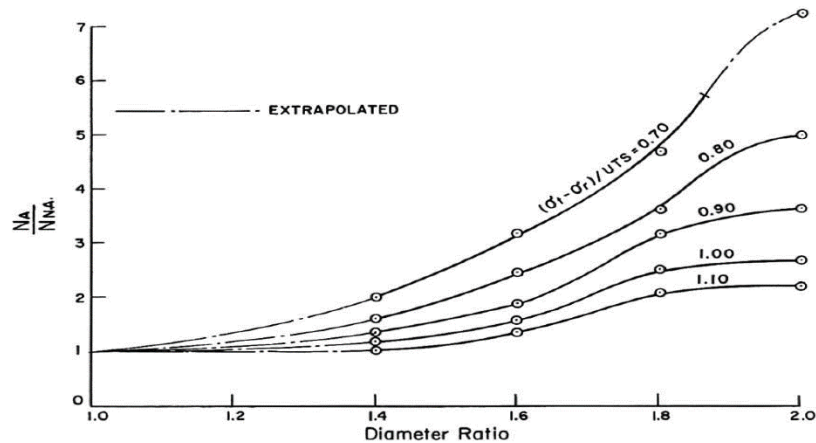
Davidson, ve ark. (1963) çalışmalarında kalın cidarlı silindirlerin dış çapının iç çapa bölünmesiyle bulunan dört farklı çap oranlarına (1.4, 1.6, 1.8 ve 2) sahip açık uçlu ve kalın cidarlı silindirlere otofretaj işleminin yorulmaya etkisinin olup olmadığını araştırılmıştır. Otofretaj, kalın cidarlı silindirlerin kullanımı öncesinde silindir cidarına ani yüksek basınç uygulayarak kalıntı gerilme oluşturma işlemidir. Çalışmada otofretaj işleminin yorulma özelliklerini pozitif yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Şekil 2.3'te otofretaj uygulanmış ve uygulanmamış farklı çap oranlarına sahip silindirlerin basınç-ömür grafikleri verilmiştir. Burada dikey eksen basıncın çekme gerilmesine oranını, yatay eksen ise malzemenin yorulduğu çevrimi göstermektedir. Sonuçlara göre çap oranı düştükçe otofretaj uygulamasının yorulma üzerindeki etkisi gittikçe azalmaktadır. Ayrıca çap oranının da yorulma üzerindeki pozitif etkisi bariz görülmektedir. 1.4 çap oranı 10000 çevrime 0.14 P/ÇD değerinde ulaşırken bu değer 2 çap oranında 0.3'lere

yükselmiştir. Çap oranının değişmesiyle aynı malzeme 3 kat büyük basınç değerlerinde çalışabilmektedir.



Şekil 2.3. 4 farklı çap oranı için basınç-ömür eğrisi (Davidson ve ark., 1963)

Şekil 2.4'te otofretajlı numunelerin otofretajsız numunelere oranla kaç kat fazla ömrü olduğu gösterilmiştir. Buradaki dikey eksen Otofretajlı numunenin yorulma ömrünün otofretajsız numunenin yorulma ömrüne oranıdır. Grafikte de görülebileceği gibi, otofretajlı silindirlerin yorulma özelliklerinde, otofretaj uygulanmamış numunelere kıyasla bir gelişme vardır. Bu gelişme, çap oranının artmasıyla artış göstermiştir. Silindirlerde oluşan teğetsel ve radyal gerilmenin farkı arttıkça ise otofretajın etkisi git gide azalmıştır.



Şekil 2.4 Otofretajlı numunenin ömrünün otofretajsız numunenin ömrüne oranıyla çap oranının ilişkisi (Davidson ve ark., 1963)

Eisenstadt ve ark. (1969), yukarıdaki çalışmanın devam çalışmasını yaparak, kalın cidarlı silindirlerin basınçlı yorulma testleri ile eksenel veya dönen eğilmeli yorulma test sonuçları arasında bir korelasyon olup olmadığı araştırılmıştır. Yazarların önceki çalışmasında, açık uçlu, kalın cidarlı bir silindirin çap oranı düştükçe, iç basınçtan kaynaklanan gerilme durumunun tek eksenli gerilmeye yaklaştığı belirtilmişti. Bu nedenle, çevrimsel olarak basınçlı kalın cidarlı bir silindirin yorulma ömrünün, eksenel gerilme yorulma testlerinin sonuçlarından tahmin edilebileceği önerilmiştir. Aynı malzeme için dönen kiriş yorulma testi sonuçları da basınçlı yorulma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Eksenel yorulma testlerinin sonuçları, ekstrapole edilmiş basınçlı yorulma sonuçlarıyla uyuşmadığı, bu iki yorulma testinin birbirleri arasında geçiş yapılamayacağını bulmuşlardır. Döner kiriş testlerinin sonuçları eksenel yorulma ve ekstrapole edilmiş basınçlı yorulma değerlerinin arasında kalmaktadır. Sonuç olarak bu üç yorulma testi arasında bir korelasyonun olmadığı belirtilmiştir.

Findley ve ark. (1982) yaptıkları çalışmada 32.3 mm iç çap ve 2,5 kat duvar oranlı içi boş silindirik numunelere belli miktarda tekrarlı iç basınç uygulayarak yorulma ömürlerini incelemiştir. Çalışmada altı farklı koşul incelenmiştir. Bu koşullar sırasıyla; temin hali, tavllanmış, nikel kaplanmış, honlanmış, ezerek parlatılmış ve bilyalı dövülmüş numunelerdir. Farklı yüzey işlemlerinin yorulma ömürlerinin karşılaştırılabilmesi için 300.000 çevrime ulaşılan maksimum basınç değerleri kullanılmıştır. Malzeme verilen basınçta 300.000 çevrimden önce yorulursa basınç belli oranda azaltılarak maksimum uygulanabilecek basınç değeri bulunmuştur. Çizelge 2.1'de yüzeyi farklı koşulda işlenmiş malzemelerin 300.000 çevrime ulaşabildiği maksimum basınç değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. 300.000 çevrimdeki yorulma dayanım sınırları (Findley ve ark., 1982)

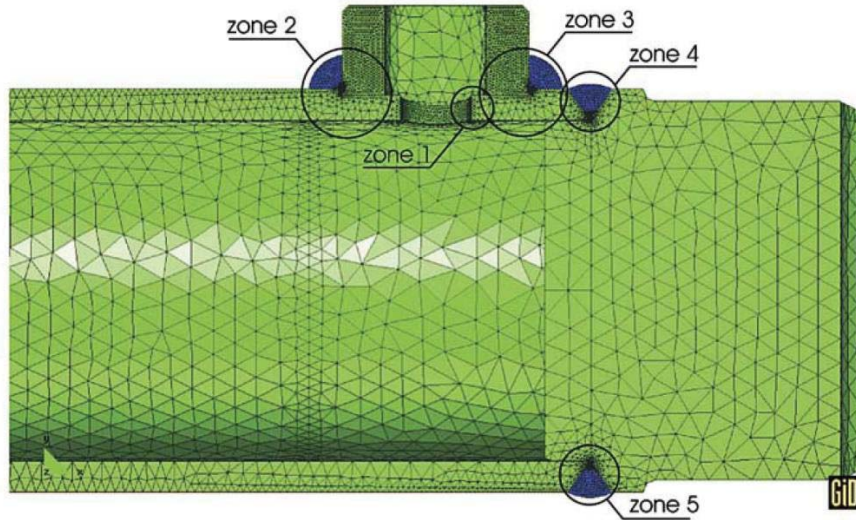
Condition		Ave. wall ratio, w	Internal pressure σ_r (compression)	
Number	Type		Mean, MPa (ksi)	Cyclic, MPa (ksi)
1	As-received	2.52	207 (30)	93 (13.5)
2	Stress relieved	2.53	207 (30)	87.6 (12.7)
3	Honed, 30 Mean	2.50	207 (30)	97.2 (14.1)
4	Honed, 40 Mean	2.50	276 (40)	95.1 (13.8)
5	Nickel Plated	2.53	207 (30)	84.8 (12.3)
6	Burnished	2.44	207 (30)	117.9 (17.1)
7	Peened	2.44	276 (40)	189.6 (27.5)

Sonuçlara göre, temin haldeki numune maksimum 93 MPa iç basınçta 300.000 çevrimi görürken, tavllanmış numunelerde bu basınç %6 azalarak 87.6 MPa değerine düşmüştür. Bu düşüşün sebebi yüzeydeki kalıntı gerilmelerde tavlamadan sonra azalmadan kaynaklanabileceği tahmin edilmiştir. Temin halin yorulma ömrü diğer yüzey işlemleriyle kıyaslandığında; maksimum basınç honlanmış numunelerde %5, ezerek parlatılmış numunelerde %22,6 ve bilyalı dövülmüş numunelerde %103 oranında artmıştır. Ancak nikel kaplanmış numunenin maksimum basıncı %13 azalmıştır. Kaplamadan kaynaklı kalıntı gerilmelerin çekme yönünde olması bu azalmanın sebebi olarak görülmektedir.

Patil (2006), yapmış olduğu çalışmada AISI 1020 çeliğinden üretilmiş ve iç içe sıkı geçmiş katmanlı silindirlerin sabit genlikli ve değişken genlikli iç basınçlardaki yorulma ömürlerinin nümerik olarak karşılaştırılmasını yapmıştır. Bu çalışmada her iki çeşit genlik için de yorulmanın dış silindirde başladığı tespit edilmiştir. Kullanılan iç ve dış silindirlerin cidar kalınlıkları eşit miktardadır ve yorulmayı sonsuz ömre götürebilmek için cidar kalınlıklarında optimizasyon yapıp kalınlıklarda büyüme yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Yorulma simülasyonlarında uzun çevrimli işlemlerde kullanılan Gerilme-Ömür metodu kullanılmıştır. Çalışmadaki performans kriteri yükleme genliğine göre yorulma ömründeki değişim, iç ve sıkı geçme basıncına göre iç ve dış silindirdeki gerilmelerin yönleri ve büyüklükleridir. İlk olarak sıkı geçmeden kaynaklı teğetsel gerilmeler ölçüldüğünde (İç basınç 0 MPa), iç silindirde basma gerilmeleri dış silindirde ise çekme gerilmeleri meydana gelmiştir. Aynı silindire malzemenin akma gerilmesi kadar (250 MPa) iç basınç uygulandığında her iki silindir de çekme gerilmelerine maruz kalmıştır. Yorulma analizlerinde ise sabit genlikte verilen basınçlarda iç silindir 2062 çevrimde yorulma gösterirken dış silindirde bu sayı 1717 çevrime düşmektedir. Basınçlar değişken genlikte verildiğinde dış silindirdeki erken yorulma problemi çözilememiştir. Bunun en önemli çözümü tasarım parametrelerini optimize etmek olup özellikle cidar kalınlıklarındaki eşitliği bozup iç silindire daha kalın cidarlı silindirlerin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.

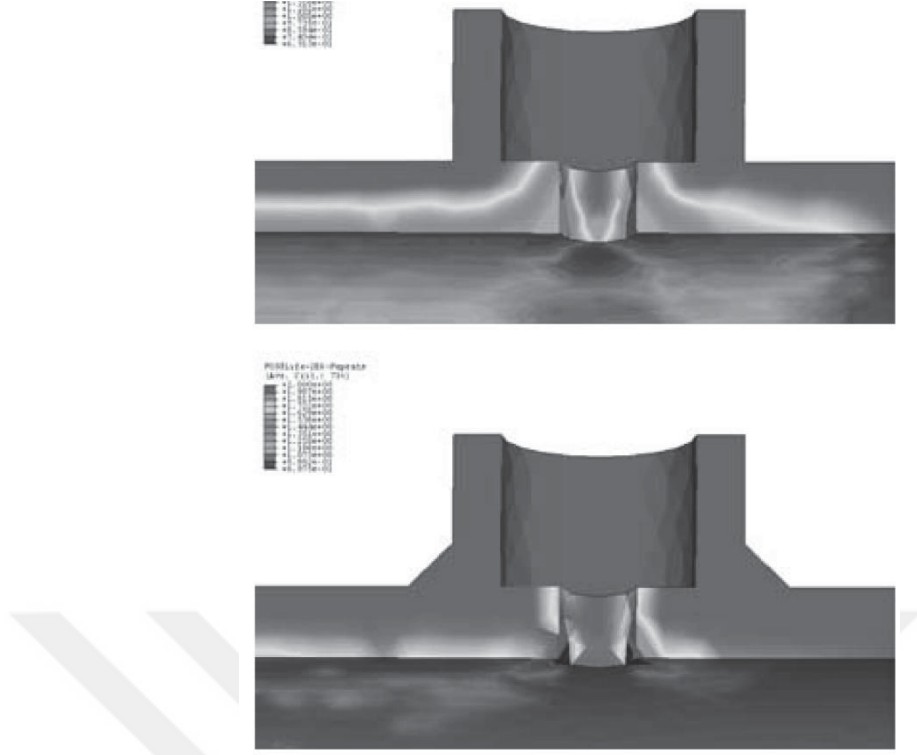
Yukarıda bahsedilen dört çalışmada da duvar oranı yani dış silindir çapının sisteme etkisi her zaman merak edilmiştir. Çoğu çalışmada silindir cidarı büyüdükçe yorulma ömrünü artırdığı anlaşılmaktadır. Ancak tek katmanlı silindirlerde belirli bir kalınlıktan sonra etkinin git gide azaldığı vurgulanmaktadır.

Marczeska, ve ark (2006) yaptıkları çalışmada, bir hidrolik silindirin farklı yükleme koşullarındaki yorulma dirençleri analitik yöntemle tahmin edilmiştir. Yapılan çeşitli analizler sonucunda hidrolik silindirin yağ giriş çıkışında kullanılan deliklerin, silindirdeki ilk yorulmaya başlayan bölge olduğu gösterilmiştir. Yağ deliği etrafındaki yorulma problemini çözmek ve yağ deliği ve silindir yüzeyi arasındaki boşluğu gidermek için sıcaklığa dayanıklı malzemeden üretilmiş pulların kullanılmasını önermiştir. Ekleniecek olan bu eleman yağın kaçak olarak çıkmasını ve köşelere fazla basınç gelmesini önleyecek, böylece yağ deliği köşelerindeki kaynaklarda oldukça sık görülen yorulma iyileşmiş olacaktır. Sonuç olarak pul eklenmeden yapılan analizlerde en kritik bölge $R=0$ değerinde 350 çevrim sonrasında yorulurken bu değer pul taktıktan sonra 398'e çıkmıştır. Bahsi geçen 5 kritik bölge (Şekil 2.5) için de karşılaştırma yapılmış olup, pul yerleştirilen silindirdeki tüm bölgeler daha uzun ömre sahip çıkmıştır. Çalışmadaki silindirin ömürleri analitik olarak belirlenmiştir. Yorulma çalışmalarında analitik çalışmalara ek olarak deneysel çalışmalarla desteklenmesi çıkan sonuçların doğruluğunu arttıracığı belirtilmiştir.



Şekil 2.5 Hidrolik silindirlerdeki kritik bölgeler (Marczeska ve ark., 2006)

Torbacki, (2007) piston tipi hidrolik silindirlere mukavemet ve yorulma analizleri yaparak sonuçlarını araştırmıştır. Çalışmada iki farklı hidrolik silindir modellemesi yapılmıştır. Bu modellerde, hidrolik yağın giriş çıkış yaptığı rekorlar kaynaklı ve kaynaklı olarak tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan geometriler Şekil 2.6'de görülmektedir.



Şekil 2.6 Köşe kaynaklı ve kaynaklı yağ giriş rekoru (Torbacki, 2007)

Çalışmanın sonucunda 3 farklı ortalama basınca maruz kalmış hidrolik silindirlerin çevrim sayıları tespit edilmiştir. Sonuçlara göre kaynaklı olan geometride ulaşılan çevrim sayısı kaynaklı olana göre daha fazla olmuştur. Aynı basınçta çalışan silindirde kaynaklı rekor 144544 çevrim sonunda yorulurken kaynaklı radyüse sahip olan silindir 89129 çevrim yapabilmektedir. Yorulma ömründe oluşan bu fark ortalama basınç arttıkça daha da artmıştır. Köşe kaynakları mükemmel olarak kabul edildiğinden bu fark daha da belirginleşmiştir. Olası kaynak hataları bu farkın git gide azalacağı anlamına gelmektedir.

2.3. Bilyalı dövme işlemi

Sanayide, metal parçalarda basma gerilmelerinin oluşturulduğu çeşitli yüzey işlem tipleri uzun yıllardır kullanılmaktadır (Torres & Voorwald, 2002; Vielma ve ark., 2014). Bunlar arasında en yaygın olanlarından biri bilyalı dövme işlemidir. Kalıntı basma gerilmeleri, yorulma, aşınma yorulması ve korozyona karşı önemli ölçüde direnç sağladığı bilinmektedir.

Bilyalı dövme, çeşitli parça yüzeylerinin, bilya denilen cam, seramik veya çelikten yapılmış küçük kürelerle, yüksek hızda bombardımana maruz kaldığı soğuk yüzey işleme

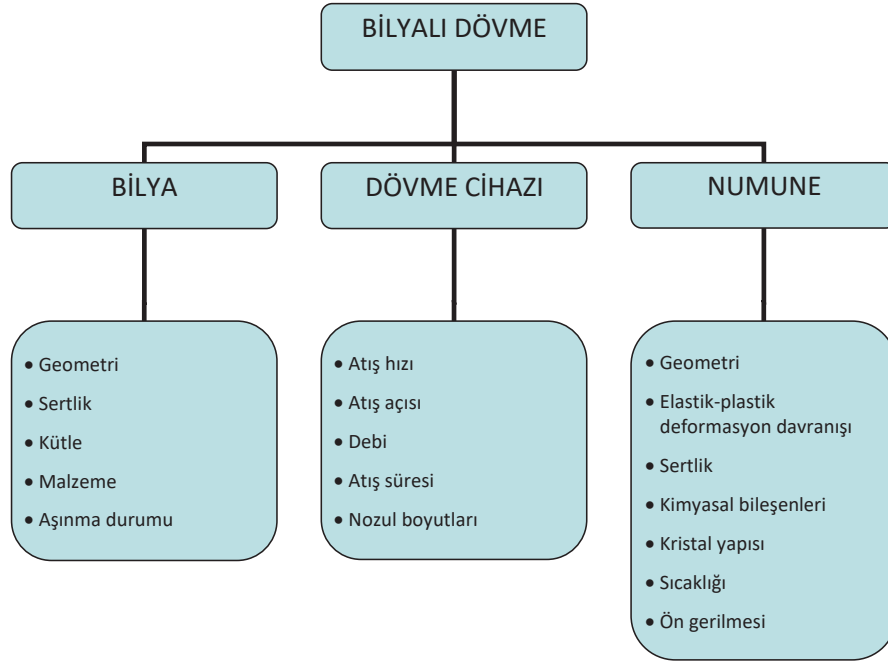


Şekil 2.7 Bilyalı dövme işlemi (Anonymous, 2019)

prosesidir. Bilyaların yüzeye çarpmasından sonra, bilya boyutu kadar yüzey alanı deforme olur. Deformasyon derinliği sınırlıdır, malzeme cidarında derine inildikçe etkilenmiş alan giderek azalır ve deforme olmayan bölgeler, malzeme yüzeyinin orijinal şekline geri döndürmeye çalışır ve basma gerilmesi uygular, bu sayede yüzeyde kalıntı basma gerilmesi alanı oluşturur (Hong ve ark., 2008).

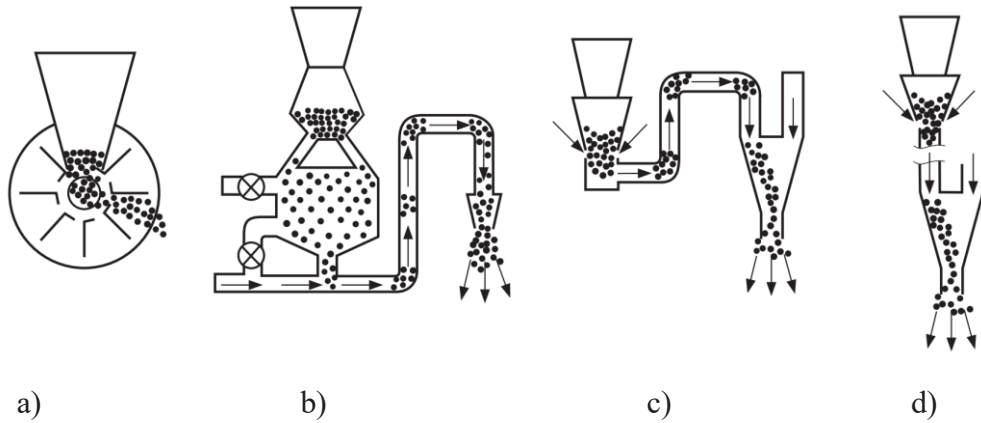
Bilyalı dövme prosesi, başta uzay ve havacılık, otomotiv olmak üzere endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Türbin ve kompresör kanatları, rotor milleri, iniş takımları, yaylar, dişliler, kam milleri vb. gibi sürekli değişken yükler altında olan veya bulunduğu sistemde gerilme yığılmasına sebep olan parçalar imal edildikten sonra bilyalı dövme ile son yüzey işleminden geçerler (Majzoobi ve ark. 2005). Bilyalı dövme, sayısal olarak modellemek için çok karmaşık bir işlemdir. Numune yüzeyinde daha yararlı bir kalıntı basma gerilme alanı üretmek için kontrol edilmesi ve ayarlanması gereken, bombardıman ile ilgili önemli sayıda parametre vardır. Bu parametreler, atış, hedef yüzey ve süreç olarak üç gruba ayrılabilir. Atış parametreleri boyut, yoğunluk, şekil, vuruş hızı, döner tabla hızı, atış açısı, sertlik vb. gibi parametrelerdir. Hedef numune için ise akma ve çekme gerilmeleri, sertlik değerleri, şekil değişimi hızı vb. gibi geometrik ve malzeme özelliklerini içerir. İşlem süreci için belirlenen parametreler ise debi, hava basıncı, atış açısı, nozül ile hedef yüzey arasındaki mesafedir (Hong ve ark. 2008). Şekil 2.8’de bilyalı dövme işleminin temel parametrelerini gösterilmektedir. Dövmedeki atış

miktarını ve hızını ve dolayısıyla dövme yoğunluğunu etkileyen faktörlerin yanı sıra, işlemin tüm parametreleri çok önemlidir.



Şekil 2.8. Bilyalı dövme işlemini etkileyen parametreler

Bilyalı dövme işlemi farklı tezgâhlarda yapılmaktadır. Şekil 2.9’da dört farklı bilyalı dövme tezgâhının şematik görünümü verilmiştir. Bunlar sırasıyla döner tablalı, basınçlı hava, püskürtme ve yerçekimi ile püskürtme tezgâhlarıdır. Döner tablalı bilyalı



Şekil 2.9. Farklı bilyalı dövme tezgâhları a) Döner tablalı b) Basınçlı hava c) Enjektör d) Yer çekimli enjektör

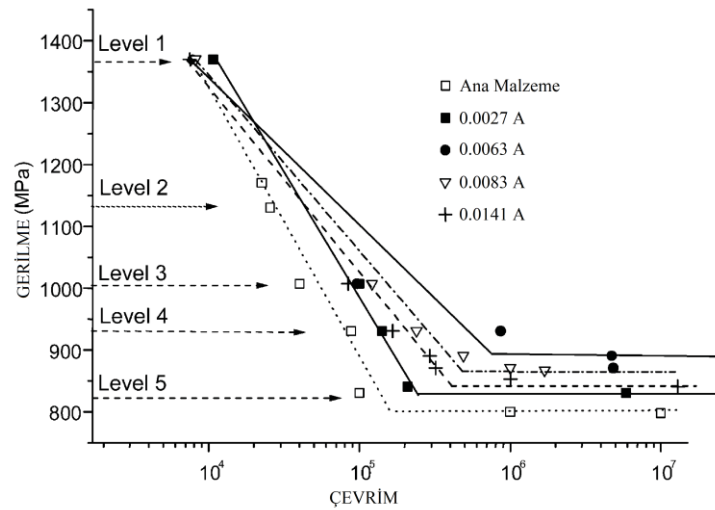
dövme tezgâhı bir veya daha fazla döner tabla ünitesinden oluşur. Döner kılavuz kanatlar, bilyaları tekerlek göbeğinden alır ve merkezkaç kuvvetleri bilyalara hız kazandırır. Atışın düşme hızı döner tekerleğin dönüşüyle kontrol edilir. Basınçlı hava ile uygulanan dövme

tezgâhlarında, bilya düşük basınçlı bir kaptan basınçlı bir kaba, besleme sistemi ile taşınır. Hava ve bilya karışımı nozülünden iş parçasının yüzeyine uygulanır. Dövme hızını belirleyen temel faktör hava/bilya karışımının basıncıdır. Dönen tablalı tezgâhların aksine, bilyaların yüzeye vurma hızı ve bilya hızlarının yayılması nispeten düşüktür. Basınçlı hava ile dövme tezgâhları nozüllerin daha fazla hareket serbestliği nedeniyle geometrik olarak karmaşık parçaların dövme işlemi ve küçük nozül çapları sayesinde küçük yüzey alanlarının yüksek yoğunluklu dövme işlemi için daha avantajlıdır. Enjektör dövme tezgâhları, bilyaları bir saklama kabından hava akımına aktarmak için emme etkisini kullanır. Bilyalar, hava akımı ile taşınır ve basınçlı hava sistemlerinde olduğu gibi, nozüller vasıtasıyla iş parçası yüzeyine yollanır. Basit yapısı, yüksek iletim hızlarına ve işlemin orta hızda gerçekleşebilmesi bu tezgâhların en önemli avantajlarıdır. Basınçlı hava sistemlerine kıyasla nozülün hareket kabiliyeti ve bilya yoğunluğu düşük seviyededir. Yer çekimli dövme tezgâhlarında, depolama kabı çalışma alanının üzerine yerleştirilir ve yerçekimi kuvvetinin desteğiyle daha hızlı atışlar elde edilebilmektedir.

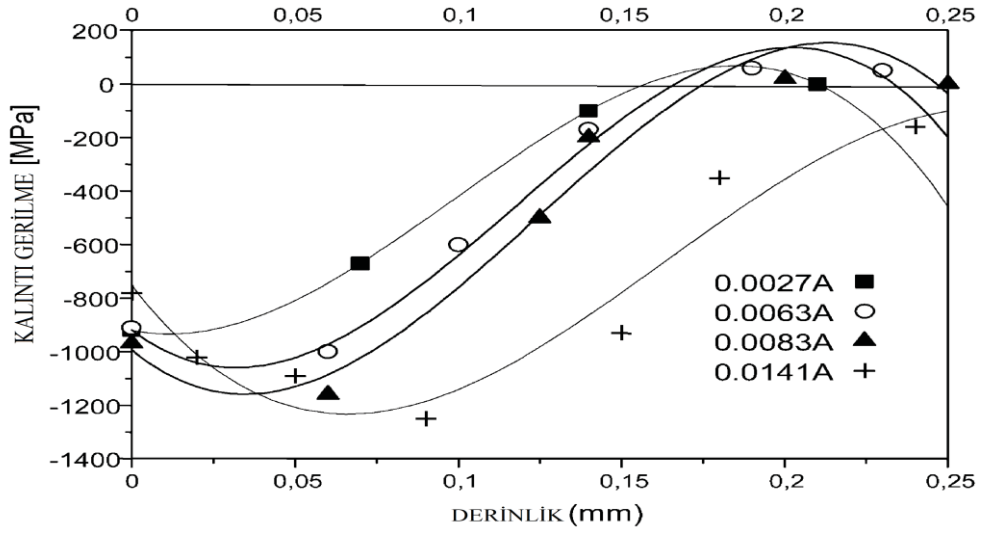
Literatürde bilyalı dövme üzerine yapılan çalışmalardan Torres ve ark. (2002) tarafından gerçekleştirilen araştırmada bilyalı dövme işlemiş uygulanmış numunelere dönen eğilmeli yorulma testleri gerçekleştirilmiş ve kalıntı basma gerilmesi alanı testler öncesinde ve sırasında bir X-ışını tensometrisi ile ölçülmüştür. Yorulma süreci nedeniyle kalıntı basma gerilmesi alanının gevşemesinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, çatlakların başlama noktaları hakkında bilgi elde etmek için kırılmış yorulma numuneleri bir tarama elektron mikroskobu kullanılarak araştırılmışlardır. Yorulma ömrünün değerlendirilmesi, kalıntı basma gerilmesi alanı gevşemesi ve çatlakların neden olduğu tartışılmıştır. Çalışmada AISI 4340 çelikten üretilmiş test numuneleri kullanılmıştır. Numuneler 815 derecede ısıtılıp 2 saat süreyle 230 derecede temperlenmiştir. Bu ısıtılma işlemi sayesinde malzemenin çekme mukavemeti 1864 MPa, akma mukavemeti ise 1511 MPa olarak ölçmüştür. Ayrıca malzemenin yorulma dayanımı ise 800 MPa olarak belirlemiştir. Çalışmada dört farklı bilyalı dövme yoğunluklarının (0.0027A(8 psi), 0.0063A(13 psi), 0.0083A(18 psi) ve 0.0141A(45 psi)) yorulma ömürleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Burada A Almen yoğunluğunu göstermekte olup değeri standart ölçülerdeki metal şeride bilyaların vurmasıyla oluşan sehim miktarıyla hesaplanmaktadır. Bilyalı dövme işleminde S 230 (0.7 mm çap) çelik bilyalar kullanılmış olup, dakikada 3 kilogram bilye bombardımana tutulmuştur. Her bir

numune için 20 deney yapılmıştır bu sayede hem tekrarlanabilirlik sağlanırken, 5 farklı seviyede yorulma ömürlerini tespit etmişlerdir. Şekil 2.10’da testlerin sonucu olan S-N (gerilme-ömür) grafiği verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere dövülmemiş numunelerle karşılaştırıldığında bilyalı dövmenin çevrim sayısında 0.0027A yoğunluklu deneyler dışında iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, orta ve yüksek çevrimlerde en iyi yorulma ömrü ara yoğunluklarda (0.0063 ve 0.0083 A) gözlemlenmiştir. Ayrıca bilyalı dövme işlemlerinden sonra oluşan kalıntı basma gerilmeleri tespit edilmiştir (Şekil 2.11). Yorulmuş numunelerinin çatlak başlangıç noktalarını belirlemek için bir tarama elektron mikroskobu (LEO 435) kullanmışlardır. Bilyalı dövme işlemi ile oluşan kalıntı basma gerilme alanlarını incelemek için testler boyunca X-ışını difraksiyon yöntemi ile incelemeler yapmışlardır. Atış yoğunluğu arttıkça yüzey üzerindeki çukurların ve basma gerilmelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak en yoğun atış haricindeki diğer tüm atışlar yüzey üzerinde neredeyse aynı derinlikler elde edilmiştir.

Basma gerilme bölgesindeki derinliğin artmasıyla yorulma ömrünü ilişkilendirilmiş ve doğru oranla ömür artması beklenmiştir. Ancak, CRSF parametreleri ile yorulma ömrünün uzaması arasındaki ilişki belirsizdir. 0.0141 A koşulu için, yüzeyde daha düşük bir kalıntı gerilme değeri, daha düşük yorulma ömrüne karşılık gelmemiştir. Öte yandan, bu durum için en büyük kalıntı basma gerilme bölge derinliği ve genişliği de en uzun yorulma ömrüne sahip olmadığına dikkat çekmişlerdir.

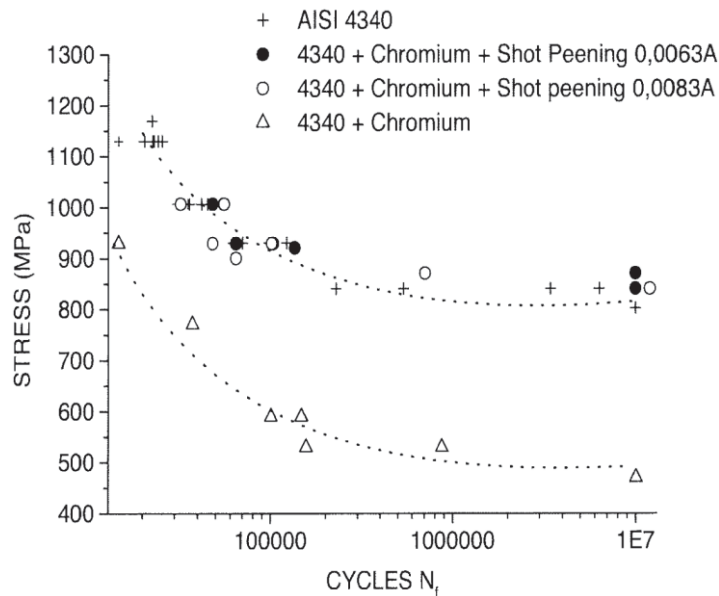


Şekil 2.10. Bilyalı dövme ve yüzey işlemsiz numunelerin S-N eğrilerinin karşılaştırılması (Torres, 2002)



Şekil 2.11. Kalıntı basma gerilme bölgesi grafiği (Torres, 2002)

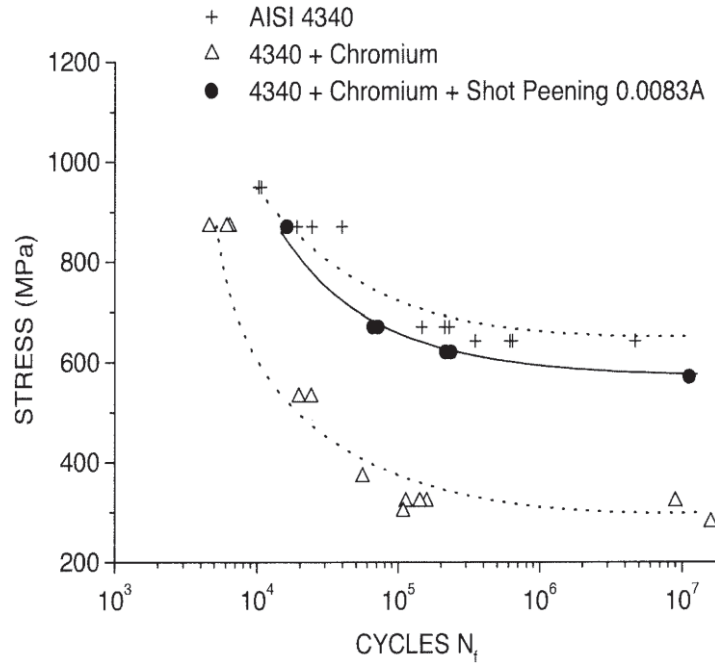
Aynı araştırmacılar (Torres ve ark., 2005) yaptıkları bir diğer çalışmada bilyalı dövme işlemini aynı malzemeyi (AISI 4340) kullanarak farklı araştırmalar yapmıştır. Bu çalışmada, hava şartlarına bağlı olarak sürekli değişken yüklemelere maruz kalan uçak iniş takımları incelenmiştir. İniş takımlarının genellikle sert krom kaplanmış 4340 çeliğinden imal edildiğinden bahseden yazarlar bu kaplamanın aşınma ve korozyona karşı dirençte oldukça iyi sonuçlar verdiğini ancak malzemenin yorulma sınırlarını yüksek ölçüde düşürdüğünü belirtmişlerdir. Buradan yola çıkarak iki farklı sertliğe sahip (39 ve 53 HRC) 4340 çeliğinden üretilen ve elektroliz ile sert krom kaplanmış numunelere bilyalı dövme işlemi uygulayarak yorulma dayanımları ve ömürleri incelemişlerdir. Ek



Şekil 2.12. 53 HRC sertliğindeki 4340 çeliğin yorulma-ömür grafiği (Torres ve ark., 2005)

sahipken, bilyalı dövülen numunelerde 820-830 MPa aralığında sonsuz ömür tespit edilmiştir.

