



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MALZEME VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GELİŞTİRİLEN YENİ TİP HADDELEME APARATI İLE BİLYELİ
HADDELEME İŞLEMİNİN DENEYSEL OLARAK ANALİZİ VE
PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ**

Mehmet NAS

**Aralık-2024
BATMAN**

T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MALZEME VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GELİŞTİRİLEN YENİ TİP HADDELEME APARATI İLE BİLYELİ
HADDELEME İŞLEMİNİN DENEYSEL OLARAK ANALİZİ VE
PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Mehmet NAS

Danışman
Doç. Dr. Oktay ADIYAMAN

Diğer Jüri Yeleri

Doç. Dr. Fikret SÖNMEZ

Doç. Dr. Şehmus BADAY

Aralık-2024
BATMAN

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet NAS tarafından hazırlanan “Geliştirilen Yeni Tip Haddeme Aparatı ile Bilyeli Haddeme İşleminin Deneysel Olarak Analizi ve Performans Değerlendirmesi” adlı tez çalışması 27/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Malzeme ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Fikret SÖNMEZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Oktay ADIYAMAN

.....

Üye

Doç. Dr. Şehmus BADAY

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğrt. Üyesi Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

Bu tez çalışması Batman Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) tarafından BTÜBAP-2023-YL-16 nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK BEYANI

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 beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İmza
Mehmet NAS
Tarih: 27/12/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GELİŞTİRİLEN YENİ TİP HADDELEME APARATI İLE BİLYELİ HADDELEME İŞLEMİNİN DENEYSEL OLARAK ANALİZİ VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Mehmet NAS

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Malzeme ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Oktay ADIYAMAN

2024, 73 Sayfa

Bilyeli haddemeleme işlemi, en çok tercih edilen yüzey iyileştirme yöntemlerinden biridir. Bilyeli haddemeleme yöntemi ile malzemelerin mekanik özellikleri, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğinde iyileşmeler meydana gelmektedir. Bu çalışmanın amacı, yeni tip tasarlanan haddemeleme aparatı ile bilyeli haddemeleme işleminin deneysel olarak analiz edilmesi ve verimliliğinin değerlendirilmesi ayrıca malzeme yüzeyindeki mekanik özelliklerde (aşınma direnci, yorulma ve sertleşme gibi) iyileştirmeler elde etmektir.

Bu deneysel çalışmada, özel olarak imal edilmiş bilyeli haddemeleme aparatı ile AISI 1050 çelik malzemesi haddelenerek yüzey iyileştirme işlemi uygulanmıştır. Deney numuneleri ilk olarak Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) torna tezgâhında, kaba işleme için WNMG 080408 kesici uç kullanılarak kaba tornalanmış ve ardından VNMG 160404 kesici uç ile bitirme işleme yapılarak haddemeleme işlemine hazır hale getirilmiştir. Son olarak da finiş operasyonu uygulanmış deney numunelerine, tasarlanan yeni haddemeleme aparatı ile bilyeli haddemeleme işlemi uygulanmıştır. Deney düzeneği Taguchi L9 ortogonal deney tasarımına göre belirlenmiş olup deneyler bu sırayla gerçekleştirilmiştir. Haddemeleme işlemi sabit haddemeleme kuvveti, 3 farklı ilerleme ve 3 farklı paso ile sabit devirde gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler sırasıyla 143N hadde kuvveti, 0,04-0,08-0,12 mm/dev ilerleme ve 3 paso ile 600 (dev/dak) sabit devir sayısı belirlenmiştir. Belirlenen parametreler ile haddelenen AISI 1050 çelik malzemesi üzerindeki yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertlik değerleri incelenmiştir. Farklı paso sayısı ve ilerleme hızlarına göre haddelenen iş parçası yüzeyinin üç farklı noktasından yüzey pürüzlülüğü değerleri alınmış ve alınan değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak o yüzeye ait yüzey pürüzlülük değeri belirlenmiştir. Haddelenen iş parçalarının yüzey sertlik değerleri mikrosertlik cihazında 3 farklı noktada ölçüm alınarak hesaplanmış ve bunların aritmetik ortalaması alınarak sertlik değerleri bulunmuştur. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri Taguchi tasarımı ile analiz edilmiştir. Taguchi sinyal/gürültü (S/N) oranlarına göre ilerleme ve paso sayısının yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve sertlik üzerinde en etkili parametrenin ilerleme olduğu görülmüştür. En iyi yüzey pürüzlülüğü şartları düşük ilerleme ve düşük paso sayısında elde edilirken en iyi sertlik değerleri düşük ilerleme ve artan paso sayısında elde edilmiştir. Yapılan deney ve analizler sonucunda mevcut standart tornalama kriterlerine göre özel tasarlanan küresel bilyeli ezici ucun haddemeleme işlemlerinde kullanılabilir olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: AISI 1050, Bilyeli Haddemeleme, Derin Haddemeleme, Yüzey Pürüzlülüğü, Yüzey Sertliği, Triboloji

ABSTRACT

MASTER THESIS

EXPERIMENTAL ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION OF BALL ROLLING PROCESS WITH DEVELOPED NEW TYPE ROLLING APPARATUS

Mehmet NAS

Batman University Graduate Education Institute

Department of Materials and Manufacturing Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Oktay ADIYAMAN

2024, 73 Pages

The ball burnishing process is one of the most preferred surface methods. With the ball rolling method, improvements occur in the mechanical properties, surface roughness and surface hardness of the materials. The aim of this study is to experimentally analyze the ball burnishing process with a newly designed burnishing tool and evaluate its efficiency and to obtain improvements in the mechanical properties (such as wear resistance, fatigue and hardening) on the material surface.

In this experimental study, the surface improvement process was applied by rolling AISI1050 steel material with a specially manufactured ball burnishing tool. The workpiece was first turned on a CNC lathe using a WNMG cutting insert for rough machining and then finished with a WNMG cutting insert to make it ready for rolling. Finally, the finishing operation was applied to the test samples and the ball rolling process was applied with the newly designed rolling apparatus. The experimental setup was determined according to the Taguchi L9 orthogonal experimental design and the experiments were carried out in this order. The rolling process was carried out with a constant rolling force, 3 different feeds and 3 different passes at a constant speed. These parameters were determined as 143N rolling force, 0.04-0.08-0.12 mm/rev feed rate and 3 passes at a constant speed of 600 (rev/min). With the determined parameters, the surface roughness and surface hardness values on the rolled AISI 1050 steel material were examined. Surface roughness values were taken from three different points of the burnished workpiece surface according to different pass numbers and feed rates, and the surface roughness value of that surface was determined by taking the arithmetic average of the values taken. The surface hardness values of the burnished workpieces were calculated by taking measurements at three different points on the microhardness device and the hardness values were found by taking the arithmetic average of these. The obtained surface roughness and hardness values were analyzed with Taguchi design. The effects of feed rate and number of pass on the surface roughness and hardness values were analyzed according to the Taguchi signal/noise (S/N) ratios. It was seen that the most effective parameter on surface roughness and hardness was feed rate. While the best surface roughness conditions were obtained at low feed rate and low number of passes, the best hardness values were obtained at low feed rate and increasing number of passes. As a result of the experiments and analyzes, it was proven that the ball burnishing tool specially designed according to the current standard turning criteria can be used in surface rolling processes.

Keywords: AISI 1050, Ball Burnishing, Deep Rolling, Surface Roughness, Surface Hardness, Tribology

ÖN SÖZ

Bu çalışmada özel tasarlanan bilyeli ezici uç ile AISI 1050 deney numunesine bilyeli haddeme işlemi uygulaması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi, buna bağlı olarak farklı parametre kullanılmıştır. Bu parametreler haddeme kuvveti (N), ilerleme hızı (mm/dev) ve uygulanan paso sayısıdır. Çalışmada öncelikle konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiş ve tez konusuna ait alt yapı bilgilerine yer verilmiştir. Materyal ve Yöntem bölümünde; deney malzemesi, tasarımı, parametrelerin belirlenmesi ve deneylerin analizi ele alınmıştır. Deneysel Sonuçlar ve Bulgular bölümünde; elde edilen ölçüm değerlerine göre konu tartışılmış, istatistiksel olarak incelenmiş ve benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır.

CNC torna tezgâhında işlenen deney numunelerinin dış yüzeylerinin mikrosertlik, yüzey pürüzlülüğü değerleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ayrıntılı olarak incelenmiş ve iş parçası üzerindeki yüzey pürüzlülüğü ve malzeme üzerinde oluşan sertlik değerlerindeki değişimler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu çalışmada en temel amaç, tasarlanan yeni haddeme aparatının bilyeli haddemede kullanılabilirliğini araştırmak sonrasında da bu haddeme aparatı ile haddelenmiş iş parçalarının analiz edilmesi ile bilyeli haddemede literatürde elde edilen sonuçlarla karşılaştırmaktır.

Yüksek Lisans tez çalışmam boyunca hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, en zor zamanlarımda bile benden desteğini esirgemeyen, bilgi birikimi ve tecrübesi ile beni aydınlatan, bana yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Oktay ADIYAMAN'a, istatistiksel analizlerdeki desteği ile benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Şehmuz BADAY'a ve Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI'ya, mikrosertlik ölçümlerinde desteğini esirgemeyen Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık fakültesi Makine Mühendisliği öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Anıl İMAK'a tez çalışmam süresince benden hiç yardımlarını esirgemeyen İbrahim ÖZEK, Ömer AKSOY, Maruf MİNAZ, Halil ESMER ve Ömer SEVEN arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatımın her anında yanımda duran desteklerini hiç esirgemeyen çok sevdiğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda bana finansal destek sağlayan Batman Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne ve çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet NAS

Batman-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖN SÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı	3
1.2. Araştırmanın Önemi.....	4
1.3. Konu ile İlgili Yapılan Araştırmalar	4
2. ÇELİK	12
2.1. Çeliğin Özellikleri.....	12
2.2. Çeliğe Uygulanan Isıl İşlemler ve Malzemenenin Kimyasal Bileşimi	13
2.3. Çeliğe Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri.....	14
2.4. Yüzeyin Kimyasal Bileşimini Değiştirilerek Yapılan İşlemler	14
2.5. Yüzeyin Kimyasal Bileşimi Değiştirmeden Yapılan İşlemler	14
2.6. Çeliğin Kullanım Alanları.....	14
2.7. Çeliğin Mekanik Özellikleri.....	15
3. TRİBOLOJİ	16
3.1.1. Yüzey iyileştirmede kullanılan yöntemler	17
3.1.2. Lazer şoku ile ezme yöntemi.....	17
3.1.3. Kavitasyon ile ezme yöntemi	18
3.1.4. Ultrasonik destekli yüzey iyileştirme yöntemi.....	19
3.1.5. Ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu.....	20
3.1.6. Derin haddeleme (ezme) yöntemi	21
3.1.7. Bilyeli haddeleme yöntemi.....	22
3.1.7.1. Bilyeli haddeleme yönteminin avantajları.....	29
3.1.7.2. Bilyeli haddeleme yönteminin dezavantajları	30
3.1.7.3. Bilyeli haddeleme yönteminin temel parametreleri.....	30

4. AŞINMA	32
4.1. Aşınma Türleri	33
4.1.1. Yorulma aşınması	34
4.1.2. Korozif aşınma	34
4.1.3. Abrasif aşınma	35
4.1.4. Adhesif aşınma	35
4.1.5. Eroziyon aşınması	36
4.1.6. Tabaka aşınması	37
5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ.....	39
5.1. Yüzeysel Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler	40
5.2. Yorulma Dayanımı.....	41
5.3. Artık Gerilme	41
5.4. Yüzeysel Sertliği.....	42
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	43
6.1. Deney Tasarımı ve Numunenin Hazırlanması	43
6.2. Bilyeli Haddelendirme Aparatı Tasarımı ve İmalatı	44
6.3. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	48
6.4. Deneylerin Analizi	50
6.4.1. Ra ve Rz ortalama ölçümleri	50
6.4.2. Mikrosertlik ölçümü	51
6.5. SEM Görüntüleri.....	52
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR	54
7.1. Ra ve Rz Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi	54
7.2. Mikrosertlik Analizi	59
7.3. SEM Analizleri.....	62
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
8.1. Sonuçlar	66
8.2. Öneriler	67
KAYNAKLAR	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	SayfaNo
Şekil 3. 1. Tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi	17
Şekil 3. 2. Lazer şoku ile ezme yöntemi	18
Şekil 3. 3. Kavitasyon ile ezme yöntemi	19
Şekil 3. 4. Ultrasonik destekli yüzey iyileştirme yöntemi	20
Şekil 3. 5. Ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu	21
Şekil 3. 6. Derin ezme ile uygulama yöntemi	22
Şekil 3. 7. Çelik milin boyuna haddelenmesi	24
Şekil 3. 8. İç delik haddeme	24
Şekil 3. 9. Bilyeli haddeme işleminde takım ve numunenin hareket şekli	25
Şekil 3. 10. Ezici bilye ile yüzey iyileştirme yöntemi	26
Şekil 3. 11. Bilyeli haddeleme işleminin şematik olarak gösterimi	27
Şekil 3. 12. Bilyeli haddeleme işlemi ve malzemede oluşan plastik deformasyonun görünümü	28
Şekil 3. 13. Paso sayıları ile yüzey düzeltme aşamaları	31
Şekil 4. 1. En çok kabul edilen dört farklı aşınma türleri şematik gösterimi	33
Şekil 4. 2. Abrasif aşınma şekil olarak gösterimi	35
Şekil 4. 3. Adhezif aşınma şekil olarak gösterilimi	36
Şekil 4. 4. Eroziv aşınma şematik olarak gösterilimi	37
Şekil 5. 1. Ra ortalama çizgi konumunun belirlenmesi	39
Şekil 5. 2. Yüzey şekilleri	40
Şekil 6. 1. Hazır hale getirilen çelik numuneler.	43
Şekil 6. 2. SMARC marka CAK6166B X200 model torna tezgâhı.	44
Şekil 6. 3. Hazır hale getirilen deney numuneleri	44
Şekil 6. 4. Bilyeli haddeleme aparatı tasarımı	45
Şekil 6. 5. İmalatı yapılan bilyeli haddeleme aparatı ve CNC torna tezgâhı taretine montajı	46
Şekil 6. 6. Yapılan işlemlere ait şematik görünüm	47
Şekil 6. 7. Yapılan işlemlere ait görüntüler	48
Şekil 6. 8. Spiral yay baskı kuvvet ayar tablosu	50

Şekil 6. 9. Yüzey pürüzlülük cihazı ve özellikleri.....	51
Şekil 6. 10. Ra ve Rz değerlerinin ölçüm bölge ve yüzeyleri	51
Şekil 6. 11. AOB marka mikrosertlik ölçme cihazı ve deney numunesi.....	52
Şekil 6. 12. SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu)	53
Şekil 7. 1. Bilyeli haddelemeki yüzey Ra değerleri dağılımı ve normallik testi	55
Şekil 7. 2. Sinyal gürültü tablosu.....	56
Şekil 7. 3. İlerleme ve paso sayısına göre Rz yüzey pürüzlüklerin gösterimi.....	57
Şekil 7. 4. İlerleme ve paso sayısına göre Ra yüzey pürüzlülük grafiği.....	57
Şekil 7. 5. İlerleme ve paso sayısına göre Ra ikili ilişki grafiği	58
Şekil 7. 6. Bilyeli haddelemeki mikrosertlik değerleri dağılımı ve normallik testi.....	60
Şekil 7. 7. Mikrosertlik değerleri S/N (sinyal gürültü) tablosu.	61
Şekil 7. 8. İlerleme ve paso sayısına göre mikrosertlik grafiği	62
Şekil 7. 9. Örnek SEM görüntüleri	63
Şekil 7. 10. İlerleme hızı değişimin yüzey üzerindeki etkisi (2 paso).....	64
Şekil 7. 11. İlerleme hızı değişimin yüzey üzerindeki etkisi (3 paso).....	64

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2. 1. Enes demir çelik.....	13
Tablo 2. 2. Enes demir çelik.....	13
Tablo 6. 1. Deneylerde uygulanacak işlem bilyeli haddelme parametreleri	49
Tablo 6. 2. Deney parametreleri , faktör ve seviyeler.	49
Tablo 6. 3. Yüzey pürüzlülüğü test cihazı teknik özellikler tablosu Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Tablo 7. 1. Deney parametrelerin faktör seviyeleri, Ra ve Rz ortalama değerleri ve S/N oranı	54
Tablo 7. 2. "En küçük en iyidir"e göre Rz ortalama S/N değerleri Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Tablo 7.3. "En küçük en iyidir"e göre Rz ortalama S/N değerleri..... Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Tablo 7.4. Mikrosertlik ve R/N (sinyal gürültü) oranı.	59
Tablo 7. 5. "En büyük en iyidir" kriterine göre mikrosertlik S/N (sinyal gürültü) oranları.	60
Tablo 7. 6. Deney parametrelerin ve ortalama Ra,Rz, mikrosertlik değerleri ve S/N oranları.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

Al	: Alüminyum
C	: Karbür
cm	: Santimetre
Cu	: Bakır
dev/dk	: Devir/ Dakika
Fe	: Demir
J	: Joule
m	: metre
Mg	: Magnezyum
mm	:Milimetre
mm/dev	: millimetre/devir
µm	: Mikron
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
Ra	: OrtalamaYüzey pürüzlülüğü
Si	: Silisyum
Zn	: Çinko

Kısaltmalar

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü Birimi
ANOVA	: Varyans Analiz
CNC	: Bilgisayarlı sayısal kontrol
HRC	: Rockwell sertliği
HV	:Vickers sertlik
Hz	: Hertz
S/N	: Sinyal gürültü oranı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu

1. GİRİŞ

İş parçalarının gerek üretim öncesi ve gerekse tornalama, frezeleme gibi işlemler sonrası yüzeylerini iyileştirme için yüzeylere taşlama (Çetin vd. 2018), lepleme, honlama (Akyüz vd. 2020), derin haddeleme ile ses titreşimleri (Zh, 2009; Bozdana, 2008) farklı yüzey kaynak yöntemleri (Kılıç vd. 2020) gibi çok sayıda son işlem operasyonları uygulanmaktadır. Prabhu ve arkadaşları yüzey iyileştirme için uygulanan yöntemleri iki ana gruba ayırmıştır. Birinci grup taşlama vb. malzeme kaybını içeren yöntemler, ikincisi ise bilyeli haddeleme (ball burnishing), derin haddeleme (deep rolling) ve bilyeli dövme (shot peening) (Avcu vd. 2021; Avcu vd. 2023). Prensipleri gibi malzeme üzerinde yeniden yayma ile yüzeyin plastik olarak sıkıştırılmasına bağlı olarak çalışan ve malzeme kaybı içermeyen prensiplerdir (Prabhu vd. 2011).

Haddeleme tekniği, iş parçası yüzeyleri üzerinden talaş kaldırılmadan ezilmesi yöntemiyle şekil değiştirme ve yüzey düzeltme tekniği olarak tanımlanabilir (Başak ve Yücel, 2015). Haddeleme tekniğinde yapılan işlem, yüzey kalitesini (yüzey pürüzlülüğü iyileşmesini) artırmak ve iş parçasına ait mekanik özelliklerinden de (yüzey pürüzlülüğü, aşınma direnci, yorulma dayanımı, yüzey sertliği, korozyon direnci) daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktır (Akyüz vd. 2020). Makine ve imalat tekniğinde, geçmişten günümüze kadar kullanılmakta olan haddeleme yöntemi ve tekniği, elde edilen iyi yüzey kalitesi ve iş parçasına ait mekanik yüzeylerde iyileşmenin elde edilmesi (yüzey sertliği, yüzey pürüzlülüğü) ve bu işlemin verimliliğinin yüksek olması nedenlerinden dolayı seri üretimde de tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Sönmez vd. 2016).

Bu süreçlerde temel amaç, malzemeye ait istenilen özellikleri kazandırmak, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve buna bağlı olarak yüzey sertliğini de artırmaktır (Ovalı, 2019). Talaşlı imalat işlemleri sırasında seçilen kesici takım, işleme parametreleri ve yüzeysel koşullara bağlı olarak, yüzeyde istenmeyen hasarlar (çizikler, aşırı plastik deformasyon, mikro çatlaklar vb.) malzemenin mekanik özellikleri (yorulma dayanımı, korozyon dayanımı, aşınma direnci vb.) üzerinde olumsuz sonuçlara sebebiyet verebilmektedir (Selver ve Varol, 2016). Bu nedenle, bilyeli haddeleme işlemi, malzemenin bu olumsuzluklarını gidermekte, daha önce işlenmiş iş parçası yüzeyine belirli bir kuvvetle uygulanan yuvarlanma elemanları (toplar veya bilyeler) vasıtasıyla, yüzeyde talaş kaldırmadan, yüzey pürüzlerinin küçük plastik deformasyonları oluşturarak

iyileştirmektedir. Bu işlemde, yüzeydeki yüzey pürüzlülüğü azalırken, malzeme yüzeyindeki yüzey sertliği de artmaktadır (Sönmez vd. 2016).

AISI 1050 alaşımlı çelik, yüksek mekanik özelliklere sahip olmakla birlikte, işlem sonrası düşük yüzey sertliği ve yüksek yüzey pürüzlülüğü gibi özelliklerde olumsuzluklar gösterebilmektedir. Haddeme işlemi bu olumsuzlukları gidermek için en çok kullanılan bir yüzey iyileştirme yöntemidir (Ömürlü vd. 2022).

Haddeme kuvveti, ilerleme hızı ve paso sayısı gibi işlem parametrelerine sahip AISI 1050 çelik malzemenin haddelenmesinde yüzey özellikleri üzerinde (yüzey pürüzlülüğü mikrosertlik ve artık gerilme) etkiler deneysel olarak incelenmiştir (Liviü vd. 2005). Yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğü, yüzey iyileştirmeleri, analizleri ve yapılan deney sonuçları incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azalırken, malzemenin yüzey sertliği de artmaktadır. Bu da özellikle aşınma ve yorulma dayanımına büyük katkı sağlamaktadır (Akyüz, 2016).