Şekil 2.13’de 39 HRC sertliğinde numunelerde bilyalı dövme işleminin yorulma ömrü üzerindeki pozitif etkisi görülmektedir. Ancak 53 HRC’lik kaplanmış numuneler bilyalı dövme işlemi sonrasında hiçbir yüzey işlemine maruz bırakılmamış numunelerin yorulma dayanımıyla aynı değere ulaşırken 39 HRC’lik numunede bu etki tam görülemediği. Aynı numunelerde sadece krom kaplanmış olanların yorulma sınırı 300 MPa değerindeyken bilyalı dövülmüş ve kaplanmış numunelerde bu değer 590-600 MPa aralığında çıkmıştır. Ancak yüzey işlemsiz numunelerde bu değer 640 MPa olarak ölçmüşlerdir.



Şekil 2.13. 39 HRC sertliğindeki 4340 çeliğin yorulma-ömür grafiği (Torres ve ark., 2005)

İki grafiği kendi aralarında kıyaslırsak, daha sert olan 53 HRC’lik numunelerde bilyalı dövme işlemi yorulma dayanımına %41 pozitif katkı sağlamışken, 39 HRC’lik numunelerde %49 pozitif katkı sağlamıştır. Buradan sonuçla, yumuşak malzemelerde bilyalı dövmenin etkisi daha yüksek seviyelerdedir. İki farklı sertlikteki dört numunenin yüzeyindeki kalıntı basma gerilmelerini ölçmüşlerdir. Bu numuneler sırasıyla şöyledir; krom kaplanmış, bilyalı dövülmüş, bilyalı dövüldükten sonra krom kaplanmış ve yorulma testinden çıkan kaplanmış ve bilyalı dövülmüş numunelerdir. 53 HRC sertliğindeki numunelerde krom kaplamanın yüzeydeki basma gerilmelerini bir hayli geri seviyeye

çektığı görülmektedir. Yorulmamış numunelerde 0.1 mm derinlik seviyesi incelendiğinde, krom kaplanmış numunede 200 MPa basma gerilmeleri oluşurken bilyalı dövülüp kaplanmış numunelerde 800 MPa, sadece bilyalı dövülmüş numunelerde ise 1000 MPa değerlerine kadar çıktığı görülmektedir. Basma gerilmelerinin mikro çatlaklar oluşturmadığı sürece yorulma ömrüne pozitif katkısı olduğu bilinmektedir. Burada da önceki grafiklerle karşılaştırıldığında basma gerilmesinin büyümesiyle yorulma dayanımının artması doğru orantılı bir şekilde değişmiştir. Derinlik arttıkça kalıntı gerilmelerde bir yakınsama söz konusudur. Bu yakınsamanın sebebi bilyaların nüfuz ettiği derinlikle alakalıdır. Sadece krom kaplanmış numunede 0.1 mm seviyesinden sonra basma gerilmelerinin etkisi yok denecek kadar azdır. 0.20 mm – 0.25 mm aralığında etki sıfırlanmıştır. Ancak bilyalı dövme işlemine maruz kalan numunelerde 0.35 mm ye kadar basma gerilmeleri etkisini sürdürmektedir.

Bilyalı dövme konusu ile ilgili kaynak araştırmasının devamı EK-A'da verilmiştir.

2.4. Ezerek Parlatma İşlemi

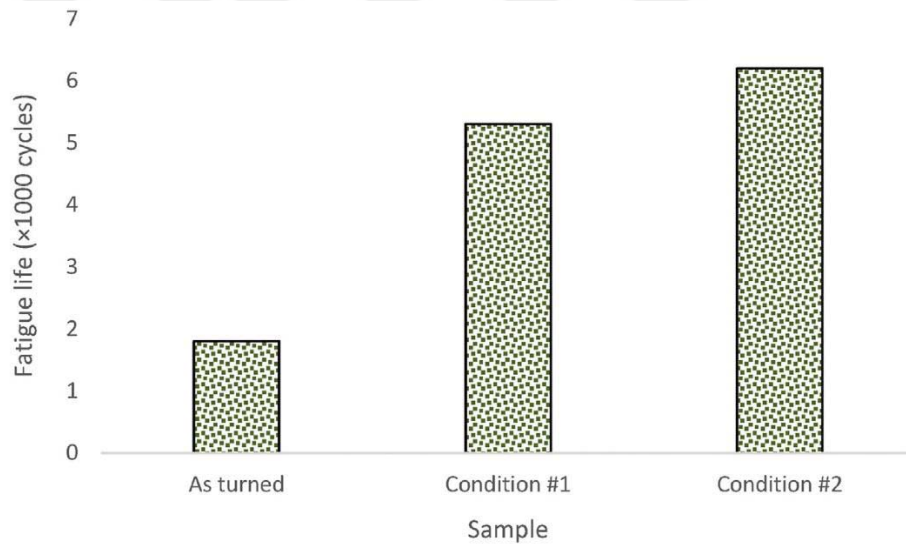
Günümüzde, makine parçalarının hassas ölçülerde üretimini ve yüksek yüzey kalitesini elde etmeyi amaçlayan kesici ve parlatma takım teknolojisi oldukça ilgi görmektedir. Ezerek Parlatma (EP), soyma, honlama, lebleme vb. son işlemler yüzey pürüzlülüğün önemli olduğu yerlerde çözüm olarak gösterilmiştir. Ezerek parlatma işlemi, değişken yükleme altında çalışan makine parçalarının üretimi ve yorulma mukavemetinin iyileştirilmesi açısından dikkat çeken bir yöntemdir. Bu işlem, bir veya birden fazla bilyeye sahip parlatma takımın iş parçasının yüzeyine temas etmesiyle gerçekleşir (Şekil 2.14)

Temas esnasında parlatma takımı veya iş parçası belli bir hızda dönmektedir. Takımın ilerlemesiyle beraber, bilyeler yüzeydeki çukurları ezmeye çalışmaktadır. Dış çaplar veya dış yüzeyler parlatılabildiği gibi içi delin olan malzemelerin iç çapları da parlatılmaktadır. Şekil 2.14'te prosesteki farklı parametreler de görülmektedir. Bunlar, dönme hızı, ilerleme miktarı, kuvvet, bilya türü ve bilya sayısıdır. Parlatma hızı da denilen dönme hızı torna aynasına bağlanılan numunenin döndürüldüğü hızdır. İlerleme ise takım katerine bağlanılan parlatma takımının dakika ilerlediği miktarı belirtir. CNC Torna tezgahlarında bu miktar devir başına mm olarak da verilmektedir. Parlatma kuvveti ise takımdan takıma değişiklik göstermektedir. Sıvı basıncıyla çalışan takımlarda kuvvet basınca göre ayarlanır. Basınçla çalışmayan takımlarda da hassas bir saat yardımıyla verilen paso miktarına göre kuvvet hesaplanır. Literatürdeki çalışmalar da bu parametrelerin çeşitli kombinasyonlarını yapıp, yüzey bütünlüğü, yorulma ve çatlak ilerleme performansı gibi başlıca konulara değinilmiştir.

Parlatılmış parçanın iç bölgesinde artık çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmelerin değerleri işlem parametrelerine göre farklılık göstermektedir. Oluşan kalıntı gerilmeler, parlatılmış yüzeyin mukavemetini artırır (Akkurt,2013). Üretilmiş bir parçanın yorulma mukavemeti, yük taşıma kapasitesi, sürtünme vb. gibi özellikleri, yüzey topografyasına, sertlik değerine, derinlik boyunca oluşan kalıntı gerilmelerine ve işlemeden kaynaklı birim şekil değişimlerine bağlıdır (El-Axir, 2000). Ezerek parlatma işlemi sayesinde malzemenin hem yüzey pürüzlülüğünde iyileşme hem de kalıntı gerilmelerden kaynaklı yorulma özelliklerinde artış meydana gelmektedir. Ezerek parlatma, kalıplarda, şaftlarda, türbin kanadı bağlantı deliklerinde, türbin kanatlarında, çeki kollarında, kaynaklı bağlantılar ve rulmanlı yatak yüzeylerinde uygulanabilmektedir (Aviles ve ark. 2013).

Bu çalışmada da tekrarlı gerilmeler altında çalışan malzemelerin yorulma ömrüne EP'nin katkısı araştırılmıştır. Bu kapsamda literatürde parlatma işleminin yorulmaya ve diğer malzeme özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Tezde ikinci kısımda eksenel (basma-çekme) yorulma testi yapılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalarda eksenel yorulma testi yapan çok az sayıda çalışma bulunmuştur. Onun aksine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu dönel eğilmeli yorulma testi kullanmıştır.

Boozarpor ve ark. (2021) 6061 Alüminyum malzemesinden üretilen 8 mm çapında düz mil şeklindeki numuneler çoklu bilyelere sahip makaralar ile parlatılmıştır. Çalışmada ele alınan parametreler sırasıyla; parlatma derinliği, bilye sayısı, parlatma hızı ve ilerleme miktarıdır. Bu parametrelere bağlı olarak performans kriterleri ise; yorulma ömrü, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilmeler ve malzeme sertliğidir. Varyans analizi ile parametrelerin etki düzeyi hesaplanmıştır. En iyi yüzey şartlarına ve en uzun ömür değerine sahip olan "optimum parametreler" cevap yüzeyi yöntemi ile belirlenmiştir. Belirlenen optimum parametreler ile numune tekrar parlatılmış, yüzey ölçümleri yapıp eksenel yorulma testi gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için tornalanmış ve parlatılmış numuneler kullanılmıştır. Optimum şartlarda parlatılmış numuneler, tornalanmış numunelere göre 3 kat fazla ömre sahip olmuştur (Şekil 2.15). Ayrıca ilerleme, bilye sayısı ve parlatma hızının sırasıyla yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme ve sertlik üzerinde büyük etkisi olan parametreler olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.15 Tornalanmış ve farklı koşullarda parlatılmış numunelerin yorulma ömür grafiği (Boozarpor ve ark. 2020)

Hua ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada finiş tornalama (FT) ile düşük plastisiteli parlatma (LBP) proseslerinin kombinasyonu yoluyla işlenmiş Inconel 718'in yüzey topografyası, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertliği, faz değişimi ve artık gerilmeler gibi yüzey bütünlüğü özellikleri araştırılmıştır. Ardından, işlenmiş Inconel 718'in yorulma performansı, tek eksenli basma-çekme yorulma testleri ile incelenmiştir. Son olarak, yüzey bütünlüğünün Inconel 718'in yorulma performansı üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. FT işlemine kıyasla LPB ile yorulma ömrü %82,4 oranında iyileştirilmiştir.

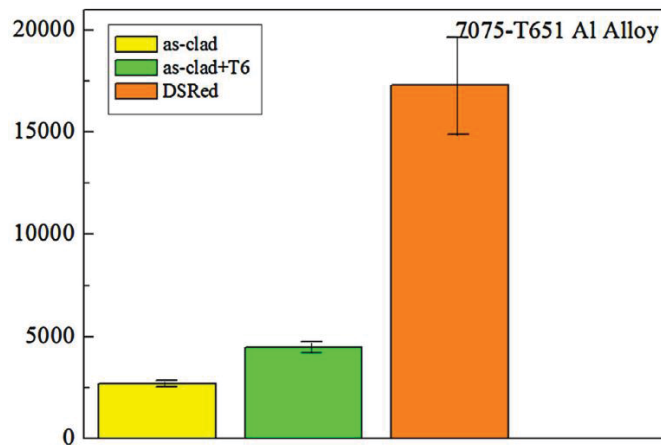
Bu iyileşme artan sertlik değerleri ve azalan yüzey pürüzlülük değerleri ile doğru orantılı bir şekilde ilerlemiştir.

Literatürde sık rastlanmayan eksenel yorulma testleriyle alakalı sadece iki tane ezerek parlatma prosesinin araştırıldığı çalışma bulunmuştur. Bu iki çalışmadaki etkiler ise Çizelge 2.2’de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.2 Ezerek parlatmalı eksenel yorulma testi yapılan güncel çalışmalar

Çalışma Yazarı	Yorulma Testi	Malzeme	Yüzey işlemi	Performans Kriteri	Yorulma Ömründeki Artış
Boozarpoor ve ark. (2021)	Eksenel	6061 T6 Al	Çok bilyeli ezerek parlatma	1- Yüzey pürüzlülüğü 2- Kalıntı basma gerilmeleri 3- Yüzey sertliği 4- Yorulma ömrü	300%
Hua ve ark. (2019)	Eksenel	Inconel 718	Bilyeli ezerek parlatma	1- Yüzey pürüzlülüğü 2- Kalıntı basma	82.40%

Sonuçlara göre parlatma işleminin iki farklı malzemede tek eksenli yük altında yorulma ömrünü iyileştirdiği bariz görülmektedir. Buradaki ömürdeki iyileşme değerleri ilk çalışmada %300 iken diğer çalışmada %82,40 bulunmuştur. Malzeme, parlatma takımının farklı olması ve parlatma parametrelerindeki farklılık yorulma ömründeki artışlardaki farklılığın temel sebepleri olarak gösterilebilmektedir.



Şekil 2.16 Lazer kaplanmış alüminyum numunelerin yorulma ömür grafikleri (Zhuang ve ark., 2014)

Zhuang ve ark. (2014) farklı olarak düz plaka şeklindeki numunelerin ölçü kısmına lazer kaplamıştır. Çalışmada sadece lazerle kaplanmış, lazerle kaplandıktan sonra ısıtıl işlem görmüş ve ezerek parlatılmış olmak üzere 3 farklı test numunesi kullanılmıştır. Kum saati şeklindeki standart düz numuneler parlatıldıktan sonra tek eksenli yorulma testine tabii tutulmuştur. Çalışmada ezerek parlatmanın parametreleri üzerine durulmayıp literatüre göre belirlenen parametrelerle parlatma işlemi yapılmıştır. Buna göre sadece lazer kaplı numuneye göre (as clad) parlatılmış numunenin ömrü (DSRed) %540 oranında artış göstermiştir (Şekil 2.16). Isıl işlem yapılmış numune (as clas+T6) ise sadece lazer kaplanmış numuneye göre %40 daha fazla ömre sahiptir. Burada alüminyum alaşımlarındaki ısıtıl işlemin yorulma üzerindeki etkisi göz ardı edilemez bir oranda çıkmıştır.

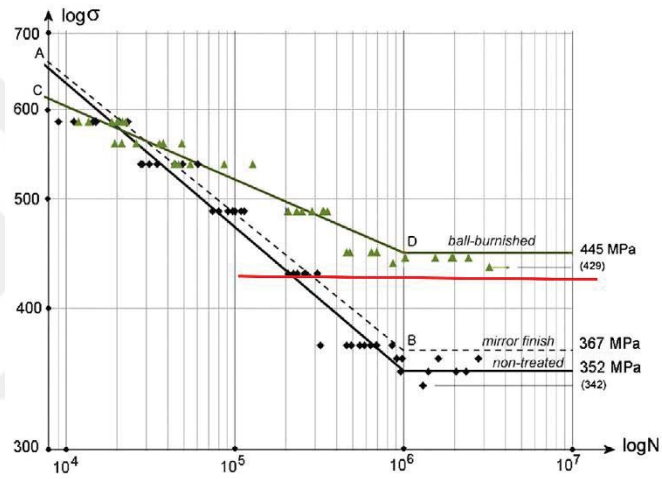
Avilés ve ark. (2013) yaptıkları kapsamlı çalışmada AISI 1045 çeliğinin bilyalı parlatma ile hem yorulma ömürlerinin hem de malzeme yüzey bütünlük değerlerini karşılaştırmıştır. Karşılaştırmaların yapılabilmesi için talaşlı imalat ile üretilen parlatılmamış silindirik numuneler kullanılmıştır. Bu kapsamda numunelerdeki tane boyutları, yüzey pürüzlülük değerleri, sertlik ve kalıntı gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 2.3’de yüzey bütünlüğüne ait sonuçlar verilmiştir. Buna göre parlatma ile 5,6 kat daha pürüzsüz yüzey elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün önemli olduğu imalatlarda sadece talaşlı imalatın yetersiz kalabileceği bu tarz çalışmalarda gösterilmiştir. Yüzey sertliğinde ise oluşan çukurların ezilmesi sonucu artış gözlemlenmiştir. Tornalanmış numuneye göre %18,8 sertlik artışı gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.3 Tornalanmış ve bilyalı parlatılmış numunelerin yüzey bütünlük ve kalıntı gerilme değerleri (Avilés ark., 2013)

		Non-treated specimens		Ball-burnished specimens	
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4
Tensile tests	Diameter (mm)	8	8	8	8
	σ_{ut} (MPa)	870	872	869	863
	σ_{yp} (MPa)	726	730	725	727
Surface hardness	HBN	278	274	326	331
Surface roughness	R_a (μ m)	0.68		0.12	
Estimation of grain size	Average of intercepts/0.5 mm	33.6		54.3	
	Grain size G (ASTM)	8.5		10	
	Grain size (μ m)	$\approx 19-20$		$\approx 9-12$	
Longitudinal residual stresses versus depth		Depth (mm)	Stress (MPa)	Depth (mm)	Stress (MPa)
		0.000	-65 ± 7	0.000	-590 ± 10
		0.017	-144 ± 7	0.020	-358 ± 6
		0.039	-95 ± 12	0.048	-352 ± 7
		0.067	-20 ± 14	0.077	-329 ± 5
		0.094	-12 ± 6	0.102	-292 ± 7
		0.161	-7 ± 6	0.166	-225 ± 6

Kalıntı gerilmelerde ise parlatmanın etkisi oldukça yüksek çıkmıştır. Hem kalıntı gerilmenin etki ettiği yüzeyden olan uzaklık artmıştır hem de gerilme değerlerinde oldukça yüksek artış görülmektedir.

Yüzeydeki kalıntı gerilmelere bakıldığında tornalanmış numune 65 MPa gerilme görülürken parlatılmış numunede bu değer 9,07 kat artarak 590 MPa çıkmıştır. Aynı şekilde kalıntı gerilmenin etki ettiği uzaklık ise tornalanmış numunede 0.370 mm olurken parlatılmış numunede bu değer 0.411 mm ölçülmüştür. Numuneler ayrıca dönel eğilmeli yorulma testine tabii tutulmuştur. Numunelere ilk olarak akma gerilmesinin %90 ı kadar (650 MPa) kuvvet uygulanmıştır. Daha sonra numune sonsuz ömre ulaşana kadar bu gerilme değerleri kademeli olarak azaltılıp S-N Wöhler eğrisi çizilmiştir (Şekil 2.17).

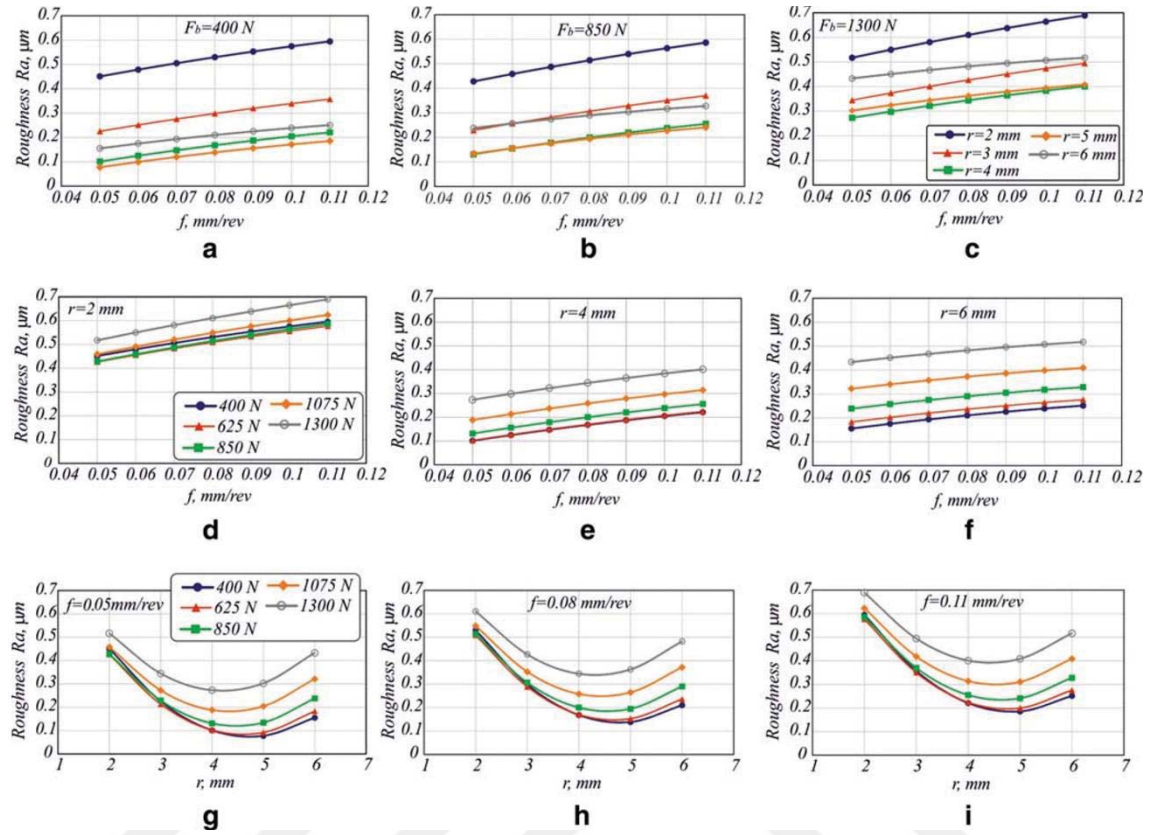


Şekil 2.17 Bilyalı ezerek parlatılmış ve tornalanmış numunelerin Wöhler eğrisi (Avilés ve ark., 2013)

Eğrideki sonuçlara göre yorulma dayanımı %21,25 oranda artış göstermiştir. Parlatılan numunenin 1 milyon çevrim yaparak sonsuz ömre ulaştığı yerden yatay bir çizgi çekildiğinde aynı gerilmede tornalanmış numunenin sadece 30000 çevrim yaptığı görülmüştür. 450-460 MPa değerlerinde görülen bu durumda parlatma işlemi ile yorulma mukavemeti 320-325 MPa artmıştır.

Duncheva ve ark. 2020 diğer çalışmalara göre farklı parlatma takımıyla çalışmışlardır. Kullanılan takım büyük ve farklı köşe radyüslere sahip makaralı takımdır. Çalışmada parlatma kuvvetinin, parlatma takım radyüslerinin ve ilerleme miktarının; yüzey pürüzlülüğü, sertlik, kalıntı gerilme değerlerine ve yorulma ömürlerine olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın özgün yanı kullanılan takımdır. Genel itibariyle literatürle basınçlı bilyeli ve ezerek parlatma takımları kullanılmıştır. Her bir parametrenin üç farklı

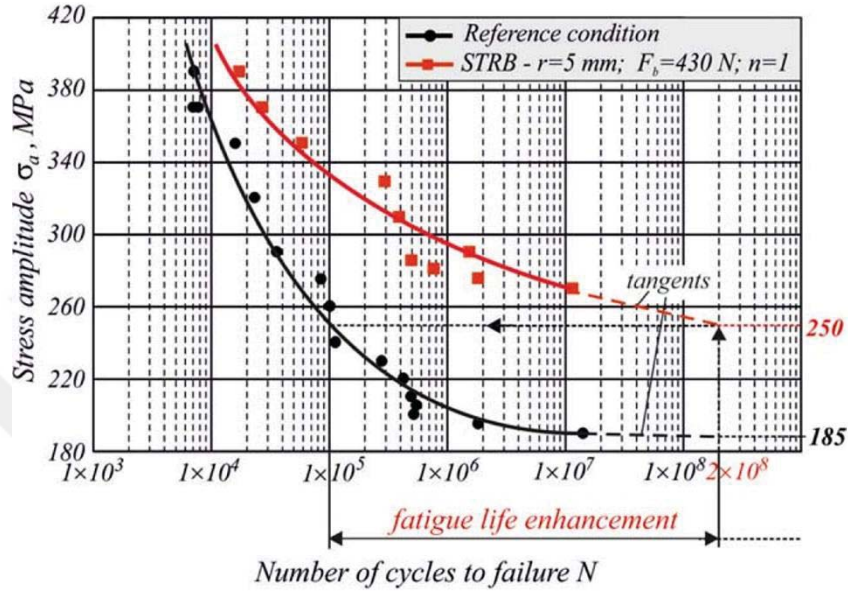
düzeyi olup çalışmada tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Şekil 2.18’de parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne farklı etkileri gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Kuvvet, takım radyüsü ve ilerleme değerlerine göre çıkan yüzey pürüzlülük değerleri (Duncheva ve ark. 2020)

a,b ve c grafiklerinde 3 farklı kuvvette farklı radyüslere sahip makaraların yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Sonuçlara göre tüm kuvvetlerde 4 ve 5 mm radyüslere sahip makaralarda minimum yüzey pürüzlülüğü çıkmıştır. Ayrıca uygulanan parlatma kuvveti de arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerinde artma meydana gelmiştir. d, e, ve f grafiklerinde ise 3 farklı makara yarıçapına bağlı olarak kuvvetlerin ve ilerlemenin pürüzlülüğe etkisi gösterilmiştir. 9 grafikten de anlaşıldığı üzere ilerleme arttığında yüzey pürüzlülüğünde ciddi artışlar meydana gelmektedir. En uygun makara yarıçapı olan 4 mm lik grafiğe bakılırsa (e), 400 ve 625 N üst üste gelmektedir. 1300 N lik en yüksek kuvvetteki parlatmaya göre 400 ve 625 N luk parlatma neredeyse 3 kat daha az pürüzlü çıkmıştır. Son olarak ise 3 farklı ilerleme de yarıçapların ve kuvvetin etkisi gösterilmiştir. Daha önceden söylenildiği üzere 4-5 mm yarıçaplı makaralar, en düşük ilerleme olan 0.05 mm/dev ve en düşük kuvvet olan 400 ve 625 N parlatma kuvveti en iyi sonuçları veren parametre seviyeleridir. Çalışmadaki paso sayısı sonuçlara çok fazla etkide

bulunmamıştır. 6 paso parlatmak yerine daha az pasoda parlatma da neredeyse aynı etkiyi göstermiştir. Varyans analizi ile optimum parametreler belirlenip bu parametreler ile yorulma testleri yapılmıştır. Optimizasyondaki performans kriteri ise minimum yüzey pürüzlülüğü, maksimum sertlik ve maksimum kalıntı gerilme değeridir. Tortalanmış referans numuneler ile parlatılmış numunelerin Wöhler eğrileri Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19 Tortalanmış ve optimum şartlarda parlatılmış numunelerin Wöhler eğrisi (Duncheva ve ark. 2020)

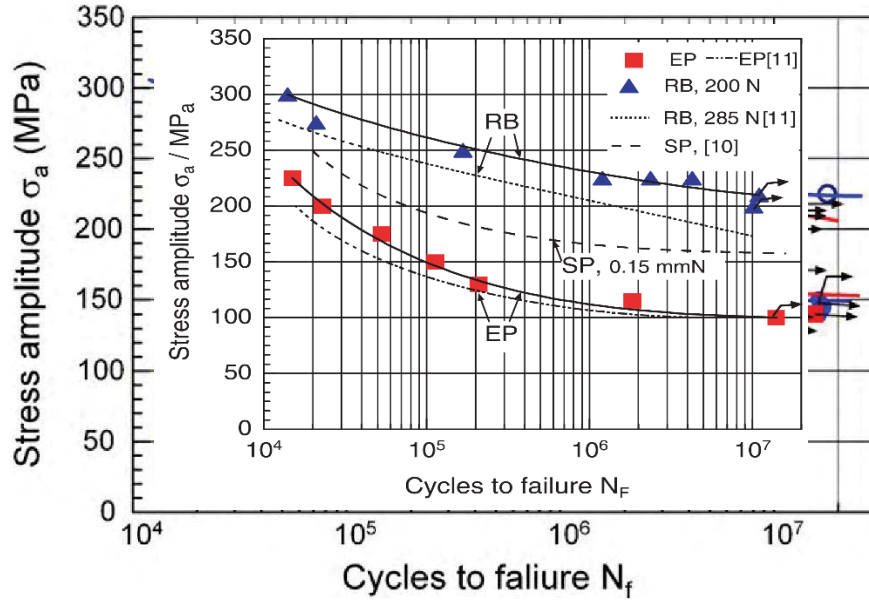
Referans numunede yorulma sınırı 185 MPa çıkmıştır. $r=5$ mm makara ve 430 N kuvvet ile parlatılan numunede ise bu değer 250 MPa'a yükselmiştir. Bu da yorulma sınırının %35,1 oranında arttığını göstermektedir. Yüksek gerilmelerde çevrimler birbirine benzer oranda gitse de gerilmeler düştükçe parlatmanın yorulma üzerindeki etkisi daha belirgin ortaya çıkmıştır.

Gardin ve ark. (2006) diğer çalışmalara göre farklı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada ezerek parlatma işleminin çatlak ilerlemesine olan etkisi araştırılmıştır. Çatlak ilerlemesinin bölgesel olabilmesi için çentikli silindirik numuneler kullanılmıştır. 3 farklı numune kullanılmıştır. Bunların ilki talaşlı imalatla işlenmiş olup diğer ikisi ise RB1 ve RB2 adı verilmiş parlatılmış numunelerdir. RB2, RB1 parlatma şartlarının iki katı olacak şekilde yapılmıştır. İşlenmiş numunelerde gözlenen çatlaklar 50.000 çevrimden sonra büyük boyutlara ulaşmıştır. Yaklaşık olarak aynı hasar seviyesine ulaşmak için RB1 numuneleri 300.000 çevrim gitmiştir. Ayrıca, RB2 numunelerindeki aynı yükleme için, 1 milyon çevrimden sonra, aynı boyutta çatlak gelişmediği için test durdurulmuştur.

Dolayısıyla, beklendiği gibi, silindirle parlatma işleminin, yorulma çatlak kinetiğini yavaşlatan faydalı bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Mohamed ve Wagne (2016) ise ezerek parlatma ile bilyalı dövme proseslerinin yüzey bütünlüğü ve yorulma performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Ayrıca her iki proses için de optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu iki prosesi karşılaştırmak için hassas tornalanmış ve daha sonra elektro polisaj çekilmiş numuneler kullanılmıştır. Numuneler 7 farklı barda 20 saniye ve bilyeler numune yüzeyine 90 derecede vuracak şekilde bilyalı dövme işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminde ise ilerleme ve devir sabit kalıp 6 farklı basınçta çalışılmıştır. Yorulma sınır mukavemetinde Bilyalı dövme %36 artış gösterirken bu değer RB de %61'e çıkmıştır. Şekil 2.20'de üç farklı işlem için elde edilen Wöhler eğrisi ve yüzeyden olan uzaklığa bağlı kalıntı gerilme grafiği verilmiştir. Yorulma dayanımındaki maksimum iyileşme ezerek parlatma işleminde görülmüştür. Bu iyileşmenin en büyük kaynağı kalıntı gerilmedeki artış olarak gösterilmektedir. Bilyalı dövmedeki iyileşmenin az olması ise basınçtan kaynaklanan düşük yüzey pürüzlülüğü ve oluşabilecek mikro çatlaklardan kaynaklandığı belirtilmektedir.

Zhang ve Lindemann (2005) farklı çalışmalarda magnezyum alaşımlı AZ80 malzemeden üretilmiş numunelere çeşitli yüzey işlemleri yapmıştır. Bunlardan biri de bilyalı dövme işlemidir. Daha sonra aynı malzeme için ezerek parlatma işlemi uygulayıp bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerle karşılaştırma yapmıştır. Her iki proses için de referans olarak polisaj çekilmiş numuneler kullanılmıştır ve karşılaştırmalar bu numunelere göre yapılmıştır. Yüzey işlemlerinden sonra RB'de maksimum kalıntı gerilme 345 MPa çıkarken SP ile maksimum 75 MPa değerine çıkabilmiştir. Çizelge 2.4'te her iki işlem için yüzey bütünlüğüne ait değerler verilmiştir. Sonuçlara göre RB sertlik artışında, kalıntı gerilme değerlerinde ve yüzey pürüzlülüğünde daha iyi sonuç veren yüzey işlemi olmuştur.



Şekil 2.20 Magnezyum alaşımlı numunelerin ezerek parlatma ile çıkarılmış Wöhler eğrisi (Zhang ve Lindemann 2005)

Çizelge 2.4 Bilyalı dövülmüş ve ezerek parlatılmış numunelerin yüzey bütünlük değerleri (Zhang ve Lindemann 2005)

Surface treatments	Maximum residual stress (MPa)	Surface microhardness increase (%)	Maximum deformation depth (µm)	Surface roughness (R_y) (µm)
Shot peening [10]	-100	~50	200	~6-20
Roller burnishing	-350	~80-100	700-800	~3-4

Dönel eğilmeli yorulma sonuçlarına göre ise ezerek parlatılan numunenin yorulma dayanımı polisaj çekilmiş numuneye göre %110 artmıştır. Şekil 2.21’te polisaj çekilmiş, bilyalı dövülmüş ve ezerek parlatılmış numunelere ait Wöhler eğrileri verilmiştir. Polisaj çekilen numunenin yorulma dayanımı 100-110 MPa aralıklarındayken bu değer BD’de 160 MPa, EP’de ise 220 MPa çıkmıştır. Ayrıca mikro sertlikteki artışında yorulma açısından çok etkili bir etken olduğu savunulmuştur.

Yine aynı yazar Zhang ve ark. (2010) ezerek parlatma işleminin sıcak haddelenmiş magnezyum alaşım malzemesinin yorulma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ham haldeki ve ısıtıl işlem görmüş numuneleri EP ile parlatarak birbirleri arasındaki yorulma ömür ve yorulma dayanım farkları belirlenmiştir. Aynı şekilde mikrosertlik, kalıntı basma gerilmesi ve yüzey pürüzlülükleri de karşılaştırılmıştır. Yorulma anlamında ısıtıl işlemin temin haldeki malzemeye göre herhangi bir etkisi görülmemiştir. Şekil 2.20’te hem temin haldeki hem de ısıtıl işlemli numunelerin Wöhler eğrileri verilmiştir. Burada görülüşü üzere hem EP’de hem de haddelenmiş numunelerin

yorulma ömrüne ısıt işlemin az da olsa pozitif etkisi görölmektedir. EP'li numunenin dayanım sınırı haddelenmişe göre %50 artarken ısıt işlemlı numuneye göre %36 artış göstermiştir.

Taranan literatür çalışmaları genel olarak yorumlandığında ezerek parlatma işleminin hem yüzey bütünlüğü özelliklerine hem de yorulma performansına olumlu etkisinin olduğı anlaşılmaktadır. Çizelge 2.5'te literatürde ezerek parlatma ile malzemelerdeki yorulma performansının incelendiğı çalışmaları ve detayları verilmiştir. Bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak ısıt işlemlle akma mukavemeti 1200 MPa değerine kadar artırılmış AISI 4340 malzeme kullanılmıştır. Ayrıca literatürde az sayıda bulunan eksenel yorulma testi kullanılmıştır.



Çizelge 2.5 Literatürde bulunan ezerek parlatmalı ve yorulma testi yapılan çalışmalar

Çalışma	Yorulma Testi	Malzeme	Kullanılan Yüzey işlemi	İncelenen Parametreler	Performans Kriteri
Boozarpoor ve ark. (2021)	Axial	6061 T6 Al	Silindirik makara ile parlatma	1. Makaradaki bilye sayısı 2. İlerleme miktarı 3. Fener mili hızı 4. Ezme derinliği	1- Yüzey pürüzlülüğü 2- Kalıntı basma gerilmeleri 3- Yüzey sertliği 4- Yorulma ömrü
Hua ve ark. (2019)	Axial	Inconel 718	Bilyeli parlatma	1.Ham halde tornalanmış 2. Üç farklı parlatma basıncı	1- Yüzey pürüzlülüğü 2- Kalıntı basma gerilmeleri 3- Yüzey sertliği 4- Yorulma ömrü
Zhuang ve ark. (2014)	Axial (3 Noktadan olabilir)	7075-T651	Bilyeli parlatma	1. Lazer kaplanmış 2. Lazer kaplanıp ısıtıl işlem uygulanmış 3. Lazer + Isıl işlem ve ball burnishing uygulanmış	1- Yorulma
Avilés ve ark. (2013)	Dönel eğilmeli	AISI 1045	Bilyeli parlatma	Parlatma işlemi	1.Yorulma 2. Kalıntı Basma Gerilmesi 3. Sertlik
Duncheva (2020)	Dönel eğilmeli	2024-T3 Al	Silindirik makara ile parlatma (Toroidal)	1. Parlatma takım radyüsü 2. İlerleme Miktarı 3. Parlatma kuvveti	1. Yüzey pürüzlülüğü 2. Mikrosertlik 3. Kalıntı basma gerilmeleri 4. Yorulma Ömrü
Gardin ve ark. (2007)	3 Noktadan eğilmeli	☒	Silindirik makara ile parlatma	1.Uygulanan kuvvet 2. Silindirik makara ile parlatma parametreleri	Çatlak ilerleme süresi
Othman ve ark. (2016)	Dönel eğilmeli	6061 T4 Al	Bilyeli dövme Silindirik makara ile parlatma	1.Bilyalı dövme yoğunlukları 2. RB basınçları	1.Yorulma sınırı 2. Mikrosertlik 3. Kalıntı basma gerilmesi
Zhang ve ark. (2005)	Dönel eğilmeli	AZ80	Silindirik makara ile parlatma	1.Kalıntı gerilmeler 2. Mikrosertlik 3. Yorulma ömrü	1. Yüksek yorulma sınırı 2. Yüksek kalıntı gerilme 3. Yüksek mikrosertlik
Zhang ve ark. (2010)	Dönel eğilmeli	Mg–12Gd–3Y	Silindirik makara ile parlatma	1.Kalıntı gerilmeler 2. Mikrosertlik 3. Yorulma ömrü	1. Yüksek yorulma sınırı 2. Yüksek kalıntı gerilme 3. Yüksek mikrosertlik

Literatürde parlatma işleminin yorulma ömrüne olan etkisi incelense de birçok çalışma malzemelerin yüzey özellikleriyle ilgilidir. Bu kapsamda, tez çalışmasındaki

parlatma işleminin parametrelerinin ve seviyelerinin belirlenmesi için yüzey özelliklerini inceleyen çalışmalar da incelenmiştir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te bu tarz çalışmalara ait parametreler ve seviyeleri verilmiştir. Buna göre önceki çalışmalarda en çok kullanılan parametre parlatma hızı, ilerleme miktarı ve parlatma kuvveti olurken paso sayısı en az incelenmiş parametredir.

Çizelge 2.6. Ezerek parlatma ile ilgili araştırmalar ve parametreleri

Parametre / Çalışma Başlığı	Parlatma hızı (dev/dk) (m/dk)	İlerleme miktarı (mm/dev)	Parlatma Kuvveti (N)	Parlatma Basıncı (MPa)	Ezme miktarı (mm)	Paso sayısı
Boozarpoor ve ark. (2021)	100	0.08	-	-	0.02	-
	500	0.16	-	-	0.05	-
	900	0.24	-	-	0.08	-
Hua ve ark. (2019)	60 m/dk	0.1	-	12	0.2	-
				15		
				18		
Duncheva (2020)		0.05	400	-	-	-
		0.08	850	-	-	-
		0.11	1200	-	-	-
Othman ve ark. (2016)	150 dev/dk	0.122	-	0.03		
				0.05		
				0.07		
				0.08		
				0.1		
				0.12		
Zhang ve ark. (2005)	-	-	50	-	-	-
			100	-	-	-
			150	-	-	-
			200	-	-	-
			250	-	-	-
			300	-	-	-
			350	-	-	-
			400	-	-	-
Boozarpoor ve ark. (2017)	50	0.08	10	-	-	1
	150	0.16	20	-	-	2
	250	0.24	30	-	-	3
	350	0.32	40	-	-	4
	450	0.4	50	-	-	5
Çobanoğlu ve ark. (2014)	355	0.2	1287	-	-	-
	500	0.4	1678	-	-	-
	710	0.6	2176	-	-	-
Elif MALYER (2017)	1200	400	-	-	0.025	1
		800	-	-	0.05	2
		100	-	-	0.1	4
John ve ark. (2017)	700	0.07	-	-	0.02	-
	900	0.1	-	-	0.03	-
	1000	0.13	-	-	0.04	-
Okada ve ark. (2015)	100	0.25	45	-	-	-
	200 m/dk	0.5	119	-	-	-
		1	240	-	-	-
			298	-	-	-

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında TÜRKAV Ar.Ge Firması tarafından üretilen Basınç Yükselticilerde (BY) yaşanan yorulma hasarlarının nedenlerinin araştırılması ve katmanlı silindir şeklinde imal edilen BY'lerin yorulma ömürlerinin uygulanacak yüzey işlemleri ile ne oranda artırılabilceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle tezde ilk başta küçük boyutlarda hazırlanmış katmanlı silindir şeklindeki deney numunelerine çevrimsel olarak yüksek basınçta sıvı uygulanmak suretiyle yorulma deneyleri yapılmıştır. Deney numunelerinin boyutları, yorulma hasarı yaşanan BY'lerde 450 MPa basınçta meydana gelen eşdeğer gerilme değerini, 400 MPa basınçta verecek şekilde belirlenmiştir. Bunun nedeni yorulma deneylerinde kullanılan basınç yükselticilerin ve sızdırmazlık elemanlarının ömürlerinin artırılmasıdır. Sonrasında iki adet numuneden birinin iç yüzeyine ezerek parlatma diğerine de bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Deneyler; sızdırmazlık, basınç yükselticilerdeki problemler ve numunelerin demontajında yaşanan güçlükler gibi birçok nedenden dolayı beklenenden çok uzun sürmüştür. Her iki numuneye ~36000 çevrim uygulanması 5-6 ay kadar süre almıştır. Bu nedenle tez önerisinde verilen metot değiştirilmiştir. Aynı malzemeye eksenel yorulma testi yapılmıştır. Numunelerin yüzeylerine yine ezerek parlatma işlemi uygulanmıştır. Tez kapsamında ezerek parlatma işleminin parametreleri olan parlatma hızı, ilerleme hızı ve ezme miktarının AISI 4340 malzemenin yorulma ömrüne ve yüzey özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Bu bölümde birincisi kısımda, kalın cidarlı silindirlerin ultra yüksek iç basınçtaki yorulma testleri, ikinci kısımda ise tek eksenli standart numunelerin yorulma testleri anlatılmıştır. Birinci bölümde önce ultra yüksek basınçlarda çalışan kalın cidarlı silindirlerin gerilme değerlerinin analitik ve nümerik hesabı, bu hesaplardan yola çıkarak BY'lerde oluşan gerilmelerle aynı gerilmelere sahip deney numunelerinin tasarımı ve imalatı anlatılmıştır. Daha sonra numunelere uygulanan ısıtma işlemi ve yüzey işlemleri açıklanmıştır. Ardından yorulma deneylerinin yapıldığı sistemin kurulumu ve sistemde kullanılan elemanlar tanıtılmıştır. İkinci kısımda ASTM standartlarındaki numunelerin hazırlanışı ve ısıtma işlemi anlatılmıştır. Daha sonra numunelere uygulanan parlatma işleminin parametreleri açıklanmıştır. Son olarak eksenel yorulma test sistemi anlatılıp yorulma testlerinin detayları verilmiştir.

3.1. Hidrolik Silindirlere Uygulanan Yorulma Deneyleri

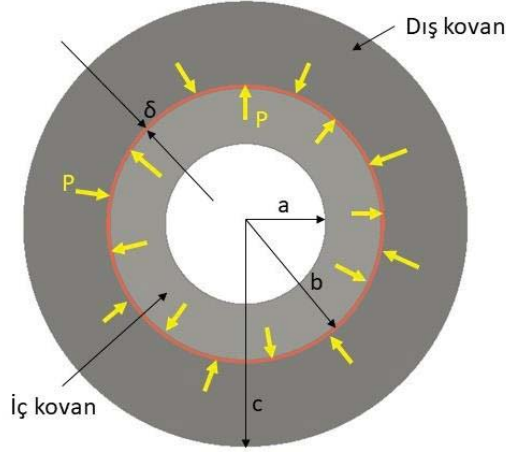
Tez çalışmasının birinci kısmında katmanlı hidrolik silindirler içerisine yüksek basınçlı sıvı uygulanarak yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerle ilgili numunelerin hazırlanması ve deneylerin yapılması aşağıda anlatılmıştır.

3.1.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Yüksek basınç yorulma deneyleri için tasarlanan numuneler, BY'lerin benzetimi olacağından öncelikle ultra yüksek basınçlarda BY'lerde oluşan eşdeğer gerilmeler hesaplanmıştır. Yeni üretilen numuneler de bu gerilme değerleriyle aynı değerleri görecektir şekilde tasarlanmıştır. Bu eşdeğer gerilmeler, literatürde de sıkça kullanılan Lamé denklemleriyle hesaplanmıştır (Harvey,1974). Lamé denklemleri sayesinde iç veya dış basınçtan kaynaklı, kalın cidarlı silindirlerde oluşan eşdeğer gerilmeler hesaplanabilmektedir. Ayrıca bu denklemlerle katmanlı silindirlerdeki sıkı geçme toleransına bağlı ara yüzey basınçları ve sıkı geçmeden kaynaklı gerilme değişimleri de hesaplanabilmektedir. Katmanlı olarak üretilen ve aralarında sıkı geçme alıştırmaya toleransı (δ) olan silindirler, birbirlerine ya preste ya da ısıtılarak geçirilmektedir. Ancak en çok kullanılan birleştirme işlemi ısıtılarak geçme işlemidir. Silindirlerin montajı için dış silindir ısıtılır ve içine iç silindir yerleştirilir. Montaj tamamlandıktan sonra soğumaya bırakılır. Bu esnada boyut farkından dolayı ara yüzeyde “sıkı geçme basıncı” (p) denilen basınç ortaya çıkar (Ugural,1995). Denklem 1’de iki farklı malzeme kullanılmış silindirlerin, Denklem 2’de ise aynı malzemeden üretilen iki silindirin sıkı geçmesi esnasında ortaya çıkan ara yüzey basıncının formülü verilmiştir (Harvey, 1984).

$$p = \frac{E_1 \cdot \delta}{\left(\frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} + \nu_1\right) \cdot b} + \frac{E_2 \cdot \delta}{\left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_2\right) \cdot b} \quad (1)$$

$$p = \frac{E \cdot \delta}{b} \cdot \frac{(b^2 - a^2) \cdot (c^2 - b^2)}{2b^2 \cdot (c^2 - a^2)} \quad (2)$$



Şekil 3.1 Sıkı geçirilmiş silindirlere boyutlandırma

Formülde verilen a , b ve c silindirlerin yarıçaplarını temsil etmektedir. Şekil 3.1’de iç içe geçirilmiş iki silindirin yarıçapları gösterilmiştir. İç silindirin iç yarıçapı a , dış yarıçapı ise b ’dir. Dış silindirin iç yarıçapı b , dış yarıçapı ise c ’dir. Genellikle dış silindirin iç çapı tam ölçü üretilir, iç silindirin dış çapına ise δ kadar sıkı geçme toleransı verilir. Hidrolik silindirlerdeki YBB silindirleri maksimum sıvı basıncına maruz kalan bölgelerdir. Kalın cidarlı silindirler iç basınca maruz kaldığında radyal ve teğetsel gerilmeler ortaya çıkar. Bu gerilmeler için Lamé eşitlikleri (Denklem 3 ve 4) kullanılmaktadır (Harvey, 1974).

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left[C_1 \cdot (1+\nu) - C_2 \cdot \frac{1-\nu}{r^2} \right] \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left[C_1 \cdot (1+\nu) + C_2 \cdot \frac{1-\nu}{r^2} \right] \quad (4)$$

Eşitliklerdeki E , elastiklik modülü, ν poisson oranı, C ise gerilme sabitidir. C_1 ve C_2 iç ve dış basınca göre değişen sabitler olup Denklem 5 ve 6’da gösterilmiştir. Analitik hesap yapılırken iç ve dış basınca göre sabitler değişmektedir.

$$C_1 = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{a^2 \cdot p_i - b^2 \cdot p_0}{b^2 - a^2} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2 \cdot (p_i - p_0)}{b^2 - a^2} \quad (6)$$

Burada, a iç silindir iç çapını, b iç silindir dış çapını, p_i iç basıncı, p_0 ise dış basıncı gösterir. C_1 ve C_2 değerleri, Denklem 3 ve 4’te yerine koyulduğunda radyal ve teğetsel gerilmeler;

$$\sigma_r = \frac{(a^2 \cdot p_i) - (b^2 \cdot p_0)}{b^2 - a^2} - \frac{(p_i - p_0) \cdot a^2 \cdot b^2}{r^2 \cdot (b^2 - a^2)} \quad (7)$$

$$\sigma_t = \frac{(a^2 \cdot p_i) - (b^2 \cdot p_0)}{b^2 - a^2} + \frac{(p_i - p_0) \cdot a^2 \cdot b^2}{r^2 \cdot (b^2 - a^2)} \quad (8)$$

şeklinde elde edilmektedir.

Lame eşitliğindeki formüller, silindirin iç ve dış basıncına göre ikiye ayrılmıştır. Hem iç hem de dış basınca maruz kalan silindirlerde her iki formülden gelen gerilmeler süperpoze edilir. Çalışmada kullanılan yüksek basınç silindirlerinde sadece iç basınç olduğu varsayılır. Ancak katmanlı silindirlerde sıkı geçmeden dolayı iç silindire dış silindir tarafından bir dış basınç uygulanması söz konusudur. Bu nedenle Lame eşitlikleri kullanılırken, iç basınç (p_i), sıvının yüzeye uyguladığı basınç olarak alınır, dış basınç (p_0) ise sıkı geçmeden dolayı oluşan yüzey basınç değeri olarak alınır.

Silindirlerde yalnızca iç basınç altında oluşan gerilmeler

Yalnızca iç basınca maruz kalan silindirlerin gerilme hesabı yapılırken Denklem 7 ve 8'de dış basınç (p_0) sıfır alınır. Radyal ve teğetsel gerilmeler Denklem 9 ve 10'a indirgenir. Yalnızca iç basınçtan kaynaklı oluşan radyal ve teğetsel gerilmeler r değerinin minimum olduğu noktada ($r=a$) en yüksek seviyeye çıkmaktadır. Radyal gerilmeler basma gerilmesidir ve her zaman teğetsel gerilmeden daha düşük değere sahiptir. Teğetsel gerilme ise çekme ve silindir iç yüzeyindeki maksimum gerilmeleri oluşturmaktadır (Harvey, 1974).

$$\sigma_r = \frac{a^2 \cdot p_i}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) \quad (9)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 \cdot p_i}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) \quad (10)$$

Silindirlerde yalnızca dış basınç altında oluşan gerilmeler

Yalnızca iç basınca maruz kalan silindirlerin gerilme hesabı yapılırken Denklem 7 ve 8'de dış basınç (p_i) sıfır alınır. Radyal ve teğetsel gerilmeler Denklem 11 ve 12'a indirgenir. Katmanlı silindirlerdeki dış basınç sıkı geçmedeki genleşmeden kaynaklanmaktadır. Yükleme dışardan olduğundan dolayı buradaki her iki gerilme de basma gerilmeleridir. Ancak değer olarak teğetsel gerilmeler radyal gerilmelerden her zaman büyük olmaktadır. Maksimum teğet gerilmeleri iç silindirin yüzeyinde meydana gelmektedir.

$$\sigma_r = -\frac{p_0 \cdot b^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (11)$$

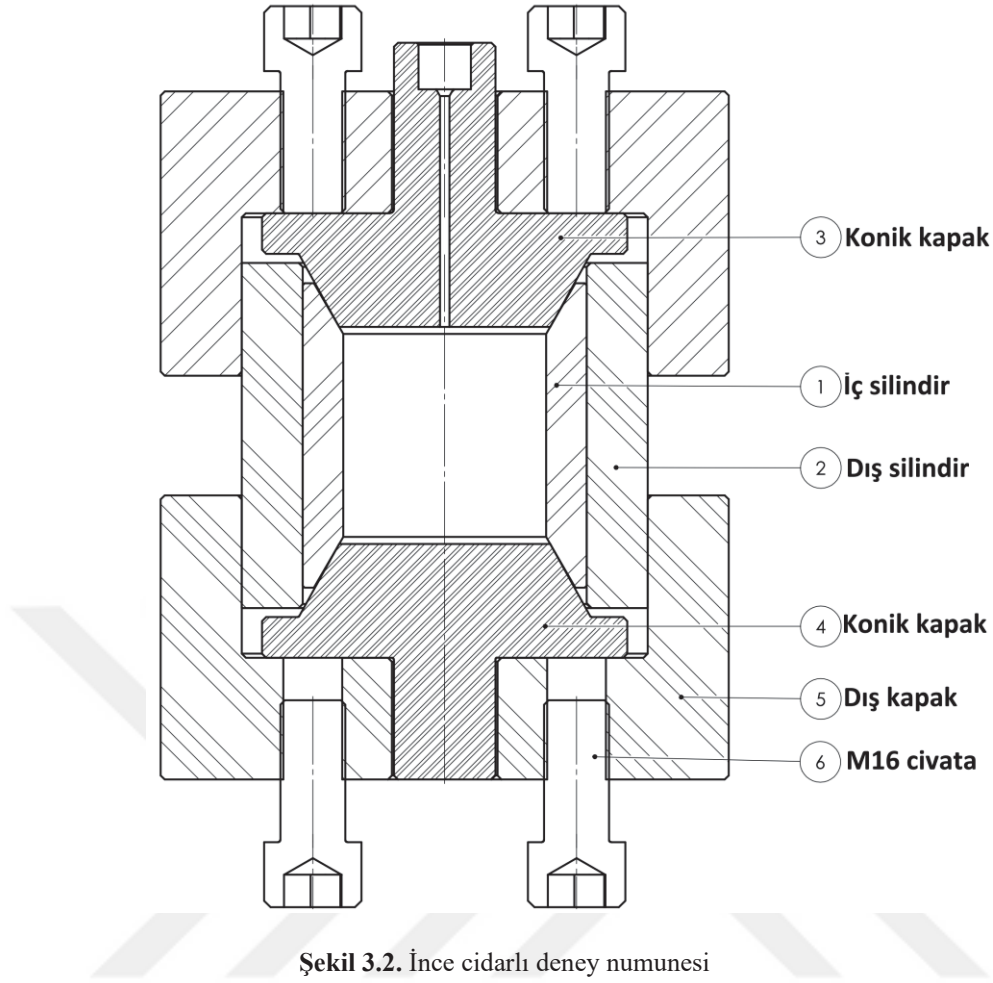
$$\sigma_t = -\frac{p_0 \cdot b^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (12)$$

Denklem 7 ve 8’de iç basınç ve sıkı geçmeden kaynaklı dış basınç yerine konularak yada denklem 9 ve 10 ile denklem 11 ve 12 kullanılarak hesaplanan radyal ve teğetsel gerilmelerin süperpoze edilmesiyle eşdeğer gerilmeler analitik olarak hesaplanabilir. Yorulma hasarı yaşanan BY’de silindir boyutları Çizelge 3.1’de verilmiştir. BY’de 450 MPa basınç altında oluşan eşdeğer gerilmeleri analitik olarak 710 MPa değerinde hesaplanmıştır. Yaklaşık olarak aynı eşdeğer gerilme seviyesini 400 MPa basınç altında, daha küçük numune boyutları ile elde edebilmek için hesaplamalar yapılmış ve numune boyutları Çizelge 3.1’de görülen Tasarlanan silindir 1’deki gibi belirlenmiştir. Bu boyutlarla tasarlanan numunelerde, yaklaşık 696 MPa maksimum eşdeğer gerilme oluşmaktadır. Böylece yorulma deneylerinde yüksek sıvı basıncını uygulayan BY’lerin sızdırmazlık ömürlerinin artırılması hedeflenmiştir.

Çizelge 3.1. Yorulma hasarı yaşanan BY ve tasarlanan silindirlerde boyutlar

	Yorulma hasarı yaşanan BY	Tasarlanan silindir 1	Tasarlanan silindir 2
İç silindir iç	60 mm	50 mm	50 mm
İç silindir cidar	44 mm	30 mm	10 mm
Dış silindir	37.5 mm	30 mm	15 mm
Sıklık toleransı	0.05 mm	0.06 mm	0.06 mm

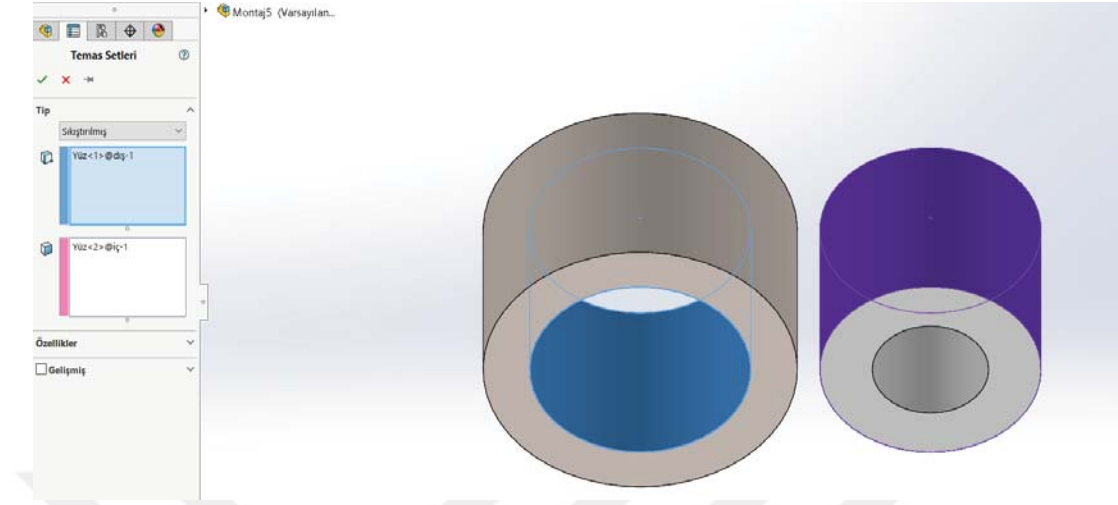
Çizelge 3.1’de boyutları verilen Tasarlanan silindir 1 ile 36-37 bin çevrim sayılarına ulaşıncaya kadar yaşanan birçok problem nedeniyle yaklaşık olarak 5-6 ay kadar süre geçmiştir. Yorulma deneylerinin süresini kısaltmak için cidarlı daha ince olan ve boyutları numuneler tasarlanmıştır (Şekil 3.2). Bu numunelerde montaj, demontaj ve sızdırmazlık problemlerinin daha az yaşanacağı düşünülmüştür. Ancak kalın cidarlı numunelerde 400 MPa basınçta konik sızdırmazlık kapağının yüzeylerinde sızdırmazlık sağlanabilmişken ince cidarlı numunelerde tam bir sızdırmazlık sağlanamamıştır. Bunun nedeni olarak cidar kalınlıklarının düşük olması nedeniyle silindirlerdeki sehmin ve esnemenin daha fazla olmasının konik yüzeylerin temasını engellemesi olduğu düşünülmüştür.



3.1.1.1. Hidrolik silindir boyunun seçimi

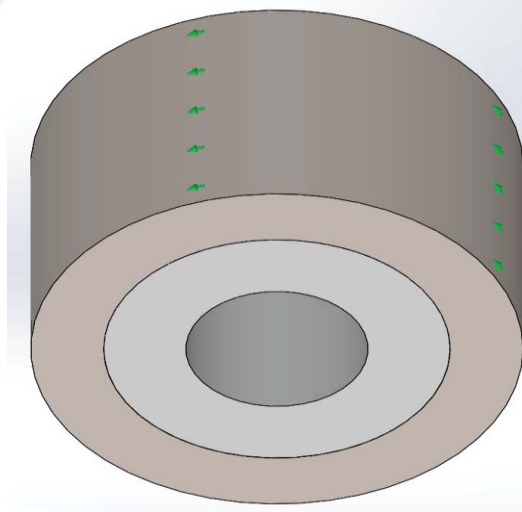
Düz kalın cidarlı silindirlerin gerilme hesabında yukarıda bahsedilen Lamé Denklemini güvenle kullanılmaktadır. Ancak daha karmaşık geometrili parçalarda tasarımın Sonlu Elemanlar Analizleri (SEA) ile destekli olarak yapılması daha pratik bir yaklaşımdır. SEA ile yapılan tasarımların güvenilirliklerinin doğrulanması için boyutları belirlenen deney numunelerine lineer statik SEA uygulanmış ve elde edilen gerilmeler analitik denklemlerden elde edilen gerilmelerle karşılaştırılmıştır. SE modellemesi Solidworks Simülasyon yazılımında yapılmıştır. İlk olarak iç ve dış silindire ait malzeme tanımlaması yapılmıştır. Malzeme tanımlamasında akma, çekme ve kopma mukavemet değerleri, poisson oranı ve elastiklik modülü girilmiştir. Analizlerde sıkı geçme işlemini tanımlamak için dış silindirin iç çap ölçüsüne tolerans verilmeden, iç silindirin dış çapına sıkılık toleransını ekleyerek modellenmiştir. Sonra program içindeki temas setleri kısmından 0.03 mm sıkılık toleransı ile sıkı geçirme işlemi yapılmıştır. Temas setleri

modülünde Şekil 3.3’de görüldüğü gibi tip olarak “Sıkıştırılmış” seçilmiştir. Yüzey seçiminde ise ilk olarak dış silindirin iç yüzeyi sonra iç çapın dış yüzeyi seçilmiştir.



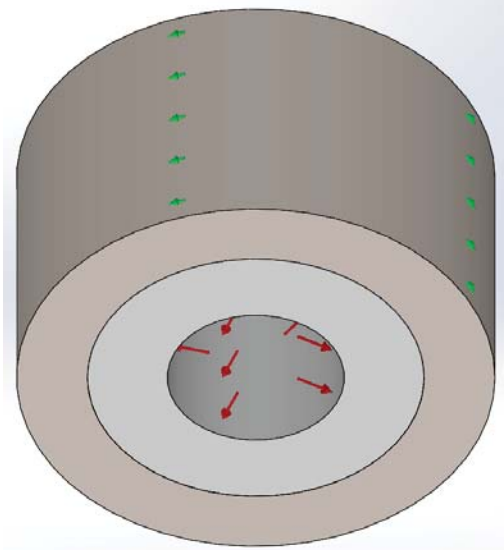
Şekil 3.3. Solidworks Simülasyon programında sıkı geçirme işlemi

Sıkı geçirme işleminden sonra silindirler Şekil 3.4’te görüldüğü gibi sadece dönme yönünde sabitlenmiştir. Parçalar birbirine geçirildiği için sadece dış silindire fikstürün verilmesi yeterli olmuştur.



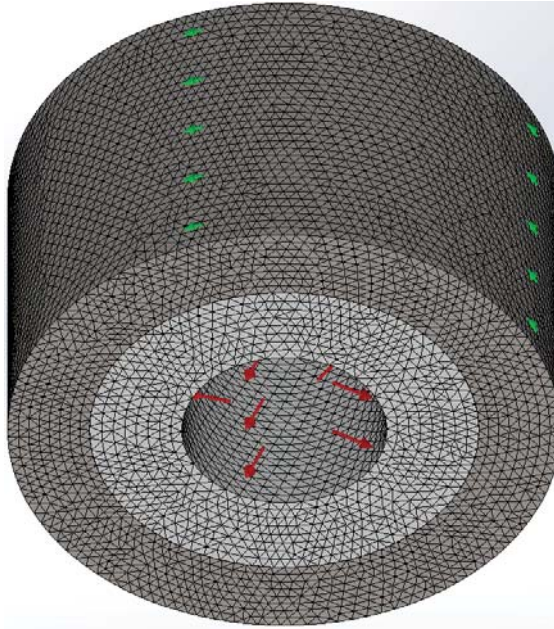
Şekil 3.4. Montajlanmış silindirlerin fikstürlenmesi

Fikstür ve sıkı geçme işleminden sonra iç silindirin iç yüzeyine 450 MPa ultra yüksek basınç uygulanmıştır. Basınç, programın harici yükler modülünde verilmiştir ve yüzeye dik olacak şekilde uygulanmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. İç basınç uygulanan katmanlı silindir

Sınır şartları ve yüklemeler tamamlandıktan sonra parçaların sonlu elemanlara bölünme işlemi yapılmıştır. Burada, 6 mm boyutunda eğrilik tabanlı 3B kuadratik elemanlar kullanılmıştır. Eğrilik tabanlı elemanların avantajı radyus ve küçük kenarlarda elemanı otomatik olarak küçültebilmektedir. Çalışmada silindirik bir yüzey olduğundan ve keskin kenar olmadığından elemanların boyutu sabit 6 mm'dir. Şekil 3.6'da sonlu elemanlara ayrılmış olan silindir verilmiştir.



Şekil 3.6. Sonlu elemanlarına ayrılmış katmanlı silindir

Silindir çapları belirlendikten sonra boyuna karar vermek için farklı boylarda silindirlere SEA yapılmıştır. Böylece silindir boyundaki değişimin silindirde oluşan maksimum eşdeğer gerilmeye etkisi araştırılmıştır. Boyları 150, 200, 250 ve 300 mm olan silindirlere yukarıda anlatılan modelleme şartlarında analizler uygulanmıştır. Bölüm 4.1’de verilen sonuçlara göre silindir boyunun gerilmeye etkisinin olmadığı görüldüğünden malzeme sarfıyatı olmaması için silindirin toplam boyu 70 mm seçilmiştir.