Haddemedeki haddeme parametrelerinin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisinin yanısıra, haddemede kullanılan farklı tipteki ezici takımlarla ilgili de birçok çalışma bulunmaktadır. Farklı işlem parametreleri (haddeme kuvveti, paso sayısı ve ilerleme miktarı) denenerek yapılan bir çalışmada, tasarlanan üç değişik aparat ile işlem parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma sonunda Al-6061-T6 malzemesi üzerindeki yüzey pürüzlülüğü, yüzey üzerindeki mikrosertliğe bağlı olarak karşılaştırılmıştır. En iyi yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertlik değerlerinin bilyeli ezici uçtaki aparat ile elde edildiği görülmüştür (Başak ve Sönmez, 2015; Başak ve Sönmez 2017). Farklı bir çalışmada da, ezici ucun farklı bilye çaplarıdaki etkisi araştırılmış, 5083 Al-Mg malzemenin haddeme iş yüzeyi 16,669 mm, 15,081 mm, 13,494 mm ve 11,112 mm bilye çapları ile değişik parametreler kullanılarak haddeme işlemine tabi tutulmuştur (Başak, 2015). Ayrıca diğer bir çalışmada frezeleme uygulaması ile yapılan haddeme işlemi ile ilgili olarak sıradan bir ezici uç ile değişik işlem parametreleri kullanılarak yüzey iyileştirme işlemi yapılmıştır (Malyer vd. 2018). Gerçekleşen kalıntı gerilmeler değerlendirilerek bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Haddeme işlemi bütün uygulanan yüzeylerde, basma kalıntı gerilmelerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada, işlem parametreleri yanında yağlayıcı kullanımı ve haddeme yönü etkisi de incelenmiştir.

Bilyeli haddeme endüstride kullanılan metalin yüzey özelliklerini iyileştiren ve oldukça ekonomik bir işlemdir. AISI 1050 çelik malzeme gibi yaygın kullanılan malzemeler üzerinde bu yöntemin etkilerinin araştırılması, uygulama alanlarının

yaygınlaştırılması ve verimli üretim olanaklarının oluşturulması adına önemli katkı sağlayacaktır (Sönmez vd. 2015).

Bu çalışmada hem yeni tasarıma sahip bir bilyeli haddeleme aparatı denenmiş hem de bilyeli haddeleme yönteminin AISI 1050 çeliği üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İşlemin özellikle mikrosertlik ve artık gerilme gibi farklı diğer yüzey özellikleri üzerinde sağladığı iyileşmeler akademik literatürde görülmüştür (Karadeniz, 2018) ve bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı umulmaktadır.

1.1. Araştırmanın Amacı

Yapılan literatür çalışmaları incelendiği zaman çoğunlukla eksene paralel veya dik yöndeki düz yüzeylerin üzerinde derin haddeleme veya bilyeli haddeleme işlemlerinin uygulandığı görülmektedir. Çekme numunesi veya yorulma deney malzemesi üzerindeki eğrisel formlar hariç, uygulamalarda ya dış yüzeylerdeki silindirik yüzeylere yada delik içine haddeleme işlemlerinin yapıldığı tespit edilmiştir. Ancak tornalanmış iş parçaları üzerinde hem silindirik, hem konik hem de eğrisel (yay veya kontür) kontürlerin olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu yüzey şekillerine sahip tornalanan iş parçalarının tüm yüzey şekli, profili (boyuna, konik, radüslü veya eğrisel) üzerinden derin haddeleme yöntemiyle yüzeylerinin iyileştirilmesi bir zorunluluk olarak önümüze çıkmaktadır. Derin haddeleme veya bilyeli haddeleme takımlarının da bu formlara sahip yüzeyleri haddeleyecek şekilde bir tasarımda imal edilmesi de ayrıca denenmesi gereken başka bir konu başlığıdır. Tasarlanan haddeleme ezici ucun kolayca CNC torna taretine monte edilebilir olması da ayrıca bir avantaj sağlayacaktır. Bu çalışmada sözü edilen bu amaçlara katkı sunmak amacıyla CNC torna taretine kolayca monte edilebilen bir bilyeli ve derin haddeleme ezici aparatın tasarımı ve imalatı yapılmış, ezici bilyeye sahip aparat ile farklı ön araştırma olarak düz, silindirik tornalanmış parçaların yüzeylerine bilyeli haddeleme işlemi uygulanmıştır. Hem tasarımı yapılan ezici bilyeli uca sahip aparatın kullanılabilirliği araştırılmış hem de elde edilen deney numuneleri analiz edilmiştir. Farklı işlem parametreleri kullanılarak bilyeli parlatma ile haddelenmiş silindirik yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri analiz edilmiş, Ra üzerine bu parametrelerin etkisi incelenerek en fazla etkinin hangi parametre olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bilyeli haddeleme sonrası yüzey üzerinden mikrosertlik ölçümleri alınmış ve yüzey üzerindeki sertlik değişimleri incelenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntüleri alınmış ve incelemeleri yapılmıştır.

1.2. Araştırmanın Önemi

Bilyeli haddeleme işleminin ve deneysel çalışmanın uygulamasında AISI 1050 çelik malzeme kullanılmıştır. Çelik malzeme seçilmesinde ve kullanılmasındaki en önemli faktör dünyada en çok kullanılan alaşım malzeme olması ve literatür olarak referans alınabilecek çok sayıda çalışmada kullanılması hem de endüstriyel uygulamalarda havacılık, inşaat, otomotiv, imalat vb. ana akım sektörlerinde çok fazla kullanılmasıdır.

Araştırmada yeni tasarıma sahip bir haddeleme aparatının tasarlanması ve sonrasında bu haddeleme aparatının bilyeli haddeleme işleminde kullanılmasının literatür çalışmalarına katkı sağlayacağı ve sonrasında farklı figür ve kontüre sahip tornalanmış iş parçası yüzeylerinin, farklı işlem parametreleri ile haddelenmesinde yeni çalışmalara öncülük yaparak katkı sunacağı düşünülmektedir ve bu yönüyle bilimsel katkı anlamında önemli olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca geliştirilen aparatın derin haddeleme tekniğine de adapte edilebilir olması da konunun genişleyerek çalışılması noktasında önemli katkılar sunacağı göz önüne alınması gereken önemli bir husustur.

1.3. Konu ile İlgili Yapılan Araştırmalar

Bilyeli haddeleme ve derin haddelemede üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar özellikle farklı numuneler üzerinde tekniğin uygulanması, yüzey üzerinde meydana gelen farklı etkilerin (yüzey pürüzlülüğü (Ra), mikrosertlik, yüzey bütünlüğü vb.) analiz edilmesi, işlem parametrelerinin sonuçlar üzerine etkilerinin incelenmesi ve bilyeli haddeleme ve derin haddelemenin yapılmasında değişik aparatların denenmesi ve sonuçlarının incelenmesi üzerinedir. Farklı zamanlarda yapılan bu çalışmalar ile alakalı konular aşağıda daha detaylı olarak anlatılmaktadır. Bu çalışmalar şu şekilde sıralanabilir:

Sağbaş (2011), alüminyum alaşımı kapsamında, bilyeli haddeleme işleminde baskı kuvveti, paso sayısı, ilerleme miktarı gibi faktörlerin paslanmaz çelik bir bilye üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Yapılan bu çalışmada 62 HRc sertliğindeki paslanmaz çelik bilyenin kullanıldığı regrasyon modeli ile haddeleme parametreleri arasındaki ilişki belirlenmiş ve geliştirilen modelin yüzey pürüzlülüğü %2,82 oranında bir hatayla tahmin yeteneğinin olduğu, yapılan deneysel çalışmada gözlenmiştir. Ayrıca, haddeleme kuvveti ve paso sayısının istatistiksel olarak önemli faktörler olduğu tespit

edilmiştir. Bu inceleme sonucunda ortalama %94,29 oranında yüzey pürüzlülüğünde iyileşme olduğu kanıtlanmıştır.

Malyer (2018), yaptığı çalışmada haddeleme yöntemi ile parlatma işlemi yapılan Al 7075-T6 alüminyum numunede meydana gelen kalıntı gerilmeler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar analiz programı ile deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. CNC freze tezgahında kullanılan bir takım ve farklı işlem parametreleri kullanılarak ezerek parlatma işlemi yapılan numunelerin kalıntı gerilme değerleri X-ışını kırınımı tekniği ile ölçülmüştür. Deney numuneleri yüzeylerinde derin haddeleme sonrasında basma kalıntı gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür. Kullanılan numuneler üzerinde meydana gelen kalıntı gerilmelerin paso derinliği, ilerleme, yanal kayma, paso sayısı gibi işlem parametreleri ile derin haddeleme uygulamaları yapılmadan önce yüzeyde meydana gelen frezeleme işlemi açısından ve işlem sırasında uygulanan yağlayıcı gibi parametre ve işlem yapıldığı alanlara bağlı olduğu görülmüştür. Sayısal analiz yöntemiyle bulunan sonuçlar neticesinde elde edilen sonuçlar sayısal olarak değişik olduğu fakat işlem parametrelerinin etkilerin yönü ve sıralaması olarak ölçüm sonuçları ile benzerlik olduğu tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2005), dönele haddeleme işleminin AZ80 iş parçasının yorulma performansını geliştirdiği ve en elverişli şartlarda %110 'luk bir iyileşme sağladığı yapılan deneyler sonucunda belirtmişlerdir. Deneyler AZ80 için haddeleme işleminin püskürtmeli sertleştirmeden daha etkili bir şekilde yorulma ömrünü artırdığını göstermiştir.

Aviles vd. (2013), bilyeli haddeleme yöntemi üzerine çalışmış ve AISI 1045 çeliğinin yorulma ömrünü iyileştirmek için kullanmışlardır. Hazırlanan yorulma malzemelerinin yüzeyleri 6 mm çapında küresel ezici uc bilyeyle ve yağlayıcı bir ortamda yüksek basınçlarda bilyeli haddeleme yöntemiyle işlenmiştir. Bunun sonucunda haddeleme işleminin yorulma dayanımında %21,25'lik bir artış meydana getirdiğini tespit etmişlerdir.

Akyüz (2020), AA7075-T6 alüminyum alaşımının üzerindeki yorulma dayanımı, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme ve mikrosertlik üzerinde bilyeli haddeleme yönteminin etkilerini deneysel olarak inceleyen bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma, bilyeli haddeleme yönteminin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini ve hadde parametrelerinden paso sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, uygulanan baskı kuvveti ve paso sayısının malzemenin mikrosertliğini artırdığı ve haddeleme kuvvetinin artması ile birlikte yüzey altı kalıntı gerilmelerinin arttığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, malzemenin yorulma dayanımında iyileşme sağlandığı ve yorulma ömrünün arttığı görülmüştür.

Buldu (2017), AZ31B magnezyum alaşımını bilyalı parlatma yönteminin mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri bakımından etkisini araştırmıştır. Bu amaçla devir sayısı, baskı kuvveti, ilerleme ve paso sayısı olmak üzere 4 farklı değişkenle bilyalı parlatma yöntemi uygulanmıştır. Taguchi deney tasarımı yöntemi ile yapılan analizde Sinyal/Gürültü (S/N) oranları yönünden en iyi parlatma şartları araştırılmıştır. Haddeleme kuvveti ve ilerleme hızı, yüzeyin mekanik yapısını düzeltmede, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri açısından önemli bir alana sahip olduğu tespit edilmiştir. Düşük ilerleme hızı ve yüksek haddeleme kuvvetinde en iyi yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Luo vd. (2006), silindirik, çok kristalli elmas takımlar tasarlamış ve üretmiştir. Çalışmada üretilen bu takımların, alüminyum alaşımı ve pirinç malzeme üzerinde kullanılmasıyla tornalama işlemiyle karşılaştırılarak parlatma işleminin mekaniği daha derinlemesine incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, parlatma ve tornalama arasında farklı kuvvet dağılımlarının olduğu sonucunu göstermiştir. Ayrıca çalışmada, parlatma parametrelerinin, parlatma kuvvetinin iş parçası yüzey sertliği üzerindeki etkisi teorik olarak analiz edilmiştir. Bu analizde, ilerleme ve paso derinliğinin haddeleme kuvveti ve yüzey mikrosertliğini etkileyen en önemli faktörler olduğu sonucuna varılmıştır.

Çorak (2018), yaptığı çalışmada, nikel-boron (Ni-B) kaplama yapılmış numuneler üzerine bilyeli haddeleme (ball burnishing) işlemi ile AISI 1045 çeliğinin aşınma ve yorulma yöntemini araştırmıştır. Aşınma ortamı bulunan yorulma deneylerinde deney parçalarına 240 ile 450 MPa miktarları arasında gerilmeler uygulanmıştır. Sonuç olarak aşınan ortamın AISI 1045 çeliğinin yorulma dayanımı üzerinde azaltma yönünde sonuç ürettiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, bilyeli parlatma işlemi ile aşınan yorulma dayanımında artış olduğu tespit edilmiştir. Bilyeli parlatma işlemi ile karşılaştırıldığında her iki yüzey işleminin (bilyeli parlatma ile Ni-B kaplama) korozyonlu yorulma dayanımını düzelttiği kanıtlanmıştır. Çalışmada SEM ile aşınan bölgenin deney numuneleri yüzeyinin morfolojisi üzerindeki etkisine de gözlemlenmiştir.

Dihifi vd. (1999), yaptıkları çalışmada, pirinç malzeme bileşenlerine yüzey pürüzlülüğünü ve sertliğini artırmak için bilyeli parlatma işlemi uygulamış, farklı kuvvetler ve paso sayısı denenmiştir. Bu çalışmada basit bir aşınma test cihazı, mevcut işlemi gerçekleştirmek için tasarlanmış ve üretilmiştir.

Axir vd. (2003), dönel parçalarla yaptıkları deneylerde, haddeleme ilerleme hızının artmasıyla iş parçasının başlangıçtaki sertliğinin azaldığı ve bu durumun iş parçası çapı, yuvarlaklığı ve yüzey sertliği üzerinde önemli etkilere yol açtığını yaptıkları araştırmada

belirtmişlerdir. Ayrıca, haddeme zamanı ve batma derinliğinin de iş parçası özellikleri üzerinde belirleyici faktörler olduğunu göstermişlerdir.

Sönmez vd. (2016), alüminyum 6061 malzemenin silindirik parçaların haddelenmesi sonucu yüzey pürüzlülüğündeki değişimleri incelemişlerdir. Çalışmada, haddeme parametreleri olan ilerleme hızı, haddeme kuvveti ve paso sayısının, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Değişik modüllerle sonuçlar ele alınmıştır. Bu modüllerin deney sonuçları ile uyumluluğu araştırılmış ve optimum deney parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve modelin tahmin ettiği değerler ile elde edilen deney sonuçları karşılaştırılmış ve analizde R^2 değeri olarak 0,891 ile yüksek bir temsil katsayısı elde edilmiştir. Bu sonuç, yüzey yanıt yöntemi ile oluşturulan modelin gerçek değerlere yakın tahminler ürettiğini göstermektedir.

Aydın (2022), yaptığı çalışmada, ezerek haddeme yöntemiyle malzeme yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi ve istenilen özelliklerin sağlanması için yeni bir uç tipi modeli tasarlamış ve farklı parametrelerin etkilerini araştırmıştır. Kesici uç olarak WNMG modeli baz alınmış ve uç radüsü ihmal edilerek farklı parametreler kullanılarak derin haddeme işlemi yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde Al 6061 T6 malzemesi kullanılmış ve CNC torna tezgâhında tornalama işlemi yapılmıştır. İşlem parametreleri olarak 143, 330 ve 495 N haddeme kuvveti, 0,04, 0,08, 0,12 mm/dev ilerleme hızı, 400, 600 ve 800 dev/dk devir sayısı seçilmiştir. Elde edilen tasarımın, standart tornalama takım tutucularına uyumlu, haddeme için kullanılan ezici ucun kolayca değiştirilebilir bir uç tipi olduğu ve derin haddeme yöntemiyle hem ergonomik hem de verimli olarak derin haddeme işleminin yapılabildiği deneysel araştırmada kanıtlanmıştır.

Sarıtaş vd. (2013), AISI 1020 çelik malzemeyi bilyeli dövme yöntemi kullanarak işlem yapmış, oluşan kalıntı gerilmeleri, elektrokimyasal katman kaldırma tekniği ve gerilim ölçmeyle incelemişlerdir. Farklı şiddetlerde bilyeli dövülerek elde edilen çelik numunelerin üzerindeki kalıntı gerilmeler ayrıca araştırılmıştır. Yapılan bu araştırmalar sonucunda çelik malzemenin haddelenmiş ve tavllanmış hali ile oluşan kalıntı gerilmeleri karşılaştırılmıştır. Bilyeli dövme ile çelikte oluşan max kalıntı gerilmelerin 276-363 MPa aralığında değişiklik gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Başak vd. (2015), Al 6061 T6 malzemesi üzerine bir aparat kullanarak haddeme işlemi uygulamış ve kuvvet, ilerleme, bilye çapı ve paso sayısı parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışmada ilerleme hızında artışın yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediği, baskı kuvveti artışının ise olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca paso sayısının artması ile de yüzey pürüzlülüğü ve sertliğin olumlu

etkilendiği, bilye çapının artması ile de buna paralel şekilde etkileri olduğu görülmüştür. Bu deneyde yapay sinir ağı (YSA) modeli oluşturularak deneysel sonuçlar ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Böylece ergonomik ve tahmin yeteneği yüksek bir model geliştirilmiştir.

Akkurt ve Ovalı (2009) yaptıkları çalışmada, Al-6061 alaşımlı malzemeden hazırlanan iş parçaları delik iç yüzeylerinin haddeme işlemi sonrası dairesellikleri incelenmiş ve farklı yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, delik daireselliğinin elde edilmesinde haddeme yönteminin tercih edilebilir bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, Al-6061 alüminyum alaşım malzeme için yüzey sertliği ölçümünde yüzey haddeme yönteminin üstünlüğünü kanıtlamışlardır.

Lacelle-A vd. (2013), dönen millerinin verimliliğini ve kalitesini artırmak için yüzey işlemi olarak bilyeli haddeme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Optimum parametreler belirlendikten sonra yapılan işlemler sonucunda yüzey özelliklerinin analizini yapmışlardır. Elde edilen ölçüm sonuçları parlatma işleminin yüzey pürüzlülüğünde olduğu kadar kalıntı gerilmelerinde de kaliteyi iyileştirdiğini deneysel olarak çalışmalarında göstermişlerdir. Bilyeli haddemenin de mekanik bir işlem olduğunu ortaya koymuşlardır.

Chen vd. (2022), soğuk haddeme yönteminin ticari bir feritik ve östenitik dubleks paslanmaz çeliğin %50'den %87,5'e kadar soğuk haddelenmesi üzerine yapılan çalışmalarında bulgular üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Soğuk haddelenme işlemi her iki bileşen fazın da ciddi şekilde deforme olmasına ve yuvarlanma yönünde uzaması sonucuna varılmışlardır. Plastik gerinim, çoklu deformasyon modlarının etkisiyle özellikle östenit fazında yoğunlaşmıştır. Deformasyon gerilimi arttıkça, ikiz matrisli lamellerin yuvarlanma düzlemine paralel olarak döndüğü görülmüştür. Yanal kesme deformasyonu, nanoikizler ve parçalanmış ince yapılar içeren "göz" şeklinde alanların oluşumuna yol açtığı ve deformasyon gerilmesinin artmasıyla malzemenin kırılma şekli, sünek ve kırılğan kırılma karışımından tipik kırılğan kırılmaya dönüştüğü sonucuna varmışlardır.

Herbster vd. (2021), CoCr28Mo6 malzemeye derin haddeme uygulaması, dövme alaşımının yüzey özelliklerini iyileştirerek ortopedik implantların daha dayanıklı olması gerektiğini amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Kullanılan numuneler metalografik olarak hazırlanıp ve EDS ve EBSD ile optik ve taramalı elektron mikroskobu, mikrosertlik testi, XRD ve tribolojik testler kullanılarak kontrolleri yapılmıştır. Sonuç olarak geliştirilmiş aşınma direncinin, implantların performansını artırarak hasta memnuniyetini ve implantların uzun ömürlü olmasını sağladığı ispatlanmıştır.