3.1.1.2. Numunelerin İmalatı

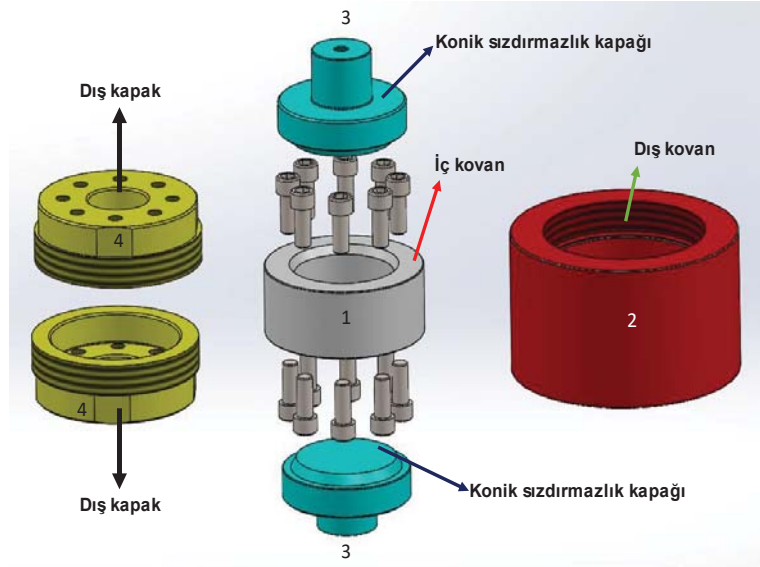
Basınçlı yorulma deneyleri sonucunda numune boyut ve tasarımında değişiklik yapma ihtimaline karşı ilk başta iki adet deney numunesi üretilmiştir. Üretimi yapılan deney numunelerinin geometrik parametreleri ve uygulanan yüzey işlemleri Çizelge 3.2’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deney numunelerinin geometrik parametreleri ve yüzey işlemleri

	Numune 1	Numune 2
İç silindir iç çapı	50 mm	50 mm
İç silindir dış çapı	110.06 mm	110.06 mm
Dış silindir iç çapı	110 mm	110 mm
Dış silindir dış çapı	170 mm	170 mm
Sıklık toleransı	0.06 mm	0.06 mm
Yüzey işlemi	Makaralı ezerek parlatma	Bilyalı dövme

Belirtilen boyutlara göre imal edilen hidrolik silindirlerin üretim aşamaları aşağıda verilmiştir.

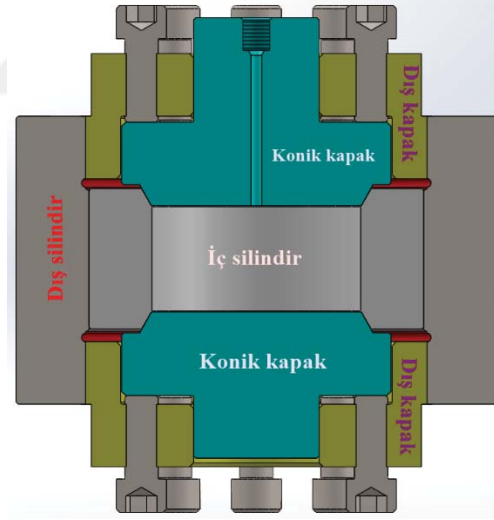
- Analitik ve nümerik olarak yüksek basınçtaki gerilmeleri hesaplanan ve tasarlanan deney numunelerinde Şekil 3.7’te görülen 1 numaralı konik sızdırmazlık kapakları ve 3 numaralı dış silindir ve ile 4 numaralı dış kapaklar için AISI 4140 ve iç silindir için 4340 kalitedeki malzeme satın alınmıştır.



Şekil 3.7 Tasarlanan deney numunesi ve parçaları

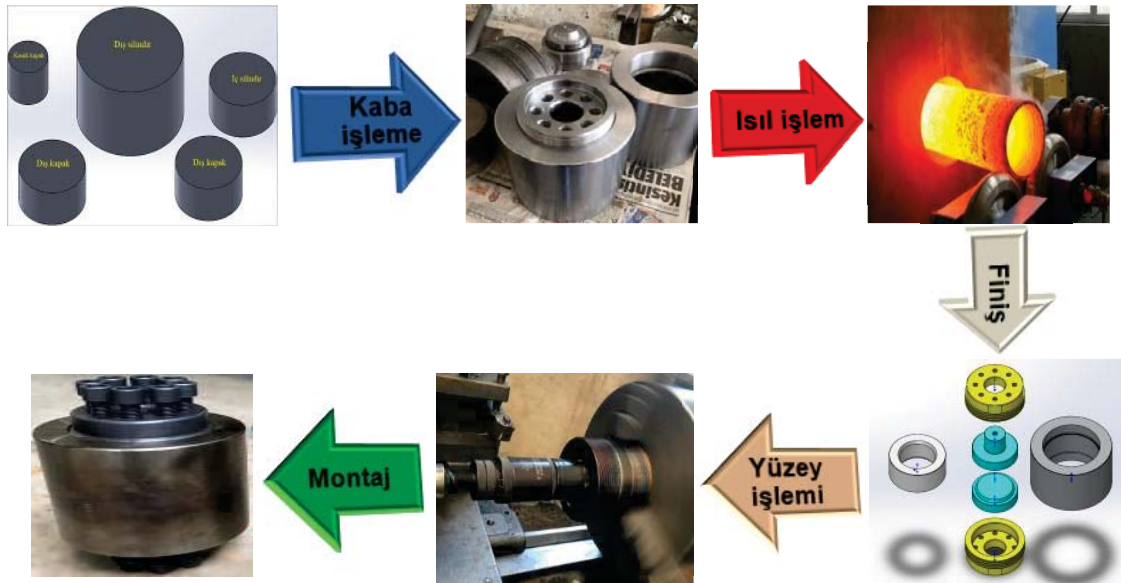
- Satın alınan malzemeler, universal torna kullanılarak, talaşlı imalat yöntemiyle, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi Naim Göncü Makine firmasında ısıtılma işleminden sonra ince işleme payı için 0.3 mm bırakılarak kaba olarak işlenmiş ve silindirler ile diğer bileşenler üretilmiştir. Isıl işleminden sonra ise ince işleme gerçekleştirilerek belirlenmiş olan toleranslara uygun olarak üretimler yapılmıştır. Sıkı geçme işlemindeki toleransların dar olmasından dolayı iç silindirin dış çapı istenilen çap değerine silindirik taşlama yapılarak getirilmiştir. Komparatör saati ile torna tezgahında salgısı ölçülen numunelerin çapında 0.01 mm maksimum salgı ölçülmüştür. EP yapılacak numunenin iç çapı parlatma takımının maksimum ezebileceği miktar olan +0.03 mm toleransında işlenmiştir. Bu toleransı universal tornada yakalamak zor olduğundan finiş işleminden sonra silindirik taşlama ile istenilen değerlere ulaşılmıştır.
- Kaba işlenen parçalara sırasıyla, konik sızdırmazlık kapakları 38 HRC, dış kapaklar 45 HRC, iç silindirler ise 42 HRC olacak şekilde ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlemin detayları ilerleyen bölümlerde verilmiştir.
- Isıl işleminden çıkan parçalara torna tezgahıyla ince işleme uygulanmış ve tasarlanan boyutlarda parçalar üretilmiştir.

- Ardından ilk iki deney numunesinden birinin iç silindire detayları Bölüm 3.1.5'te anlatılan makaralı ezerek parlatma diğerine ise bilyeli dövme yüzey işlemi uygulanmıştır.
- Parçalar üretildikten sonra, iç ve dış silindir sıkı geçme ile birbirlerine montaj edilmiştir. Şekil 3.8'de tasarlanan numunenin montaj kesit görüntüsü verilmiştir. İlk olarak dış silindir ısıtılarak iç silindire sıkı geçirilmiştir. Daha sonra iç silindire konik kapaklar yerleştirilmiş ve ardından dış kapaklar vidalanarak sıkılmıştır. Konik kapağın sızdırmazlığı tam sağlaması ve güvenlik açısından 8 adet M16 cıvata eksenel yönde konik kapaklara bastırmaktadır. Ayrıca dış kapaktaki görülen yüksek basınçlı sıvının aktarımı için bağlanacak nipele uygun delik ve dış ölçüleri Maximator firmasının boru ve delik bağlantı kataloğundan temin edilmiştir.
- Yüksek basınç devre elemanlarının da numuneye bağlanmasından sonra deney numunesi hazır hale gelmiştir.



Şekil 3.8 Deney numunesi kesit görüntüsü

Şekil 3.9'da numunelerin hazırlanmasındaki aşamalar şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 3.10'da imalatı ve montaj aşamaları tamamlanmış olan deney numunesi görülmektedir.



Şekil 3.9 Hidrolik silindir numunelerinin hazırlanış aşamaları

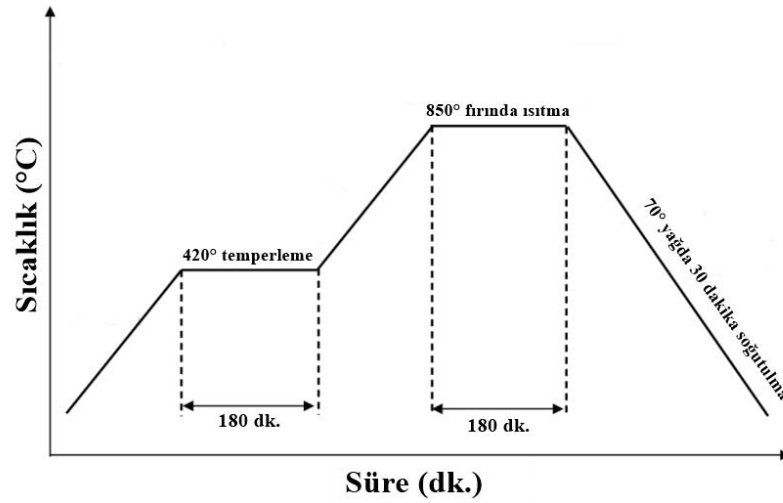


Şekil 3.10 Deney numunesi

Numunelerin ısıtılması

Her iki deney yöntemi için üretilen numunelere de aynı ısıtma işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.11’de AISI 4340 kalitedeki iç silindirlere ve standart yorulma test numunelerine uygulanan ısıtma işleminin özet grafiği verilmiştir. Diğer parçalara da mukavemet kazandırmak için konik sızdırmazlık kapakları 38 HRC, dış kapaklar 45 HRC, olacak şekilde ısıtma işlemi uygulanmıştır. Isıtma işlemi uygulaması Konya Teknik Isıtma İşlem firmasında

yapılmıştır. İç silindir numuneler 3 saat 420° temperlemeden sonra 850°'lik fırında 3 saat durmuş ve 70°'lik yağda 30 dakika soğutulmuştur.



Şekil 3.11 Numunelere uygulanan ısıtma işleminin özeti

Isıl işlem sonunda aksel yorulma deneyleri için üretilen numunelere çekme deneyleri yapılmış ve AISI 4340 malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. AISI 4340 malzemesinin mekanik özellikleri

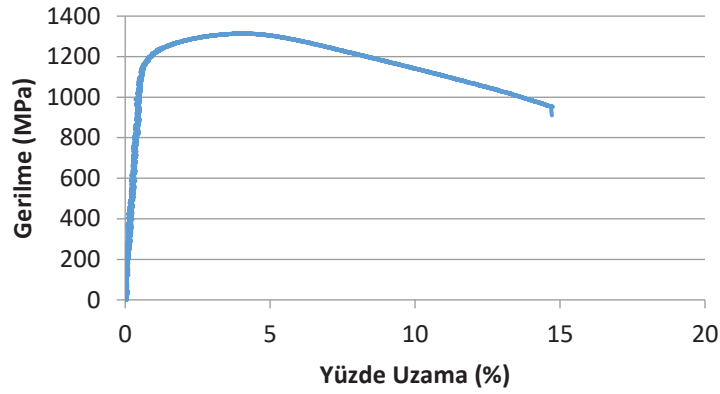
Akma Mukavemeti 1210 MPa

Çekme Mukavemeti 1350 MPa

Elastiklik Modülü 203 GPa

Yüzde Uzama (%) 14.7

Yine yapılan sertlik ölçümleri sonucunda iç silindirlerin sertlik değeri 41.8 HRC çıkmıştır. Isıl işlemler sonrasında elde edilen akma eğrisi **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** da verilmiştir. Çekme testleri ilk olarak Konya Teknik Üniversitesi Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. Ancak uzama değerinin sadece çenelerin hareketinden ölçülmesi nedeniyle akma mukavemetinde hata olduğunun farkına varılmış, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde deneyler tekrarlanmıştır.



Şekil 3.12. AISI 4340 malzemeye ait çekme deneyleri sonucunda elde edilen akma eğrisi

Numunelere uygulanan yüzey işlemleri

Deney numunelerinin iç silindirlerine Bilyalı Dövme (BD) ve Ezerek Parlatma (EP) olmak üzere iki farklı yüzey işlemi uygulanmıştır. Torres ve ark. (2013) AISI 4340 malzeme için bilyalı dövme (BD) prosesinin optimizasyonunu yapmıştır. Bu çalışmadaki optimum sonuçlar tez çalışmasındaki silindire uygulanmıştır. BD işlemi silindir içine yapılacağından Şekil 3.13'te gösterilen silindir içi BD aparatı temin edilmiştir. BD'de, S230 model 0.6-0.9 mm çap aralığında çelik bilyeler kullanılmıştır. 8 bar basınçta, silindir yüzeyine 90° gelecek şekilde bilyalar fırlatılmıştır.



Şekil 3.13 Silindir içi bilyalı dövme aparatı

EP işlemi Şekil 3.14’de görülen Yamasa marka DX3 model iç çap parlatma takımı kullanılarak, Konya Başaran Hidrolik firmasında gerçekleştirilmiştir. Takım üretici firmasının tavsiyesi üzerine parlatma işleminden önce silindirik iç taşlama ile numune iç çapında 0.03 mm ezme payı bırakılmıştır. Daha sonra üniversal tornanın aynasına numune bağlanmış, gezer puntaya parlatma takımı takıldıktan sonra devir ve ilerleme ayarlanmıştır (Şekil 3.15). Otomatik ilerlemeyle iç çap istenen değere gelecek şekilde ezme işlemi tamamlanmıştır. Ezilen numunelerin iç çap değerleri, iç çap komparatör saatiyle ölçülmüştür. Parlatmadaki ilerleme 0.1 mm/devir, parlatma hızı ise 750 dev/dk. seçilmiştir.



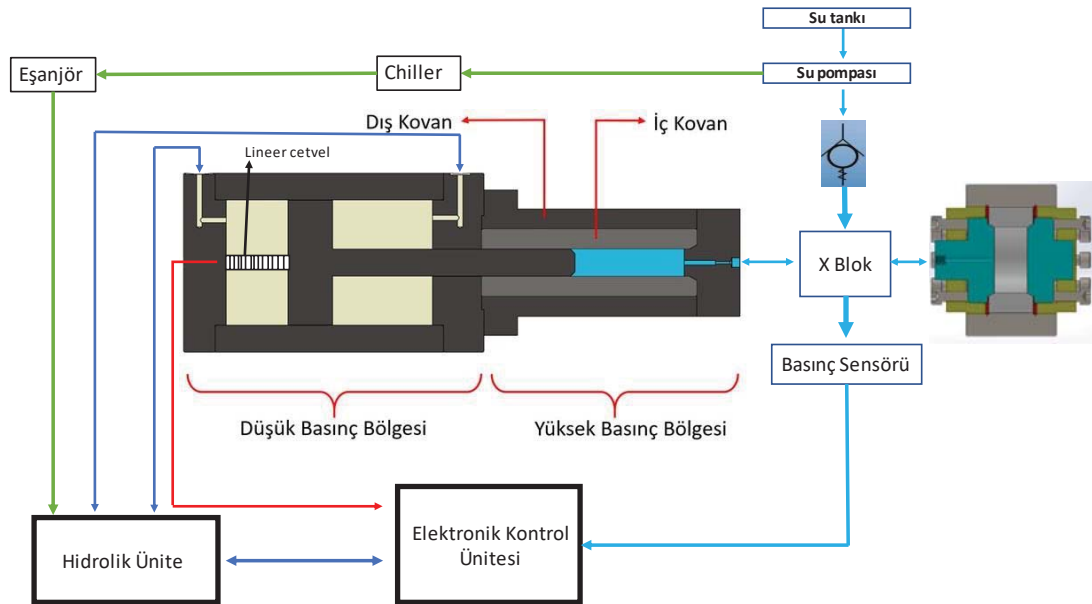
Şekil 3.14. Yamasa DX3 ezerek parlatma takımı (Anonim, 2021)



Şekil 3.15. Ezerek parlatma işlemi

3.1.2. Yorulma Deney Düzenekinin Tasarımı

Yorulma deney düzenekği ultra yüksek basıncın sağlandığı BY, hidrolik ve elektronik ünite, yüksek basınç sensörü, basınçsız suyun iletileceği su pompası, soğutucu ve yüksek basınç bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Yorulma deney düzenekği Şekil 3.16’te şematik olarak gösterilmiştir. Deneylerde TÜRKAV Ar-Ge firmasına ait olan çift etkili (ÇEBY) ve tek etkili (TEBY) olmak üzere iki farklı BY kullanılmıştır. Kullanılan TEBY 1 litre hacim ve 4500 bar basınç kapasitesine ÇEBY ise 0,1 litre hacim ve 4500 bar basınç kapasitesine sahiptir. Basınç yükselticiden elde edilen yüksek basınçlı sıvı, yorulma performansı araştırılan silindirlerin içerisine aktarılırken aşırı şekilde ısındığı için yine TÜRKAV Ar-Ge firmasına ait soğutma gurubu ile soğutulmuştur.



Şekil 3.16 Basınç yükseltici çalışma şeması

Basınç yükseltici basınç ve yön denetim valfine sahip bir hidrolik ünite ile kontrol edilmektedir. Bu sayede istenilen basınçlarda çalıştırılabilmekte ve basınç yükselticinin ileri ve geri yönde hareket etmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca pompanın bastığı hem A hem de B hatlarında hidrolik yağ basıncı, basınç sensörü ile ölçülebilmektedir. Bu sayede elektronik kontrol ünitesi PLC ekranından Şekil 3.17’de girilen basınç değerlerine ulaşıldığında BY pistonunun yön değiştirmesi mümkün olmaktadır. Böylece çevrimsel olarak BY ile hedeflenen basınçlara ulaşılıp tekrarlı yükleme yapmak mümkün olmuştur.



Şekil 3.17. Elektronik kontrol ünitesi PLC ekranı

Ayrıca otomasyon yazılımında yaptırılan modifikasyon ile çevrim sayısının kaydedilmesi ve konum cetvelinden okunan değere bağlı olarak BY'nin istenilen konum aralığında çalıştırılması mümkün olmuştur. Kontrol sisteminde ölçülen zaman, hidrolik ve yüksek basınç değerleri ile çevrim sayısı kayıt altına alınmıştır.

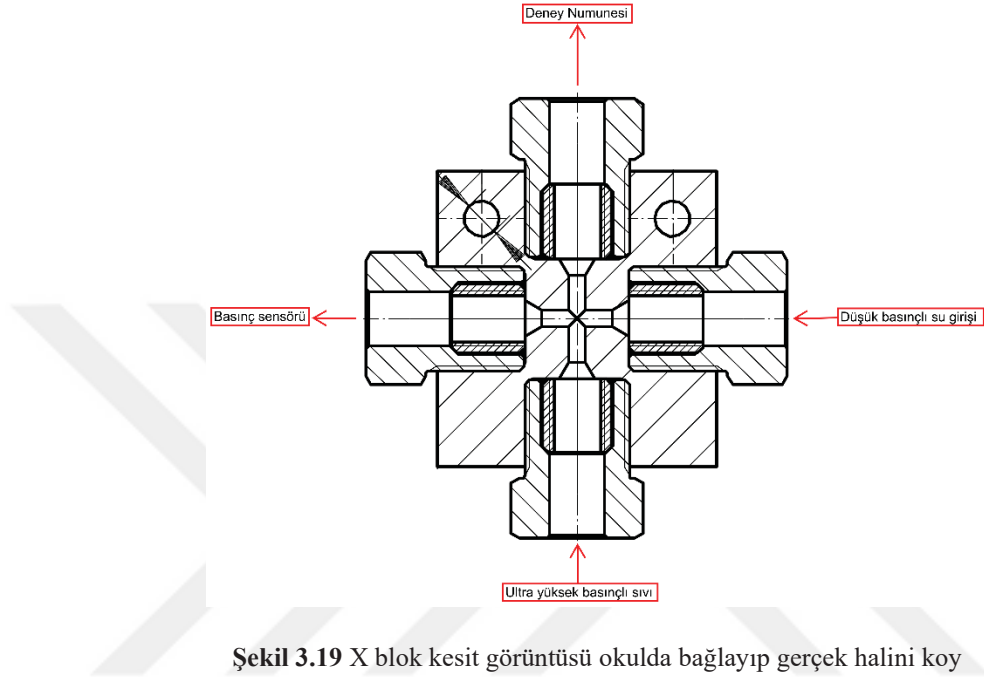
Hidrolik ve elektronik ünitelerin BY ile bağlantıları bittikten sonra basınç yükselticiden çıkan yüksek basınçlı sıvının dağılması için Şekil 3.18'de gösterilen yüksek basınç blokları Maximator firmasından temin edilmiştir. Deneyler için 65X4H model X blok kullanılmıştır.



Şekil 3.18 Deneylerde kullanılan X blok

Basınç yükselticisine bağlı X bloğa hangi elemanların bağlandığı şematik olarak Şekil 3.19'da deney sisteminin kurulumu da Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Yorulma deney ünitesi Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü CAD-CAM laboratuvarına kurulmuştur. Yüksek basınç devresinde, sisteme beslenen düşük basınçlı

sıvı ve 6000 bar kapasiteli sensör ile numunelere basılan sıvının basıncının ölçülmesi görülmektedir. Pompadan gelen düşük basınçlı su çekvalften ve X bloğun içinden geçerek BY ve deney numunelerinin içine dolmaktadır. Çekvalf ile yüksek basınçlı sıvının pompa tarafına geçişi engellenmiştir. BY ilerletildiğinde sistemde, elektronik kontrol sisteminden girilen basınç değerlerine kadar basınç oluşturulmaktadır.



3.1.3. Proses parametrelerinin belirlenmesi

Deneylerin Taguchi deney tasarım yöntemine göre üç tekrarlı olarak yapılması planlanmıştır. Yüksek basınç altında çalışan hidrolik silindirlerin yorulma ömrüne; en iç çapa uygulanan Ezerek Parlatma (EP) ve bilyalı dövme işlemi, katmanlar arası sıkı geçme miktarı ve hidrolik silindirin bir ucunun kapalı ve açık olma durumu olmak üzere toplamda 3 parametrenin etkisinin araştırılması planlanmıştır. Çizelge 3.4'te görülen 3 parametre ve her bir parametrenin de iki düzeyi olduğu için Çizelge 3.5'teki Taguchi L4 deney tasarım matrisine göre numune üretimi yapılmıştır. Üretimin zor ve pahalı olmasından dolayı, geometrik boyutların ve tasarımın uygunluğunu değerlendirmek için başlangıç olarak 2 adet deney numunesi üretilmiştir.

Çizelge 3.4 Deney parametreleri

	Parametre	Seviyeler	
		1	2
A	Sıklık Toleransı	0.06 mm	0.12 mm
B	Uç Geometrisi	Açık	Kapalı
C	Yüzey İşlemi	Makaralı ezerek parlatma	Bilyalı Dövme

Çizelge 3.5 Taguchi L₄ deney tablosu

Deney No	Seviyeler		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

3.1.4. Yorulma Deneylerinin Yapılması

Deney numunelerinin imalatı ve yorulma deney düzeneğinin kurulmasından sonra yüksek basınçlı yorulma deneylerine başlanmıştır. Deneyler sırasında hidrolik ünitenin 200-205 barda sürekli çalışmasından dolayı hidrolik yağında sıkça ısınma meydana gelmiştir. Deney ünitesine bağlı soğutma gurubu, yağı soğutmaya çalışsa da sıcaklık yeterli ve istenilen derecelere indirilememiştir. Bunun için 1.5-2 saat sistem sürekli çalıştıktan sonra 1 saat hidrolik sistem dinlendirilmiştir. Deneylere başlamadan önce genel anlamda herhangi bir sorun olmasa da deney esnasında birçok sorun ve hasar meydana gelmiştir. Bu hasarların tamiri ve sorunların çözümü ne kadar yapılsa da belli bir süre sonra hatalar tekrarlamış ve bu da deneylerin tamamlanmasını engellemiştir. Deneyler sırasında karşılaşılan başlıca problemler şunlardır:

- Basınç yükseltici ve numunelerde meydana gelen hasarlar,
- Numunelerdeki cıvata kırılmaları,
- Konik yüzeylerin aşınması ile sızdırmazlık sorunu
- BY'deki sızdırmazlık elemanlarının patlaması sonucu sızdırmazlık sorunu,
- Yüksek basınç devre elemanları olan nipel, blok ve çekvalfte sürekli olarak yaşanan sızdırmazlık sorunları
- BY'deki ve numunelerdeki yivli bağlantıların sıkıldıktan sonra tekrar sökülememesi

Oluşan hasarlar ve deneydeki sorunların detayları EK-B'de verilmiştir.

Tez projesi için sınırlı zamanın olması ve deneylerin istikrarlı ilerleyememesinden dolayı ezerek parlatma yüzey işleminin malzemenin yorulma ömrüne etkisinin araştırılmasına karar verilmiştir. Bu nedenle standart eksenel yorulma test numunesine farklı ezerek parlatma parametreleri uygulanarak silindir üzerinde oluşan eşdeğer gerilme değerlerinde eksenel yorulma testleri gerçekleştirilmiştir.

3.2. Eksenel Yorulma Testleri

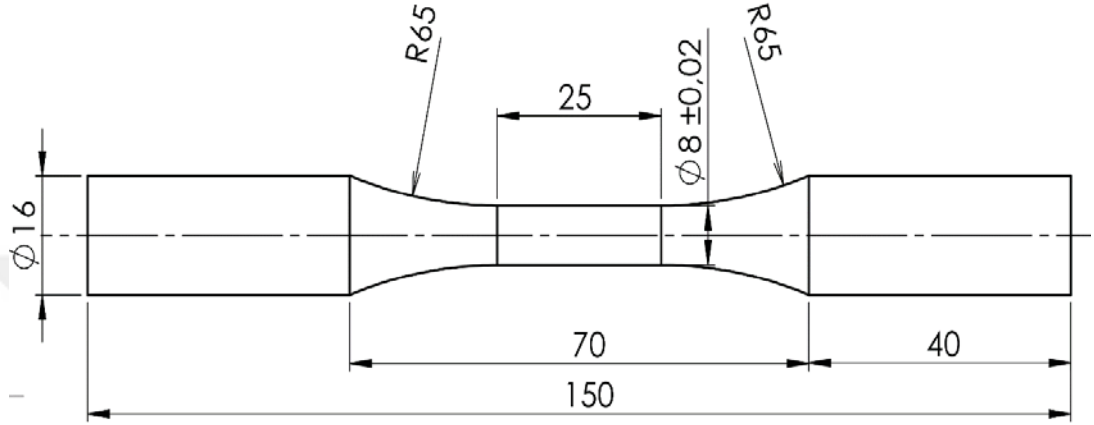
Tez çalışmasının ikinci kısmında standart ASTM E466 standardına göre eksenel yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerle ilgili olarak numunelerin hazırlanması, deneylerin yapılması ve sonuçların ölçülmesi ile ilgili detaylar aşağıda anlatılmıştır.

3.2.1. Yorulma test numunelerinin hazırlanması

ASTM E466-15 standardı herhangi bir malzemenin sabit genlikli ve belirli frekanslarda uygulanan eksenel yükleme şartındaki yorulma ömrünü belirlemek için kullanılmaktadır. Numuneye uygulanan yük eksenel doğrultuda olup test, kuvvet kontrolüyle gerçekleştirilmiştir. Standarttaki numune geometrileri silindirik ve dikdörtgen olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tezde silindirik teğetsel, keskin olmayan radyüslü numuneler kullanılmıştır. Şekil 3.30’da gösterilen numunedeki D: Kesit çapı, D_k : Kavrama çapı, L: Kesit uzunluğu R: Radyüs olarak adlandırılmıştır. Standarda göre tasarım kriterleri şu şekildedir;

- Kesit çapı (D) 5.08 mm ile 25.4 mm arasında olmalıdır.
- Kavrama çapı (D_k) test kesit çapından en az 1.5 kat büyük olmalıdır. Bu değer 4 kata kadar olabilmektedir.
- Gerilme yığılmasını en aza indirmek için radyüsler test kesit çapının en az 8 katı olmalıdır.
- Test kesit uzunluğu (L) test kesit çapının yaklaşık 2-3 katı olmalıdır. Burkulmayı en aza indirmek için test kesit uzunluğunun test çapının 2 katı kadar olması önerilmektedir.

Yukarıdaki kriterleri sağlayacak şekilde Şekil 3.21’de görülen yorulma test numuneleri tasarlanmıştır. İstenilen gerilmenin sağlanabilmesi için test kesit çapının hassas ölçülmesi gerekmektedir. İşleme sonunda kuvvetin geleceği çapa en fazla ± 0.02 mm tolerans verilmiştir. Tasarım yapılırken test yapılacak cihazın tutabileceği maksimum kavrama çapı göz önünde bulundurulmuştur. Cihaz en fazla 16 mm çapındaki silindirik malzemeleri kavrayabilmektedir.



Şekil 3.21. Tasarlanan eksenel yorulma test numunesi

Numuneler tasarlandıktan sonra eksenel yorulma testleri için deney parametreleri ve seviyeleri belirlenmiştir. Burada, birinci bölümden farklı olarak sadece ezerek parlatma işleminin yorulma performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ezerek parlatma işlemine ait üç parametre ve parametrelere ait üç seviye kullanılmıştır. Bu parametreler; ezme miktarı, parlatma hızı ve ilerleme hızıdır. Deney parametreleri ve seviyeleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviyeler		
	A	B	C
Ezme miktarı	0.05 mm	0.1 mm	0.15 mm
İlerleme hızı	0.1	0.2	0.4
Parlatma hızı	200 dev/dk	400 dev/dk	1000

Deneylerde tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır (Çizelge 3.7). Üç parametre ve üç seviye için tam faktöriyel deney tablosu oluşturulmuş böylece 27 adet deney tasarlanmış ve 3 tekrarlı başarılı deneyler yapılacağı düşünülerek parlatılmış durumda 108 adet, tormalanmış durumda bırakılmış 5 adet ve 5 adet de çekme deneylerinde kullanılmak üzere toplamda 118 adet numune hazırlanmıştır.

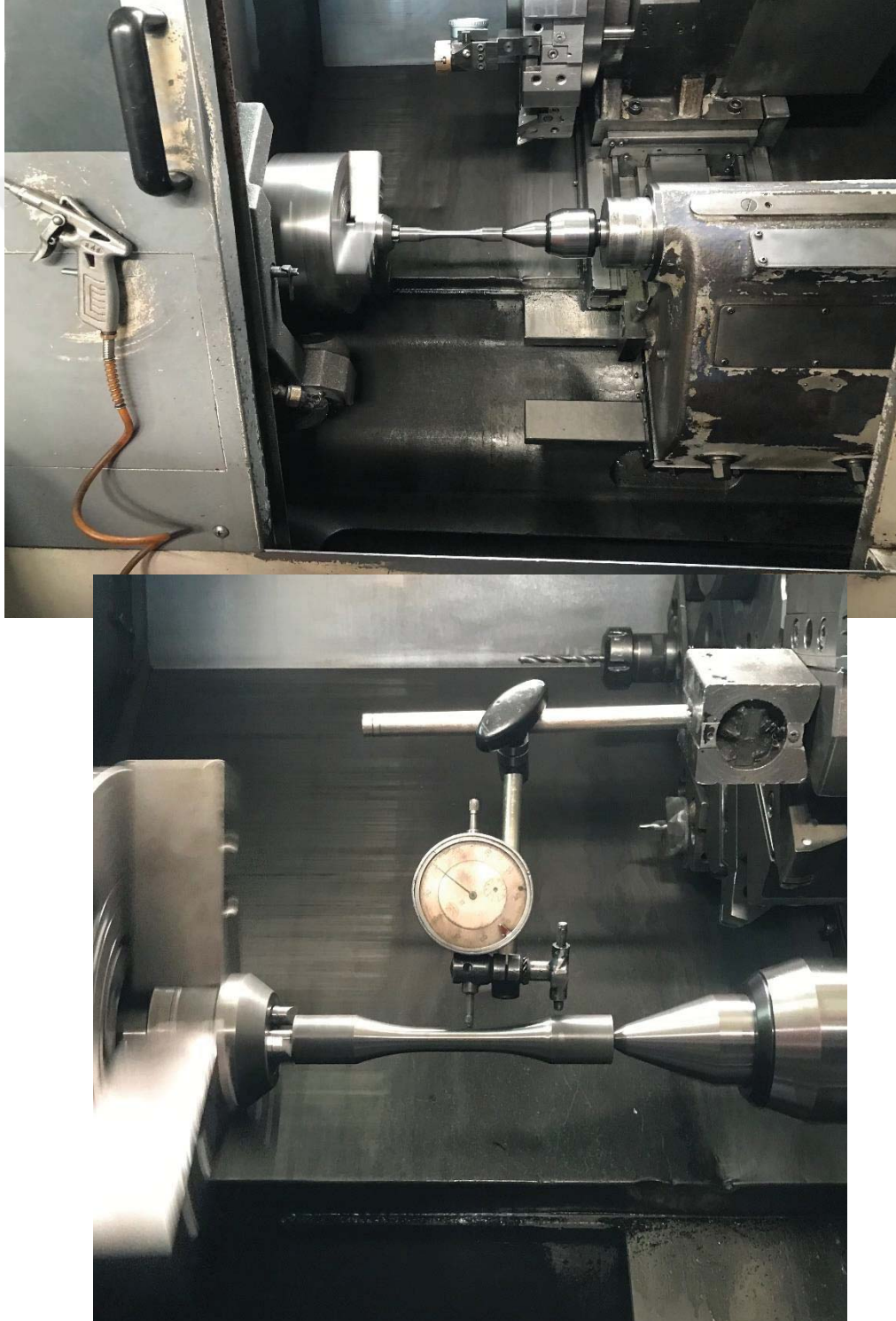
Parametreler ve seviyeleri seçilirken literatürde kullanılmış yaygın değerler ve parametreler göz önünde bulundurulmuştur. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te verilen literatür tablosundan da yararlanılarak parametreler ve seviyeler belirlenmiştir. Test numunesinin geometrisi belirlendikten sonra Hasçelik firmasından AISI 4340 malzeme temin edilmiştir. Numunelerin talaşlı imalatla üretimi ve parlatma işlemi Özceylanlar Hidrolik şirketinde yapılmıştır. Test numunelerinin üretim aşamaları şu şekildedir:

- Temin edilmiş 20 mm çapındaki malzemetestere ile numune boyunda kesilmiştir
- CNC torna tezgahına numuneler teknik resimdeki ölçülerinden 0.2 mm fazla olacak şekilde kaba tormalanmıştır. Tormalama işlemi Şekil 3.23'te görüldüğü gibi Mori Seiki marka CNC torna tezgahında yapılmıştır.
- Malzemelere Bölüm 3.1.3.1'de hidrolik silindirlere uygulanan şartlarda ısıtma işlemi yapılmıştır.

Çizelge 3.7. Deney tablosu

- Isıl işlemden sonra numuneler ince tormalanmıştır.
- İnce tormalamadan sonra parlatmanın her yüzeyde eşit olabilmesi için komparatör saati ile numunedeki salgı (Şekil 3.23) ve boyut kontrolü yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre çapta en fazla 0.01 mm salgı görülmüştür. Bu salgı da ezerek parlatma için göz ardı edilebilir bir ölçü olarak kabul edilmiştir.
- Geometrik olarak hazır olan numunelerin orta düz bölgesi parlatma takımıyla Çizelge 3.27'de görülen deney tablosundaki parametrelere göre parlatılmıştır. Parlatma işlemi için tamamen hazır olan numuneler yine aynı CNC torna tezgahında ezerek parlatılmıştır. İlk bölümdeki parlatma işlemi silindir içi parlatma takımı olduğundan burada farklı takım kullanılmıştır. Standart test numunelerinin dış kısmının parlatılması için Yamasa firmasına ait SX5 modellenli tek bilyeli parlatma takımı

kullanılmıştır (Şekil 3.24). Takımın üzerinde bulunan saat ile ezme miktarı 0.01 mm hassasiyetle takip edilebilmektedir. İstenilen ezme miktarı saatle ayarlandıktan sonra sabit ilerleme ve parlatma hızı ile parlatma işlemi yapılmıştır. Şekil 3.25'te görüldüğü gibi deney tablosuna göre parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminde bor yağlı su da soğutma sıvısı olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.23. Test numunelerindeki salgının ölçümü



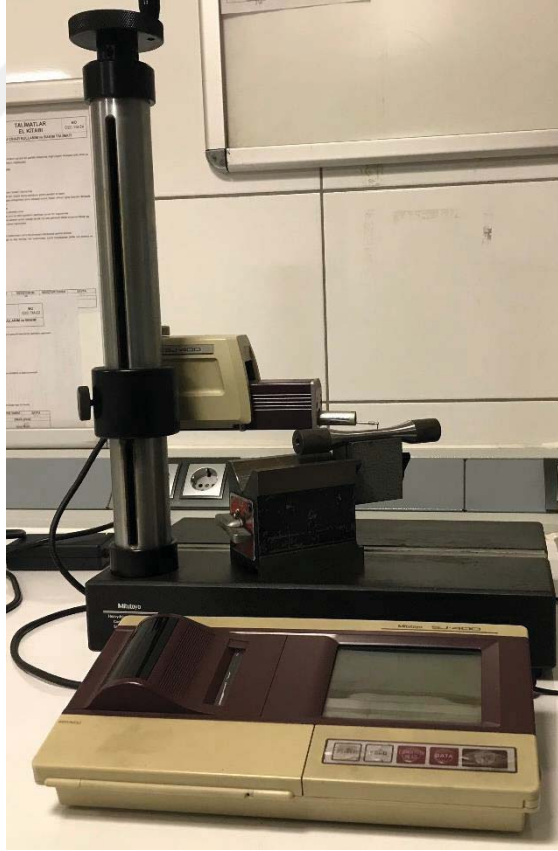
Şekil 3.24. Yamasa marka SX5 tek bilyalı makaralı ezme takımı



Şekil 3.25. Numunelerin parlatılması

3.2.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Numuneler üretildikten sonra parlatılan bölgelerin yüzey pürüzlük değerleri ölçülmüştür. Böylece, ezerek parlatma işleminin yorulma performansının yanında malzemenin yüzey özellikleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri Özceylanlar Hidrolik şirketinin ölçme laboratuvarında yapılmıştır. Ölçümlerde Şekil 3.26'da görülen silindirik numuneler için v yataklı, Mitutoyo marka yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. 27 numunenin parlatılmış bölgesinden üç tekrarlı ölçümler yapılmıştır. Parlatma işleminde tekrarlanabilirliğin sağlandığını göstermek için 4 farklı deneyin 3 tekrarı da ölçülmüştür. Ölçüm yapmadan önce parlatılan bölge hassas bir şekilde temizlenmiş ve ölçümlerde parmak izi gibi etkenlerin olmamasına dikkat edilmiştir. Ölçüm yaparken yüzeydeki pürüzleri ölçen hassas iğnenin parlatılmış yüzeye yeterince temas edip etmediği cihazın ölçüm sonuçlarını verdiği ekrandan kontrol edilmiştir. Şekil 3.27'de görülen ekrandaki işaretli yerdeki siyah kutucuk tam ortada bulunduğunda hassas iğnenin yüksekliği tam konumlandığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.26. Yüzey pürüzlülük cihazı



Şekil 3.27. Yüzey pürüzlülük cihazı ölçüm ekranı

Ölçüm sonunda çıkan değerler ekrandan okunabildiği gibi çıktı olarak da alınabilmektedir. Numunelerin ölçümü yapıldıktan sonra her bir numunenin Ra ve Rz değerleri kaydedilmiştir. Bu verilerle, ezerek parlatma işlemi parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çıkan sonuçlara Minitab 2019 yazılımında varyans analizi uygulanmış ve etki parametreleri hesaplanmıştır. Kullanılan parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin olup olmadığı ortaya konulmuştur.

3.2.3. Mikrosertlik ölçümleri

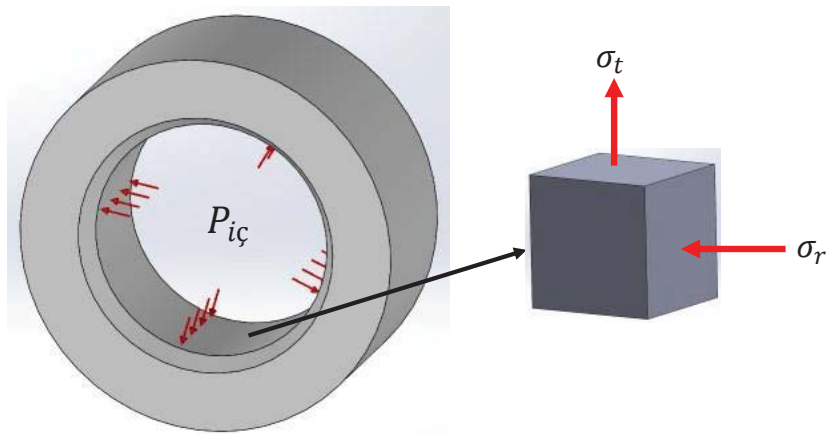
Yüzey pürüzlülüğünün yanında, numunelerin parlatılmış bölgelerinden mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, Necmettin Erbakan Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında yapılmıştır. Ölçümler Şekil 3.28’de görülen Matsuzawa marka ölçüm cihazında yapılmıştır. Hassas uç 10 saniye boyunca 100 GF (gram force) yük uygulamıştır. Daha sonra optik görüntüleyici ile oluşan izin derinliği hesaplanıp sertlik değerleri not edilmiştir.



Şekil 3.28. Sertlik ölçüm cihazı

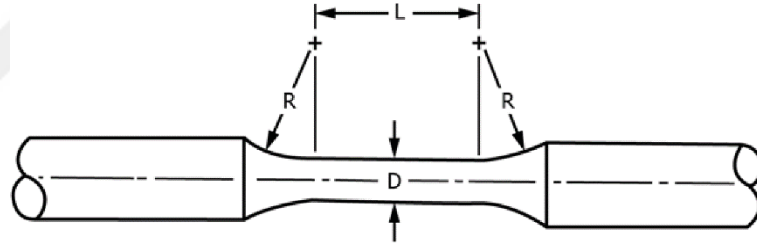
3.2.4. Yorulma testlerinin yapılması

Yüksek basınçlarda gerçekleştirilen hidrolik silindir yorulma deneylerinde uygulanan iç basınç neticesinde Şekil 3.29’de görüldüğü gibi hem teğetsel hem de radyal yönde çok eksenli gerilmeler oluşmaktadır. Böyle durumlarda, farklı türdeki gerilmeleri tek bir gerilmeye düşüren hipotezler mevcuttur. Bu hipotezler kullanılarak çok eksenli gerilmeler, tek eksenli gerilmeye indirilerek benzetim yapılması mümkündür (Babalık, 2018).



Şekil 3.29. İç basınç altında oluşan çok eksenli gerilmeler

Bölüm 2.1’de iç basınç altındaki birbirine sıkı geçirilmiş katmanlı silindirlerde oluşan gerilmelerin hesabı anlatılmıştır. Basıncsız durumda sıkı geçmeden kaynaklı ve basınç altında hidrolik silindirlerde meydana gelen radyal ve teğetsel gerilmeler, Lamé denklemleriyle hesap edildikten sonra von Mises eşdeğer gerilme değeri hesaplanmıştır. Çizelge 3.2’de görülen boyutlardaki hidrolik silindirler 0.06 mm sıklık toleransı ile montaj edildiğinde ve 450 MPa değerinde basınç uygulandığında iç silindirin iç yüzeyinde maksimum olarak sırasıyla -78 MPa basma ve 702 MPa eşdeğer gerilme değeri elde edilmektedir. Bu genel değişken gerilme durumunda gerilme oranı $R=-0.11$ elde edilmiştir. Hidrolik silindirlerde meydana gelen -78 MPa basma ve 702 MPa eşdeğer gerilmeler ilk başta aksel yorulma testinde Şekil 3.30’da görülen test numunelerine uygulanarak ASTM E466.2347 standardına uygun olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ancak bu gerilme değerlerinde deneyler 846.000 civarında çevrime kadar sürmüştür. Bu nedenle hidrolik silindirlerde meydana gelen gerilme oranı korunarak gerilme seviyesi akma mukavemetinin %90’ı değeri olan -110 MPa ile 1100 MPa aralığında uygulanmıştır.



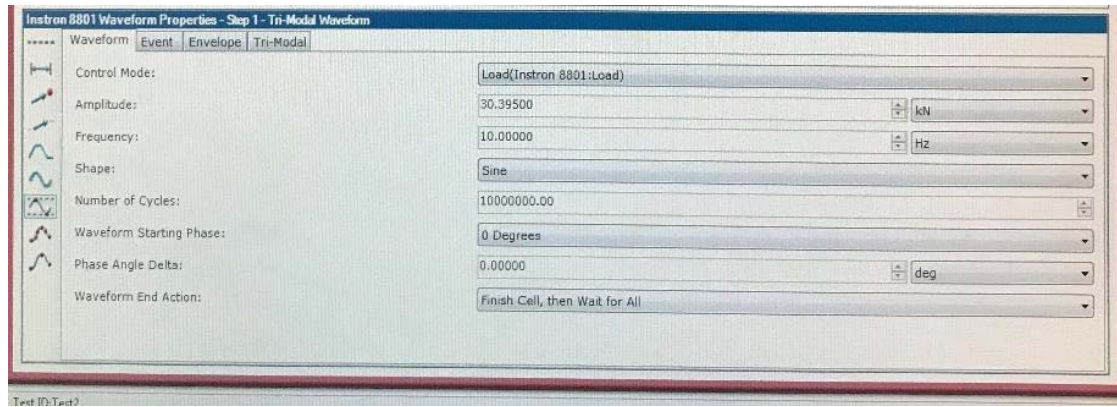
Şekil 3.30. Silindirik yorulma numunesi

Çizelge 3.7’de görülen 27 adet deneyde parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etki değerleri analiz edildiğinde partlatma hızının istatistiksel olarak deney sonuçlarına anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu nedenle yapılması uzun süren yorulma deneylerinde partlatma hızının etkisinin dikkate alınmamasına karar verilmiştir. Böylece üç ilerleme hızı ve üç adet de ezme miktarı için toplamda 9 adet aksel yorulma deneyi yapılmıştır. Her bir deney 3 tekrarlı olarak gerçekleştirildiğinden toplamda yapılan yorulma deney sayısı 27 olmuştur. Testler, ASTM E466 standartlarına göre kuvvet kontrollü olarak yapılmıştır. Bölüm 3.6.1’de belirtilen -110 MPa basma ve 1100 MPa çekme gerilmesi değerlerinin elde edilmesi için $\sigma = \frac{F}{A}$ formülüne göre numune kesit alanı ile gerilme değeri çarpılmış ve elde edilen kuvvet değerleri yorulma test cihazına

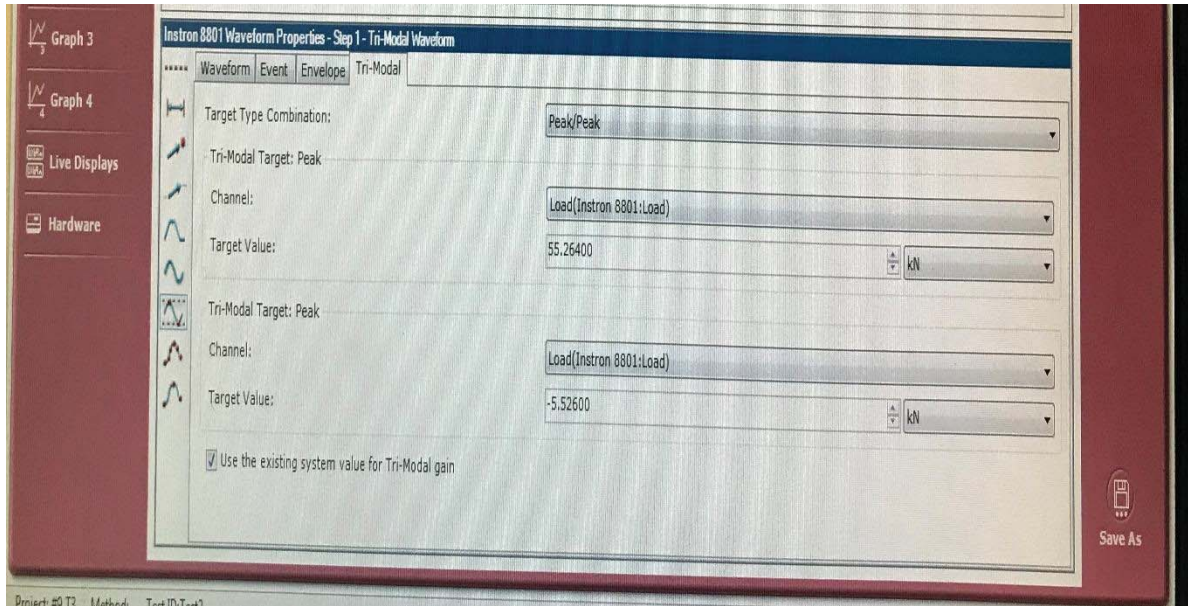
girilmiştir. Yorulma testleri Şekil 3.31’de görülen Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Instron 8801 marka çekme / yorulma test cihazında yapılmıştır. Cihaz 0.1–100 kN kuvvet ve 0.1-100 Hz frekans aralıklarında eksenel olarak yorulma testlerini yapabilmektedir. Yorulma testlerine başlamadan önce cihazın yorulma yazılımı olan WaveMatrix programına test için belirlenen parametreler girilmiştir. Bu parametreler sırasıyla, test yükleme türü (Kuvvet ya da Yer değiştirme), kuvvet genliği, frekans, minimum ve maksimum uygulanacak kuvvettir. Şekil 3.32 ve Şekil 3.33’de görülen ekrandan bu değerler için Çizelge 3.8’de görülen parametreler girilmiştir.



Şekil 3.31. Instron 8801 çekme testi cihazı



Şekil 3.32. Deney parametrelerinin girildiği program (1)



Şekil 3.33. Deney parametrelerinin girildiği program (2)

Çizelge 3.8. Test için kullanılan parametreler

Parametre Adı	Kullanılan Değer
Yükleme Türü	Kuvvet Kontrollü
Kuvvet Genliği	30395 N
Frekans	10 Hz
Maksimum Kuvvet	55260 N
Minimum Kuvvet	-5.526 N

Testlerin yapılmasındaki adımlar aşağıdaki gibidir:

- Test cihazı ve bilgisayar açıldıktan sonra hidrolik yağın ısınması için en az 15 dakika cihaz, test yapılmadan çalıştırılmıştır.
- Program hafızasındaki değerler kontrol edilmiş ve numune tutma kısımlarından çenelere bağlanılmıştır. Hidrolik çene sıkma basıncı 2 bar olarak ayarlanmıştır.
- Bilgisayar üzerinden “Start” tuşuna basılıp numune kırılıncaya kadar test devam etmiştir.
- Numuneler kırıldıktan sonra çevrim ve kuvvet verilerinin yazıldığı dosya kaydedilmiş ve numuneler çenelerden çıkartılmıştır.

2 ila 4 saat civarında süren deneylerin uzaktan da takip edilebilmesi için bir IP kamera kullanılmıştır. Bu sayede laboratuvarında olunmasa bile testin hangi aşamada olduğu, bitip bitmediği anlık olarak görüntülenebilmiştir. Kamera Şekil 3.34’de görüldüğü gibi numuneyi ve çevrim sayısının görüldüğü bilgisayar ekranını görecektir.



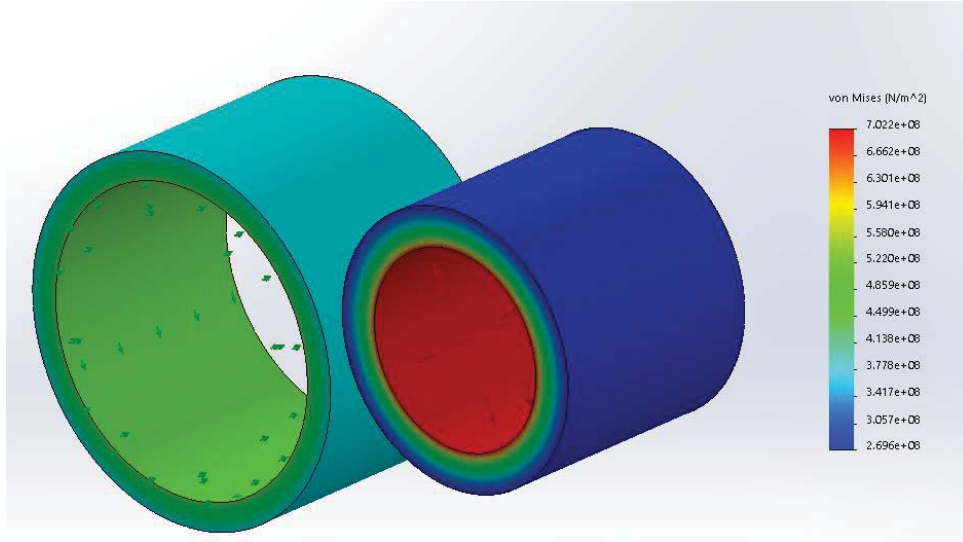
Şekil 3.34. IP kamera ile testin takibi

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

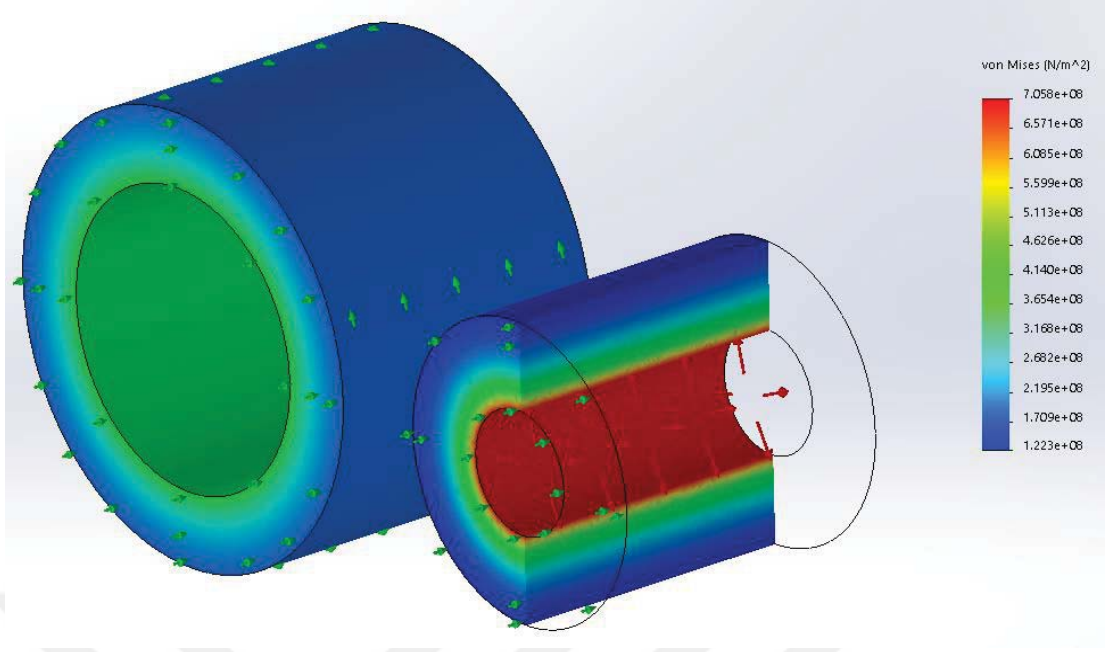
Bu bölümde ilk olarak katmanlı hidrolik silindirlere ait statik gerilme analizlerinin sonuçları ve analitik değerlerle karşılaştırılması ve AISI 4340 malzemesinden üretilmiş katmanlı silindirik deney numunelerinin çevrim sayıları verilmiştir. Ardından aynı malzemeden üretilmiş ASTM E466 standartlarındaki eksenel yorulma test numunelerine ait yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait optimizasyon ve etkileşim değerleri sunulmuştur. Belirlenen parametrelerde parlatılmış test numunelerinin eksenel yorulma test sonuçları verilmiştir. Bu test sonuçlarına parlatma işleminin etkisinin olup olmadığı ve parlatma işlemindeki parametrelerin ne düzeyde yorulma performansına etki ettiği belirtilmiştir.

4.1. Hidrolik Silindirde Analitik ve Nümerik Yöntemlerle Hesaplanan Gerilmelerin Karşılaştırılması ve Silindir Boyunun Seçimi

Yüksek basınç altındaki katmanlı silindirlerin SEA sonuçlarının doğrulanması için yapılan çalışmanın sonucu Şekil 4.1’de sunulmuştur. Analitik olarak iç gerilmesi 696 MPa hesaplanan çift katmanlı silindirin SEA’den elde edilen maksimum eşdeğer gerilme değeri 702 MPa’dır. Sonuçlara göre analitik ve SEA sonuçları arasında oldukça büyük



Şekil 4.1. Katmanlı silindirin sonlu elemanlar analizi



Şekil 4.2 150 mm boyundaki sıkı geçirilmiş silindirin iç basınç altında statik analizi

bir uyum bulunmakta olup SEA sonuçlarının doğruluk yüzdesi % 99.18 olarak belirlenmiştir. Bu durum yüksek basınca maruz katmanlı silindirlerin tasarımında SEA'ları güvenle kullanılabileceğini göstermiştir.

Silindir boyunun gerilme değerine etkisini belirlemek ve imal edilen numunelerin boyuna karar vermek için yapılan analizlerin sonucunda 150 mm boyundaki silindirin 450 MPa iç basınç altında oluşan statik analiz sonucu Şekil 4.2'te verilmiştir. Diğer boylardaki silindirlerin gerilme sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Farklı boylardaki silindirlerdeki gerilmeler birbirine çok yakın çıkmıştır. Yüzeyde oluşan maksimum ve ortalama gerilmelere göre karşılaştırma yapıldığında 4 farklı numunede %0.23 gibi çok küçük farklar görülmüştür. Silindir boyunun etkisiz olduğu anlaşıldığından ve fazla malzeme sarfiyatının önüne geçmek için olabildiğince küçük boylarda imalat yapılmıştır. Toplam silindir boyu 70 mm seçilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı boyların yüzey iç gerilmelerinin karşılaştırılması

Boy(mm)	İç Silindirdeki Maksimum Gerilme (MPa)	İç yüzeydeki Ortalama Gerilme (MPa)	Maksimum gerilmedeki fark (%)	Maksimum ortalama gerilmedeki fark (%)
150	705.8	692.3	0.004	0.086
200	704.9	692.7	0.08	0.14
250	707.4	691.7	0.27	0
300	703.9	689.99	0.23	0.24
Ortalama	705.5	691.7		

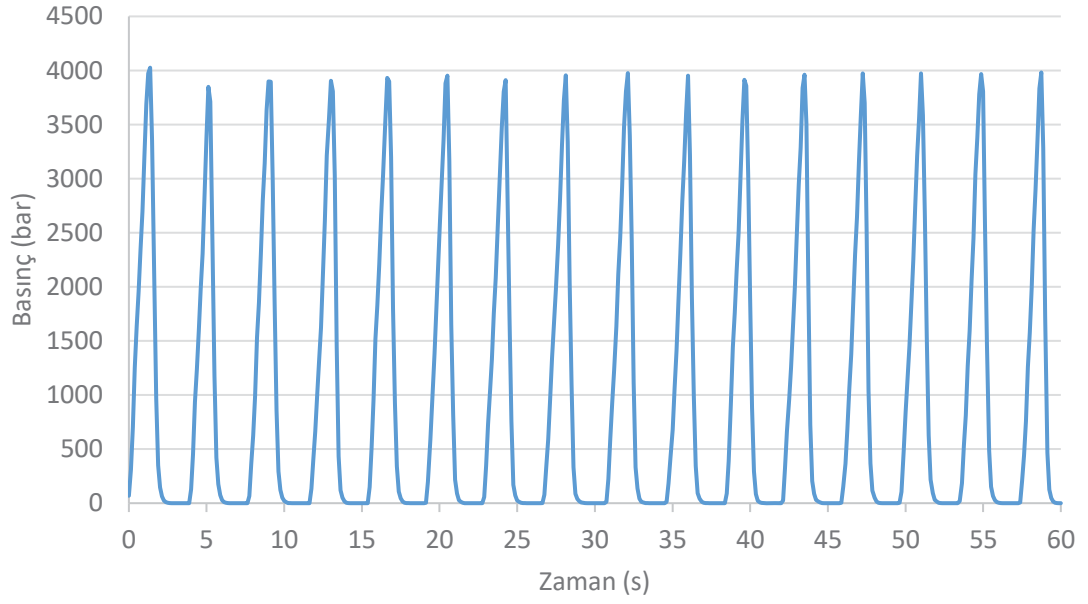
4.2. Katmanlı Hidrolik Silindirlerin Yorulma Deney Sonuçları

Basınç yükselticilerin yüksek basınç bölgelerini temsil eden katmanlı silindirik deney numunelerine çevrimsel olarak 400 MPa (4000 bar) iç basınç uygulanmıştır. Hazırlanmış olan iki numuneye de aynı anda uygulanmıştır. Kontrol ünitesinden basınç ayarı BY'nin tahrik edildiği hidrolik yağ basıncı girilerek yapılmaktadır. BY'nin alan oranına göre numunelere basılan sıvı basıncı yükseltilmektedir. Sıvı basıncı yüksek basınç sensörü ile ölçülerek de istenilen değerlerin elde edilip edilmediği kontrol edilmiştir. Deney yapma basıncı olan 4000 barın elde edilebilmesi için hidrolik basınç 208 bar değerinde kontrol ünitesine girilmiştir. Sonuçta örnek olarak BY'nin çıkışında ölçülen sıvı basıncının 60 saniye zaman dilimindeki değeri Şekil 4.3'te görülmektedir. BY pistonunun ilerlemesiyle sıvının sıkıştırılması sonucunda kontrol ünitesinden ayarlanan basınç değerine önce çıkılmaktadır. Sonrasında BY pistonu yön değiştirmekte böylece yüklenen basınç sıfırlanmaktadır. BY pistonu, karşı yönde BY kapağına dayandığında yine kontrol ünitesinden ayarlanan basınç değerine çıkılmakta ve tekrar yön değiştirerek basma konumuna geçmektedir. Bu şekilde çevrimsel olarak ayarlanan basınçta yükleme yapmak mümkün olmuştur.

Ölçümlerde verilerin alınma sıklığının, kayıt sırasında ölçülen maksimum basıncı etkilediği görülmüştür

Şekil 4.5'te kontrol ünitesinden girilen 4000 bar basınca karşılık olarak farklı veri alma hızlarında ölçülen basınç değerleri görülmektedir. Bir saniyede alınan veri sayısı azaldıkça BY'nin ulaştığı maksimum basıncın kaydedilmesi mümkün olmamaktadır.

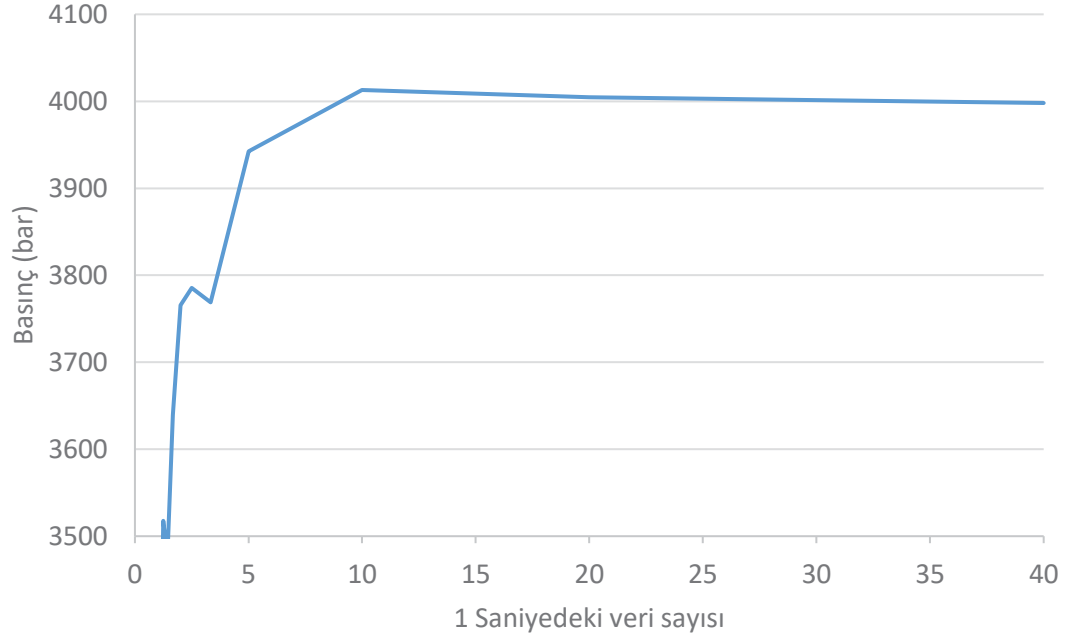
Kontrol ünitesinden girilen basınç değerinin sağlıklı bir şekilde ölçülmesi ancak saniyede 10 adet veri alındığında mümkün olmuştur. Bu nedenle kayıt işlemi hızı saniyede 10 veri olacak şekilde ayarlanmıştır. Uygulanan basınç değerindeki doğruluk ve belirsizliğin belirlenmesi için farklı veri alma hızlarında 10 çevrim için ölçülen maksimum basınçlar gibi kaydedilmiştir. Ölçümlerin ortalaması 100 ms aralıklarla yapılan kayıtta 4013 bar olarak elde edilmiştir. Bu ortalama değerdeki standart sapma 35 bardır. Dolayısıyla deneylerin %95 güvenirlilikle 4013 ± 70 bar basınç aralığında gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.3. Zamana bağı olarak ölçülen basınç eğrisi

Şekil 4.5. Veri kaydetme frekansının kaydedilen maksimum basınç değerine etkisi

Veri kayıt hızı (ms)	900	800	700	600	500	400	300	200	100	50	25
1	3830	3011	3966	3588	4004	4004	3943	3988	4055	3945	4013
2	2974	2932	3042	3821	3431	3689	3364	3865	3992	4007	4001
3	2518	3018	3057	3364	3840	3920	3931	3861	4005	4029	3995
4	3210	3984	3746	3983	4066	3513	3991	3868	3980	4030	4012
5	3963	4030	4031	2896	3344	3591	3525	3970	4058	4024	4026
6	2007	2847	2535	3890	4034	3978	3879	3938	4045	4011	4006
7	3213	3468	3333	3835	3314	3769	3701	3990	4039	4028	3937
8	3954	3922	3871	3384	3904	3956	3632	3968	3974	4024	3986
9	3556	4012	3450	3981	3691	3711	3781	3919	3967	3948	3989
10	3796	3952	3738	3653	4028	3722	3941	4059	4015	4001	4017
Ortalama	3302	3518	3477	3640	3766	3785	3769	3943	4013	4005	3998
Std. Sapma	655	514	485	344	300	171	209	65	35	32	25



Şekil 4.4. 1 saniyedeki veri sayısına karşılık elde edilen basınç değerleri

Yorulma deneylerine iç yüzeylerine ezerek parlatma ve bilyeli dövme işlemi uygulanmış iki deney numunesi ile başlanmıştır. Ancak deneyler, Bölüm 3.4'te bahsedilen problemlerden dolayı sık sık durdurulmuştur. Problemler çözüldükçe deneyler devam etmiştir. Sonuçta yüzeyine bilyalı dövme uygulanmış numuneye 36161 çevrim, ezerek parlatılan numuneye de 37188 çevrim hasar oluşmadan uygulanmıştır (Çizelge 4.2). Bu çevrim sayılarına ulaşmak yaklaşık olarak 3 ay kadar süre almıştır. Bu

Çizelge 4.2. Katmanlı silindirlerin yorulma test sonuçları

Deney Numunesi	Çevrim Sayısı
Numune 1 (Bilyalı Dövme)	36161
Numune 2 (Ezerek Parlatma)	37188

çevrimlerden sonra sızdırmazlığı sağlayan konik kapaklar aşınmış ve sistemin demonte edilmesi gerekmiştir (Şekil 4.6). Kalın cidarlı silindirik numunelerde deneylerin tamamlanmasının çok uzun süreceği anlaşıldığından yorulma deneylerine Bölüm 3.1.1'de anlatılan çok daha ince cidarlı olan katmanlı silindirle devam edilmeye çalışılmıştır. İnce cidarlı numunelerle başlanan deneylerde henüz 100 çevrim yapılmışken numunenin dış kapağındaki radyüslerin küçük verilmesinden kaynaklı çatlama meydana gelmiştir. Radyüs değeri 1 mm'den 5 mm'ye çıkartılarak dış kapak yeniden imal edilmiştir. Son durumdaki numunelerde deneylere devam edilmeye çalışıldığında sızdırmazlığın sağlanamaması nedeniyle 400 MPa çalışma basıncına çıkmak mümkün olmamıştır. Bu duruma iç silindir cidar kalınlığının azaltılmasıyla sehim değerinin yükselmesi sonucunda konik kapakla iç silindir ara yüzeyinde meydana gelen boşlukların neden olduğu düşünülmüştür.