Maiß vd. (2022), yaptıkları çalışmayla mekanik yüzey işlemleri ile, parça özelliklerini iyileştirmeyi ve kullanım ömürlerini uzatmayı amaçlamışlardır. Farklı malzemelerin ve ön işleme yöntemlerinin derin haddeleme üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Derin haddeleme takımlarının yüzey kalitesi üzerindeki etkileri incelendiğinde proses parametrelerinin basınç, hız, sıcaklık, yüzey kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalar, derin haddeleme sürecinde optimal yüzey kalitesi elde etmek için gerekli sınırları belirlemeyi amaçlamış ve haddeleme için bir yüzey bütünlüğü kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, proses parametrelerinin optimize edilmesine ve yüzey kalitesinin sürekli izlenmesine olanak sağlamış ve yüzey kalitesini kontrol ederek proses parametrelerini optimize ve üretim süreçlerinin verimliliğini artırmayı hedeflemiştir. Geliştirilen sistem süreç izleme ve simülasyon teknikleri, üretim hattındaki malzeme kaybını azaltarak maliyet tasarrufunu ve parça kalitesini arttırmaktadır. Sonuç olarak, çalışma sonucunda mekanik yüzey işlemlerinin etkinliğini artırmak ve üretim süreçlerini optimize etmek için önemli adımlar atılmıştır. Tüm sonuçlar analiz edildiğinde, izleme ve simülasyon yöntemlerinin, derin haddeleme gibi işlemlerin yüzey kalitesini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Çelik (2023), çalışmalarında Inconel 718 alaşımından tornalama yöntemiyle imal edilmiş malzeme kullanmıştır. Yuvarlanma elemanı ile malzeme yüzey üzerinde belirli bir kuvvetle baskı uygulanmış ve malzemenin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu araştırmada Taguchi L16 deneysel tasarımı uygulanmış ve dört farklı seviyede parametreler ile işlemler yapılmıştır. Oluşan yorulma dayanımı incelenmiş ve oluşan kalıcı gerilme değerleri elektro-kimyasal katman kaldırma teknolojisi kullanılarak analiz edilmiştir. Haddelenmiş ve tavllanmış dövme durumundaki çelik malzemelerin yorulma ömrü ve kalıcı gerilmeleri karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar bilyeli dövme ile tavllanmış malzemelerin yorulma dayanımı ve basma dayanımı arasındaki gerilmelerin etkilerinin analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda yorulma dayanımı, 205 MPa seviyesinde 267 MPa'a çıkarken max kalıcı gerilmeler 276 MPa basma ile 363 MPa basma arasında değiştiği sonucuna yaptığı araştırmada kanıtlamıştır.

Talçınkaya (2019), tank palet pimi olarak kullanılan AISI 4140 çeliği üzerindeki bilyeli dövmenin AISI 4140 çelik malzeme üzerindeki etkisini araştırmıştır. Üç-nokta eğme yorulma testi için numuneler hazırlanmış ve bu numunelere otomotiv mühendisler derneği (SAE) standardı çerçevesinde 4 farklı dövme şiddetinde ve %200 yüzey sarma oranında bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Haddeleme işleminden sonra tüm numuneler yorulma testine tabi tutulmuştur. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde en iyi yorulma

performansını sağlayan bilyeli dövme şiddetinin SAE standartlarına göre 6-10 A olduğu sonucuna varılmıştır.

Selver ve Varol (2016), AA 1050 alüminyum malzemenin metallografik incelemesi ve bilyeli dövme işleminin etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmada farklı bilye çapları kullanılarak yapılan bilyeli dövme işlemi öncesinde ışıl işlem gerçekleştirilmiştir. Yapılan metallografik incelemeler sonucunda, malzemenin içyapısında deformasyon etkisiyle birlikte yüzey kalitesinde değişimler olduğu görülmüştür. Bu değişimlere, bilye çaplarındaki büyümenin ve böylece dövme işlemi uygulanan bölgede tabaka kalınlığının artmasına neden olduğu, ayrıca AA1050 alüminyum malzemede bilyeli dövme işlemi sonucunda aşırı plastik deformasyona uğramış bölgelerin yer yer hasar gördüğu tespit edilmiştir.

Hassan vd. (1999), yaptıkları çalışmada, bilyeli haddeleme işlemi ile pirinç malzeme üzerindeki yüzey pürüzlülüğu ve yüzey sertliği üzerinde iyileşme amaçlamışlardır. Tasarladıkları özel bilyeli ezici uç ile haddeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Haddeleme işlemi bittikten sonra iş parçasını aşınma testine tabi tutmuşlardır. Aşınma test sonucuna göre uygulanan hadde kuvvetinin paso sayısına göre değişkenlik gösterdiği, bu değişkenliğin paso sayısının artmasına bağlı olarak iş parçasının aşınma direncini de arttırdığu sonucuna varmışlardır. Bu araştırma sonucunda bilyeli haddeleme işleminin aşınma direncini artırmak için uygulanabilir olduğunu kanıtlamışlardır.

Rodriguez vd. (2012), bilyeli haddeleme işleminin, 15-5PH martenzit paslanmaz çelik malzeme üzerindeki etkilerini ve parametrelere bağlı olarak sonuçlarda nasıl bir değişikliğin meydana geldiğini tespit etmeyi amaçlamışlardır. Haddeleme işlem parametreleri olarak paso sayısı, ilerleme hızı ve hadde kuvveti seçilmiş ve bu parametrelerin artık gerilme, mikroyapı ve sertlik üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deney sonuçları ve analizler birlikte değerlendirildiğinde, tornalanmış yüzeyler ve haddelenmiş yüzeyler karşılaştırmışlardır. Yapılan bu karşılaştırma sonucunda artık gerilme üzerindeki en iyi parametrenin baskı kuvveti olduğu sonucuna varılmıştır.

Yu vd. (1999), özel tasarlanan polikristalin elmas ucun alüminyum malzeme üzerindeki etkilerini gözlemek ve malzeme yüzeyinde iyileştirme oluşturmayı amaçlamışlardır. Özel tasarlanan polikristalin elmas uc ile farklı parametreler (ilerleme hızı, paso sayısı ve haddeleme kuvveti) kullanılarak haddeleme işlemi uygulanmıştır. Yapılan deney ve analizler incelediğinde en iyi yüzey pürüzlülüğu değerlerinin düşük

ilerleme hızında elde edildiği ve en iyi yüzey sertlik değeri nin de artan hadde kuvveti sonucu oluştuğu kaydedilmiştir.

2. ÇELİK

Alaşimsız makine çeliği ve karbon çeliği diye bilinen imalat çeliği, yaklaşık %0,20-60 oranında karbon içeren alaşimsız çeliklerdir (Talçinkaya, 2019).

Çelik, sanayi ve endüstrinin gelişmesine yardımcı olan ticari bir değere sahip vazgeçilmez bir metaldir. Çelik, karbon ve demir elementinin birleşiminden elde edilen alaşımdır. Yapısında fosfor, magnezyum, silisyum, kükürt gibi farklı alaşım elementleri kullanılır. Çelikler kendi içerisinde çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Çelikleri sınıflandırılmada birçok farklı ölçüt kullanılmıştır. Örneğin, alaşım elementi olarak sadece karbonun kullanıldığı çelikler sade karbonlu çelikler, karbon dışında alaşım elementi içerenler ise alaşımlı çelikler olarak sınıflandırılır. Çelikler içerdikleri karbon oranına göre az karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu çelikler olarak sınıflandırılır. Karbon oranına göre çelikler oranları aşağıda verilmiştir.

- Az karbonlu çelikler ($0,1 < C < 0,2$)
- Orta karbonlu çelikler ($0,2 < C < 0,5$)
- Yüksek karbonlu çelikler ($0,5 < C < 2$)

Karbon miktarı, çeliklerin mekanik özelliklerini en çok etkileyen faktördür. Karbon, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise çeliğin karbon içeriği yüksek olmalıdır. Yani az karbonlu çeliğin sünekliği yüksek, mukavemeti düşükken yüksek karbonlu çelikte durum tam tersidir. Ayrıca çeliğe karbon dışında birçok alaşım elementi katılır ve bunların hepsinin birbirinden farklı özellikleri vardır. Örneğin, çelik bünyesine katılan krom elementi yeterince katıldığı zaman çeliğe korozyon direnci yani paslanmazlık özelliği kazandırılır. Ayrıca katılan alaşım elementi çeliğin maliyeti üzerinde de etkisi vardır ki bu da çelik fiyatlarındaki çeşitliliği göstermektedir.

2.1. Çeliğin Özellikleri

- Çelik, demirden daha sert yapıdadır.
- Çeliğin kimyasal birleşimi kaynak işlemlerine uygundur.
- Farklı işlemlerde yüksek sıcaklığa dayanıklı ve sertliği arttırılabilen yapısı vardır.

- Isıl işlemler sayesinde daha iyi elektrik, mekanik ve fiziksel özellikler elde edilebilir.
- Belirli sıcaklıkta dövme, presleme ve haddeleme yöntemleri ile istenilen şekilde elde edilebilir.
- Çeliğin özelliğine göre soğuk işlem uygulanarak da şekillendirme yapılabilir.
- Plastik ve metallerde kaplama işlemi yapılabilir.
- Paslanmaz çelikler korozyona ve ısıya karşı dayanıklıdır. Bu nedenle geri dönüştürülebilir.
- Karbon derecesi artan çeliğin akma ve çekme dayanıklılığı beraberinde artmaktadır.

2.2. Çeliğe Uygulanan Isıl İşlemler ve Malzemenin Kimyasal Bileşimi

Çeliğe uygulanan ısı işlemler aşağıdaki Çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Çeliğe ait genel özellikler ve ısı işlem sıcaklıkları (Enes demir çelik, 2024).

Sıcak şekil verme sıcaklığı °C	Yumuşatma sıcaklığı °C	Yumuşak tavlama sıcaklığı >BSD30	Normal tavlama sıcaklığı °C	Sertleştirme sertliği (HRC) (yağda)	Sertleştirme sertliği (HRC) (suda)	Sertleştirme sıcaklık (yağda)	Sertleştirme sıcaklık (suda)	Menevişleme sıcaklığı °C
1100-850	600-750	207	840-870	50-55	50-57	830-860	820-850	540-680

Malzemenin kimyasal bileşimi aşağıdaki Çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2. 2. AISI 1050 Çeliğin kimyasal özellikleri (Enes demir çelik, 2024).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Ni
0,42-0,50	0,15-0,35	0,50-0,80	0,045	0,045	-	-	-	-	-

Metallere ve alaşımlarına istenilen mekanik özellikleri kazanmak amacı ile bir veya birden fazla sayıda uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemlerine ısı işlem denir.

- Yumuşatma tavlaması (Tam tavlama)
- Normalizasyon tavlaması
- Küreselleştirme tavlaması
- Gerilim giderme tavlaması
- Su verme sertleştirme tavlaması

-Menevişleme

2.3. Çeliğe Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Bazı uygulamalarda kullanılan çelik parçaların hem aşınma dirençlerinin hem de darbe dayanımlarının yüksek olması istenir. Bunun için parçaların yüzeylerinin sert, merkezlerinin olabildiğince yumuşak ve tok olması gerekir. Bunu sağlamak için parçalara yüzey sertleştirme işlemleri uygulanır. Yüzey sertleştirme işlemleri ikiye ayrılır (Kesti, 2009).

2.4. Yüzeyin Kimyasal Bileşimini Değiştirilerek Yapılan İşlemler

- Endüksiyonla yüzey sertleştirme
- Alev ile yüzey sertleştirme

2.5. Yüzeyin Kimyasal Bileşimi Değiştirmeden Yapılan İşlemler

- Sementasyon (Karbürizasyon)
- Nitrürasyon (Nitrüleme)
- Borlama

2.6. Çeliğin Kullanım Alanları

Çelikler, metalürji endüstrinin en önemli metalleri arasında yer almaktadır. Çelikler yaygın ve geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Örneğin, makineler, motorlu taşıtlar, trenler, metal kesiciler, gemiler, dingiller, iş aletleri, uzay araçları, motor pistonları, zırhlı araçlar, çatı ve dış yapı sistemleri, akslar, şaftlar, krank milleri, motor gövdeleri, demir yolları, yay çelikleri, otomat çelikleri, darbe takım çelikleri, rulman çelikleri, basınçlı kap çelikleri, meteoroloji araçları, uçaklar, askeri araçlar, köprüler ve birçok alanda kullanılan en önemli malzemelerden biridir (Karagöz vd. 2015).

2.7. Çeliğin Mekanik Özellikleri

Çelik türleri, kimyasal bileşimlerine, gördükleri tavlama ve ısıtım işlemlerine göre birbirinden farklı karakteristik özellikler gösterir. Bu özellikler; elektriksel, fiziksel ve kimyasal alanda olabilir fakat çeliğin en önemli ve bütün çelik türleri için geçerli olan özelliği, mekanik özelliğidir. Çelik türlerine göre değişen mekanik özelliklerin en önemlileri sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı, uzama, büzülme (kesit daralması) ve darbe dayanımıdır (Enes Çelik, 2024).

Sertlik, bir maddenin başka bir cisme batmaya karşı gösterdiği dirençtir. Sertlik ölçümünde farklı deneyler ve yöntemler kullanılır, bu yöntemlerin isimleri değişebilir. Örneğin; dinamik ve statik sertlik deneyleri en yaygın olanlardır. Bunlardan en çok kullanılanlar Rockwell, Vickers ve Brinell sertlik yöntemleri arasında yer almaktadırlar (Enes Çelik, 2024).

Çeliğin çekerek kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir. Belirli kesitteki bir çekme çubuğuna, koparılıncaya kadar uygulanan en yüksek çekme kuvvetinin, çubuğun başlangıç kesitine bölümünden çıkarılır

Çekme sırasında, esnekliğin kalmadığı noktada (akma noktası) uygulanmış olan kuvvetin, çekme çubuğunun başlangıç kesitine bölümünden elde edilen değerdir. N/mm^2 olarak ifade edilir.

Uzama, çekme çubuğunun koptuğu anda ölçülen uzunluğu ile başlangıç uzunluğu arasındaki farkın, başlangıç uzunluğuna oranıdır ve % ile gösterilir. Çekme çubuğunun boy çapı ne kadar büyük olursa, uzama o oranda düşük çıkar. Bu nedenle uzama deneyinde kullanılacak çekme çubuklarının boyu genellikle (5 d) olarak kabul edilir ve uzama (A5) olarak işaretlenir.

Büzülme, çekme çubuğunun koptuğu andaki kesitinin, başlangıç kesitine oranıdır ve % ile ifade edilir.

Darbe dayanımı, iki taraflı yataklanmış veya tek taraflı bağlanmış çentikli bir çubuğu tek bir darbe ile kırmak için harcanan güçtür. Darbe dayanımı joule (J) ile ölçülür (Enes Çelik, 2024).

3. TRİBOLOJİ

Triboloji, Yunanca kökenli "tribos" kelimesinden türetilmiş olup sürtünme anlamına gelir. Triboloji, birbirleriyle etkileşime giren yüzeylerin ve bunlarla ilişkili olayların bilimsel çalışması veya tekniği olarak tanımlanır.

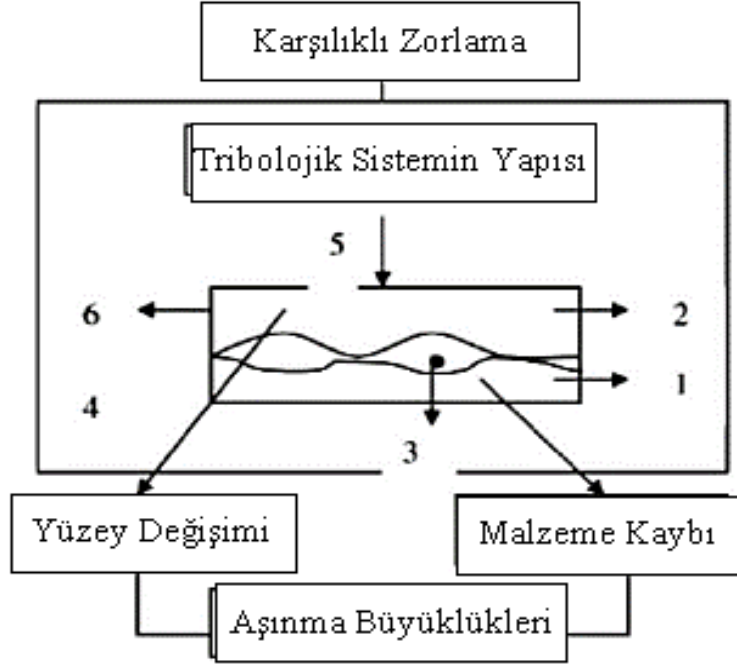
Triboloji, bir sistemin parçaları arasındaki temasın neden olduğu sürtünme kuvvetleri, yüzeyler arasındaki aşınma miktarı ve yağlama koşullarının incelenmesini içerir. Tribolojik çalışmalar, makine parçalarının performansını artırmak, enerji verimliliğini artırmak, aşınma ve hasarı azaltmak gibi birçok endüstriyel uygulama alanına sahiptir (Zum Gahr, 1987).

Genel olarak, tribolojik bilgiler, otomotiv, havacılık, makine mühendisliği, endüstriyel üretim ve birçok diğer alanda önemli rol oynar. Tribolojik sistemlerin ve aşınmanın karmaşıklığına ve çeşitliliğine odaklanılmış gibi görünüyor. Bu sistemi oluşturan bileşenlerin, yani karşı malzeme (aşındıran), ana malzeme (aşınan), ara malzeme, hareket, yük ve çevrenin rolü belirtiliyor. Ana malzeme ve karşı malzeme arasındaki temas aşınma çiftini oluşturur ve bu temas altında ara malzeme bulunursa aşınma başlar. Ana malzeme genellikle mineral, metal, ağaç, kauçuk, plastik, deri gibi katı maddelerden oluşurken, aşındıran malzemeler de benzer katı maddelerin yanı sıra sıvılar ve gazlarla karışımlar olabilir. Ara malzeme, aşınma parçacıkları, yağlar veya hiçbir madde olmayabilir. Yükleme çeşitleri, darbeli, darbesiz, değişken, sabit gibi çeşitlerden oluşurken, hareket şekilleri de kayma, kaymalı yuvarlanma, darbe, yuvarlanma gibi şekillerde ifade edilir (Koç vd. 2010).

Tribolojik sistemlerde, unsurlar arasındaki etkileşimler nedeniyle aşınma mekanizmaları öne çıkar. Bu mekanizmalar arasında abrasiv (tahriş edici), adhesiv (yapışma), korozyon ve yorulma gibi çeşitli türler bulunur. Aşınma, genellikle tek bir türde değil, birden fazla türde ortaya çıkabilir. Araştırmacılar, çalıştıkları sistemi dikkate alarak aşınma test cihazlarını seçer ve tasarlarlar. Ancak standart test cihazlarının her sistemin koşullarını tam olarak sağlamakta kesin olmadığı belirtilmektedir (Akça, 2019).

Tribolojik sistemlerde sürtünme ve aşınmalar meydana gelmektedir. Tüm mekanik sistemler tribolojik sistemler olarak düşünülebilir. Bir yerde sürtünme kaynaklı bir aşınma meydana geliyorsa o sistem tribolojik bir sistemdir. Tribolojik sistemlerin karmaşıklığını ve çeşitliliğini anlatırken, aşınma mekanizmalarının önemi vurgulanmaktadır. Bu sistemin sematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

1. Karşı malzeme
2. Ana malzeme
3. Ara malzeme
4. Çevre şartları
5. Yük
6. Hareket



Şekil 3. 1. Tribolojik sistem yapısı şematik olarak gösterimi (Onaran, 1985).

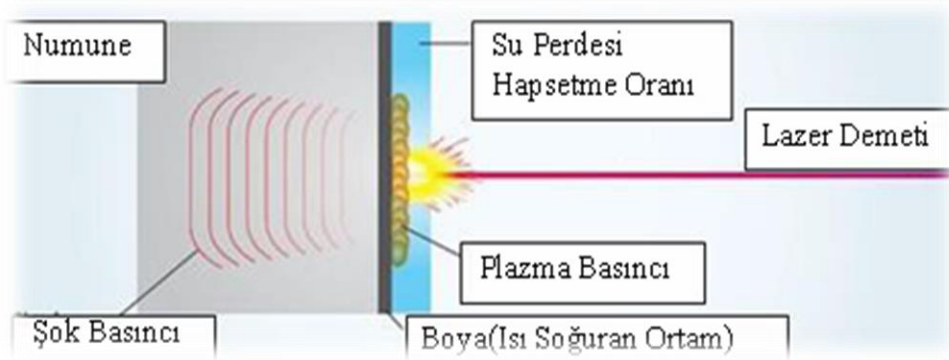
Tribolojik sistemlerde en önemli başlıca etken aşınma olayıdır ve aşınmaya bağlı olarak ikili ve tekli aşınma türleri oluşmaktadır.

3.1.1. Yüzey iyileştirmede kullanılan yöntemler

Malzemelerin yüzeylerinin iyileştirilmesinde kullanılan geleneksel olmayan yeni yöntemler günümüzde kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemler raybalama, honlama, taşlama gibi günümüz şartlarına uygun olmakla birlikte dezavantajları nedeniyle tercih edilmemektedir. Geleneksel olmayan yöntemler, malzemenin yüzey kalitesini artırmak için daha etkili ve yenilikçi yaklaşımlar gösterdiği için tercih edilmektedirler. Bu yeni yöntemler bilyeli haddelme, derin haddelme, bilyeli yüzey dövme, lazer şoku ile ezme, ultrasonik destekli yüzey iyileştirme, kavitasyon ile yüzey ezme ve ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu gibi günümüz teknolojik şartlarına uygun daha hassas ve özelleştirilmiş sonuçlar elde etmek için en çok tercih edilen yüzey iyileştirme yöntemleridir (Varol, 2009).

3.1.2. Lazer şoku ile ezme yöntemi

Lazer şoku ile ezme, malzeme performansını artıran önemli bir yüzey iyileştirme yöntemidir. Yüzeyde oluşan artık gerilmeler, basınç ve çekme hallerinde meydana gelen yorulma ve çatlak oluşumunu önlemeye yardımcı olur. Bu yöntemin bir avantajı, malzemenin dayanıklılığını artırması ve uzun vadeli kullanımda daha sağlam parçalar elde edilmesidir. Ancak bu yöntemin avantajları ile beraber dezavantajları da mevcuttur. Öncelikle, proses için kullanılan araç ve gereçlerin pahalı olması ve ekipmanların muhafaza edilmesinin zorluğu, maliyeti artırılmaktadır. Ayrıca işlemi gerçekleştirmek için deneyimli bir operatöre ihtiyaç duyulması, başlangıçta iş gücü ve eğitim maliyetlerini gerektirir. Yine de malzeme üzerindeki olumlu etkileri göz önüne alındığında, lazer şoku ile ezme yöntemi, özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Uygulama alanları ve kullanılan malzeme özellikleri dikkate alındığında, yöntemin avantajları, dezavantajlarını aşmaktadır. Lazer şoku ile ezme yöntemi Şekil 3.2’te gösterilmektedir.