Yukarıda anlatıldığı gibi hidrolik silindire uygulanan yorulma deneylerinde numunelerde hasar oluşuncaya kadar yükleme yapılması mümkün olmamıştır. Bu nedenle tezin yöntemi değiştirilmiş ve iç silindir malzemesi olan AISI 4340 malzemeye aynı ısıtma işlem şartlarında farklı yüzey işleme parametrelerinde ezerek parlatma prosesi uygulanmış ve ASTM E466 standardına göre aksel yorulma testi uygulanmıştır. Böylece test numunelerine uygulanan parlatma işleminin yorulma ömrüne ve yüzey özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır.



Şekil 4.6. Konik aşınması

4.3. Eksenel Yorulma Test Numunelerinin Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

Üçer seviyeli olarak farklı ezme miktarı, ilerleme ve parlatma hızlarında toplamda 27 farklı şartta parlatılan 27 adet ezerek parlatılmış numune ile sadece tornalanmış iki adet numunenin ortalama yüzey pürüzlülükleri (R_a) ölçüm sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Parlatmanın ve yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin tekrarlanabilirliğini göstermek için 7,8,12 ve 26. deneylerin 3 tekrarının da yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi elde edilmiştir. Her bir numunede çevrede üç farklı bölgeden ölçüm alınmıştır. Aynı numunedeki yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin ortalama standart sapması $0.04 \mu\text{m}$ bulunmuştur. 4 farklı şarttaki deneylerdeki ortalama yüzey pürüzlülüğünün standart sapması ise $0.16 \mu\text{m}$ 'dir. Her bir deneydeki standart sapma değerini ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine oranladığımızda belirsizliğin %10 mertebesinde olduğu hesaplanmıştır. Böylece Çizelge 4.5'te verilen ölçüm sonuçlarının %90 oranda güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.3. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tekrarlanabilirlik sonuçları

Deney No	1. Numune	2. Numune	3. Numune	Ortalama	STD Sapma
7	1.98	2.12	2.29	2.13	0.16
8	2.02	1.81	2.52	2.12	0.36
12	1.52	1.51	-	1.51	0.01
26	0.81	0.59	0.62	0.67	0.12
				Ortalama	0.16

Çizelge 4.5'te verilen sonuçlara göre en düşük yüzey pürüzlülük değeri 0.15 mm ezme miktarı, 0.1 mm/dev ilerleme hızı ve 200 dev/dk parlatma hızında elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri ise 0.1 mm ezme miktarı, 0.4 mm/dev ilerleme ve 1000 dev/dk parlatma hızında oluşmuştur. Parametrelerin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etki değerlerini hesaplamak için sonuçlara varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA tablosu Çizelge 4.4'te görülmektedir. Buna göre yüzey pürüzlülüğünün değişmesinde en etkili parametre %78.01 oranla ezme miktarı olmuştur. Bunun yanında, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne %9.02 oranda etki ettiği görülmüştür. Parlatma hızına ait P değeri 0.05'te yüksek olduğu için parlatma hızının istatistiksel olarak yüzey pürüzlülüğüne anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarındaki toplam hata %10.53 olarak ölçülmüştür. Ezme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi net bir şekilde görülmüştür. Ezme miktarı seviyesinin belirli bir değerin üzerine çıkmasıyla yüzey pürüzlülüğündeki azalma hissedilir oranda olmuştur. Ezme miktarı arttıkça tornalamada yüzey pürüzlülüklerinin ezilme miktarı artmaktadır. Ezme miktarı arttıkça parlatma takımı daha düşük seviyeli pürüzlere ulaşabilmiştir. Bu sayede daha iyi pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Ezme miktarının daha da artırılmasıyla yüzey pürüzlülüğünün daha da iyileşebileceği düşünülebilir. Ancak literatürde yapılan çalışmalarda belirli bir seviyeden sonra ezme takımı yüzeyde mikro çatlakların oluşmasına yol açabileceği, bu durumun da yüzey pürüzlülüğünü artıracak belirtilmiştir (Boozarpoor, 2021)

Çizelge 4.4. Yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre yapılan varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Etki Yüzdesi	Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
Ezme Miktarı	2	1.56599	%78.01	0.78299	74.07	0
İlerleme Hızı	2	0.18111	%9.02	0.09055	8.57	0.002
Parlatma Hızı	2	0.04882	%2.43	0.02441	2.31	0.125
Hata	20	0.21143	%10.53	0.21143	0.01057	
Toplam	26	2.00735	100.00%			

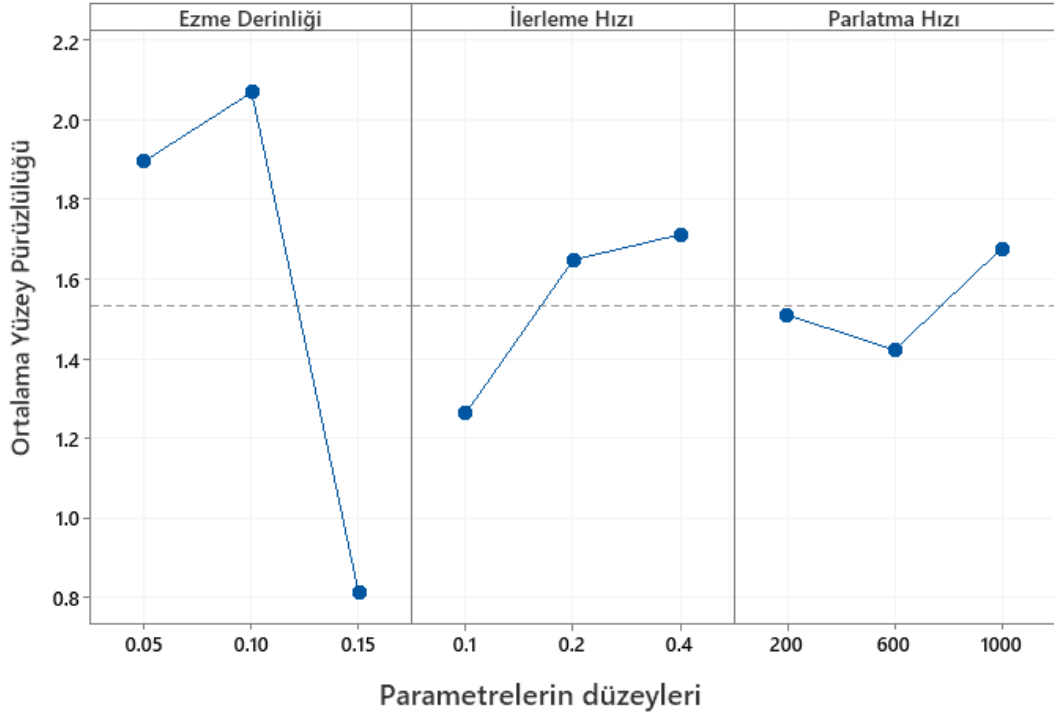
Çizelge 4.5. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

	Ezme miktarı (mm)	İlerleme Miktarı (mm/dev)	Parlatma hızı (dev/dk.)	Ra (µm) (Ort.)
Parlatılmamış 1	-	-	-	3.08
Parlatılmamış 2	-	-	-	2.88
1	0.05	0.1	200	1.68
2	0.05	0.1	600	1.70
3	0.05	0.1	1000	1.75
4	0.05	0.2	200	2.14
5	0.05	0.2	600	1.85
6	0.05	0.2	1000	1.98
7	0.05	0.4	200	1.98
8	0.05	0.4	600	2.02
9	0.05	0.4	1000	2.00
10	0.1	0.1	200	1.52
11	0.1	0.1	600	1.52
12	0.1	0.1	1000	1.52
13	0.1	0.2	200	2.41
14	0.1	0.2	600	1.63
15	0.1	0.2	1000	2.50
16	0.1	0.4	200	2.50
17	0.1	0.4	600	2.54
18	0.1	0.4	1000	2.77
19	0.15	0.1	200	0.51
20	0.15	0.1	600	0.62
21	0.15	0.1	1000	0.98
22	0.15	0.2	200	0.79
23	0.15	0.2	600	0.73
24	0.15	0.2	1000	1.37
25	0.15	0.4	200	0.85
26	0.15	0.4	600	0.81
27	0.15	0.4	1000	0.76

Parametre düzeylerinin yüzey pürüzlülük değerlerine etki grafikleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. En etkili parametre olan Ezme miktarının ilk iki seviyesi pürüzlülük üzerinde neredeyse aynı etkiyi gösterirken 0.15 mm ezilen numunelerde etki büyük bir artış göstermiştir. İlerleme miktarı artarken yüzey pürüzlülüğünde de aynı şekilde artış gözlemlenmektedir. İlerleme miktarı düşürüldüğünde, aynı bölge ezme takımıyla daha fazla temasta kalacağından en düşük ilerleme miktarında daha düşük yüzey pürüzlülük

değerleri elde edilmiştir. Parlatma hızının yüzey pürüzlülüğüne istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ancak literatürde parlatma hızının ilerleme hızının %25'i kadar etkili olduğu görülmektedir (Boozarpoor, 2020). Tez çalışmasında da Çizelge 4.4'e göre parlatma hızının ilerleme miktarın yaklaşık olarak %25 oranında etkisinin olduğu görülmektedir. Ancak Ezme miktarının seçilen seviyelerinde etkisinin fazla olması nedeniyle, parlatma hızının etkisi hata oranının altında kalmıştır.

Şekil 4.8'de yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre oluşturulan hiper düzlem



Şekil 4.7. Yüzey pürüzlülüğü için parametre düzey grafikleri

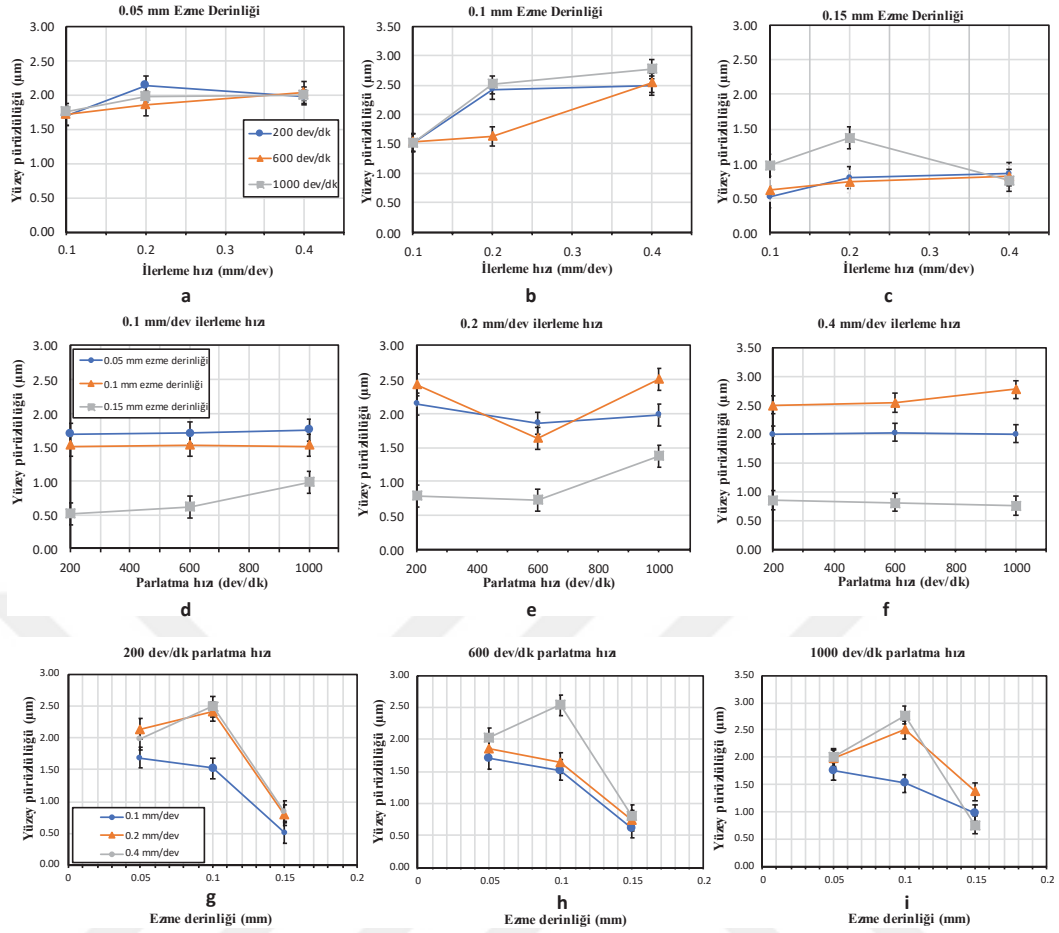
grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde yan yana verilmiş 3 grafik tek bir 3B grafiğin iki boyuta çevrilmiş halidir. Bir parametre sabit değerde tutulur ve yüzey pürüzlülüğü diğer iki parametrenin fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu sayede, bir parametre sabitken diğer iki parametrenin değişimiyle yüzey pürüzlülüğünün değişimi görülebilmektedir. Şekil 4.8 a, b ve c grafiklerinde, ezme miktarı sabit tutulmuş ve farklı parlatma hızlarında ilerleme hızının etkisi sunulmuştur. Ezme miktarı 0.05 mm iken farklı parlatma hızlarında ilerleme hızı neredeyse etkisiz çıkmıştır. Ezme miktarı 0.1 mm olduğunda ilerleme hızının etkisinden bir miktar söz edilebilir. İlerleme hızıyla pürüzlülük değeri bir miktar artmıştır. Ezme miktarının 0.15 mm olmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin bariz şekilde düştüğü ancak yine ilerleme hızının etkisinin az olduğu görülmektedir. Şekil 4.8 d, e ve

f’de ilerleme hızı sabit tutulmuş ve farklı ezme derinliklerinde parlatma hızının etkisi verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü 0.1 ve 0.4 mm/dev ilerleme hızlarında tüm parlatma hızlarında neredeyse yatay olarak seyretmiştir. 0.2 mm/dev ilerleme hızında parlatma hızı 600 dev/dak olduğunda pürüzlülük daha düşük seviyeye inmiştir. Özellikle 0.1 mm ezme miktarı için bu düşüş daha belirgindir. Çizelge 4.8 g,h ve i’de parlatma hızları sabit tutulmuş ve farklı ilerleme hızlarında ezme miktarının etkisi sunulmuştur. Burada 0.1 mm/dev ilerleme hızında, ezme miktarı arttıkça sürekli bir şekilde pürüzlülük değeri azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğü 0.1 ve 0.4 mm/dev iken ezme miktarı 0.05 mm’den 0.1 mm’ye çıktığında yüzey pürüzlülüğü tüm parlatma hızlarında artış göstermiş sonra hızlı bir şekilde düşmüştür. Ancak yapılan deneylerde en düşük seviyedeki pürüzlülük 0.15 mm ezme miktarı için elde edilmiştir.

Çıkan sonuçlar içinden en düşük yüzey pürüzlülük değerine göre optimizasyon çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi ezme miktarının 0.15 mm, ilerleme hızının 0.1 mm ve parlatma hızının 600 dev/dk seviyeleri optimum parametrelerdir.

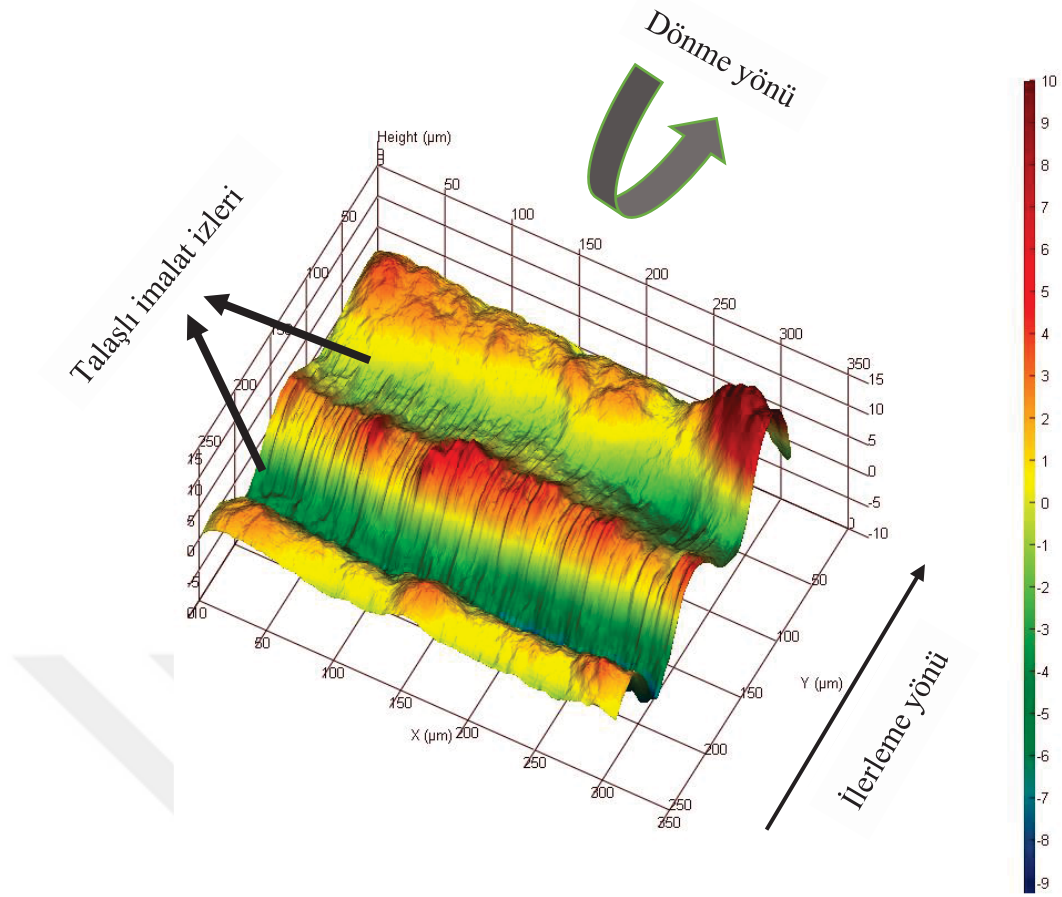
Çizelge 4.6. Parametrelerin optimum seviyeleri

Parametreler	Optimum seviyeleri
Ezme miktarı	0.15 mm
İlerleme miktarı	0.1 mm/dev
Parlatma hızı	600 dev/dk



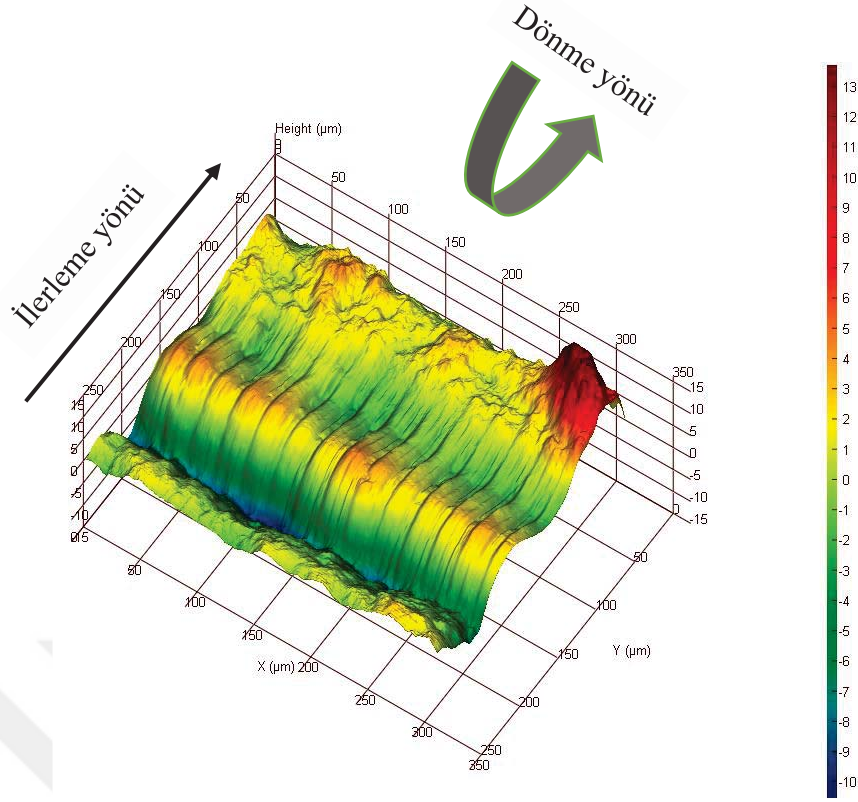
Şekil 4.8. Parametre ve seviyelere ait hiper düzlem grafikleri

Şekil 4.9’de parlatılmamış deney numunesine ait 0.2x0.3 mm’lik dikdörtgen alandan alınan yüzey topoğraf sonuçları verilmiştir. Burada her bir oyuk, takımın geçtiği ve iz bıraktığı yeri temsil etmektedir. Oyuğun alt ve üst tepe noktalarının arasındaki uzaklık maksimum -9 μm ile 9 μm arasında çıkmıştır. Ayrıca parlatılmamış numunenin tepelerinde de oldukça keskin ve yüksek vadilerin oluştuğu görülmüştür.



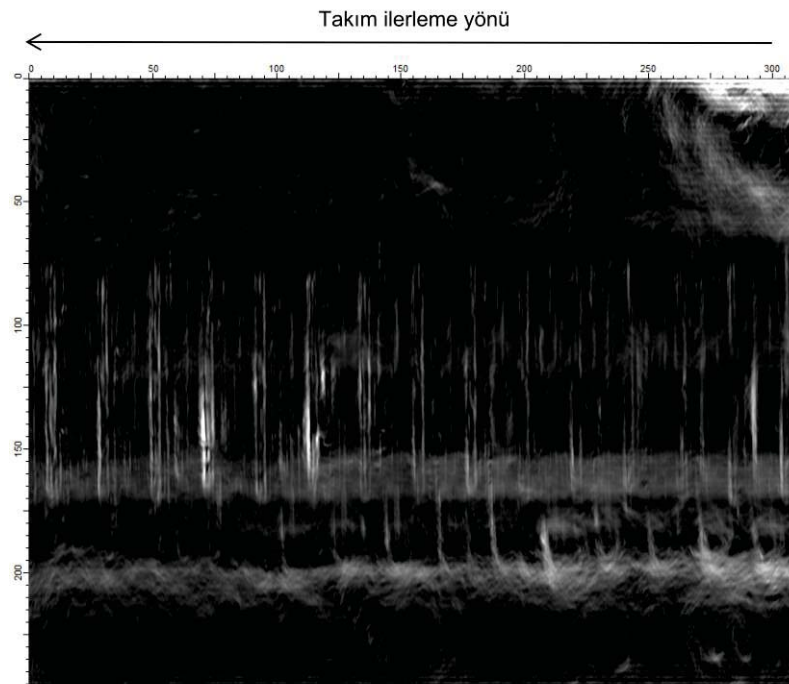
Şekil 4.9. Parlatılmamış deney numunesinden alınan yüzey topoğrafyası

Şekil 4.10'te ise parlatılmış numunenin yüzey topoğrafya görüntüsü verilmiştir. Buradaki vadilerin alt ve üst noktalarında ciddi değişiklikler meydana gelmiştir. Parlatma sayesinde maksimum tepe noktası $4\text{ }\mu\text{m}$ ile $-9\text{ }\mu\text{m}$ arasında çıkmıştır. Bazı bölgelerde, şekilde de görüldüğü gibi parlatma takımı vadilerin alt noktasına da nüfus etmiş olup aradaki vadinin alt noktası $-2\text{ }\mu\text{m}$ 'ye kadar düşebilmiştir. Parlatma işleminin malzeme yüzeyinde ciddi ezmeler meydana getirip yüzey özelliklerini olumlu anlamda etkilediği bu analizler sonucunda da görülmüştür.

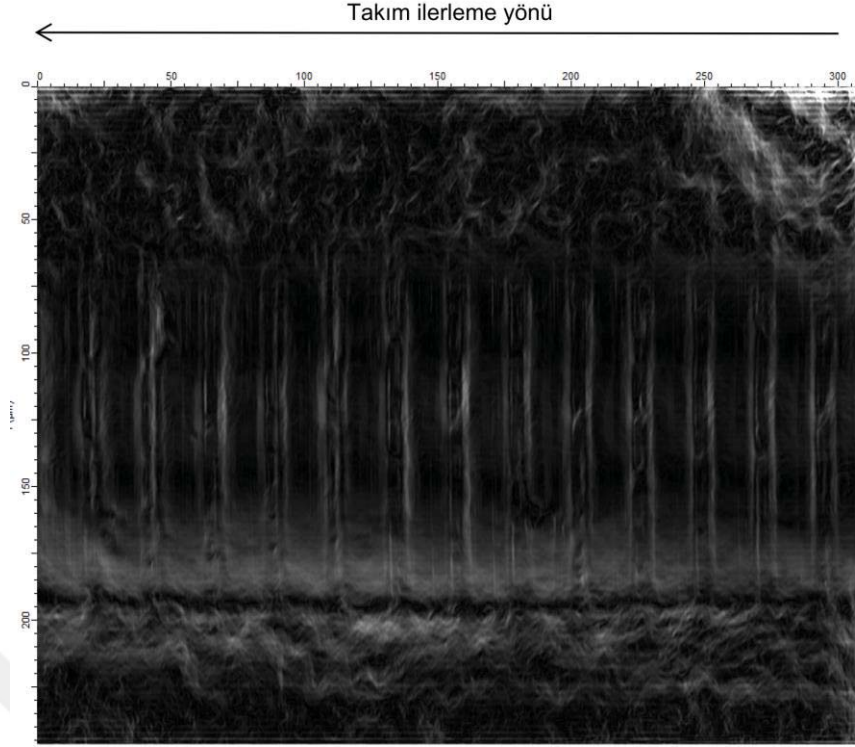


Şekil 4.10. Parlatılmış numunelerin yüzey topoğrafya sonuçları

Parlatılmamış ve parlatılmış numunelerin karanlık ortamda yakınlştırılmış yüzey topoğrafya görüntüleri sırasıyla Şekil 4.11’de ve Şekil 4.12’de verilmiştir. Burada, tornalanmış numunede görülen yoğun çizgiler ezerek parlatılmadan sonra kısmen giderilmiştir. Bu çizgilerin giderilmesiyle daha pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir.



Şekil 4.11. Tornalanmış numunelerin karanlık alanda çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.12. Parlatılmış numunelerin karanlık alanda çekilmiş fotoğrafları

Yüzey pürüzlülük sonuçları, tez çalışmasındaki parametrelere benzer şekilde çalışılmış iki çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.7). Çizelgede, parametrelerin hangi seviyelerinin en düşük pürüzlülük değerini verdiği görülmektedir. Tez çalışmasında literatürdeki iki çalışmaya benzer şekilde ezme miktarının en yüksek, ilerleme hızının da en düşük seviyesi için en az yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Ancak literatürden farklı olarak, en düşük yüzey pürüzlülük değeri en yüksek parlatma hızında değil orta düzeydeki hızda meydana gelmiştir.

Çizelge 4.7. En düşük yüzey pürüzlülük değerleri için optimizasyon sonuçları

Çalışma	Parlatma Hızı (dev/dk)	İlerleme hızı (mm/dev)	Ezme miktarı (mm)
Boozarpoor ve ark. (2021)	900 (En yüksek hız)	0.08 (En düşük ilerleme)	0.08 (En büyük ezme mik.)
John ve ark. (2017)	1100 (En yüksek hız)	0.07 (En düşük ilerleme)	0.04 (En büyük ezme mik.)
Tez Çalışması (2021)	200 (En düşük hız)	0.1 (En düşük ilerleme)	0.15 (En büyük ezme mik.)

4.4. Eksenel Yorulma Test Numunelerinin Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri Çizelge 4.10’da verilen yorulma test tablosundaki deney numunelerine yapılmıştır. Parlatılmış ve parlatılmamış test numunelerinin ortalama

sertlik değerleri izelge 4.8’da verilmiştir. Her numunede üç farklı parlatılmış bölgeden ölçüm alınmıştır. Aynı numunedeki sertlik lmlerinin ortalama standart sapması 0.44 HRC bulunmuştur. 4 tekrarlı üretilen yorulma testi numunelerinden  yorulma deneylerinde kullanıldığı için mikrosertlik ölçümleri geri kalan tek numune üzerinden alınmıştır.

Çizelge 4.8. Sertlik lm sonuçları

Deney Num.	Mikrosertlik Değeri (HRC)
1	39.9
2	45.4
3	47.9
4	39.3
5	45
6	43.8
7	41.8
8	40.4
9	39.7
Tornalanmış	41.8

Parametrelerin ortalama sertlik değerlerine etki değerlerini hesaplamak için sonuçlara ANOVA uygulanmıştır. ANOVA tablosu izelge 4.9’de görülmektedir. İlerleme miktarının p değeri 0.334, ezme miktarının ise 0.352 çıkmıştır. P değerinin 0.1’den yüksek olması istatistiksel olarak bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir fark oluşturmadığı anlamına gelmektedir. Malzemenin silindirik olmasından kaynaklı sertlik ölçümleri sonuçlarına hangi parametrenin ne kadar etkisinin olduğu anlamlı şekilde değerlendirilememiştir. Varyans analizi sonucunda lm sonuçlarındaki toplam hata %41.38 olarak ölçülmüştür. Bu nedenle ezerek parlatma işleminin yüzey sertliğine etkisi tespit edilememiştir.

Çizelge 4.9. Mikrosertlik lm sonuçlarına yapılan varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Etki Yüzdesi	Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
Ezme Miktarı (mm)	2	21.35	28.39%	10.674	1.37	0.352
İlerleme Miktarı (mm/dev)	2	22.73	30.23%	11.364	1.46	0.334
Hata	4	31.12	41.38%	7.779		
Toplam	8	75.2	100.00%			

4.5. Eksenel Yorulma Test Numunelerinin Yorulma Testi Sonuçları

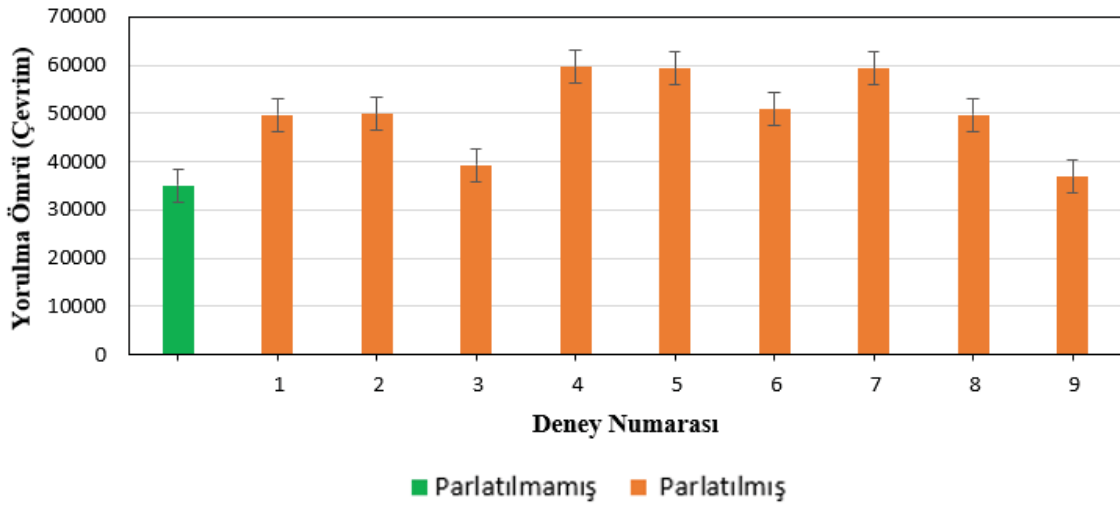
Yüzey pürüzlülük ölçümlerine göre parlatma hızının yüzey pürüzlülüğüne herhangi bir önemli bir etkisinin olmamasından dolayı, yorulma testlerinin daha kısa sürede bitirilebilmesi için yorulma ömrüne parlatma hızının etkisi incelenmemiştir. Dokuz farklı yorulma testinin üçer tekrarlı olarak gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen yorulma ömürleri Çizelge 4.10'de verilmiştir. Malzemenin iç yapısından ve yüzeyinden kaynaklı fark edilemeyen problemlerden dolayı yorulma testlerinde tekrarlanabilirliğin sağlanması oldukça zordur. Bu gibi durumlarda veri eliminasyonu oldukça önem kazanmaktadır. Tez çalışmasındaki üç tekrarlı yorulma test sonuçlarındaki hatayı azaltmak için veri eliminasyonu yapılmıştır. Çıkan sonuçların veri eliminasyonu için chauvenet testi uygulanmış ve kalan sonuçların ortalaması alınmıştır. Tekrarlı numunelerdeki yorulma ömürlerinin ortalama standart sapması 3389 çevrim olarak bulunmuştur. Her bir deneydeki standart sapma değerini ortalama yorulma ömrüne oranladığımızda belirsizliğin % 6.9 oranında olduğu ve böylece verilen ölçüm sonuçlarının % 93.1 oranında güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu sonuçlara göre, en düşük ömre sahip numuneler, beklenildiği gibi, sadece tornalanmış olan numunelerdir. En yüksek çevrim ise 4, 5 ve 7. deneylerde görülmüştür. Numunelerin yorulma ömür sonuçları Şekil 4.13'da tornalanmış numunenin sonucuyla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ezerek parlatılan numunelerden en düşük yorulma ömrü bile tornalanmış numunelerin ömründen %5.34 fazla çıkmıştır. Yorulma ömründeki en

Çizelge 4.10. Yorulma testi sonuçları

Deney Num.	Ezme miktarı (mm)	İlerleme Miktarı (mm/dev)	Yorulma Ömrü (Ortalama) (çevrim)	STD. Sapma
1	0.05	0.1	49722	-
2	0.05	0.2	49946	5629
3	0.05	0.4	39348	3446
4	0.1	0.1	59614	310
5	0.1	0.2	59323	2805
6	0.1	0.4	50930	3956
7	0.15	0.1	59262	10906
8	0.15	0.2	49704	694
9	0.15	0.4	36929	1623
Tornalanmış			35056	1129
			Ortalama	3389

yüksek artış oranı ise 4. Deneyde görülmüştür. En yüksek çevrim yapan numune, tornalanmış numuneye göre %70.06 daha fazla çevrime çıkmıştır.