Şekil 3. 2. Lazer şoku ile ezme yöntemi (Meletlioğlu, 2014)

3.1.3. Kavitasyon ile ezme yöntemi

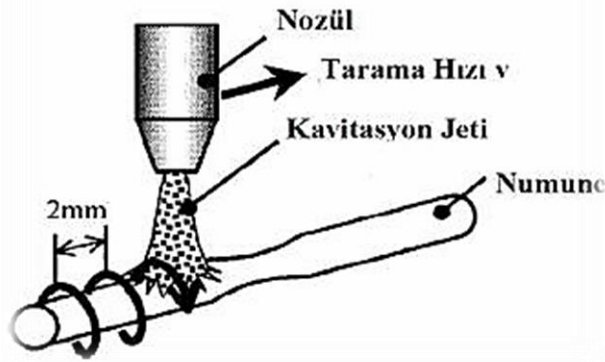
Kavitasyon ile ezme, su jetinden çıkan yüksek basınçlı suyun nozuldan çıkarak basınç seviyesinin düşük olduğu bir ortama geçmesiyle oluşan kabarcıkların malzeme yüzeyinde yüksek darbe yüklerine neden olduğu bir işleme yöntemidir. Bu yöntemde, kavitasyon darbeleri kullanılarak malzeme yüzeyinde plastik deformasyonlar oluşturulur.

Bu işlemin ilk aşamasında, yüzeyde meydana gelen en belirgin değişiklik, kütle kaybı yerine plastik deformasyonun oluşmasıdır. Plastik deformasyonlar, mekanik yüzey özelliklerini olumlu yönde etkileyebilir. Ancak, kavitasyona maruz kalma süresi arttıkça,

metal yüzeyinde erozyon ve hasar meydana gelebilir. Bu nedenle işlem süresi, iş parçasının yüzey özelliklerini belirlemede önemli bir parametredir.

Kavitasyon ile ezme işlemi, hava kabarcıkları ile oluşan plastik deformasyon sayesinde yüzey sertliği, mikrosertlik ve pürüzlülüğün iyileştirilmesine katkı sağlayabilir. Ancak, yöntemin yüzey özellikleri üzerindeki etkisi tam olarak araştırılmamıştır ve bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Genel olarak, kavitasyonla ilgili araştırmalar, özellikle mühendislik uygulamalarındaki aşınma gibi negatif etkiler üzerine odaklanmıştır. Kavitasyon ile ezme, katı cisim çarpışmalarının olmadığı için pürüzlülükteki artışı göz ardı edilebilir hale getirir ve işlem maliyetlerini düşürür. İşlem sırasında malzemenin yüzey altında plastik deformasyon olduğundan, basınç artık gerilmesi elde edilebilirken morfolojik hasar minimize edilebilir. Kavitasyon ile ezme yöntemi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 3. Kavitasyon ile ezme yöntemi (Meletlioğlu, 2014).

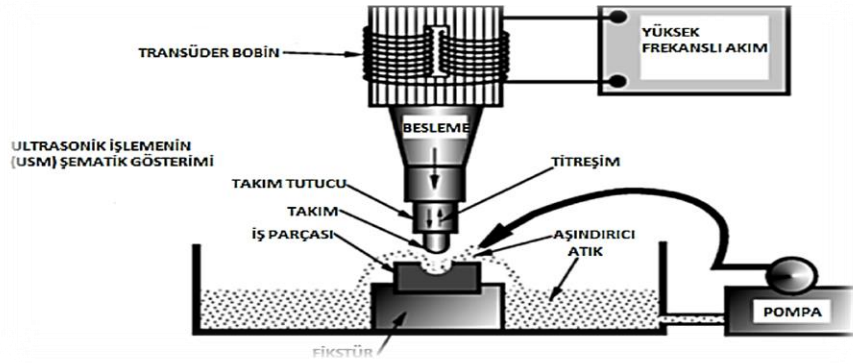
3.1.4. Ultrasonik destekli yüzey iyileştirme yöntemi

Ultrasonik destekli yüzey iyileştirme, Statnikov tarafından icat edilmiş ve 1970'lerde patenti alınmış olan, kaynak sonrası yüzey işleme yöntemleri arasında yenilikçi bir tekniktir. Bu yöntem, kaynak sonrası yüzeylerin iyileştirilmesi için kullanılan bir tekniktir.

Ultrasonik destekli yüzey iyileştirme metodu, yaklaşık 27 kHz frekansta çalışan ultrasonik işleme yaklaşık 200 Hz'de mekanik dövme işleminin çakıştığı bir süreç içerir. Temel amacı, yüzeyde plastik deformasyon yoluyla yararlı basınç artık gerilmeleri oluşturmak ve kaynak-malzeme birleşme noktasının profilini düzleştirerek gerilme konsantrasyonunu azaltmaktır.

Bu yöntemde, ultrasonik dalgaların ve mekanik dövmenin birleşimi, yüzeydeki malzeme moleküllerinin hareketini sağlayarak plastik deformasyona neden olur. Bu deformasyon, kaynak-malzeme birleşme noktasında yararlı gerilmelerin oluşmasına ve gerilme konsantrasyonunun azaltılmasına katkı sağlar.

Bu yöntemin temel prensibi, kaynak sonrası yüzeylerdeki mekanik özellikleri iyileştirmek ve kaynak birleşme noktasının dayanıklılığını artırmaktır. Bu yöntem, özellikle metal bileşenlerin kaynağından sonra oluşan gerilme ve deformasyon sorunlarını gidermede etkili bir yol sunar. Ultrasonik destekli yüzey iyileştirme yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.4’de gösterilmiştir (Cherif vd. 2008).



Şekil 3. 4. Ultrasonik destekli yüzey iyileştirme yöntemi (Meletlioğlu, 2014).

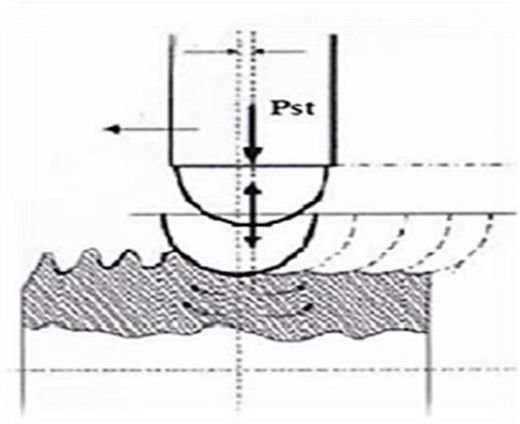
3.1.5. Ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu

Ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu (UNSM), yüzey işleme için yeni bir teknolojidir. Bu yöntemde, iş parçasına bağlı bir tungsten karbür topuyla milimetre kare başına 1.000 ila 10.000 çekimlerde saniye başına en az 20.000 kez veya daha fazla vurma işlemi gerçekleştirilir. Ultrasonik cihaz tarafından üretilen bu soğuk dövme benzeri vuruşlar malzemenin yüzey tabakasında ağır plastik deformasyonlara neden olur. Bu deformasyonlar sonucunda malzeme yüzeyinde nano ve mikro kristal yapılar oluşur (Cherif vd. 2008).

Bu yöntem, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek bir artık gerilme dağılımı sağlar. Yüzey tabakasındaki nano ve mikro yapı değişiklikleri, iş parçasının dayanımını ve sünekliğini geliştirmeye yardımcı olur. Aynı zamanda, iş parçasının yorulma direncini artırarak yüzey pürüzlülüğünü geliştirir ve basınç artık gerilmelerine katkıda bulunur.

Bu yöntemin avantajlarından biri, iş parçasının yüzey tabakasında meydana gelen nano ve mikro yapı değişiklikleri sayesinde, dayanımını ve sünekliğini artmasıdır. Bu, iş parçasının uzun süreli performansını artırabilir ve yüksek stres altında çalışan parçalar için önemli bir avantaj sağlar (Soyama vd. 2003).

Ancak, bu yöntemin uygulanmasıyla ilgili olarak, iş parçasının geometrisi, malzeme özellikleri ve işlem parametreleri gibi faktörlerin dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, işlemin optimize edilmesi ve kontrollü bir şekilde uygulanması için dikkatli bir çalışma gerekmektedir. Uygulama yöntemi Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 5. Ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu (Meletlioğlu vd. 2014).

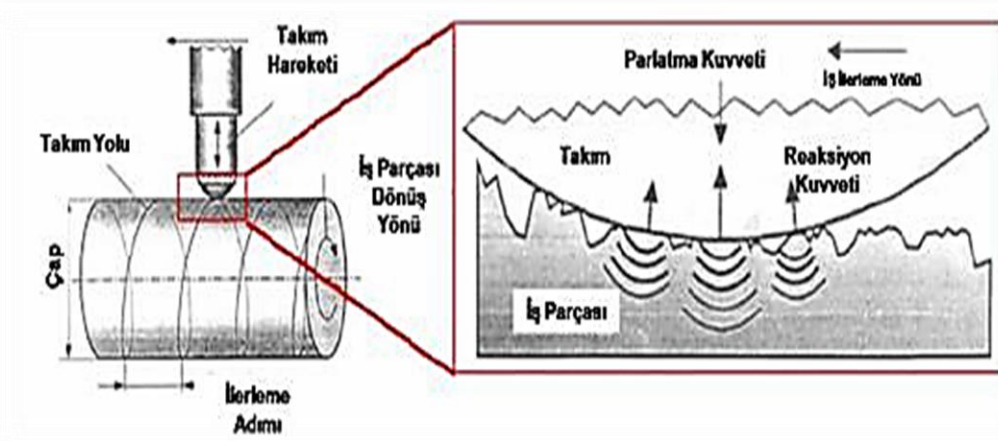
3.1.6. Derin haddeleme (ezme) yöntemi

Derin ezme (Deep Rolling), bilyeli haddeleme yöntemine benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Bu yöntemde, dönen bir iş parçasının yüzeyine bir aparat yardımıyla yüksek basınç uygulanarak yüzey tabakasında gerilmeler oluşturulur. Derin ezme işlemi sırasında, yüzeydeki mikro çıkıntılar basınç aparatı kullanılarak plastik deformasyona uğrattılır ve bu deformasyonlar yüzeydeki mikro çukurlara doldurulur (Özkan, 2006).

Yöntemin temel mekaniği, iş parçası ile küresel bir bilye arasında oluşturulan yüzey basıncına dayanır. Bu yüzey basıncı, iş parçasının yüzey tabakasında artık gerilmeler ve mikro yapısal deformasyonlar (sertleşme/yumuşama) oluşturur. Bu deformasyonlar, malzemenin yüzeyindeki mikro yapıları etkileyerek, genellikle yüzeyin dayanıklılığını artırır ve yorulma direncini artırır (Schulze, 2004).

Derin ezme, özellikle metal parçaların yüzey kalitesini ve dayanıklılığını artırmak için yaygın olarak kullanılan bir işleme yöntemidir. Bu yöntemin avantajlarından biri, iş

parçasının yüzeyinde istenmeyen çatlakların oluşmasını önlemesidir. Ancak, işlemin uygulanması ve kontrolü dikkat gerektirir, çünkü yanlış parametrelerle uygulanması durumunda istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Derin ezme yöntemi Şekil 3.6'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 6. Derin ezme ile uygulama yöntemi (Meletlioğlu vd. 2014).

3.1.7. Bilyeli haddeleme yöntemi

Haddeleme işlemi, iş parçasının yüzeylerinin talaş kaldırılmadan ezilmesini sağlayarak mekanik özelliklerinin iyileşmesine ve yüzey kalitesinin artmasına olanak tanır. Bu süreç, özellikle seri üretimde verimliliği artırır ve taşlama yöntemine göre üstünlük sağlar. Ancak, işlemde kullanılan takım malzemesi, iş parçasının özellikleri, kimyasal bileşimi, yüzey kalitesi ve diğer faktörler iş parçasının yüzey pürüzlülüğüne ve sertliğine etki edebilir (Başak, 2015).

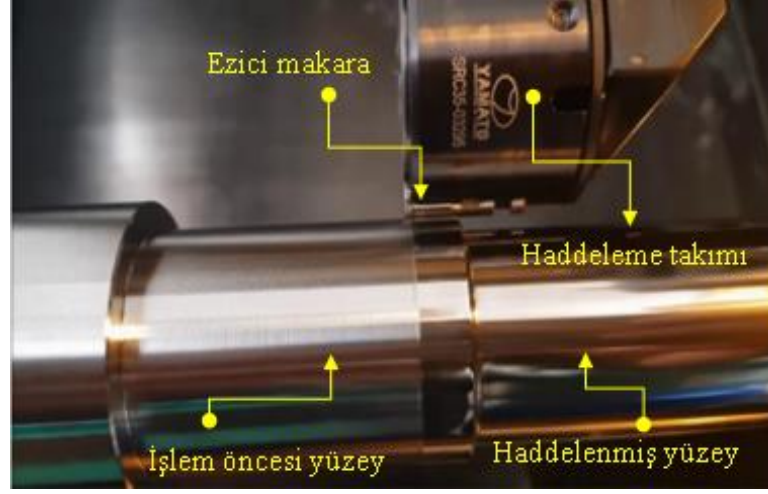
Makine imalatçılığında uzun süredir kullanılmakta olan bilyeli haddeleme işlemi, malzemeye ait uygulanan yüzeyde seri üretim esnasında verimlilik artışı ve mekanik özellikleri de iyileştirmesi (yüzeyin sertleşmesi) nedeniyle ve elde edilen yüzeyde daha iyi yüzey kalitesi oluşturması nedeniyle taşlama yöntemine göre daha üstün konuma gelmektedir. İş parçasındaki Ra ve yüzey üzerindeki sertliğine etki edebilecek birçok faktör vardır. Bu faktörler, işlenen takımın malzemesi, iş parçasının fiziksel özellikleri, mekanik, kimyasal bileşimi, yüzey kalitesi ve rijitliği, geometrisi, soğutma ve yağlama teçhizat kinematığı, işleme ya da şekil verme işleminin özelliği, akışkanlığı ve ısı transfer özelliği şeklinde sıralanabilmektedir (Başak, 2009; Vukelic vd. 2013).

Yüzey pürüzlülüğü değerlerini iyileştirmek için birden fazla işleme yöntemi (taşlama, frezeleme, honlama, alıştırma, parlatma) uygulandığı gibi haddeleme işlemi de bu işlem namına uygulanan bir işleme yöntemi olarak görülmektedir. Uç kısmında haddeleme işlemi için kullanılan küresel ezici bilya veya düzleştirici olarak makara kullanılır. Yüzey iyileştirme yöntemi, iş parçasının yüzeyinde talaş kaldırılmadan, şekil değiştirme işlemi olarak bilinen soğuk sonlandırma uygulaması şeklinde adlandırılır. Soğuk sonlandırma işeminin amacı hacimsel bir gerçeklik elde etmek değil, iş parçasına ait yorulma ve çekme dayanımlarında istenilen olumlu sonuçlar elde etmek ve iş parçası yüzeyinde iyileştirilmiş mikrosertlik değerlerine sahip olmak ve malzeme yüzeyi üzerinde olumlu bir Ra değerleri elde etmek, iş parçasının korozyon ve aşınma dirençlerini artırmak şeklinde gösterilebilmektedir (Başak, 2015).

Literatür taramaları incelendiğinde haddeleme işleminin farklı numuneler için kullanıldığı tartışılmaktadır. Alüminyum alaşım ve karışımları ile çelik (plastik kalıp çelikleri, sertleştirilmiş çelik, ısıtılmış işlem görmüş ve temperlenmiş çelik, St37, AISI 5140, X5CrNiMo17-12- 2) en çok kullanılan uygulama numuneleri şeklinde gösterilmektedir. Bunun nedeni ise çeliklerin ve alüminyum alaşımların, endüstrideki kullanım alanının çok fazla olması olarak gösterilebilmektedir. Literatür de polimerler, bakır, pirinç ve titanyum vb. numunelere haddeleme işlemi gerçekleştirildiği ve deneysel çalışmaların yapıldığı idrak edilmektedir (Başak, 2015). Son zamanlarda magnezyum (Ramesh vd. 2021) ve titanyum ile ilgili uygulamalara da karşılaşmaktadır (Huang vd. 2019; Wandra 2022).

Makine üretim faaliyetleri için farklı şartlarda farklı nitelikte malzemelerden faydalanmaktadır. Bütün malzemelerin sertliği, yorulma dayanımı, yüzey pürüzlülüğü, korozyon direnci ve aşınma direnci içerisinde belirli farklar bulunmaktadır. Taleplerin karşılanabilmesi için en doğru üretim yöntemi araştırma yaparak uygulanmaktadır. Uygulanan üretim yöntemleri, istenilen özellikleri sağlamada zaman zaman yetersiz kalmakta ve imalat tekniklerine ek olarak çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Uygulanan yöntemler yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği değeri, korozyon direnci ve aşınma direnci gibi pek çok mekanik niteliklerin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Üretim alanında kullanılan talaşlı imalat yöntemleri (tornalama, frezeleme vb.) elde edilen numune yüzeylerinde sınırlı yüzey iyileştirmesine olanak vermektedir. Yüzeyde iyileştirme istenildiği zaman haddeleme ve taşlama, lepleme gibi yüzey düzeltme işlemleri uygulanmaktadır. Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme işlemi, imalat alanında yüzey bitirme yöntemleri olan lepleme, taşlama, honlama vb. tekniklerine alternatif olarak gerçekleştirilmektedir (Loh vd. 1989). Şekil 3.7’de çelik bir milin haddelenmesi ve işlem

öncesinde ve işlem sonrasında malzeme yüzeyinde olumlu farklılıklar görülmektedir (Akyüz, 2020).



Şekil 3. 7. Çelik milin boyuna haddelenmesi (SKUV, 2023).

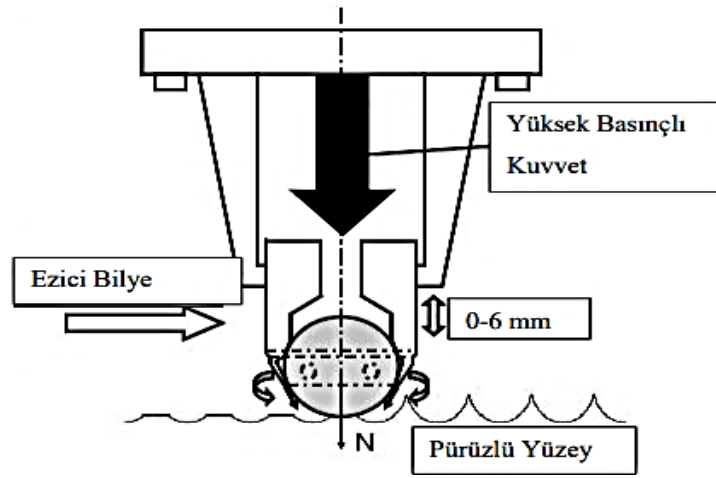
Tornalamada delinmiş bir iş parçasının delik kısmının haddelenmesi Şekil 3.8’da gösterilmektedir.



Şekil 3. 8. İç delik haddelme (SKUV, 2023).

Talaşlı imalatta üretilen malzemeler makine üretim aşamasında mekanik yüzey nitelikleri açısından belirgin bir düzeye erişmektedir. Yüzey özellikleri haddelme, taşlama vb. sonuçlandırma işlemleri ile düzeltilmektedir. Bilyeli haddelme (ball burnishing), imalat edilen makine elemanlarında yüzeylerin talaş kaldırmadan plastik deformasyona

uğramasıyla yapılan, duyarlı bir yüzey iyileştirme metodu şeklinde adlandırılabilir. Bu işlem, metal parçaların prizmatik, silindirik, konik iç ve konik dış yüzeylerine uygulanabilirse de büyük kısmı tornalanmış ve taşlanmış iş parçalarının yüzeylerine uygulanır (Özkan, 2006; Mendi,1996). Bu metotta, Şekil 3.9'da şematik olarak verildiği şekliyle, numune yüzeye belirli bir kuvvetle bastırılan yuvarlanma veya sabit bir ezme aparatı yardımıyla yüzeylerden talaş kaldırmadan, yüzeydeki mikro pürüz tepelerin küçük plastik ayrışmalara uğratarak düzleştirilmesi ile bir bakıma soğuk şekillendirme işlemi olarak denilebilmektedir (El-Axir, 2000; Başak ve Sönmez, 2015).



Şekil 3. 9. Bilyeli haddeleme işleminde takım ve numunenin hareket şekli (Aviles vd. 2013).

Yuvarlanma elemanının uyguladığı basınç genellikle yay baskısı, hidrolik baskı veya manyetik baskı ile sağlanır. Bu işlem sonucunda, malzemenin yüzey sertliği artarken, yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azalır. Yüzeye uygulanan gerilme şiddetine bağlı olarak, işlem düşük ve yüksek deformasyon aralıklarında gerçekleştirilebilir.

Yüksek deformasyonlarda, yüzeye genellikle 30 MPa'dan daha yüksek basınçlar uygulandığından, yüzey altında oluşan artık çekme gerilmeleri derinliği 1 mm'nin üzerine çıkabilir. Düşük deformasyonla haddeleme ise genellikle kalıp yüzeyleri, miller, türbin kanatlarının bağlantı kısımları, araç süspansiyon sistemleri, kaynaklı bağlantılar ve yatak yüzeyleri gibi parçalarda kullanılır (Akyüz, 2020).

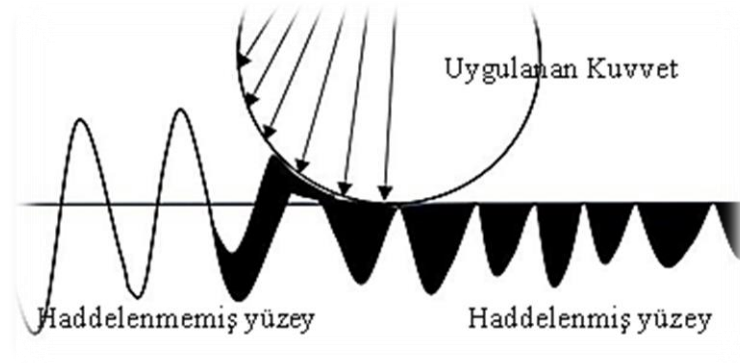
Bilyeli haddeleme, geleneksel hassas tornalama, taşlama ve honlama yöntemlerine kıyasla yaklaşık 15 kat daha ekonomiktir. Ayrıca, işlem sonucunda yüzeydeki çekme gerilmeleri basma gerilmelerine dönüştüğünden, yorulma ömrü önemli ölçüde artar. Bu

nedenle, bilyeli haddeleme işlemi, yüzey kalitesini iyileştirmek ve parçaların dayanıklılığını artırmak için yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir (Luca, 2002).

Bilyeli haddeleme; havacılık, medikal, nükleer endüstri, otomotiv, paketleme, kimya ve tıp gibi birçok farklı endüstri alanında kullanılan bir yüzey işleme yöntemidir. Bu yöntem, çeşitli malzemelerin yüzey kalitesini artırmak ve işlevselliğini iyileştirmek için yaygın olarak tercih edilir.

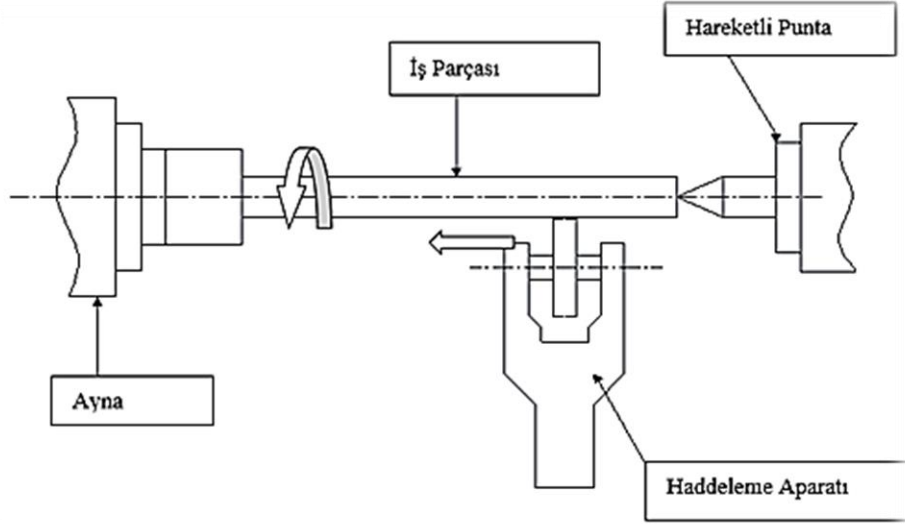
Bilyeli haddeleme işlemi sırasında, metal parçaların yüzeyleri profilometre ile incelendiğinde, düz olmadığı ve yüzeyde girinti ve çıkıntıların olduğu görülür. Bu işlem, metal parçaların plastik şekil değişiminden yararlanarak yüzeydeki çıkıntıların, daha sert bir bilye kullanılarak ezilmesi ve girinti bölgelerinin doldurulması esasına dayanır (Akyüz, 2020).

Bu yöntem, işlenmiş metal parçaların yüzeylerindeki düzensizlikleri gidermek, pürüzlülüğü azaltmak ve yüzeyin mekanik özelliklerini iyileştirmek için etkili bir şekilde kullanılır. Şekil 3.10'deki gibi elde edilen iş parçasının düz olmadığı tam tersine girinti ve çıkıntılı olduğu şekilde görülmektedir.



Şekil 3. 10. Ezici bilye ile yüzey iyileştirme yöntemi (Öcalır, 2009).

Bilyeli haddeleme işleminin şematik görünümü, Şekil 3.11'te verilmiştir. Genel olarak, işlemde kullanılan aparat, iş parçasının eksenine etrafında dönen bir mekanizma ile donatılmıştır. Bu mekanizma, iş parçasının yüzeyine basınç uygulamak için kullanılır ve aparat hareket ettirilerek iş parçası eksenine boyunca ilerler, böylece yüzeyin tamamı şekillendirilir. İş parçasının deforme edilecek yüzey kalınlığı, malzemenin özelliklerine göre değişir, ancak genellikle tornalamış yüzeylerde maksimum 15-20 mikron, taşlanmış yüzeylerde ise bu değer maksimum 6-8 mikron olarak öngörülür (Yen vd. 2005).



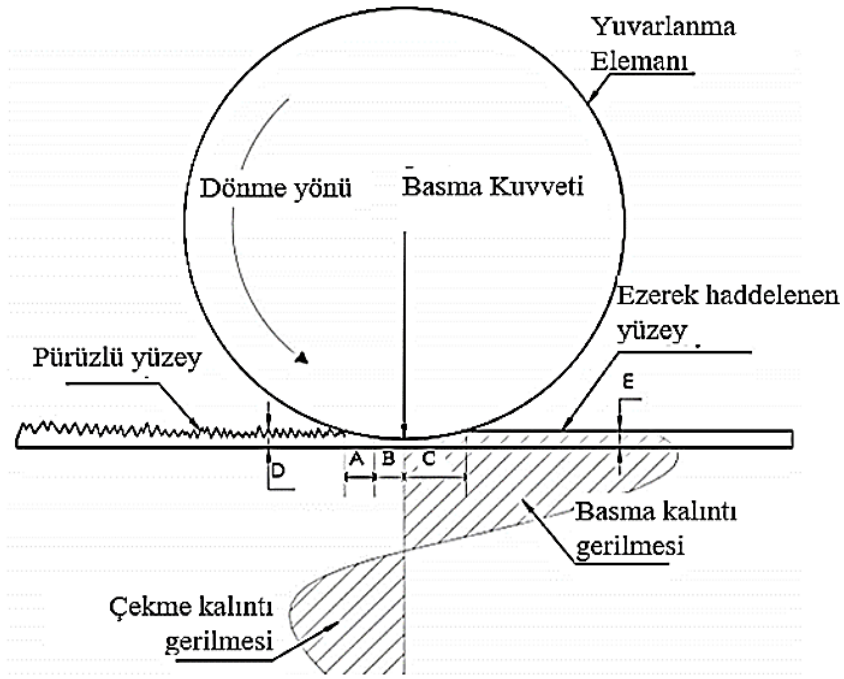
Şekil 3. 11. Bilyeli haddele işleminin şematik olarak gösterimi (Hassan, 1997).

Bilyeli haddeleme (Ball Burnishing) işlemi, karmaşık yüzelerde düzgün bir yüzey bırakarak onlara iyi bir şekil verir. Bu yöntem, malzeme yüzeyini düzleştirir ve yüzey bitirme özelliklerini geliştirir. Uygulanması basittir, çünkü bir mekanizma sayesinde makine işlemi otomatik olarak gerçekleştirilir ve parça sökülmesi gerekmez, sadece bir aparat kullanılır (Rodriguez vd. 2012).

Bu yöntem, frezeleme veya tornalama gibi işlemlerden sonra malzemede oluşan artık gerilme veya yüzey pürüzlülüğünü değiştirmek veya iyileştirmek için kullanılır. İşlem sonunda malzemenin yüzey sertliği artar. Başlıca uygulama alanları arasında otomotiv krank şaftları, hidrolik sistem elemanları, rulman yüzeyleri ve implant malzemesi yüzeyleri bulunur (Rodriguez vd. 2012). Bu işlem aynı zamanda bir soğuk işleme prosesi olarak düşünülebilir. Bu prosedürde, sert ve yüksek polisleme özelliğine sahip bir top malzeme yüzeyine uygulanarak sıkıştırılır. Haddeleme, yumuşak ve sünek malzemelere ek olarak sert metallerde de uygulanabilir. Haddeleme aparatı, malzeme yüzeyine uygulanan sıkıştırmadan dolayı ince bir plastik akış oluşturur ve malzeme yüzeyinde birkaç mikronluk bir deformasyon meydana gelir. Bu proses, yüzeyin korozyon direncini, yorulma dayanımını ve aşınma direncini diğer yüzey işlemlerine kıyasla daha iyi iyileştirme sağlar (Prafulla vd. 2011).

Bilyeli haddeleme işleminde, bilyenin yüzeyi ezme işlemi ve kalıntı gerilme dağılımı şekil 3.12'teki şematik olarak gösterilmiştir. Ön işlemi yapılmış iş parçasının yüzeyine uygulanan kuvvet nedeniyle malzeme akma noktasına geçer. Bu bölgede plastik

deformasyonla mikropürüz tepeleri ezilir. Plastik deformasyondan sonra malzemede bir miktar elastik dönüşüm gerçekleşir. Son olarak, bilye malzemeye son kez temas eder ve yüzeyin parlak, pürüzsüz ve istenilen ölçülere gelmesini sağlar. Bu işlem sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen gerilme yüzeyden eksene doğru azalır. Gerilme, haddeleme kuvvetine bağlı olarak iş parçasına kadar 1 mm'ye kadar nüfuz edebilir. Haddeleme kuvveti kalktıktan sonra, malzemede dislokasyon artışı ve pekleşme nedeniyle yüzey tabakasının altında gerilim yığılması oluşur.



Şekil 3. 12. Bilyeli haddeleme işlemi ve malzemede oluşan plastik deformasyonun görünümü (Akkurt ve Ovalı, 2009).

Malzemenin yüzey pürüzlülüğünün artması, çentik etkisine neden olarak malzeme yüzeyinde çatlak oluşumuna yol açabilir. İş parçasında oluşan çekme gerilmelerinin etkisiyle çatlak ilerleme hızı artabilir. Ancak, yüzeyde oluşan basma artık gerilmeleri çatlak ilerleme hızını yavaşlatabilir. Malzeme yüzeyinde meydana gelen bu iki etki, malzemenin mekanik özelliklerini etkiler. Malzemede meydana gelen artık gerilmeler, yüzeyde basma gerilmesi ve iç bölgede çekme iç gerilmelerinin bulunmasıyla malzeme kesitinde denge oluşturur ve herhangi bir eksene göre momentlerin toplamı sıfır olur. Bilyeli haddeleme yöntemi ile işlenmiş malzemelerde özellikle kalıntı gerilmeler, yüzey doğruluğunu etkileyen en önemli parametrelerden biridir.

3.1.7.1. Bilyeli haddeleme yönteminin avantajları

Bilyeli haddeleme yönteminin birçok avantajı vardır. Bu avantajlar şunlardır:

- Yüksek kalitede pürüzsüz yüzey elde edilir.
- İkincil işlemlerde genellikle yüzey pürüzlülüğünde iyileşme sağlanırken, bilyeli haddeleme yönteminde yüzey pürüzlülüğü, aşınma direnci, korozyon direnci, yorulma dayanımı ve yüzey sertliği gibi özelliklerde iyileşme görülür. Ayrıca, malzemenin çekme ve akma mukavemeti artar.
- Yüzey kalitesi çok iyidir ve ek işleme ihtiyacı duyulmadan kullanılabilir. Yüksek ölçü hassasiyeti sağlanır.
- Yüksek hassasiyet gerektiren parçaların imalatında son işlem olarak kullanılır.
- Kullanılan aparatın tasarımı ve imalatı diğer yöntemlere göre daha kolay ve daha ekonomiktir ve birçok kez kullanılabilir.
- İşleme süresi, geleneksel yüzey işleme yöntemlerine göre daha kısadır.
- Talaş kaldırılmadan yapılan bir üretim tekniğidir.
- Minimum fire ile üretim sağlanır.
- Malzeme liflerinin sürekliliği bozulmaz, dolayısıyla üretilen parçaların dayanımı artar.
- Özel bir tezgâh gerektirmez, haddeleme aparatı klasik tornalama tezgâhlarına bağlanarak işlem gerçekleştirilebilir.
- Seri üretimde kullanılabilirliği fazladır.
- Fazla ustalık gerektirmez.
- Silindirik ve konik malzemelerin iç ve dış yüzeylerine, prizmatik metal parçaların yüzeyine uygulanabilir.
- Kullanılan takımın tasarım süreci ve yapımı diğer takımlara göre basit ve maliyeti azdır.
- Yüksek üretim hızına sahiptir.
- Elektrik gücü ve toplam enerji gereksinimi diğer yüzey işleme proseslerine göre çok azdır, bu da üretim maliyetini düşürür.
- Elde edilen yüzey kalitesi çok iyidir, bu da uygulandığı yüzeylerde sürtünmeyi azaltır ve enerji tasarrufu sağlar.

Bu özelliklerden dolayı bilyeli haddeleme yöntemi, geleneksel yüzey işleme yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir (Luo, 2006).

3.1.7.2. Bilyeli haddeme yönteminin dezavantajları

Bilyeli haddeme yöntemi, bazı dezavantajlarla birlikte gelir:

- Malzemenin ezilmesi prensibiyle yapılan bir işlem olması nedeniyle, malzemenin haddeme işlemine tepki vermesi ezilme kabiliyetine bağlıdır. Bu durum, yapısal olarak sert malzemelerde yöntemin etkisinin sınırlı kalmasına neden olabilir. Bu nedenle işlemin olumlu etkisi genellikle yumuşak malzemelerde daha etkilidir.

- İşlemden etkili olan parametrelerden baskı kuvveti ve paso sayısı gibi değişkenlerin uygun değerlerde verilmemesi durumunda, yüzeyde olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir.

- Deformasyonu başlatmak ve sürdürmek için yüksek kuvvetler gerekebilir.

- Daha büyük ve daha güçlü tezgâhlar gerektirebilir.

- Süneklik daha azdır.

Yukarıda belirtilen nedenler, bilyeli haddeme yönteminin bilinen bazı sınırlılıklarını oluşturur. Bu sınırlılıklar, yöntemin uygulama alanlarını ve etkinliğini belirler (Yurtoğlu vd. 2005).

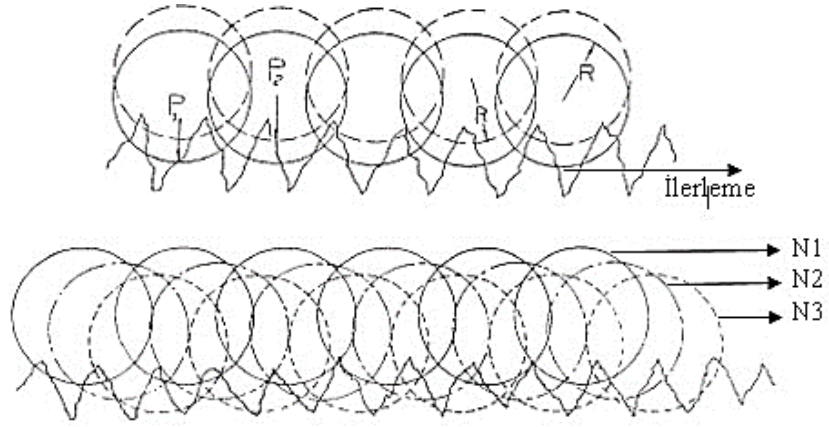
3.1.7.3. Bilyeli haddeme yönteminin temel parametreleri

Bilyeli haddeme yöntemi, yuvarlak bilyelerin bir yüzey üzerinde belirli bir baskı kuvveti ile ilerletilerek plastik deformasyonun sağlandığı bir işlemdir. Bu işlem sırasında belirli parametrelerin doğru seçilmesi, işlem verimliliği ve ürün kalitesi açısından kritiktir. İşte bu temel parametrelerin bazıları ve etkiledikleri özellikler aşağıda verilmiştir.

İlerleme Hızı: Bilyelerin malzeme üzerinde ilerleme hızı, işlem süresini ve bilyenin malzemeyi ne kadar sıkı sıkıştırdığını belirler. İlerleme hızı, torna ve CNC tezgâhlarında takımın üzerindeki hızını ifade etmektedir. Birimi mm/dk'dır. Yavaş ilerleme hızı daha derin deformasyon ve daha pürüzlü bir yüzey oluşturabilirken, hızlı ilerleme daha düz ve daha az deformasyonlu bir yüzey elde etmeye olanak tanır

Baskı Kuvveti (Hadde Basıncı): Baskı kuvveti, bilyelerin malzeme üzerine uyguladığı basınçtır ve birimi Newton (N)'dir. Daha yüksek baskı kuvveti, daha derin bir deformasyon ve daha pürüzlü bir yüzey oluşturabilir. Ancak aşırı yüksek baskı kuvveti, malzeme hasarına ve aşınmasına yol açabilir.

Paso Sayısı: Paso sayısı, haddeme işleminin tekrar edilmesi anlamına gelir. Bilyelerin malzeme üzerinde ilerlediği adım sayısını belirtir. Daha fazla paso sayısı genellikle daha homojen bir deformasyon ve daha düzgün bir yüzey oluşturur. Ancak çok fazla paso sayısı işlem süresini uzatabilir ve maliyeti artırabilir. Paso sayıları ve yüzey iyileştirme aşamaları şekil 3.13'te gösterilmiştir (Akyüz, 2020).



Şekil 3. 13. Paso sayıları ile yüzey düzeltme aşamaları (Hassan, 1997).

Bu parametrelerin doğru seçilmesi, istenilen yüzey özelliklerinin elde edilmesini sağlar. Örneğin, daha derin deformasyonlar isteniyorsa ilerleme hızı ve baskı kuvveti artırılabilir. Daha pürüzlü bir yüzey isteniyorsa bu parametreler azaltılabilir veya daha küçük paso sayıları seçilebilir. Bu nedenle, bilyeli haddeme işlemi öncesinde malzeme özellikleri ve işlem sonucunda elde edilmek istenen yüzey özellikleri dikkate alınarak doğru parametrelerin seçilmesi önemlidir (Akyüz, 2020).

4. AŞINMA

Aşınma, malzemeye uygulanan dış etkenler ile yüzeylerde meydana gelen fiziksel değişimler olarak tanımlanır (Akkurt, 1990). Kullanılan malzemelerin yüzeyinde yıpranma ve aşınma sonucunda meydana gelen aşınmanın sağlanabilmesi için aşağıdaki koşulların gerçekleşmesi gerekir (Yıldız ve Gör, 2006).

- Sürtünme olayı sonrasında (bağıl hareketin) olması,
- İstem dışı oluşması,
- Sürekli ve yavaş olması,
- Mekanik bir tesir olması,
- Numune yüzeyi üzerinde farklılık oluşturmasıdır.

Aşınma, sürtünme şeklinde yer alan yüzeylerde mekanik bir etkinin amaçlanmadığı halde kopan numune kaybı olarak ifade edilmektedir. Bu halinde yüzeylerin ilk şekilleri değişir ve parçalar içerisindeki boşluklar sürekli olarak büyüyen bir eğilim göstermektedir. İstenen işleve normal halde ulaşmaz (Akkurt, 1990).

Yüzeylerin birbirine temas etmesi, pürüzlerin etkileşimine neden olur. İlk temas genellikle pürüz tepeleri arasında meydana gelir ve girintilere ulaşmaz. Temas halindeki pürüzlerin toplam alanı, gerçek temas alanını belirler. İlk temas eden pürüzler, ezilerek şekilleri değişir ve bu genellikle yük artışından kaynaklanır, daha sonra yeni ve daha küçük pürüzlerle temas haline geçer. Bu süreçte pürüz sayısı azalır. Gerçek temas alanı, görülen temas alanına yaklaşır. Sisteme yük ve hareket enerjisi uygulanır, böylece temas halindeki cisimler arasında göreceli hareket sağlanabilir. Giriş ve çıkış arasındaki fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine dönüşür, ayrıca aşınmaya neden olabilir.

İmalat yöntemlerinde, tamamen pürüzsüz bir düz yüzey elde etmek genellikle mümkün değildir. Yüzey işleme süreçlerinde kullanılan kesici araçlar ve işleme teknikleri ne kadar hassas olursa olsun, genellikle işlem sonrası yüzeyde mikroskobik düzeyde pürüzler kalır. Bu pürüzler, işlemin doğasından kaynaklanır ve yüzeyin istenilen son özelliklere uygun olması için uygun olabilir (Portakal, 1974). Belirtildiği gibi, bu mikroskobik pürüzler genellikle birkaç mikron yüksekliğindedir. Bu pürüzler, yüzeyin dokusunu ve özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle, imalat süreçlerinde pürüzsüz bir yüzey elde etmek için özel işlemler veya işlemlerden sonra yüzeyin düzeltilmesi gerekebilir. Bu durum, özellikle yüzeyin estetik ve pürüzsüz görünümü imalat sektöründe oldukça önemlidir (Demir, 2002).

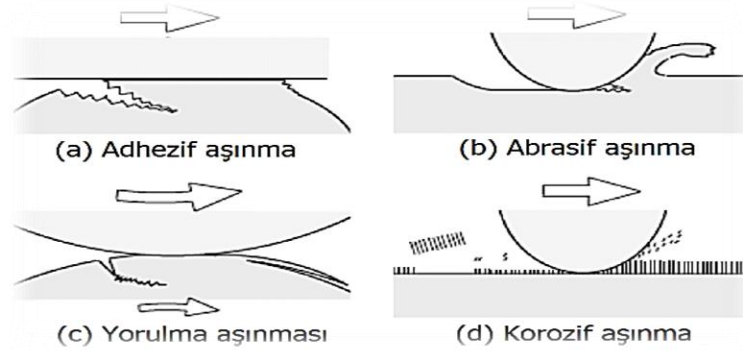
Aşınma sürecinin başlaması ve devam etmesi için sürtünme gereklidir. Sürtünen iki nesne arasındaki temas yüzeyi, genellikle görünenden daha küçük bir alanı kapsar. Bu, temas yüzeyinin mikroskobik pürüzlerle dolu olduğu anlamına gelir (Cöcen vd. 1997).