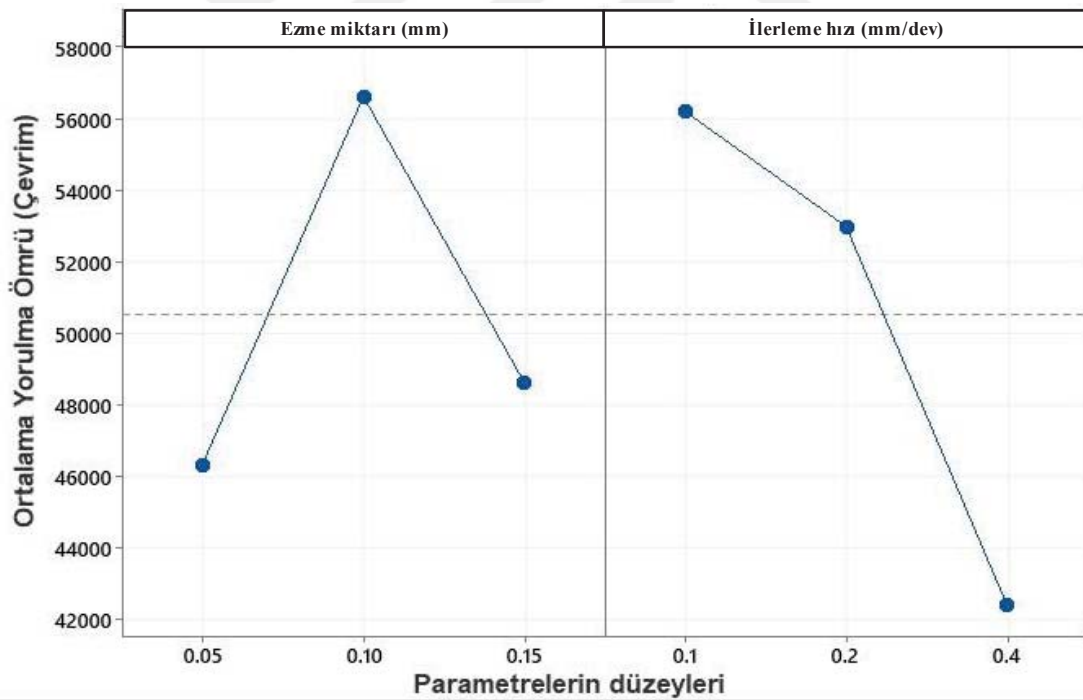
Şekil 4.13. Ortalama yorulma ömürlerinin karşılaştırması

Parametrelerin ortalama yorulma ömrüne etki değerlerini hesaplamak için sonuçlara ANOVA uygulanmıştır. ANOVA tablosu Çizelge 4.11’de görülmektedir. İlerleme miktarının p değeri 0.026, ezme miktarının ise 0.066 çıkmıştır. P değerinin 0.05 ile 0.1 değerleri arasında olması, ölçüm sonuçları 'marjinal olarak anlamlı' olarak yorumlanır, bu da parametrenin sonuçlara hala anlamlı bir etki olduğunu göstermektedir. Varyans analizi sonucunda ölçüm sonuçlarındaki toplam hata %11.01 olarak hesaplanmıştır. İlerleme miktarının yorulma ömrüne etkisi %57.08 olurken, ezme miktarında ise bu oran %31.91 olarak hesaplanmıştır. Ezme miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi % 78 iken, yorulma ömrüne etkisinin yaklaşık %32 olması yorulma ömründe yüzey pürüzlülüğünden farklı etmenlerin de etkili olduğunu göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü yorulma ömrü arasında bir korelasyon olduğu ancak bunun lineer bir şekilde seyretmediği bulunmuştur. En düşük yüzey pürüzlülük değerini veren optimum parametre seviyelerinin en yüksek yorulma ömrünü vermediği Boozarpoor (2021)’in çalışmasında da gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Yorulma test sonuçlarına göre yapılan varyans analiz sonuçları

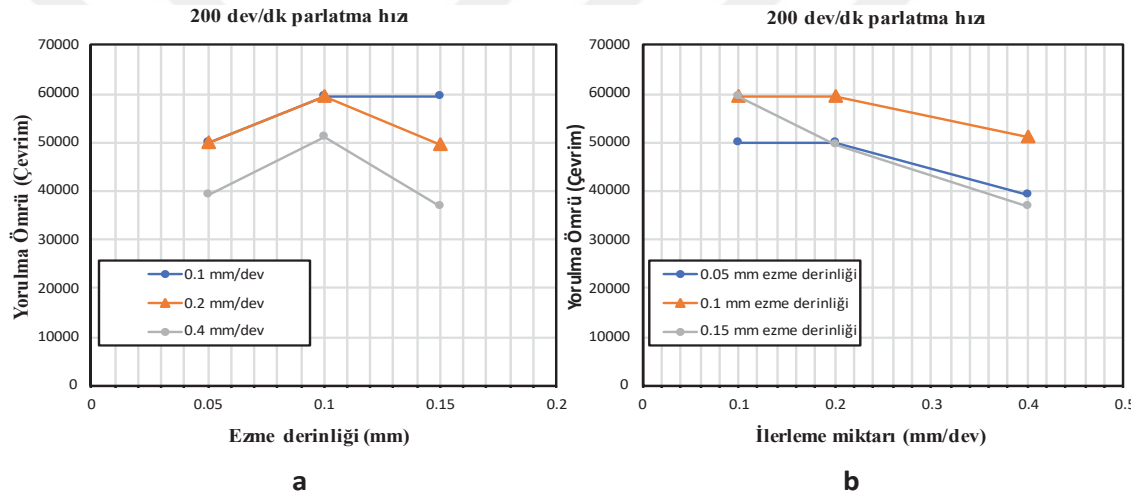
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Etki Yüzdesi	Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
Ezme Miktarı (mm)	2	174862403	31.91%	87431201	5.8	0.066
İlerleme Miktarı (mm/dev)	2	312770474	57.08%	156385237	10.37	0.026
Hata	4	60311366	11.01%	15077842		
Total	8	547944243	100.00%			

Şekil 4.14, parametre düzeylerinin yorulma ömürlerine etkisini göstermektedir. İlerleme miktarı artarken yorulma ömründe düşüş gözlemlenmektedir. Yüzey pürüzlülüğünde ilerleme hızındaki optimum seviye olan 0.1 mm/dev değeri, yorulma ömür sonuçlarında da optimum seviye çıkmıştır. Ezme miktarı parametresi için optimum seviye 0.1 mm çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ile karşılaştırıldığında en yüksek yüzey pürüzlülüğü veren ezme miktarı en yüksek yorulma ömür değerini vermiştir. Ezme miktarı arttıkça mikro çatlakların oluşma riski artmaktadır. Ezme miktarının artmasıyla daha pürüzsüz yüzey elde edilse de mikro çatlakların oluşma ihtimalinin artmasından dolayı yorulma ömrüne olumsuz etkide bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.14. Yorulma ömrü için parametre düzey grafikleri

Şekil 4.15’de yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre oluşturulan hiper düzlem grafikleri verilmiştir. Şekil 4.15 a’da farklı ilerleme hızlarında ezme miktarının etkisi sunulmuştur. Üç ilerleme hızı için de ezme miktarı 0.05’ten 0.01 seviyesine çıktığında yorulma ömründe artış söz konusudur. Ancak 0.15 mm’ye yükseldiğinde yorulma ömründe üç ilerleme hızında da artış söz konusu olmamıştır. Hatta 0.2 ve 0.4 mm/dev ilerleme hızları için önemli miktarda yorulma ömründe düşüş yaşanmıştır. İlerleme hızının hem yüzey özellikleri hem de yorulma ömrü açısından önemli bir parametre olduğu net olarak anlaşılmaktadır. Şekil 4.15 b’de farklı ezme derinliklerinde ilerleme hızlarının etkisi gösterilmiştir. 0.1 mm ezme miktarı ilerleme miktarının üç seviyesi için de en yüksek yorulma ömrünü vermiştir. Üç ezme miktarı için de ilerleme miktarının artmasıyla, yorulma ömrü bariz şekilde azalmıştır. Sonuç olarak en yüksek yorulma



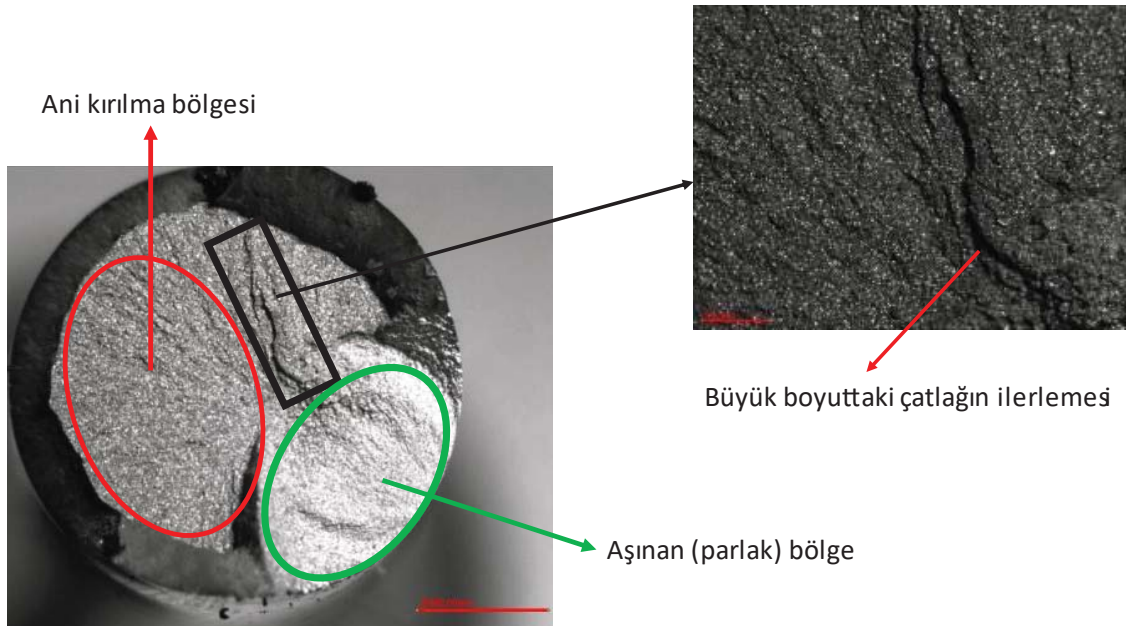
Şekil 4.15. Parametre ve seviyelere ait hiper düzlem grafikleri

ömrüne ulaşmak için ezme miktarını belirli bir seviyenin üzerine çıkarmamak ve ilerlemeyi en düşük seviyede tutmak gerektiği bulunmuştur. Çalışılan parametreler arasında en yüksek yorulma ömrünü Çizelge 4.12’te görüldüğü gibi ezme miktarının 0.1 mm, ilerleme hızının 0.1 mm seviyeleri vermiştir.

Çizelge 4.12. Parametrelerin optimum seviyeleri

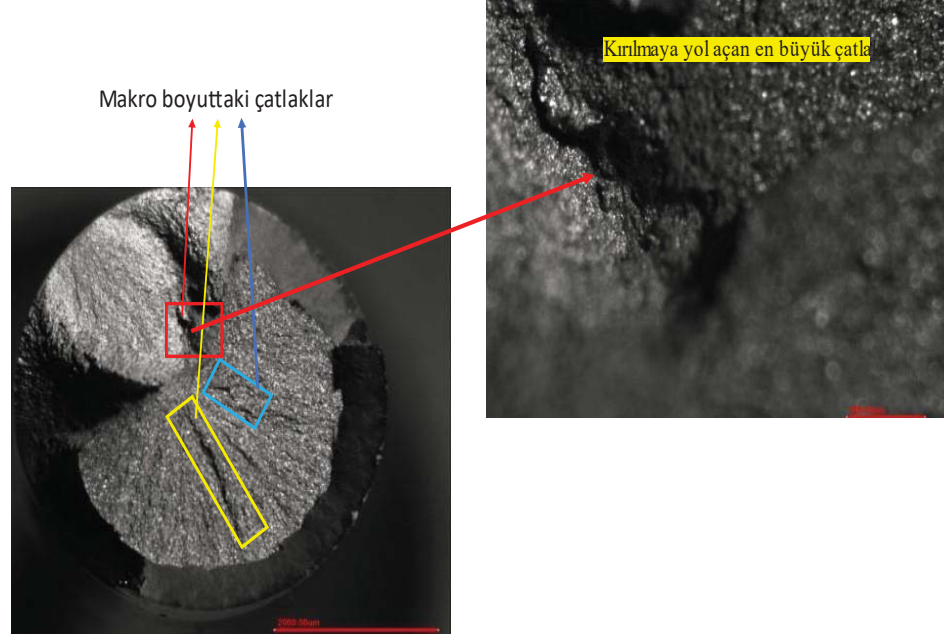
Parametreler	Optimum seviyeleri
Ezme miktarı	0.1 mm
İlerleme miktarı	0.1 mm/dev

Yorulma testlerinden sonra parlatılmış numunelerden en uzun ve en az sürede kırılmış olanları ile ve parlatılmamış olan bir numunenin kırılma yüzeyleri optik mikroskopla incelenmiştir. Şekil 4.16'da ortalama yorulma ömrü 59614 olan 4 numaralı teste ait numunenin kırılma yüzeyi görülmektedir. Makro çatlakların oluşmasıyla yüzeylerin birbirine sürtünmesi sonucu oluşan parlak yüzey ve ani kırılma bölgeleri gösterilmiştir. Ani kırılma bölgesinde de mikro ve makro çatlaklar gözükse de Şekil 4.16'da ayrıntılı şekilde gösterilmiş olan büyük çatlağın ilerlemesiyle hasar meydana gelmiştir.



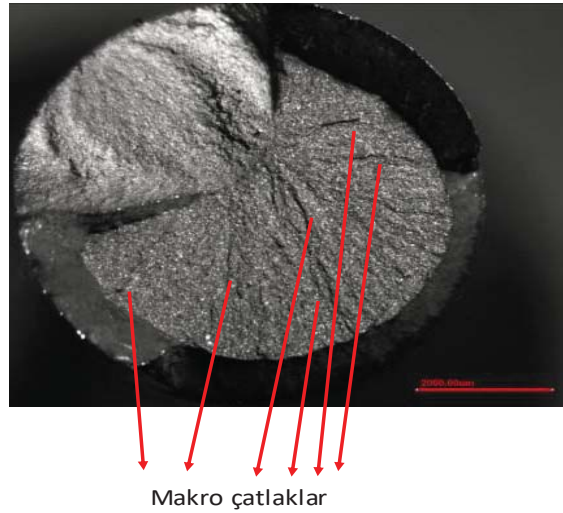
Şekil 4.16. 4. deneye ait kırılma yüzeyi ve çatlak ilerlemesi

Şekil 4.17'de ise 36929 çevrim ile parlatılmış numuneler arasında en düşük çevrime sahip olan 9. Test numunesinin kırılma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Burada yorula ömrü en fazla olan numune ile karşılaştırıldığında az çevrim yapan numunenin çatlak yüzeylerinde daha çok makro çatlağın olduğu görülmektedir. Bu da yüzeyden gelen mikro çatlakların yoğun olduğunun belirtisidir. İlerleme hızının yüksek olmasından ve ezme miktarının yüksek olmasından kaynaklı oluşacak mikro çatlakların bu yoğun makro çatlaklara yol açtığı düşünülmektedir.



Şekil 4.17. 9. deneye ait kırılma yüzeyi ve çatlak ilerlemesi

Parlatılmamış numunenin kırılma yüzeyleri ile en az yorulma ömrüne sahip parlatılmış numunenin kırılma yüzeyleri birbirlerine benzerlik göstermektedir. Şekil 4.18’de parlatılmamış numuneye ait kırılma yüzey görüntüsü verilmiştir. Bu numunede de makro çatlak sayısı oldukça fazladır. Ezerek parlatmadan dolayı oluşan kalıntı basma gerilmelerin bu numunede olmadığından mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesi daha hızlı gerçekleşmiştir.



Şekil 4.18. Parlatılmamış numuneye ait kırılma yüzey görüntüsü

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında öncelikle yüksek basınç altında çalışan hidrolik silindirlerin yorulma performansının uygulanan yüzey işlemleri ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Kurulan deney düzeneğinde birçok sızdırmazlık, hasar ve demontaj problemleri ile karşılaşıldığından hidrolik silindirler üzerinde yapılan deneylerin tamamlanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle standart eksenel yorulma testi numuneleri kullanılarak yorulma ömrünün yüzey işlemleriyle arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu kapsamda, AISI 4340 malzemenin yorulma ömrüne, ezerek parlatma işlemi parametreleri olan ezme miktarı, ilerleme hızı ve parlatma hızının etkisi araştırılmıştır. Standart test numunelerine eksenel yorulma testi uygulanmıştır. Çevrimsel yükleme $R=-0.1$ oranında ve akma mukavemetinin %90'ına denk gelen gerilme seviyesinde uygulanmıştır. Ezerek parlatma işleminin yüzey pürüzlülüğüne ve sertlik değerlerine olan etkisi de ayrıca araştırılmıştır.

5.1 Sonuçlar

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Katmanlı silindirlerin iç basınç altında SEA ile hesap edilen gerilmeleri Lamé denklemleri kullanılarak hesaplanan gerilmeler ile % 99 oranında birbiriyle uyumlu çıkmıştır. Bu nedenle karmaşık geometrili katmanlı silindirlerin hesabında SEA'lerin güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Ezerek parlatma işlemi sonucunda, numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinde parlatılmamış numuneye göre bariz şekilde azalma görülmektedir. Çıkan sonuçlara göre, parlatılmamış numunenin ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,98 μm iken parlatma ile bu pürüzlülük değeri 0,51 μm 'ye kadar düşürülebilmektedir.
- Ezerek parlatmanın parametreleri olan ezme miktarı, ilerleme hızı ve parlatma hızından yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi en fazla olan parametrenin % 78.01 oranla ezme miktarı olduğu tespit edilmiştir.

İlerleme hızının etkisi % 9.02 bulunurken, parlatma hızının yüzey pürüzlülüğünde önemli bir etkiye sahip olmadığı bulunmuştur.

- Ezerek parlatma işleminin etkisi yüzey topoğrafya analizleriyle görüntülenmiş ve tornalama işlemiyle oluşan takım izlerinin parlatma işlemiyle azaltıldığı ve daha pürüzsüz bir yüzey elde edildiği görüntülenmiştir.
- Ezerek parlatma işleminin yorulma ömrüne önemli oranda etki ettiği bulunmuştur. AISI 4340 malzemenin yorulma ömründe %70'e kadar iyileşme görülmüştür. Bu sonuç değişken yüklemeler altındaki yapısal parçaların yüzey işlemleri ile yorulma dayanımlarının önemli ölçüde iyileştirilerek kullanım ömürlerinde ciddi artışlar elde edilebileceğini göstermiştir.
- Ezerek parlatma işleminde ezme miktarı ve ilerleme hızının yorulma ömrüne etkisi araştırılmıştır. İlerleme hızının % 57.08, ezme miktarının ise %31.91 oranında etkili olduğu belirlenmiştir.
- Malzemenin yüzey özelliklerini en iyi hale getiren parlatma parametrelerinin yorulma performansında en iyi parametre olmadığı görülmektedir. Bu da yorulma ile yüzey pürüzlülüğü arasında bir korelasyonun olup ancak bu korelasyonun doğrusal olmadığını göstermektedir.

5.2 Öneriler

Yorulma konusu halen sanayide sıkça rastlanan ve halen tam anlamıyla çözülemeyen problemlerden biridir. Bu yüzden malzemeye uygulanacak işlemlerin iyi araştırılması gerekmektedir. Bu parametrelerin kullanılacağı seviyeler de oldukça önem arz etmektedir. Bu konuya benzer çalışmalar yapacak araştırmacılara yol göstermek amaçlı aşağıda konu hakkında öneriler sunulmuştur.

- Hidrolik silindirlerin yorulma deney düzeneğinde vidalı bağlantılar kullanılmıştır. Bunun yerine hidrolik pres altında numune kapaklarının kapatılıp açılmasıyla deneyler daha kolay olarak gerçekleştirilebilir.

- Hidrolik silindirlerde kullanılan malzeme ısıt işlemsiz bir şekilde kullanılarak daha düşük basınçlarda deneylerin yapılması sağlanabilirdi. Böylece sızdırmazlık ve deney düzeneğindeki hasar problemleri en aza indirilebilir.
- Aynı malzemeyi farklı ısıt işlemlere tabii tutarak ezme işlemi yapılabilir. Bu sayede ezerek parlatma işlemin ısıt işlemlı malzemeler üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Aynı ezerek parlatma parametre ve seviyeleri farklı malzemelere uygulanabilir ve aynı parlatma işleminin farklı malzemeler üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Ezerek parlatmada kullanılan bilya malzemesi araştırılıp farklı bilya malzemesi ile ezme işlemi yapılp yüzey özellikleri ve yorulma performansları incelenebilir.
- Farklı tornalama şartları üretilen numunelerin parlatılmasıyla yüzeyin nasıl etkilendiğı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Akkurt, A., Kurt, A., Özdemir, A., & Şeker, U., 2012, Comparison of hole surface finishing processes with roller burnishing method applied in copper materials. *Gazi University Journal of Science*, 27(1), 721-734-734.
- Anonim, 2006, Tarım istatistikleri özeti, DİE Yayınları, No;12, Ankara, 22-23.
- Anonymous, 2019, Shot peening glass beads product featuress [online], <https://www.jundaglassbeads.com/News/85.html> [Ziyaret Tarihi: 30 Mart 2020]
- Anonymous, 1989, Farm accountancy data network, an A-Z of methodology” Commission Report of the EC, Brussels, 16-19.
- Avilés, R., Albizuri, J., Rodríguez, A., & López De Lacalle, L. N., 2013. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue*, 55, 230-244. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.06.024>
- Babalık, C. F., ve Çavdar, K., 2018, Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Dora Yayınları,
- Boozarpoor, M., & Teimouri, R., 2021. Parametric study of multi-roller rotary burnishing process. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(2), 179-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.10.001>
- Corliss, R., 1993, *Pacific Overtures Times*, 142 (11), 68-70.
- Davidson, T. E., Eisenstadt, R., & Reiner, A. N., 1963. Fatigue characteristics of open-end thick-walled cylinders under cyclic internal pressure. *Journal of Fluids Engineering*, Transactions of the ASME, 85(4), 555-565. <https://doi.org/10.1115/1.3656910>
- Dasgupta, D., 1998, *Artificial immune systems and their applications*, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 45-52.
- De Castro, L. N. and Von Zuben, F. J., 2000, *Artificial immune systems: Part I- Basic theory and applications*, DCA-RT 02/00, Brasil, 23-28.
- Dieter, G. E., & Bacon, D. J., 1986, *Mechanical metallurgy (Vol. 3)*. McGraw-hill, New York
- Duncheva, G. V., Maximov, J. T., Dunchev, V. P., Anchev, A. P., Atanasov, T. P., & Capek, J., 2020, Single toroidal roller burnishing of 2024-T3 Al alloy implemented as mixed burnishing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(11-12), 3559-3570. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06350-2>
- Eisenstadt, R., Kendall, D. P., & Davidson, T. E., 1969, A comparison of results of axial-tension, rotating-beam and pressurized-cylinder fatigue tests. *Experimental Mechanics*, 9(6), 250-254.
- El-Axir, M. H., 2000 “An investigation into roller burnishing”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 40, 1603-1617,
- Findley, W. N., & Reed, R. M., 1982, *Fatigue of Thick Tubes: Effect of Mean Pressure, Honing, Plating, Burnishing, and Peening*.
- Gardin, C., Courtin, S., Bertheau, D., Bézine, G., & Ben Hadj Hamouda, H., 2007, The influence of roller burnishing on the fatigue crack propagation in notched round bars - Experimental observations under three-point bending. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 30(4), 342-350. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01111.x>

- Geren, N., & Tunç, T., 2000, Su jeti kesme sistemlerinde kullanılan basınç artırıcılarda gerilme analizleri ve tasarım sınırları.
- Güneş, S. ve Polat, K., 2009, Elektrokardiyogram (EKG) aritmi teşhisinde en az kareli destek vektör makinaları kullanımına dayalı medikal teşhis destek sistemi, 13. *Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, BİYOMUT-2009*, İstanbul, 170-173.
- Harvey, J. F., 1974, Theory and design of modern pressure vessels, *Van Nostrand Reinhold Company*, New York
- Hoepfner, D. W. (1996). Industrial significance of fatigue problems. Materials Park, OH: ASM International, 3.
- Hong T., Ooi J.Y., Shaw B., 2008, A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses, *Engineering Failure Analysis*, 15, 1097-1110
- Hua, Y., Liu, Z., Wang, B., & Hou, X., 2019, Surface modification through combination of finish turning with low plasticity burnishing and its effect on fatigue performance for Inconel 718. *Surface and Coatings Technology*, 375(April), 508–517. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.057>
- Lee, Y. L., Pan, J., Hathaway, R., & Barkey, M. (2005). Fatigue testing and analysis: theory and practice (Vol. 13). Butterworth-Heinemann.
- Llaneza V., & Belzunce F. J., (2014), Looking for the Optimal Shot Peening Treatment on Quenched and Tempered Steels with Different Hardness Levels, *In Proceedings of the 12th International Conference on Shot Peening*, 49-54
- Majzoubi G.H., Azizi R., Nia A.A., 2005, A three – dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts, *Journal of Materials Processing Technology*, 164, 1226-1234
- Marczewska, I., Bednarek, T., Marczewski, A., Sosnowski, W., Jakubczak, H., & Rojek, J., 2006. Practical fatigue analysis of hydraulic cylinders and some design recommendations. *International journal of fatigue*, 28(12), 1739-1751.
- Mohamed, O. A. O., & Wagne, L., 2016, Optimizing the Process Parameters and Investigating the Influence of Shot Peening and Roller Burnishing On Surface Layer Properties and Fatigue Performance of Al 6061 T4. *Sohag Journal of Sciences*, 1(1), 65–68. <https://doi.org/10.18576/sjs/010108>
- Ozturk, F., 2011 Finite-element modelling of two-disc shrink fit assembly and an evaluation of material pairs of discs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 225(2), 263–273. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES2354>
- Özel, A., Temiz, Ş., Aydın, M. D., & Şen, S., 2005 Stress analysis of shrink-fitted joints for various fit forms via finite element method, *Materials and Design*, 26(4), 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.06.014>
- Patil, S. A., 2006,. Fatigue analysis of compound cylinder subjected to repeated internal pressure. American Society of Mechanical Engineers, *Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 2006, 1–5. <https://doi.org/10.1115/PVP2006-ICPVT-11-93761>
- Peres, M. P., ve Voorwald, H. J. C., 1996, Effect of cadmium deposition on fatigue strength of 4340 steel. In *Fatigue'96: Sixth International Fatigue Congress*. (Vol. 2, pp. 1421-1426). Schulze V., Modern Mechanical surface treatment, Wiley-Vch, Karlsruhe – Germany, 9-14
- Shigley, J. E. (2011). Shigley's mechanical engineering design. Tata McGraw-Hill Education.

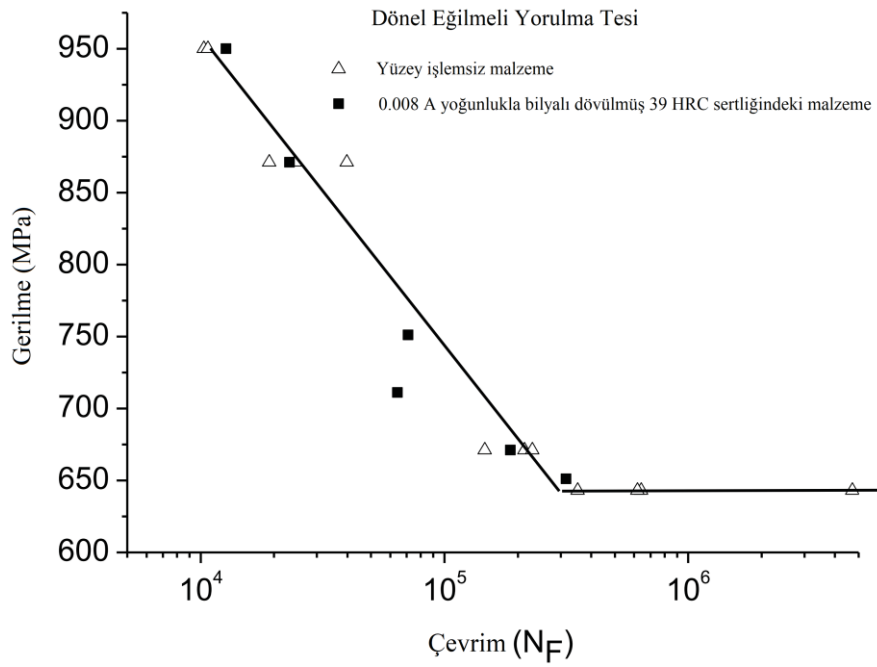
- Specht, R., Harris, F., Lane, L., Jones, D., Hackel, L., Zaleski, T., Wübbenhorst, W., 2003, Process control techniques for laser peening of metals, *Shot Peening*, 474-482.
- Steven R. Lampman, Steven R. Lampman, 1996. ASM handbook. Volume 19, Volume 19. Materials Park, Ohio
- Torbacki, W. 2007, Numerical strength and fatigue analysis in application to hydraulic cylinders. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 25(2), 65-68.
- Torres, M. A. S.ve Voorwald, H. J. C., 2002, An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel, *International Journal of Fatigue*, 24(8), 877-886.
- Torres, M. A. S., Harada D.T., Baptista, C.A.R.P., Cindra Fonseca M.P., 2016, Effect of Shot Peening on Fatigue Behavior of AISI 4340 in Different Loading Conditions, *Key Engineering Materials*, 713, 30-33
- Vielma, A. T., Llaneza, V., & Belzunce, F. J., 2014, Shot peening intensity optimization to increase the fatigue life of a quenched and tempered structural steel. *Procedia Engineering*, 74, 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.261>
- Yamasa, 2021 Tek bilyalı parlatma takımları [online], Web adresi: <https://yamasa.com.tr> [17/05/2021]
- Vielma, A. T., Llaneza, V., & Belzunce, F. J., 2014, Shot peening intensity optimization to increase the fatigue life of a quenched and tempered structural steel. *Procedia Engineering*, 74, 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.261>
- Zhang, Y., McClain, B., & Fang, X. D., 2000. Design of interference fits via finite element method, *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(9), 1835–1850. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00072-7)
- Zhang, P., Lindemann, J., Ding, W. J., & Leyens, C., 2010, Effect of roller burnishing on fatigue properties of the hot-rolled Mg-12Gd-3Y magnesium alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 124(1), 835–840. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.07.070>
- Zhang, P., & Lindemann, J., 2005, Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80. *Scripta Materialia*, 52(10), 1011–1015. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.01.026>
- Zhuang, W., Liu, Q., Djugum, R., Sharp, P. K., & Paradowska, A., 2014. Deep surface rolling for fatigue life enhancement of laser clad aircraft aluminium alloy. *Applied Surface Science*, 320, 558–562. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.139>

EKLER

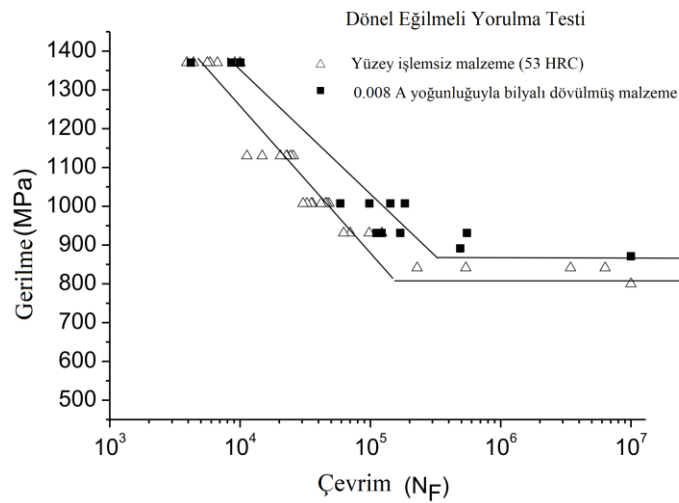
EK-A Bilyalı Dövme İşlemi Literatür Araştırması

Kaynak araştırmasında anlatılan çalışmaların devamı niteliğindeki bir diğer çalışma yine Torres ve ark. (2016) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada bilyalı dövülmüş AISI 4340 çeliğinin farklı yüklemeler altında yorulma davranışları incelenmiştir. Mevcut çalışmada, bilyalı dövme işlemi uygulanmış AISI 4340 çeliğinin yorulma ömürlerini, iniş takımında kullanılan üç farklı malzeme sertliklerini (39,43 ve 53 HRC) değerlendirmişlerdir. Numunelere dönel eğilmeli ve eksenel çekme yorulma testleri yapılmıştır. Ayrıca kalıntı basma gerilme bölgeleri yorulma deneylerinden önce ve sonra x-ışını tensometrisi ile ölçülmüştür. Bilyalı dövme işleminden sonra yorulma ömründeki değişimin, kalıntı basma gerilme bölge gevşemesine, çatlak başlangıç bölgelerine ve yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilmesini yapmışlardır. Bilyalı dövme işleminde S 230 (0.7 mm çap) çelik bilyalar kullanılmış olup, dakikada 3 kilogram bilye bombardımana tutulmuştur. Kalıntı gerilme dağılımının derinliğe göre değişiminin tespiti için numune yüzeyi, asit olmayan bir çözelti ile elektrolitik olarak parlatılmıştır. Yorulmuş numunelerin çatlak bölgeleri, çatlak başlangıç noktalarını belirlemek için bir tarama elektron mikroskobu (LEO 435) kullanılarak incelenmiştir. Bilyalı dövme işlemi ile oluşan kalıntı basma gerilme alanlarını incelemek için testler boyunca X-ışını difraksiyon yöntemi ile incelemeler yapmışlardır. Bilyalı dövme işlemiyle yüzey pürüzlülüğündeki artış, malzemenin sertliği ile ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Ortalama pürüzlülük R_a 'nın dövme işleminden sonra, 53 HRC için $1.34 \pm 0.095 \mu m$, 43 HRC için $1.17 \pm 0.075 \mu m$ ve 39 HRC için $0.92 \pm 0.063 \mu m$ ölçülmüştür. Pürüzlülükteki bu artış yüzeyde mikro çatlakların oluşturup yorulma ömründe azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre, 39 HRC malzeme durumu için, oluşan kalıntı basma

gerilme alanı, pürüzlülük artışına engel olamadığından yorulma ömründe iyileşme söz konusu olmamıştır (Şekil A.2).



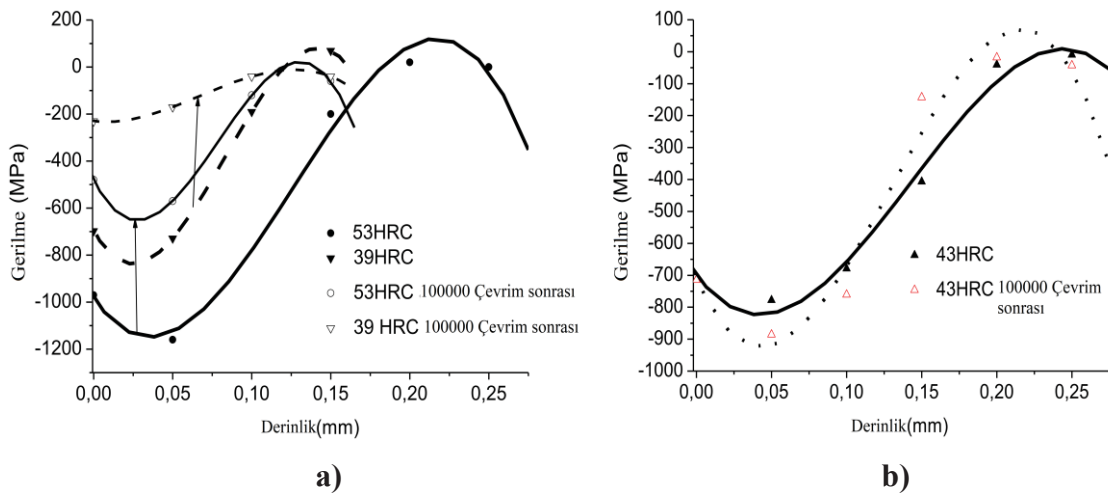
Şekil A.2 39 HRC sertliğindeki yüzey işlemsiz ve bilyalı dövülmeli numunelerin yorulma sonuçları (Torres ve ark. 2016)



Şekil A.1 53 HRC sertliğindeki, yüzey işlemsiz ve bilyalı dövülmeli numunelerin yorulma sonuçları (Torres ve ark. 2016)

Öte yandan, Şekil A.1’de görüldüğü üzere daha geniş bir kalıntı basma gerilme alana ve daha az pürüze sahip 53 HRC sertliğindeki numunelerin yorulmaya karşı dirençleri daha yüksek seviyede çıkmıştır.

Şekil A.3’de üç farklı sertlik değerine sahip numunelerin yorulma testlerinden önce ve sonra X-ışını difraksiyon yöntemiyle kalıntı basma gerilme bölgelerindeki gerilme değerleri verilmiştir. En yüksek ve en düşük sertlikteki malzemede (39 ve 53) HRC malzeme yüzeyindeki basma gerilmeleri 10^5 çevrimden sonra iki katı kadar azalma görülürken orta sertlikteki (43 HRC) malzemede bu azalma yüzeyde yok kadar az denilirken, derinlere inildikçe fark çoğalmıştır. Sonuç olarak düşük sertlikteki malzemelerde yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan yorulma ömründeki azalma meydana gelmişti. Burada ise yüksek sertlikten dolayı ve basma gerilmelerin hızlı bir şekilde azalması yorulma ömrünü etkilemektedir. Orta sertlikteki çeliğin bu anlamda seçilmesi daha mantıklı görülmektedir.



Şekil A.3 Yorulma testleri öncesi ve sonrasındaki kalıntı basma gerilme değerleri grafiği a) 53 HRC ve 39 HRC sertliğindeki numune b) 43 HRC sertliğindeki numune (Torres ve ark. 2016)

Vielma ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, farklı mekanik özelliklere sahip ($226 < HV < 552$) AISI 4340 çeliğin ve çeşitli bilyalı dövme yoğunluklarıyla ($8A < A1 < 21 A$) yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertleşmesi ve artık gerilme değerlerini elde etmişlerdir. Bu kapsamda en yüksek yorulma ömrüne ulaşmak için farklı bilyalı dövme yoğunluklarıyla yüzey işlemi uygulanmış numuneler döner eğilmeli yorulma testine tabi tutulmuştur. Yorulma test sonuçlarından optimum parametreleri elde etmişlerdir. Çalışmada kullanılan ısıtılma işlem parametreleri ve bu işlemler sonunda ortaya çıkan malzeme özellikleri Çizelge A.1’de gösterilmiştir. Farklı sertlikler sayesinde yorulma ömründeki

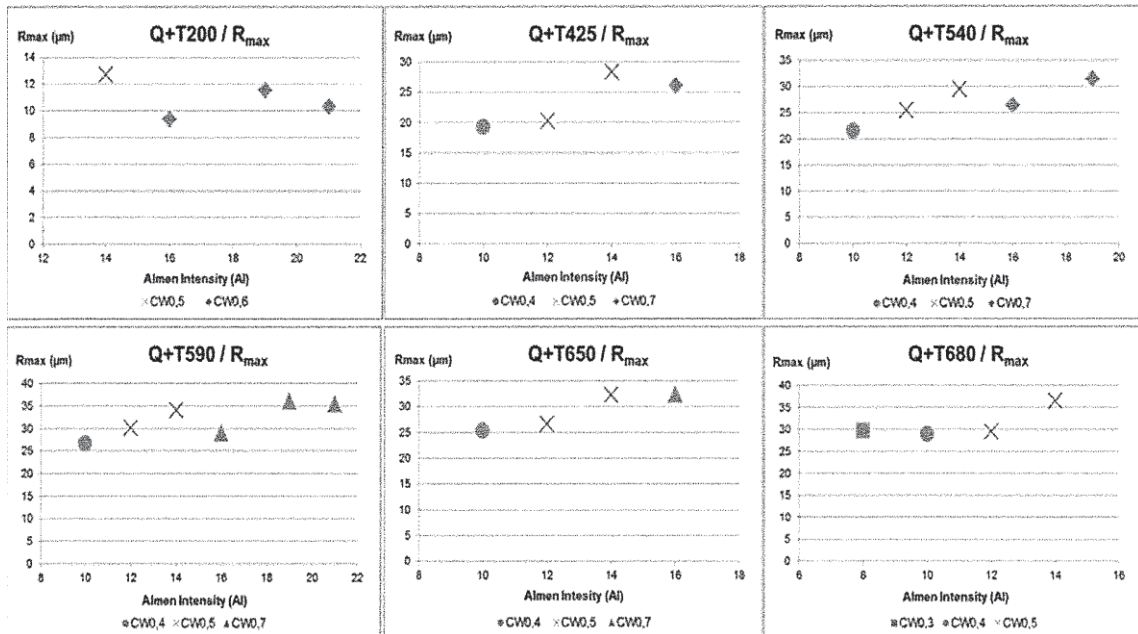
değişimin nedeni tam olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca çalışmada dört farklı bilya çapı (0.3,0.4,0.5,0.7) mm kullanılmıştır. Özellikle yüzeyde oluşacak plastik deformasyonun yüzeyde açtığı derinlik ve kalıntı gerilmelerin değişimi farklı bilya

Çizelge A.1 Test edilen numunelerin mekanik özellikleri (Torres ve ark. 2016)

Tavlama Sıcaklığı (°C)	HV	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_R (MPa)
200	552	201	1604	2057
425	424	200	1364	1426
540	350	198	1123	1201
590	325	205	983	1123
650	255	202	863	897
680	226	197	626	764

tipleriyle sağlanmıştır. Basınçlı hava makinesi kullanılarak yapılan bilyalı dövme işleminde çarpma açısı 90 derece olarak alınmış ve numune yüzeyleri %100 olarak dövülmüştür.

Şekil A.4'te farklı sertlikte 4340 çeliğin yüzey pürüzlülük değerleri mikron ölçekte verilmiştir. Grafik Almen yoğunluğu ile yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırmasını temsil etmektedir. Bilyalı dövme yoğunluğu arttıkça pürüzlülüğün arttığını gözlemlenmektedir ancak kullanılan bilya boyutu da bu artışta etkili bir parametredir. Bilya çapı 0.5'den 0.7 mm'ye yükseltildiğinde belirgin bir yüzeyde pürüzlerin arttığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil A.4'te bilyalı dövme işleminin yumuşak çeliklerde sert olanlara göre pürüzlülük



Şekil A.4 Farklı bilye ve dövme şiddetine bağlı yüzey pürüzlülüğü grafikleri (Torres ve ark. 2016)

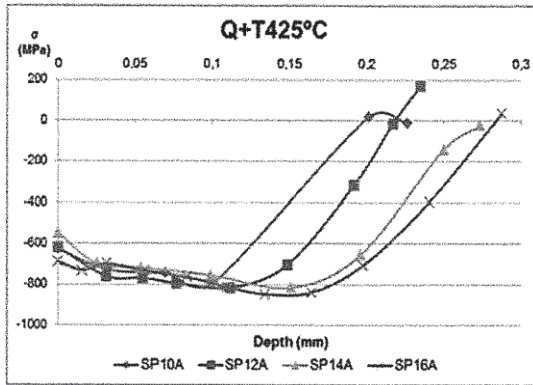
değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Örnek olarak 19 HRC sertlikteki numuneler 30- 40 μm arasında pürüzlülüğe sahipken 52-52 HRC sertliğe sahip olan numunelerde maksimum 13 μm çıkmıştır.

Şekil A.5’de bilya yoğunluğunun en yüksek seviyede olduğu numunenin X ışını ile görüntülenmiş içyapısı verilmiştir. Yumuşak malzemelere gelen yoğun bilyalar içeride mikro çatlaklara yol açabilmektedir. Bu mikro çatlaklar da yorulma ömrünü ciddi derece azaltmaktadır.

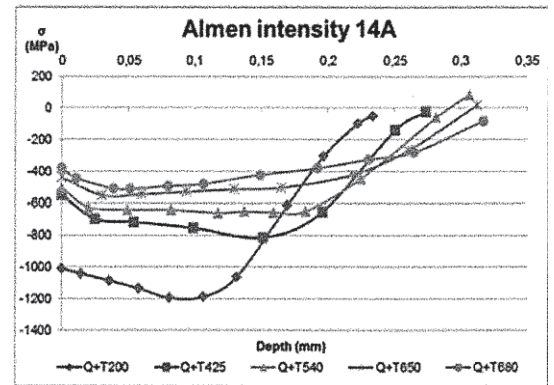


Şekil A.5. 255 HV’ye sahip numunede oluşan mikro çatlak görüntüsü (Torres ve ark. 2016)

Şekil A.6 a’da kalıntı basma gerilmelerin bilyalı dövme yoğunluğuna bağlı olmadığını, ancak etkilenen derinliğin uygulanan yoğunluk ile arttığını göstermektedir. Şekil A.6 b’de ise farklı sertliklerdeki çeliğin aynı yoğunlukta bilyalı dövme işlemiyle yüzey işlemine tutulmuş numunelerin kalıntı basma gerilme değerleri gösterilmiştir.



a)

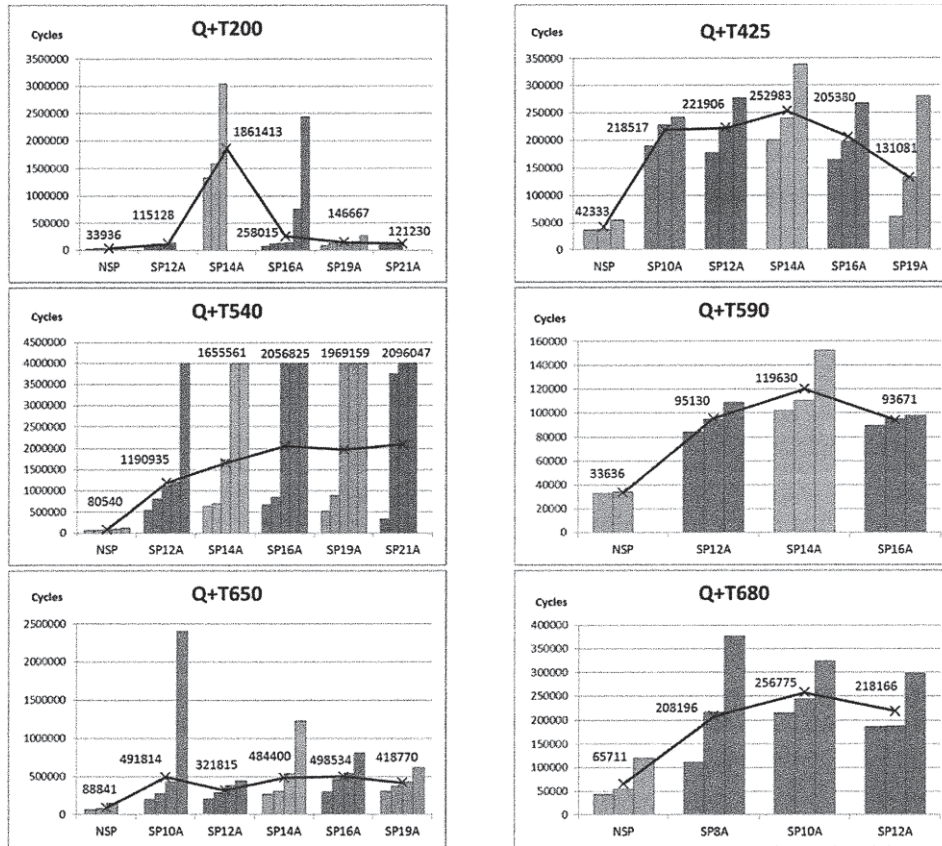


b)

Şekil A.6 a) Farklı bilyalı dövme şiddetine bağlı kalıntı basma gerilme değerleri b) Aynı yoğunlukta dövülmüş farklı sertliklere sahip numunelerin kalıntı basma gerilme değerleri (Torres ve ark. 2016)

Grafikten anlaşıldığı üzere çeliklerin sertlikleri ve dayanım değerleri büyüdükçe kalıntı gerilmelerin büyüdüğü, ancak etki alanındaki derinliğin azaldığı tespit edilmiştir.

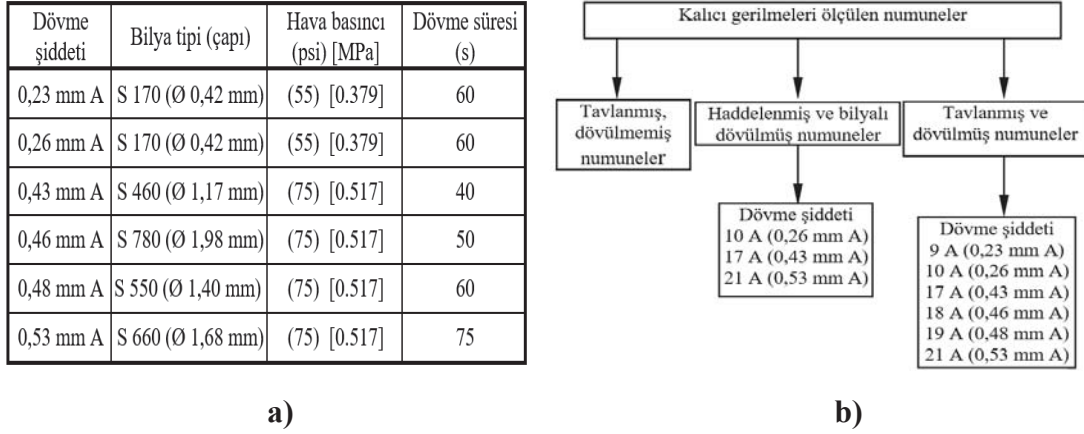
Son olarak yorulma test sonuçları Şekil A.7’de verilmiştir. Bilyalı dövme işleminin yorulma ömrünü tüm numuneler için uzattığı özellikle vurgulanmıştır. Dövme yoğunluğu belirli bir seviyeye kadar yorulma ömrünü uzatmaktadır daha sonra ise yukarda gösterildiği gibi mikro çatlakların oluşmasından dolayı ömrü negatif yönde etkilemektedir. Ayrıca en sert olan malzemelerde Almen yoğunluğunun etkisi bariz görülürken yumuşak malzemelerde bu etki bu kadar görülmemektedir. Son olarak, tüm Bilyalı dövme işlemlerinin, işlenmemiş numunelere kıyasla farklı çeliklerin yorulma ömrünü iyileştirdiği vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, yorulma ömrünün belirli bir değere kadar Almen yoğunluğuyla doğru orantılı olarak uzadığını ancak dövme işlemi çok yoğun olduğunda yüzey hasarı ortaya çıktığında ömrün düştüğü tespit edilmiştir. Buradan sonuçla, yapılacak çalışmalarda malzemelerin mekanik özelliklerine dikkat edileceği gibi uygulanacak çeşitli işlemlerin parametrelerinin de iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da görüldüğü üzere aynı malzemeden üretilen numuneler



Şekil A.7 Yorulma test sonuçları (Torres ve ark. 2016)

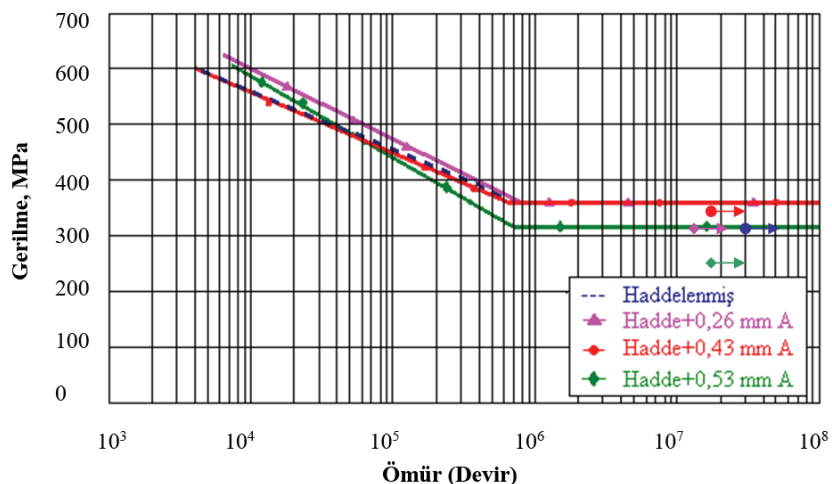
farklı sertlikte oldukları için yorulma ömürlerinde, yüzey sertliklerinde ve yüzey pürüzlük değerlerinde oldukça farklı değerler gözlemlenmiştir.

Dülek ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada farklı bilyalı dövme yoğunluğuyla dövülmüş Ç1020 çeliğinin yorulma testleriyle yorulma gerilmeleri, elektro-kimyasal



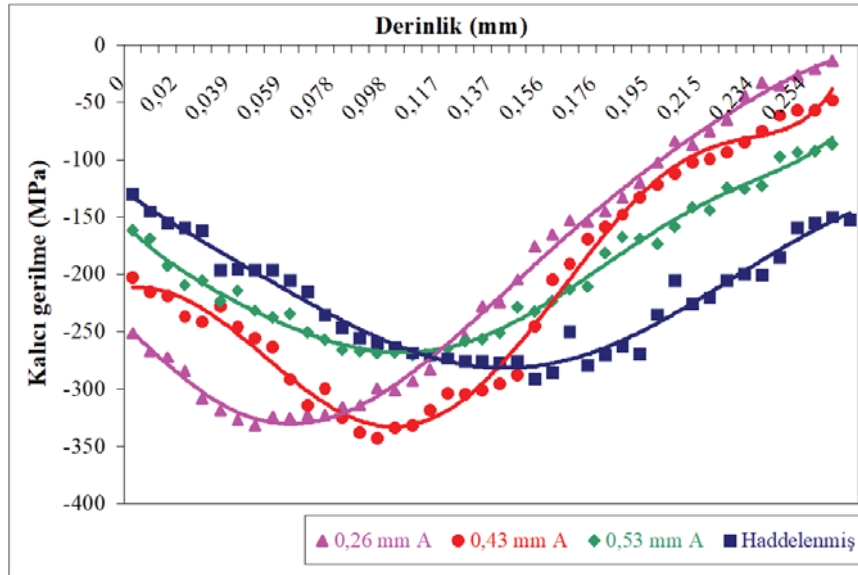
Şekil A.8 a) Bilyalı dövme işlemi parametreleri **b)** Kalıcı basma gerilmeleri ölçülen numune parametreleri (Dülek ve ark. 2005)

Şekil A.9’da haddelenmiş ve farklı miktarlarda dövülmüş numunelerin yorulma test sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlara göre bilyalı dövme işlemi uygulanmamış numunede yorulma mukavemet sınırı 360 MPa seviyelerindedir. Haddeleme işleminin ardından farklı yoğunluklarda dövülen numunelerin yorulma sınırları da aynı seyirlerde göstermektedir. Buradan sonuçla haddeleme işleminden sonra bilyalı dövmenin etkisi yok denecek kadar azdır. Hatta 0.53 mm A yoğunlukla dövülen numune diğer numunelerden daha kötü yorulma ömrü sergilemiştir. Bunun nedeni ise aşırı yoğunluktan dolayı malzeme üzerindeki plastik deformasyonların yüzey tabakasına verdiği zararlardır. Bu zararlar mikro çatlaklara sebep olmaktadır. Sonuç olarak haddelenmiş numunelerde bilyalı dövme işlemi istenen etkiyi gösterememiştir.



Şekil A.9 Haddelenmiş ve farklı yoğunluklarda dövülmüş numunelerin S-N grafiği (Dülek ve ark.

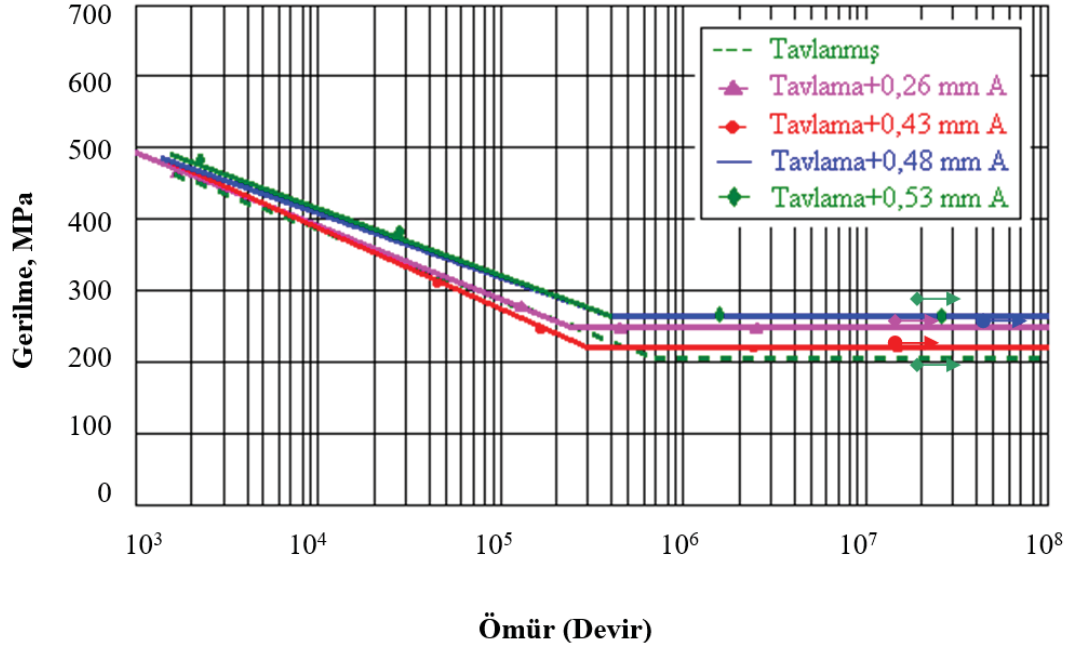
Yukarıda testleri yapılan numunelerin deneysel yolla kalıcı basma gerilmeleri Şekil A.10'da verilmiştir. Dövülmemiş malzemede basma gerilmeleri -130 MPa seviyelerinde görülürken, bilyalı dövülmüş numunelerde yoğunlukla ters orantılı bir şekilde basma gerilmeleri artma göstermiştir. Yüzeylerde oluşan en yüksek basma gerilmesi 0.26 mm A yoğunlukta dövülen numunelerde -250 MPa değerindedir. Ancak maksimum basma gerilmesi 0.43 mm A yoğunlukla dövülmüş numunelerde 0.117 mm derinlikte -331 MPa olarak ölçmüşlerdir. Buradan anlaşılacağı üzere uygun dövme yoğunluğu belirlenirken, yüzey basma gerilmeleri çok önemli olsa da malzeme derinliğindeki gerilme değerleri de oldukça önemlidir. Aynı şekilde yüksek yoğunluklu dövme işlemi malzemede zarar yaratacağından basma gerilme değerleri de etkilenmektedir. En yoğun dövme işlemindeki numunelerdeki basma gerilme değerleri dövülmemiş numunelerden daha düşük değerlerde göstermektedir.



Şekil A.10 Soğuk haddelenmiş ve farklı dövme şiddetleri ile dövülmüş numunelerin enine kesitte oluşan gerilme dağılımları (Dülek ve ark. 2005)

Aynı çalışmada tavlanmış ve farklı şiddetlerde dövülmüş numunelerin yorulma dayanımları dönel eğmeli yorulma testi ile belirlenmiştir. Dövme yoğunlukları sırayla, 0.26, 0.43, 0.48 ve 0.53 mm A'dır. Şekil A.11'de yapılan test sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre dövülmemiş numunelerde yorulma sınırı 205 MPa olarak belirlemişlerdir. 0.26 mm A yoğunluğuyla dövülmüş numunelerde yorulma dayanımı 250 MPa seviyesine çıkmıştır. 0.43 mm A yoğunluklu numunelerde yorulma sınırı 220 MPa seviyelerinde bulunmuştur. Dövme yoğunluğu bu seviyeden sonra yorulmada etkisini göstermiştir. 0.48

ve 0.53 mm A yoğunluklu dövmelede yorulma sınırı %29 artarak 265 MPa değerine çıkmıştır.



Şekil A.11 Tavlanmış ve tavlama farklı şiddetlerde dövülmüş numunelerin S-N grafiği (Dülek ve ark.

Yazarlar çıkan sonuçları literatürdeki çalışmalarla da doğrulamıştır. Bilyalı dövmele işlemlerindeki yoğunluk tespiti ve parametrelerin belirlenmesi zahmetli işlemidir. Literatür kaynaklarının farklı çalışmalarla doğrulanmasından dolayı bu tez çalışmasında uygulanan bilyalı dövme parametreleri literatürden alınmıştır.

EK-B Hidrolik Silindir Yorulma Testlerinde Karşılaşılan Problemler

Bu bölümde Bölüm 3.1’de bahsedilen hidrolik silindirlerin yorulma deneylerinde karşılaşılan problemlerin detayları verilmiştir. Karşılaşılan problemler şu şekildedir:

- BY milinin çizilmesi
- BY milinin eğilmesi ve pistona yeni kapak imalatı
- YBB dişinin sarması
- Hidrolik yağ hortumunun patlaması
- Sızdırmazlık koniklerinin aşınması
- Vidalı bağlantıların sökülememesi
- Tasarım hatasından kaynaklı numune kapağının çatlaması

BY milinin eğilmesi ve pistona yeni kapak imalatı

Katmanlı hidrolik silindirlere BY’nin piston milinin ilerlemesiyle ultra yüksek basınç iletilmektedir. Deneylerde karşılaşılan ilk sorun BY’nin piston milinin eğilmesidir. Bu eğilme BY’ye ait yüksek basınç bölge (YBB) silindiri sızdırmazlık elemanlarının değişimi için takılıp çıkartılırken kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda milin yataklanabilmesi için kullanılan ara parça mile zarar vermiştir. Bunun çözümü için ara parça çıkartılmış boşluğu daha fazla olan Şekil B. 1’deki mil kapakları üretilmiştir. Bu sayede hem mil yataklanmıştır hem de mile herhangi bir zarar gelmemiştir.



Şekil B. 1. İmal edilen milin yataklamasına yardımcı olan kapak

BY'lerde karşılaşılan en büyük problem vidalı bağlantıların sökülüp takılması olmuştur. BY'nin dış kapağı ve gövdesi vidalı bağlantı ile montaj edilmektedir. Sızdırmazlık elemanının ömrü bittiğinde değiştirilmesi için bu vidalı bağlantılardan söküp sistemi demonte etmek gerekmektedir. Ancak bu demonte deneyler esnasında çoğu zaman açılmamıştır. BY'nin dış kapağının açılmamasından dolayı Şekil B. 2'de görüldüğü gibi oksijen kaynağı kullanılarak ısıtıp vidaların gevşemesi beklenilmiştir.

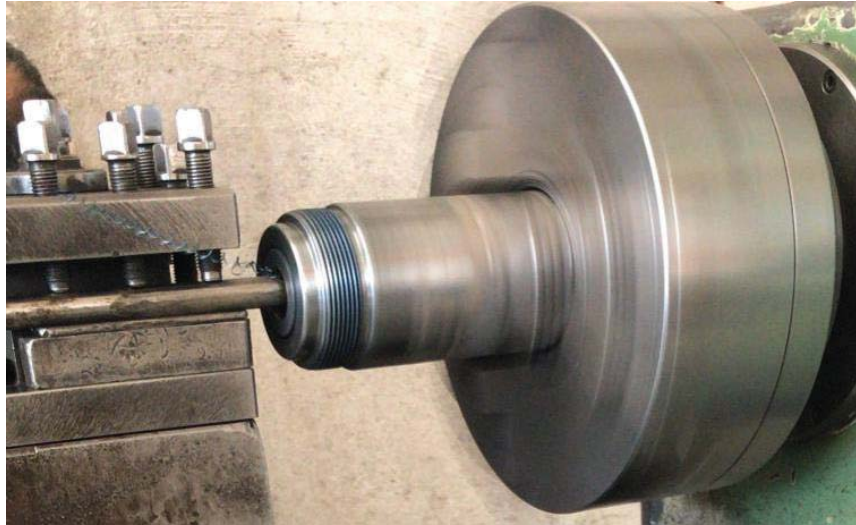


Şekil B. 2. Vidalarının açılması için uygulanan ısıtma yöntemi

Ancak bu da işe yaramamıştır mecburen kapak vidadan kurtulana kadar tornalanmıştır. İç çapı genişletme operasyonu torna tezgahında yapıldıktan sonra tekrardan BY dış kapağı üretilmiştir. Şekil B. 3'te ise kapakların tornalanmasından sonra yüksek basınçtan kaynaklı birbirine kaynayan dişler görülmektedir. Kapak söküldükten sonra sızdırmazlık probleminin çözümü için farklı malzemeden kapağın YBB'ye montajı için YBB yeniden işlenmiştir (Şekil B. 4).



Şekil B. 3. Vidaların birbirine kaynaması



Şekil B. 4. Yüksek basınç bölgesine sızdırmazlık elemanı yerleşimi için kanal açılması

Sistemin sökölüp takılması çok zor olduğundan Şekil B. 5'te görölen aparat üretilmiştir. Aparat silindire takıldıktan sonra silindir yüzeyiyle aparatın sıkıldığı bölge kaynaklanmıştır. Çekiç veya balyozla vurulması için yapılan uzun kısma saat yönü veya tersi yönünde vurularak BY'nin demontaj işlemi zorlukla gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil B. 5. Montaj ve demontaj için üretilen aparat

Sıkça karşılaşılan sorunlardan bir tanesi de sızdırmazlık sağlayan konik kapakların aşınma problemidir. Yüksek basınç silindir içine dolduğunda konik kapaklar tarafından sızdırmazlık sağlanmaktadır. Sıvı, kapağa aksenel yönde geldiğinden kapağı açmaya çalışmaktadır. Bu esnada ise kapak çok küçük hareketler yaparak karşı yüzeyle sık temasından dolayı aşınmaktadır. Şekil B. 6'da ve Şekil B. 7'de aşınmış konik sızdırmazlık kapakları görölmektedir.



Şekil B. 6. BY'nin konik sızdırmazlık kapağının aşınması



Şekil B. 7. Deney numunesinin sızdırmazlık kapağının aşınması