En hassas işleme teknikleri uygulansa bile katı malzemelerin yüzeyi asla tamamen düz olmaz. Bu mikroskobik pürüzler, yüzeyler arasında temasın gerçekleşmesini sağlar ve sürtünmeyi oluşturur. Sürtünme, yüzeyler arasındaki temas ve hareketin direncidir. Aşınma süreci, bu sürtünme kuvveti nedeniyle gerçekleşir ve yüzeylerdeki malzeme kaybına yol açar. Bu nedenle sürtünme ve yüzey pürüzlülüğü, aşınma sürecinin temel bileşenleridir. Bu kavramlar, malzemelerin performansını ve dayanıklılığını artırır (Hutchings, 1992).

4.1. Aşınma Türleri

En çok bilinen aşınma türleri şematik gösterimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. (İpek, 1992).

- Yorulma aşınma
- Korozyon aşınma
- Erozyon aşınma
- Abrasif aşınma
- Adhezyon aşınma
- Tabaka aşınması



Şekil 4. 1. En çok kabul edilen dört farklı aşınma türleri şematik gösterimi

4.1.1. Yorulma aşınması

Yorulma, malzemenin tekrarlayan yüklemelere maruz kaldığı durumlarda meydana gelen bir mekanizmadır. Bu tekrarlayan yüklemeler, malzemenin zamanla yorulmasına ve sonunda kırılmasına neden olabilir (Gürleyik, 1986). Yorulma genellikle metalik malzemelerde daha belirgindir ancak diğer malzeme tiplerinde de görülebilir. Özellikle titreşimli ortamlarda veya yüzeylerin sürtünme etkisi altında olduğu durumlarda yorulma daha sık görülür. Yorulma çatlaklarının oluşumu genellikle malzemenin iç yapısında başlar ve zamanla yüzeye doğru ilerler. Bu çatlaklar, malzemenin dayanıklılığını azaltır ve sonunda kırılmasına sebebiyet verir. Yorulma olayı, mühendislerin tasarımlarını ve malzeme seçimlerini dikkatlice yapmalarını gerektiren önemli bir olaydır. Malzemenin yorulma direncini artırmak için farklı teknikler kullanılabilir, bunlar arasında malzeme seçimi, yüzey işlemleri, tasarım değişiklikleri ve yük altındaki koşulların iyileştirilmesi bulunur. Bu önlemler, malzemenin ömrünü uzatmaya ve istenmeyen kırılma olaylarını önlemeye yardımcı olabilir (Selver ve Varol, 2016).

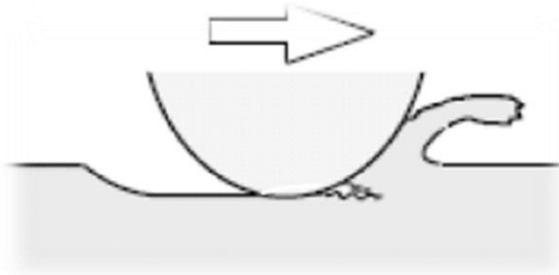
4.1.2. Koroziyon aşınma

Koroziyon aşınma, metal yüzeylerinde meydana gelen önemli hasar olaylarıdır. Korozyon, metalik malzemelerin çevresiyle kimyasal reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen bir olaydır. Bu reaksiyonlar genellikle metalin yüzeyinde tabakalar oluşturarak malzeme üzerinde çürüme veya bozulma nedeniyle yüzeyde hasara yol açarlar. Aşınma ise malzemenin yüzeyinin sürtünme veya diğer dış etkenler nedeniyle zamanla yıpranmasıdır. Bu yıpranma sonucu malzeme kaybolabilir veya yüzeyinde çatlaklar oluşabilir. Abrasif aşınma, malzemenin sert parçacıklarla temas etmesi sonucu meydana gelirken adhesif aşınma ise yüzeylerin birbirine yapışarak sürtünme hareketi sonucu meydana gelir. Koroziyon aşınma ise hem korozyon hem de aşınmanın etkilerinin birleştiği bir süreçtir. Bu durumda, metal yüzeyler hem kimyasal reaksiyonlarla bozulur hem de mekanik yıpranma sonucu aşınır. Bu tür hasarlar genellikle malzemenin ömrünü kısaltır ve işlevselliğini azaltır. Mühendislik uygulamalarında, koroziyon aşınmanın etkilerini azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler arasında koruyucu kaplamalar, paslanmaz çelik gibi korozyona dayanıklı malzemelerin seçimi, kimyasal inhibitörlerin kullanımı ve ortam

kontrolü bulunur. Bu önlemler, malzeme ömrünü uzatmaya ve hasarın oluşumunu engellemeye yardımcı olur (Selver ve Varol, 2016).

4.1.3. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma, sürtünen malzemelerden birinin diğerini çizerek veya talaş kaldırarak aşınmasına neden olan bir aşınma mekanizmasıdır. Bu aşınma türü, malzemeler arasındaki sürtünme ve hareket ile birlikte ortaya çıkar. Sürtünen malzemelerden biri, diğerinden daha sert bir yapıya sahiptir ve pürüzlü veya keskin yüzeyleri vardır. Bu pürüzlü yüzeyler, diğer malzemenin yüzeyine sürtünme esnasında talaş kaldırır veya çizikler oluşturur. Abrasif aşınmanın etkilerini azaltmak veya önlemek için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler arasında yüzeylerin kaplanması, daha dayanıklı malzemelerin kullanılması, yağlama veya sıvı soğutma sistemlerinin kullanılması ve sürtünme yüzeylerinin düzenli bakımı bulunur. Bu önlemler, malzeme kaybını azaltarak ekipmanın ömrünü uzatabilir ve işletme maliyetlerini düşürebilir (Karamış, 1986). Abrasif aşınmanın gösterimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

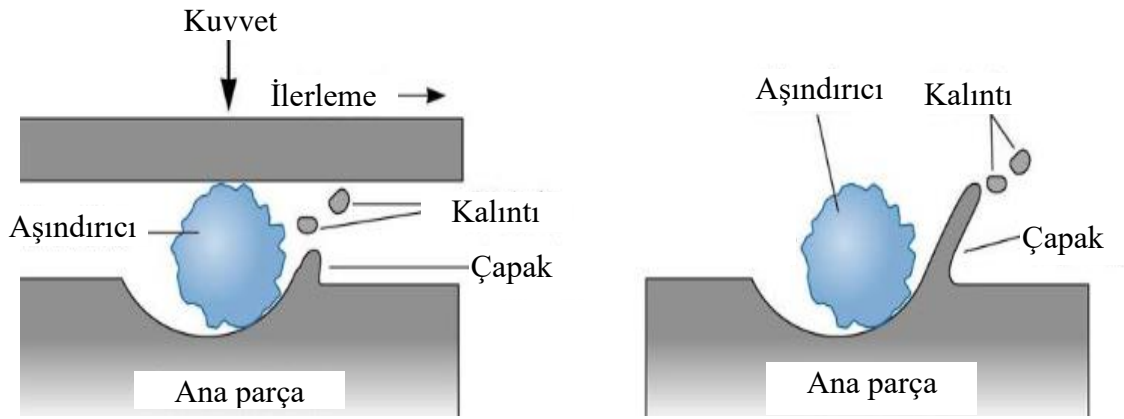


Şekil 4. 2. Abrasif aşınma şekil olarak gösterimi

4.1.4. Adhesif aşınma

Adhesif aşınma, metal-metal aşınma çiftlerinde meydana gelen, genellikle temas yüzeylerinde yapışma kuvvetlerinin etkisi altında gerçekleşir. Kayma sürtünmesi sırasında, temas eden yüzeylerdeki gerilmeler akma gerilmesi sınırına yaklaşır veya bu sınırı aşar. Bu durumda, temas eden metaller arasında yapışma kuvvetleri kendini gösterir ve yüzeyler arasında malzeme transferi, soğuk kaynaklaşma ve küçük parçaların kopması gibi olaylar meydana gelebilir. Adhesif aşınma, metal yüzeyler arasındaki bağıl hareket sırasında,

birbirine yapışmış veya kaynamış yüzeylerdeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar. Eğer iki metal aynı sertlikteyse, aşınma her iki yüzeyde de meydana gelebilir. Adhesif aşınmayı azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bunlar arasında yüzeylerin mükemmel yağlanması, yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması yer alır. Bu önlemler, adhesif aşınmanın etkilerini azaltarak malzeme kaybını önleyebilir veya azaltabilir. Sonuç olarak adhesif aşınma, yüzeye etkiyen normal yük, kayma yolu ile ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile doğru orantılıdır. Bu nedenle uygun önlemler alınarak adhesif aşınmanın etkileri azaltılabilir ve malzemenin ömrü uzatılabilir. Adhesif aşınmanın gösterimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir (Odabaş, 1991).

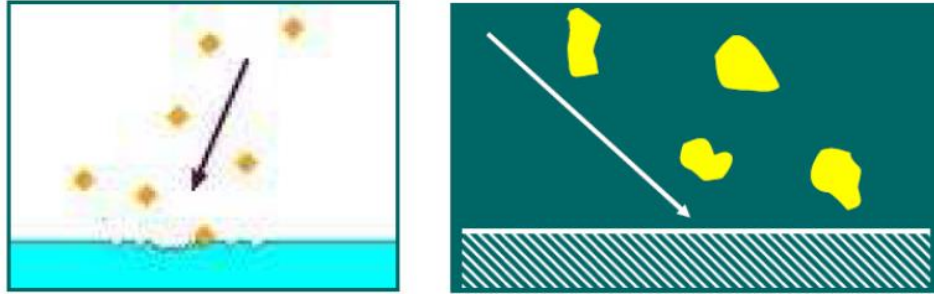


Şekil 4.3. Adhesif aşınma şekil olarak gösterilimi

4.1.5. Eroziyon aşınması

Katı parçacık çarpması nedeniyle meydana gelen eroziyon aşınma, malzeme yüzeyindeki parçacıkların yüksek hızlarda hareket etmesi ve yüzeye çarpması sonucu oluşur. Bu tür aşınma, özellikle sıvı içerisindeki sert partiküllerin yüzeydeki malzemeyi koparmasıyla meydana gelir. Katı parçacık çarpması, sıvı içerisinde taşınan veya çevrede bulunan sert partiküllerin, yüzey üzerine sürekli çarpması neticesinde gerçekleşir. Bu durumda parçacıklar yüzey üzerinde çarpma enerjilerini transfer ederler ve malzeme yüzeyinden parçalar koparak aşınmaya neden olurlar (Kalkan, 2016). Eroziyon aşınmanın örnekleri arasında; uçak üzerine çarpan yağmur damlaları, sıvı püskürtme cihazları, fanlar, pompa bileşenleri, buhar türbin vanaları ve boru hatları yer alır. Özellikle yüksek hızlı akışkanların bulunduğu ortamlarda ve sert parçacıkların bulunduğu sıvılarda eroziyon aşınma daha yaygın olarak görülür. Bu tür aşınma, ekipmanların ömrünü kısaltabilir ve

işlevselliğini azaltabilir, bu nedenle mühendisler ve tasarımcılar, erozif aşınmayı azaltmak veya önlemek için çeşitli önlemler alırlar. Bu önlemler arasında malzeme seçimi, yüzey kaplamaları, akışkanın kontrolü ve parçaların geometrisi gibi faktörler yer alabilir. Eroziyon aşınma şematik olarak Şekil 4.4'te gösterilmiştir (Bayındır, 2009; Özyaman, 2017).



Şekil 4. 4. Eroziyon aşınma şematik olarak gösterilimi (Bayındır, 2009; Özyaman, 2017).

4.1.6. Tabaka aşınması

Tabaka aşınma ve yağlama gibi konular, mühendislik ve malzeme bilimi alanlarında oldukça önemlidir. İzafe hareketler sırasında temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme, hareketin başlatılması ve devamı için gereken kuvvetlerin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Sürtünme kuvveti, genellikle temas eden yüzeyler arasındaki mikroskobik düzeydeki tarama ve oksidasyon gibi faktörlerden kaynaklanan direnç farklılıklarından kaynaklanır. Bu tür ufak kayma hızlarında, temas yüzeyleri arasındaki sürtünme titremleri oluşabilir. Bu titremler, malzemeler arasındaki mikroskobik düzeydeki deformasyonlar ve reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkabilir. Özellikle, temas yüzeylerindeki bazı maddelerin oksidasyonu sonucunda bir oksit filmi meydana gelebilir. Bu oksit filmi, sürtünmeyi azaltıcı veya artırıcı etkiye sahip olabilir. Bu süreç tribo oksidasyon olarak adlandırılır. Tribo oksidasyon, temas yüzeylerindeki malzemelerin oksijenle reaksiyona girmesi sonucunda meydana gelir. Bu reaksiyon, oksit tabakasının oluşmasına ve sürtünme özelliklerinin değişmesine neden olabilir. Ayrıca gaz veya sıvı ortamda bulunan oksijenin basıncı ve diğer faktörler, oksidasyonun hızını ve tabakanın şeklini etkileyebilir. Tabaka aşınması kontrol edilmesi, malzemelerin dayanıklılığı, sürtünme özellikleri ve genel performansı açısından önemlidir. Bu nedenle triboloji konusu, mühendislik

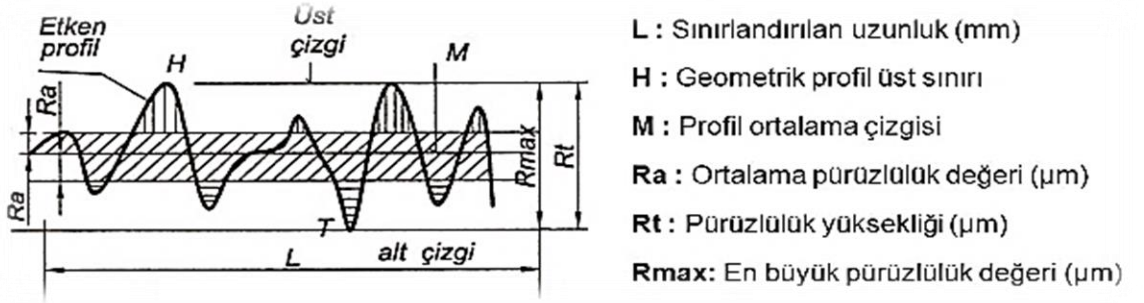
uygulamalarında ve malzeme bilimi araştırmalarında önemli bir alan olarak kabul edilir (Tekin, 1986).

5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Tornalama işleminden sonra işlenen ürünün yüzeyinin düz olmaması durumu pürüzlülük olarak adlandırılır. Bu pürüzlülük, genellikle istenmeyen bir durum olarak kabul edilir çünkü birçok uygulamada düzgün ve pürüzsüz bir yüzey gereklidir. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir, bu ölçümler genellikle en basit dokunma yönteminden, çeşitli cihazların ve teknolojilerin yardımıyla çok hassas ölçümlere kadar uzanır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçme yöntemlerini genellikle iki ana kategoride değerlendirebiliriz: uygulama şekline göre (tahribatlı, tahribatsız, temaslı, temassız) ve ölçme hassasiyetine göre (kaba, orta, hassas). Bu ölçme yöntemlerinde istenilen özellikler genellikle pürüzlülüğü ölçülen yüzeye herhangi bir tahribat veya temas olmaması ve hassas ölçüm yapılabilmesidir.

Yüzey pürüzlülüğü, genellikle R_a olarak ifade edilen ortalama pürüzlülük değeri ile ölçülür. R_a değeri, işlenmiş yüzeydeki çıkıntılarının ve çukurlarının alanlarının toplamının işlenmiş boy uzunluğuna bölünmesiyle elde edilir. Bu değer mikrometre (μm) cinsinden ifade edilir. Ortalama R_a değerinin görünümü Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

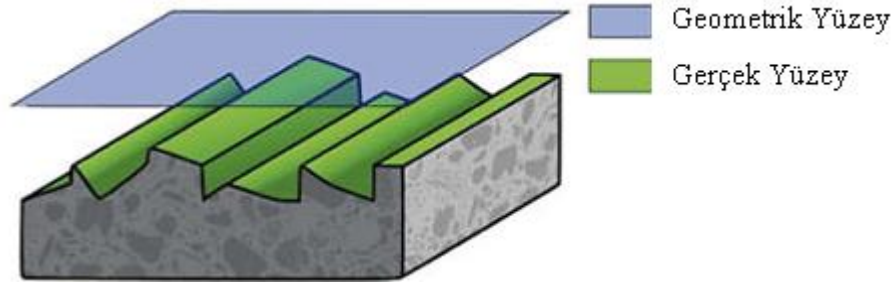


Şekil 5. 1. R_a ortalama çizgi konumunun belirlenmesi (Scurr,1991).

Yüzey kalitesi, modern talaş kaldırma tekniklerinde boyutsal doğruluk kadar önemlidir çünkü parçaların aşınması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Standartlara göre, bir yüzeyin nesneyi başka bir yüzeyden, alandan veya maddeden ayırmasına ve bir nesnenin bir yüzey tarafından sınırlanmasına "gerçek yüzey" denir. Bu, geometrik olarak mükemmel bir yüzey olarak düşünülür. Gerçek yüzey, bir cismin çevresindeki ortamdan ayıran ve sınırlayan yüzey olarak tanımlanır. Geometrik yüzey ise kusursuz bir yüzeye

sahip olan yüzeye "geometrik yüzey" adı verilir. Geometrik yüzey, genellikle matematiksel olarak tanımlanabilir ve ideal bir şekle yakın olacak şekilde üretilmiştir (Tekin, 1986).

Geometrik yüzeyler, mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılır ve genellikle hassas parçaların üretiminde veya montajında gereklidir. Şekil 5.2’de gerçek yüzey ile geometrik yüzeyin farklı olduğu gösterilmiştir.



Şekil 5. 2. Yüzey şekilleri (Joson Ryan, 2024).

5.1. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler

Bu faktörlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi oldukça çeşitlidir ve birleşimi sonucunda Ra değeri ortaya çıkar. İşte yüzey pürüzlülüğünü etkileyen bazı faktörler:

- İşlenen malzemenin sürekli veya süreksiz talaş oluşturması.
- Kesici takımdaki titreşimler, özellikle yüksek hızlarda ve kesme derinliklerinde.
- Talaş derinliği: Derin kesimler daha pürüzlü bir yüzey oluşturabilir.
- İlerleme miktarı: Daha yüksek ilerleme miktarları genellikle daha pürüzlü bir yüzey bırakır.
- Kesici takım geometrisi: Kesici takımın kenar geometrisi, talaş oluşturma sürecini ve dolayısıyla yüzey kalitesini etkiler.
- Kesici ucun üstüne talaşın yapışması: Talaşın kesici takıma yapışması, kesme sürecini etkileyebilir ve pürüzlü bir yüzeye neden olabilir.
- Kesme hızı: Daha yüksek kesme hızları genellikle daha düşük bir yüzey pürüzlülüğüne yol açabilir, ancak diğer faktörlerle etkileşime girebilir.
- İşlenen iş parçasında oluşan titreşim ve balans: Titreşimli işleme süreçlerinde, titreşimler yüzey pürüzlülüğünü artırabilir.
- Bir önceki yüzey kalitesi: Daha önceki işlemlerde oluşan yüzey kalitesi, sonraki işlemlerin pürüzlülüğünü etkileyebilir.

Bu faktörler, işleme sürecinde dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir ve yüzey pürüzlülüğünün optimize edilmesi için uygun stratejilerin belirlenmesinde önemlidir (Neşeli ve Yıldız, 2006).

5.2. Yorulma Dayanımı

Yorulma dayanımı, dinamik yüklere maruz kalan makine elemanlarında kritik bir faktördür. Sürekli değişen yükler altında malzemenin yorulma dayanımı önemlidir çünkü yüzeyde çatlaklar oluşabilir ve değişken yüklerin etkisiyle bu çatlaklar ilerleyebilir, nihayetinde malzemedeki plastik deformasyonlara neden olabilir. Bu plastik deformasyonlar, sistemde kalıcı hasarlara yol açabilir. Bu durumun ne zaman meydana geleceğini önceden kestirmek genellikle zordur çünkü tetikleyici faktörler, imalat yöntemlerinden malzeme kusurlarına kadar çeşitli olabilir. Bu istenmeyen durumun önlenmesi büyük önem taşır.

Makine elemanlarında yorulma dayanımını artırmak için bir dizi yöntem uygulanmaktadır. Son yıllarda, bilyeli haddeleme yöntemi bu yöntemler arasında öne çıkmaktadır. Bilyeli haddeleme yöntemi, metal parçaların yüzeyindeki çatlak oluşumunu azaltarak ve yüzey kalitesini iyileştirerek yorulma dayanımını artırabilir. Bu yöntemin olumlu etkileri, özellikle metal parçaların yüksek performanslı uygulamalarda kullanıldığı alanlarda önemlidir.

Bilyeli haddeleme, yüksek basınç altında özel rulmanlar veya bilyeler aracılığıyla metal parçaların yüzeylerine uygulanan bir işlemdir. Bu işlem genellikle parçaların yorulma dayanımını artırmak, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve yüzey sertliğini iyileştirmek amacıyla kullanılır. Bu nedenle, yorulma dayanımını artırmak için mevcut yöntemlere ek olarak bilyeli haddeleme yöntemi tercih edilebilir (Akyüz, 2020).

5.3. Artık Gerilme

Artık gerilmeler, malzemenin içinde oluşan ve yük etkisi olmaksızın varlığını sürdürebilen gerilimlerdir. Bu genellikle malzeme homojen olmayan deformasyona uğradığında görülür. Örneğin, bir numune eğilip sonra serbest bırakıldığında, elastik deformasyona uğramış bölgelerde plastik deformasyona uğramış bölgeler tarafından geri dönüşüm engellenebilir bu durum, çekme gerilmesi altında elastik şekil değişimine uğramış bölgelerin basma gerilmesi altına girmesine ve plastik şekil değişimine uğramış bölgelerin ise elastik çekme gerilmesi altına girmesine neden olur.

Genel olarak, yapının yüzeyindeki basma artık gerilmesi, malzemenin mukavemetine fayda sağlayabilir. Bu, yorulma mukavemetini artırabilir, yorulma ömrünü uzatabilir, çatlak yayılma hızını azaltabilir ve çevresel etkilerle desteklenen hasarları önleyebilir ancak, malzemenin yüzeyindeki çekme gerilmesi, yorulma mukavemetini ve ömrünü azaltabilir, çatlak yayılma hızını artırabilir ve çevresel etkilerle desteklenen hasarlara karşı malzeme direncini düşürebilir. Bu nedenle, yüzeydeki çekme gerilmesi genellikle istenmez.

Bilyeli haddeleme yöntemi, yüzeyde basma gerilmesi oluşturarak mekanik özelliklerde iyileşmeler sağlar. Bu basma gerilmesi, yorulma mukavemetini ve korozyon direncini artırabilir, çatlak yayılma hızını azaltabilir ve çevresel etkilerle desteklenen hasarlara karşı malzeme direncini artırabilir. Bu nedenle bilyeli haddeleme yöntemi, özellikle metal parçaların performansını artırmak için tercih edilen bir yöntemdir (Varol, 2009).

5.4. Yüzey Sertliği

Sertlik, malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnci ifade eder. Mühendislik malzemelerinde sertlik ölçümü oldukça yaygın bir testtir ve bir malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında bir ilişki kurulabilir. Örneğin, çeliklerde genellikle çekme mukavemeti ile sertlik arasında doğru orantılı bir ilişki bulunur.

Bu ilişki, mühendislik uygulamalarında malzemenin sertlik değerinin bilinmesini önemli hale getirir. Bu nedenle, sertlik ölçme yöntemleri geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmıştır. Genellikle malzemenin sertliği ile işlenebilme özelliği arasında ters bir ilişki vardır. Bu durum, talaşlı üretim gibi işlemlerde zorluklara neden olabilir ancak işleme sonrası malzeme üzerinde ısıtma işlemi veya haddeleme gibi sertleştirme işlemleri uygulanarak bu olumsuz etkileri azaltmak mümkündür, bu durum işleme maliyetini ve zaman tasarrufunu sağlayabilir.

Belirli çalışma koşullarında malzemenin yüzey sertliği isteniyorsa uygulanan yöntemler yetersiz kalabilir ancak bilyeli haddeleme yönteminin bu alanda etkili sonuçlar verdiği deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır. Bu nedenle bilyeli haddeleme yöntemi, yüzey sertliğini artırmak için tercih edilen bir yöntem olarak öne çıkmıştır (Başak ve Sönmez, 2015).

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Deney Tasarımı ve Numunenin Hazırlanması

Bilyeli haddeleme işleminin ve deneysel çalışmanın uygulamasında AISI 1050 çelik malzeme kullanılmıştır. Çelik malzeme seçilmesinde ve kullanılmasındaki en önemli faktör yaygın olarak kullanılan bir malzeme olması ve literatürde referans alınabilecek çok sayıda çalışmada kullanılmasıdır. Ayrıca bu çelik cinsi inşaat, havacılık, otomotiv, imalat vb. ana akım sektörlerde de kullanılmaktadır.

Deney numuneleri olacak parçalar dış çapı 60 mm ve iç çapı 35 mm olan uzun boru tipi malzemeden 15 mm kalınlığında kesilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6. 1. Hazır hale getirilen çelik numuneler.

Tüm deneyler SMARC marka CAK6166B X200 model CNC torna tezgâhında uygulanmıştır (Şekil 6.2).

AISI 1050 çeliğe ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 6.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. AISI 1050 kimyasal ve fiziksel özellikler

Kimyasal kompozisyon					
Element	C	Mn	Fe	S	P
% Ağırlık	0.47-0.55	0,60-0,90	98.46-98.92	≤0.050	≤0.050
Fiziksel mekaniksel özellikler					
Gerilme Dayanımı	690 MPa		Poisson Oranı	0.27-0.30	
Akma Dayanımı	365-415 MPa		Kopma Uzaması	0.27-0.30	
Kayma Modülü	80 GPa		Sertlik (Brinell)	197	
Elastik Modül	190-210 GPa		Isıl İletkenlik	49.8 W/mK	



Şekil 6. 2. SMARC marka CAK6166B X200 model torna tezgâhı.

Dilimlenen parçalar bilyeli haddelleme için yapılan bağlama aparatına bağlanması için iç çapı 36 mm olarak kalınlığı da 12 mm olacak şekilde tornalanmış ve bilyeli haddelleme işlemine hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.3). Bilyeli haddelleme işlemleri yağlı ortamda gerçekleşmiştir.

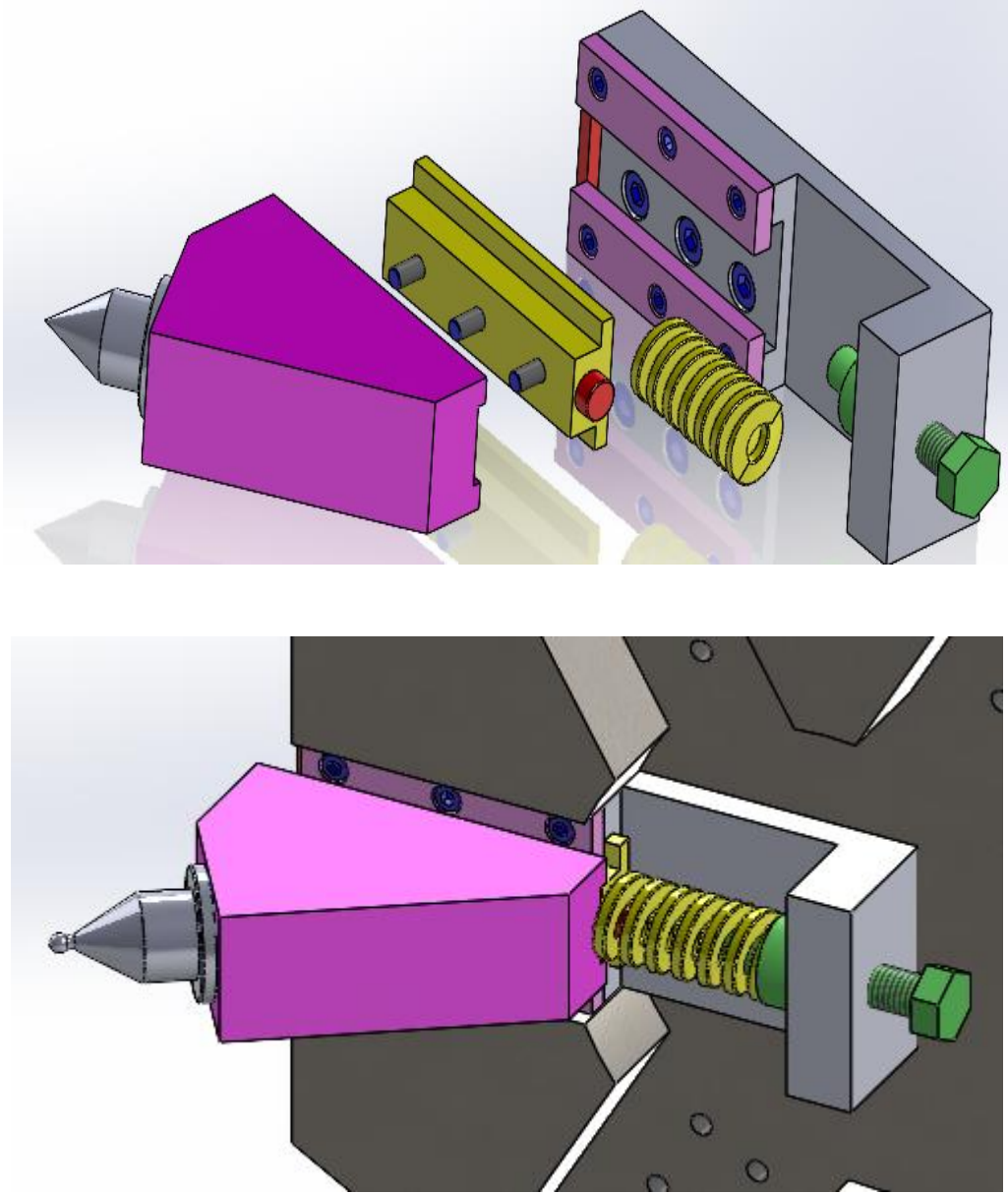


Şekil 6. 3. Hazır hale getirilen deney numuneleri

6.2. Bilyeli Haddelleme Aparatı Tasarımı ve İmalatı

Bilyeli haddelleme aparatı tasarımı yapılırken, elde edilecek bilyeli haddelleme aparatının konik, iç ve dış radüslü ve farklı kontürleri de haddelenebilecek, radyal yönde hareket edebilmesi ve ucun dönme hareketini sağlayabilecek yetenekte olması

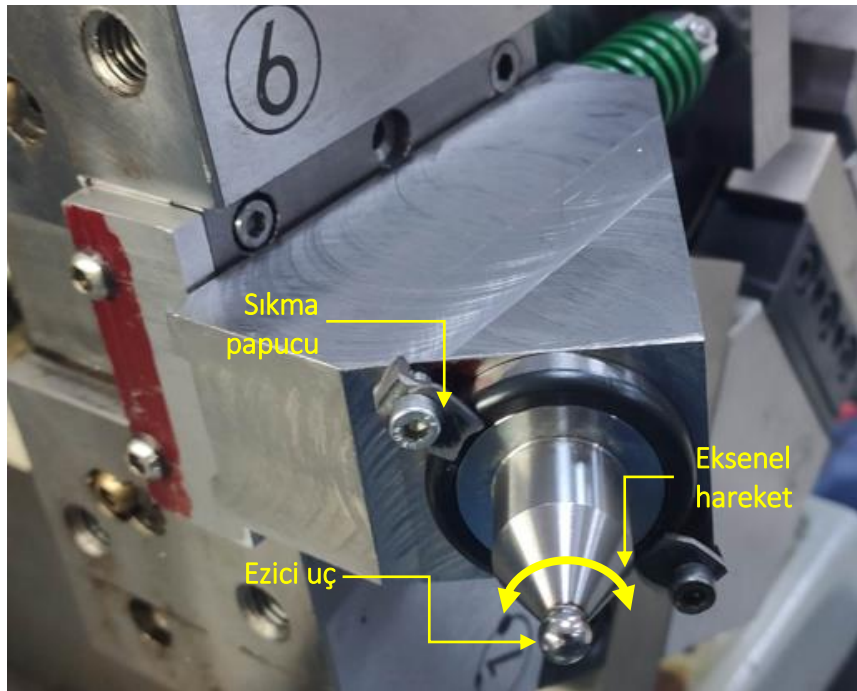
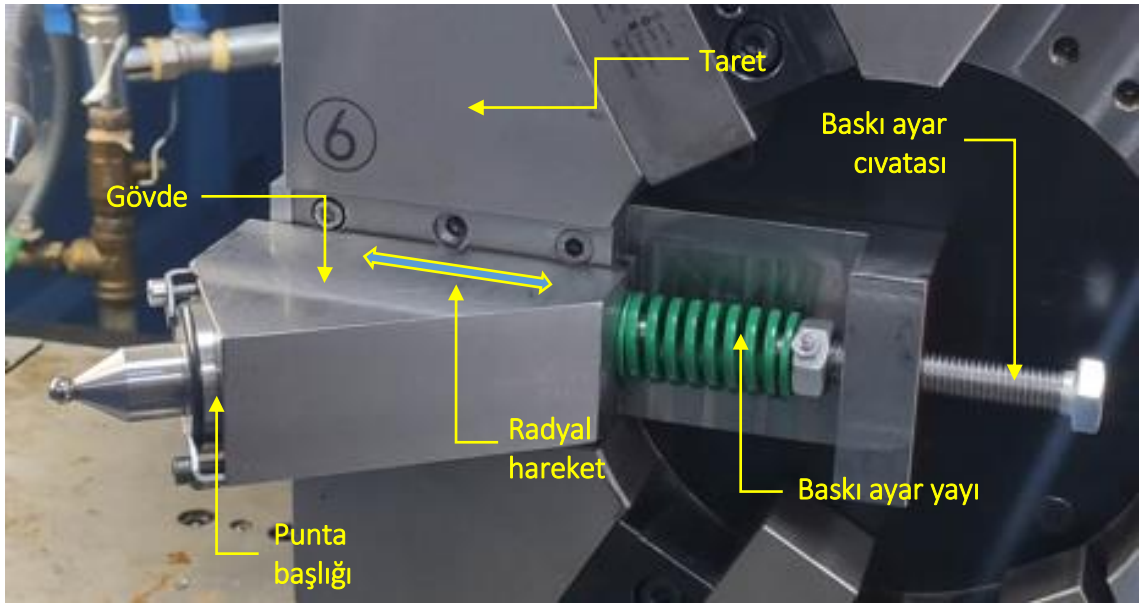
amaçlanmıştır. Ayrıca gerektiğinde ucun dönme hareketinin sabitlenerek derin haddeleme işleminde de kullanılması da düşünülmüştür. Tasarımı yapılan aparatın CNC tezgâh taretine monte edilebilecek şekilde standart montaj ölçülerinde de olmasına dikkat edilmiştir. Şekil 6.4'te haddeleme aparatının yapılmış tasarımı ve 6.5'te ise tasarımı yapılmış haddeleme aparatının imal edilmiş görüntüsü ve CNC torna tezgâh taretine montaj edilmiş hali bulunmaktadır.



Şekil 6. 4. Bilyeli haddeleme aparatı tasarımı

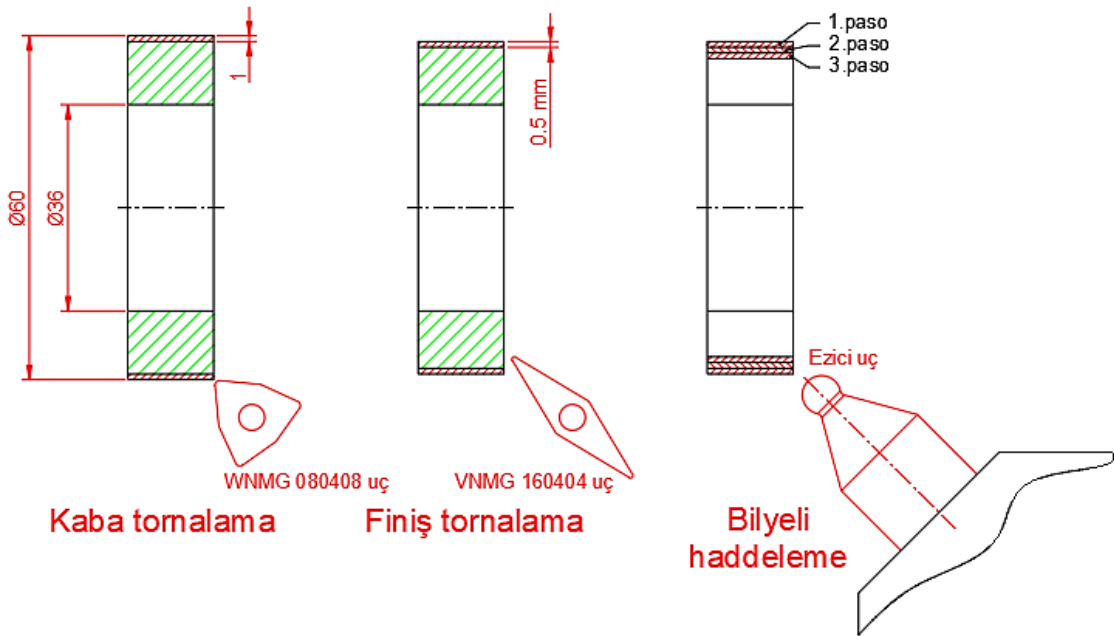
Tasarımda iki farklı hareket göz önünde bulundurulmuştur. Bunların ilki radyal ileri geri hareket, diğeri eksenel dönme hareketidir. Radyal hareket bir baskı yayı ve ayar

cıvatası yardımıyla haddeleme kuvvetinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Eksenel dönme hareketi ise torna punta başlığının ucuna lazer kaynağı ile monte edilen bir bilyenin kendi eksenini etrafında dönmesi ile elde edilmiş ve bu bilye ucu ile bilyeli haddeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bilye 65 HRC sertlikte üzerine polisaj ile parlatılmış rulman bilyesinden seçilmiştir. Gerekli derin haddelemede kullanılmak ve sıkma papuçları da kullanılmış ve punta başlığı gövde yuvasına oturtulmuştur. Yay sıkma kuvveti üretici firma kataloğunda belirtilen sıkma mesafeleri dikkate alınarak ayarlanmıştır (Yüce Teknik, 2023).

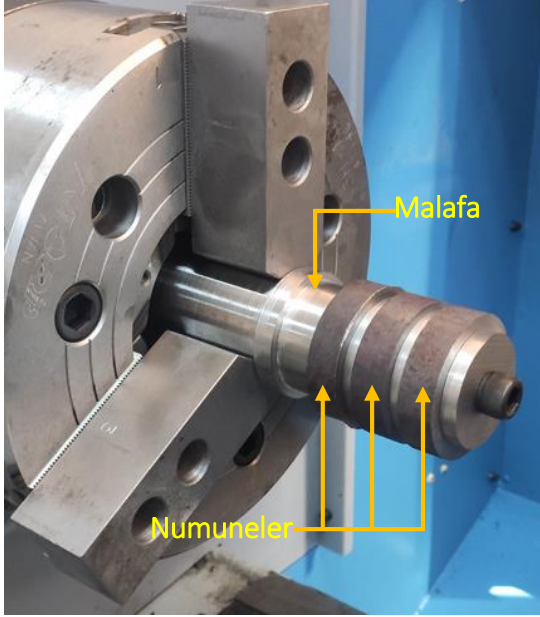


Şekil 6. 5. İmalatı yapılan bilyeli haddeleme aparatı ve CNC torna tezgâhi taretine montajı

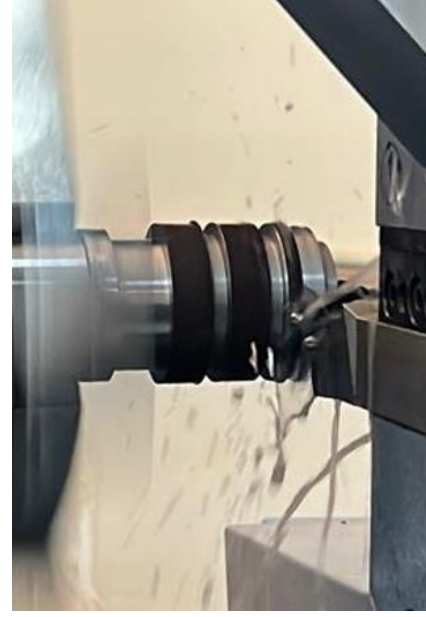
Hazır hale getirilen deney numunelerinin bağlanması ve işlenmesi için özel bağlama malafası tasarlanmıştır. Malafa üzerine takılan 3 deney numunesi önce kaba olarak tormalanmış, sonra finiş operasyonu uygulanmış ve en sonunda bilyeli haddeleme işlemi tatbik edilmiştir. Kaba tormalamada WNMG 080408 tipi insert uç kullanılmış sonrasında finiş tormalama içinde VNMG 160404 tip insert uç kullanılmıştır. Tüm operasyonlarda yay baskı kuvveti 143 N olacak şekilde sabit şekilde ayarlanmıştır. 1, 2 ve 3. Pasolarda her paso arasında 0,02 mm talaş derinliği verilmiştir. Şekil 6.6'da yapılan işlemlere ait teknik şematik çizim, Şekil 6.7'de ise bu işlemlere ait görüntüler yer almaktadır.



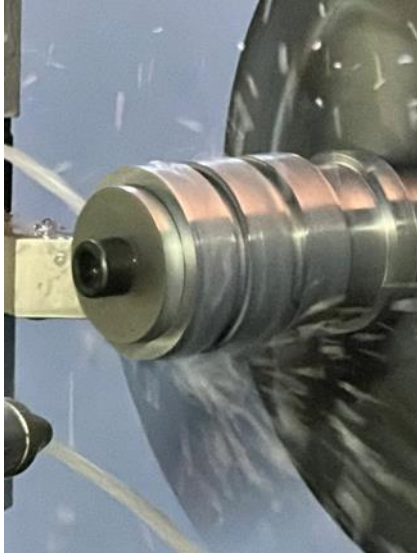
Şekil 6. 6. Yapılan işlemlere ait şematik görünüm



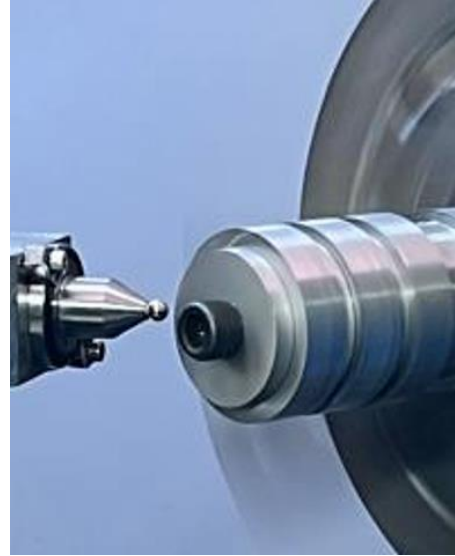
Deney numuneleri montajı (3 lü)



Kaba tornalama



Finiş işleme



Bilyeli haddeleme işlemleri

Şekil 6. 7. Yapılan işlemlere ait görüntüler

6.3. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Deneylerin yapılmasında yapılması gereken diğer bir faaliyet konusu deney tasarımı ve işlem parametrelerinin belirlenmesidir. Bu çalışmada tornalamadaki bilyeli haddeleme çalışmaları ve çelik türü sert malzemeler referans alınarak işlem parametreleri belirlenmiştir. Özellikle AISI 1050 çelik malzemeler ile yapılan çalışmalar ana referans kaynakları olarak seçilmiştir. Çalışmalarda ezici tipi olarak bilyeli (küresel) ve makaralı tip ezici uç seçildiği görülmektedir. Bu çalışmada küresel tipli uç tipi kullanılmış ancak

45⁰.’lik bir yaklaşma açısı ile bilyeli haddeme yapılmıştır (Şekil 6.5 ve 6.6). Tüm deneyler yağlı ortamda yapılmıştır.

Deney tasarım ve analiz yöntemi olarak Taguchi metodu kullanılması kararlaştırılmış ve L9 deney tasarımına göre deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. Haddeme kuvveti sabit (143 N) tutularak paso sayısı ve ilerleme hızı olarak 2 farklı parametre seçilmiş ve her parametre için 3 farklı seviye tespit edilmiştir. Böylece parametre değerlerine göre 3x3=9 deney yapılarak deneyler tamamlanmıştır. Giriş bölümünde de belirtildiği üzere, çalışmadaki birincil amaç tasarlanan ve imalatı yapılan haddeme aparatının bilyeli haddeme için uygun olup olmadığını belirlemektir. Diğer bir amaç ise geliştirilen bu aparatın bilyeli haddemede çalışmalara benzer sonuçlar üretip üretmediğinin tespitidir. Böylece olumlu yönde sonuçların elde edilmesi ile geliştirilen haddeme aparatı ile farklı deney parametreleri, farklı ezici uç malzemesi ve farklı malzemelerin haddeli bilyelenmesine yönelik çalışmalara devam edilecektir. Hatta tüm çalışmalar haddeme aparatındaki aksenal dönme hareketinin (Şekil 6.5) sabitlenmesi ile derin haddeme için de yapılabilecektir. Deneylerdeki uygulanacak işlem bilyeli haddeme parametreleri Çizelge 6.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 6. 2. Deneylerde uygulanacak bilyeli haddeme işlem parametreleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Paso sayısı	1	2	3
İlerleme (mm/dev)	0,04	0,08	0,12
Haddeme Kuvveti (N)	143	143	143
Haddeme ortamı	Yağlı		
İşleme Tipi	Tornalama, sonrasında bilyeli haddeme		
Ezici Tipi	Küresel (bilye çapı 6 mm)		
Paso Derinliği (mm)	0,02		

Gerçekleştirilen 9 deney için ve bu deneylerde kullanılan parametreler ile ilgili deney tasarımı Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6. 3. Deney tasarımı L9

Deney sıra no	Haddeme kuvveti (N)	İlerleme (mm/dev)	Paso sayısı
1	143	0,04	1
2	143	0,04	2
3	143	0,04	3
4	143	0,08	1
5	143	0,08	2
6	143	0,08	3
7	143	0,12	1
8	143	0,12	2
9	143	0,12	3

Tasarlanan bilyeli ezici ucun haddeleme baskısı kuveti Şekil 6.5'te gösterilen baskı ayarlama cıvatası ile yani yay boyunun kısaltılması (%13) ile ezici ucun deney numunesine baskı yapması sağlanmıştır. Bu kuvvetin ayarlanmasına yönelik kullanılan yay tablosu Şekil 6.8'de görülmektedir.



Ürün	D _H	D _S	L ₀	R ₀	f _{BL}	A	B	C	D	E	PCS						
	Dış Çap	İç Çap	Serbest Uzunluk	Yük Katabayı	Max. Esneme	13% f _{BL}	30% f _{BL}	45% f _{BL}	62% f _{BL}	80% f _{BL}							
Kod	mm	mm	mm	N/mm	mm	N	N	N	N	N	N						
26	CL 26 x 25	26	12,5	25	100	13	1,7	166	3,8	393	6,7	574	7,9	791	10,2	1020	100
CL 26 x 32	32			80,3	16	2,0	163	4,7	376	7,0	665	9,7	778	12,5	1004	100	
CL 26 x 38	38			62	19	2,4	151	5,6	349	8,4	523	11,6	721	15,0	930	100	
CL 26 x 44	44			50,9	22	2,8	140	6,6	349	9,9	524	13,6	722	18,0	952	100	
CL 26 x 51	51			44	25	3,2	130	7,6	330	11,3	495	16,5	692	20,0	860	100	
CL 26 x 54	54			36,2	31	3,6	120	8,6	330	13,1	495	19,4	682	25,0	860	100	
CL 26 x 76	76			29	37	4,0	111	11,1	311	16,7	466	22,9	643	30,0	840	50	
CL 26 x 89	89			24	44	4,4	102	13,1	315	19,7	473	27,1	651	35,0	840	50	
CL 26 x 102	102			21,1	51	4,7	93	15,4	324	23,1	497	31,8	670	41,0	805	50	
CL 26 x 115	115			18,7	58	5,1	84	17,3	323	26,0	484	36,7	667	46,0	800	25	
CL 26 x 127	127			16,7	64	5,5	75	19,3	319	29,7	479	41,5	660	51,0	852	25	

Şekil 6. 8. Spiral yay baskı kuvvet ayar tablosu (Yüce Teknik, 2023).

6.4. Deneylerin Analizi

6.4.1. Ra ve Rz ortalama ölçümleri

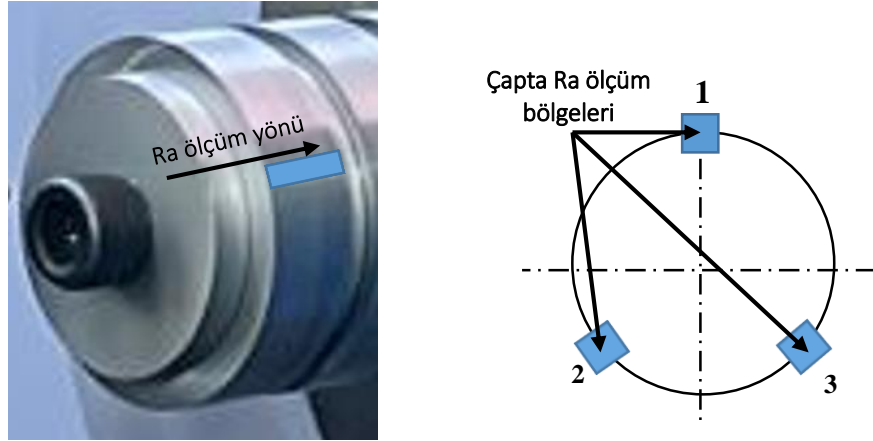
Taguchi deney tasarımı ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmış ve analizlerde “en küçük en iyi” prensibi esas alınmıştır. Malzemelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ölçümünde, “Surface Roughness Tester SRT-6210” markalı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçüm test cihazı ve cihaza ait teknik özellikleri Şekil 6.9’da verilmektedir.



Cihaz Markası ve Modeli	SRT-6210
Ölçme yöntemi (Filtreleme Yöntemi)	GAUSS
Ölçme birimi	Ra
Ölçme hızı	0,25 Vt:0,135 mm/s

Şekil 6. 9. Yüzey pürüzlülük cihazı ve özellikleri

Ra ve Rz değerleri deney numunelerinin silindirik dış yüzeyinden parça eksenine paralel olarak alınmıştır. Ölçümler için parça dairesel çap olarak takriben 120⁰ 'lık bölümlere ayrılarak 3 farklı ölçüm yapılmıştır. Alınan 3 ölçümün aritmetik ortalaması alınarak o parçaya ait yüzey pürüzlülüğü tespit edilmiştir (Şekil 6.10).

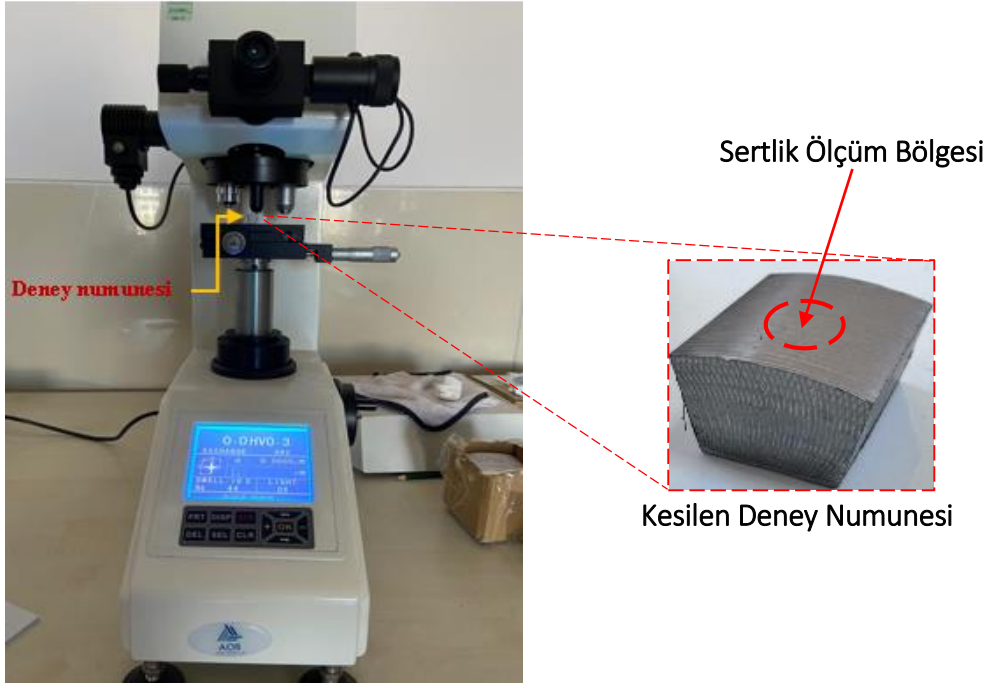


Şekil 6. 10. Ra ve Rz değerlerinin ölçüm bölge ve yüzeyleri

6.4.2. Mikrosertlik ölçümü

Deney numunelerin mikrosertlik ölçümleri için deney numunesi küp şeklinde kesilerek Şekil 6.11'de gösterildiği gibi hazır hale getirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi laboratuvarındaki AOB markalı vickers mikrosertlik cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm değerleri vickers sertlik ölçme yöntemine göre 50 gr yük altında ölçüm yapılmıştır. Ölçümler kesilen parça numunesinin yüzeyi üzerindeki farklı noktalardan 3 sertlik ölçümü alınarak kaydedilmiş ve her deney

numunesi için bulunan değerlerin aritmetik ortalama değerleri alınarak o deneyin mikrosertlik değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 6. 11. AOB marka mikrosertlik ölçme cihazı ve deney numunesi

6.5. SEM Görüntüleri

Mikrosertlik ölçümü için kesilen (Şekil 6.11) numuneler SEM görüntüleri için de kullanılmıştır. SEM görüntüleri bilyeli haddeme işlemi uygulanmış yüzeydeki kanal, çizik, karbür gibi yapıların ve yüzey morfolojisinin analizi için yapılmıştır. SEM görüntüleri Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarındaki SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6.12).



Şekil 6. 12. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar ve işleme parametreleri ve sonuçlara ait veriler detaylı olarak irdelenmiştir. Bilyeli haddeleme işlem parametrelerine bağlı ilerleme hızı, paso sayısı ve haddeleme kuvvetinin mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir.

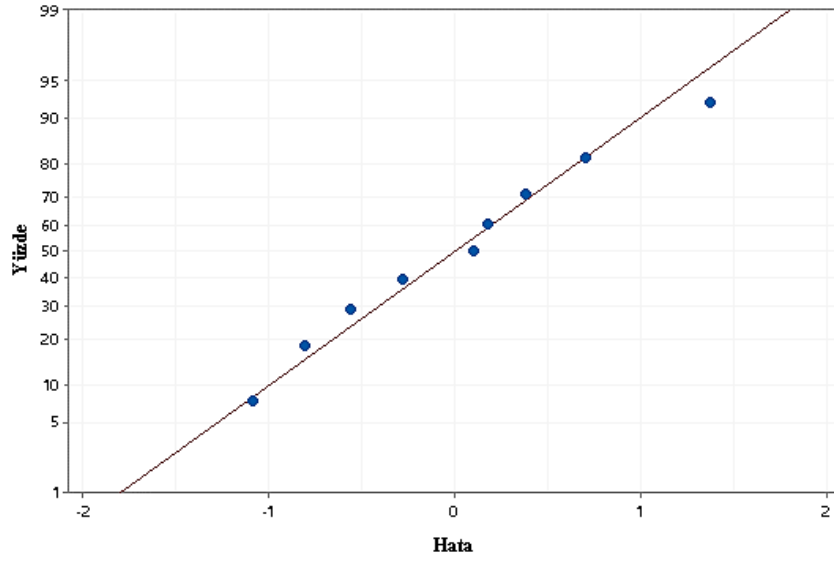
7.1. Ra ve Rz Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi

Taguchi L9 deney tasarımına göre bilyeli haddeleme uygulanmış deney parçaları yüzeyleri üzerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri ile bulunan sinyal gürültü (S/N) oranları Çizelge 7.1’te gösterilmektedir.

Çizelge 7. 1. Deney numuneleri ait Ra ve Rz yüzey pürüzlülük değerleri ve S/N oranları

Deney No	İlerleme (mm/ dev)	Paso Sayısı	Ra (m/μ)	Ra S/N	Rz (mμ)	Rz S/N
1	0,04	1	1,117	-1,4008	3,358	-10,521
2	0,04	2	1,620	-4,3655	4,581	-13,219
3	0,04	3	1,907	-5,4275	5,392	-14,635
4	0,08	1	1,737	-4,4543	4,654	-13,357
5	0,08	2	1,437	-5,023	4,573	-13,205
6	0,08	3	1,910	-5,9201	5,563	-14,906
7	0,12	1	1,990	-5,9771	5,628	-15,007
8	0,12	2	1,893	-5,543	5,488	-14,788
9	0,12	3	1,937	-6,0336	5,677	-15,082

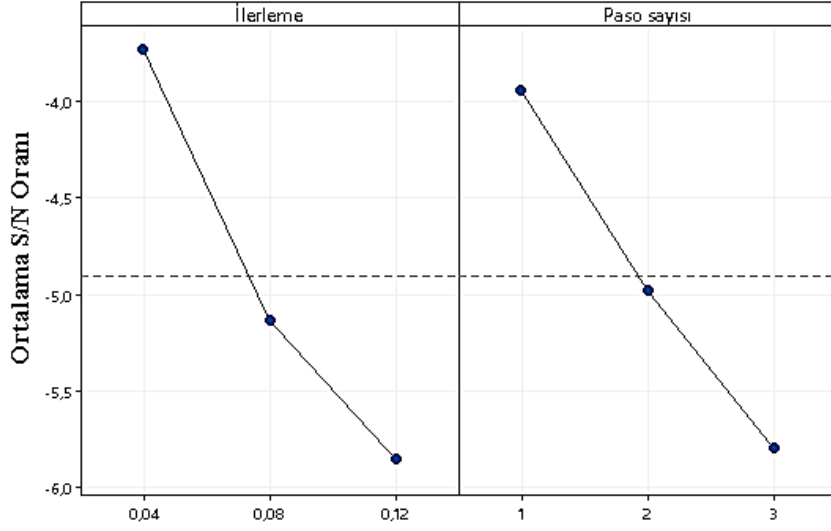
Elde edilen bu sonuçların öncelikle normal dağılım gösterdiklerinin kontrol edilmesi ve grup desenini bozan bir sonucunun varlığının olup olmadığını tespit edilmektedir. Bu maksatla normallik testi yapılmış ve Şekil 7.1’de verilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 7. 1. Bilyeli haddelemeki yüzey Ra değerleri dağılımı ve normallik testi

Şekil 7.1'deki yüzey pürüzlülük değerleri dağılımı incelendiği zaman, elde edilen sonuçların normal dağılım sergiledikleri görülmektedir. Dağılımın normal dağılım çizgisi üzerinde yoğunlaşması ve çizgiye yakın olması da değerlerin normal dağıldığını da ayrıca göstermektedir.

Bilyeli haddelemede diğer işlemlerde olduğu gibi parçalarda istenilen tolerans ve tamlığın elde edilebilmesi için yüzey kalitesinin en ideal seviyede olması gerekir. En iyi yüzey kalitesi, yüzey pürüzlülük değerinin en düşük olması ile elde edilebilmektedir. Yüzeylerdeki elde edilen Ra değerleri üzerinde her bir parametrenin etkisinin incelenmesi ve parametreler arasında en fazla etkiyi yapan parametrenin bulunması amacıyla ayrıca sinyal gürültü grafiği elde edilmiştir (Şekil 7.2). Bu analizde sinyal gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında “en küçük en iyi” referans alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.



En küçük en iyidir.

Şekil 7. 2. Sinyal gürültü tablosu

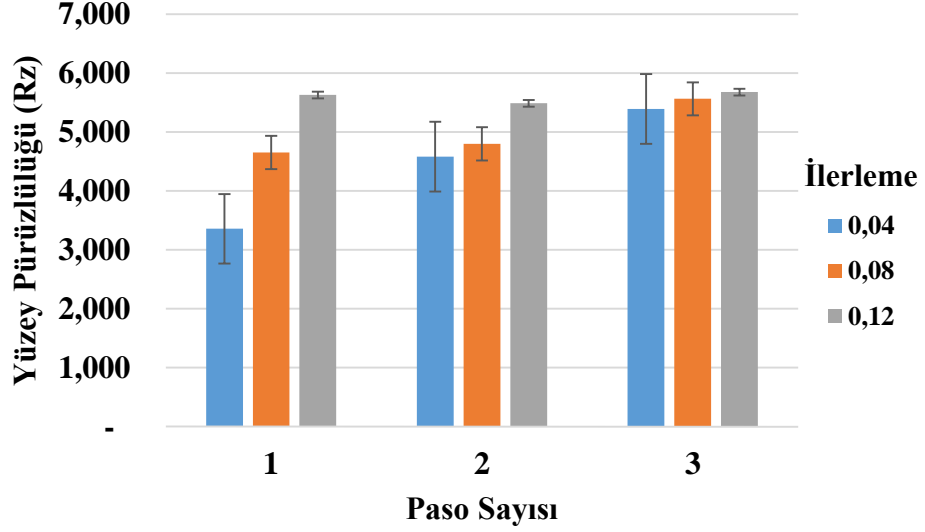
Ayrıca Ra ve Rz değerlerine göre üretilmiş sinyal/gürültü oranları ile ilgili yanıt tablosu da Çizelge 7.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.2. Ra ve Rz sinyal gürültü oranı yanıt tablosu

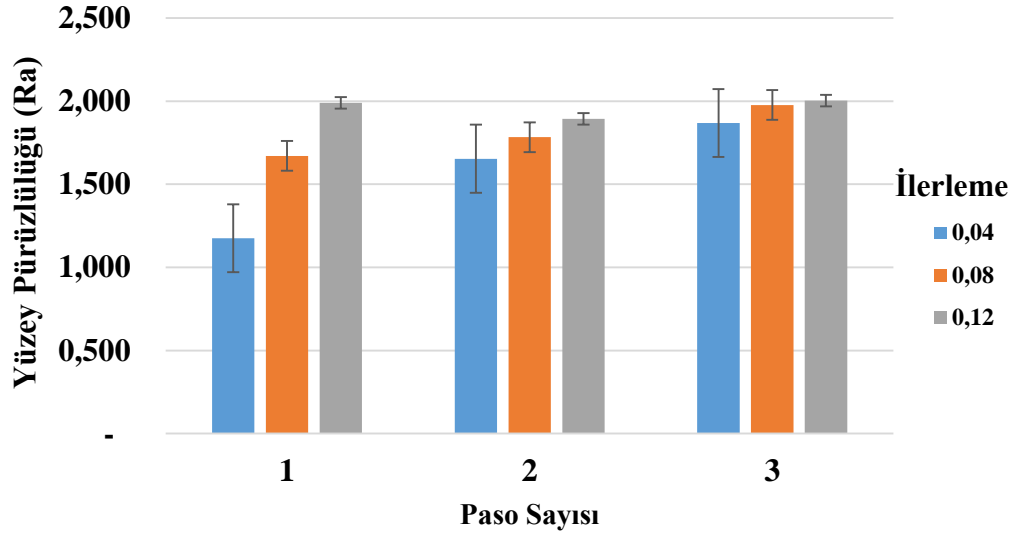
Seviye	Ra için		Rz için	
	İlerleme	Paso sayısı	Seviye	Paso sayısı
1	-3,731	-3,944	1	-12,79
2	-5,132	-4,977	2	-13,82
3	-5,851	-5,794	3	-14,96
Delta	2,120	1,850	Delta	2,17
Sıralama	1	2	Sıralama	1

Şekil 7.2'de sinyal gürültü grafiği ve Çizelge 7.2 beraber incelendiğinde Ra ve Rz üzerinde en ideal parametrelerin, paso sayısında 1 ve ilerleme değerinde 0,04 mm/dev olduğu görülmektedir. Ayrıca sinyal gürültü tablosundan ilerleme ve paso sayısı parametrelerinin her ikisinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir şekilde etkili olduğu da görülmektedir.

Bilyeli haddelenmiş yüzeyler üzerinden alınan Ra ve Rz değerlerine göre yüzey pürüzlülüğünün her paso sayısındaki ilerleme değerlerine göre etkisini gösteren grafik Şekil 7.3 ve 7.4'te gösterilmektedir.



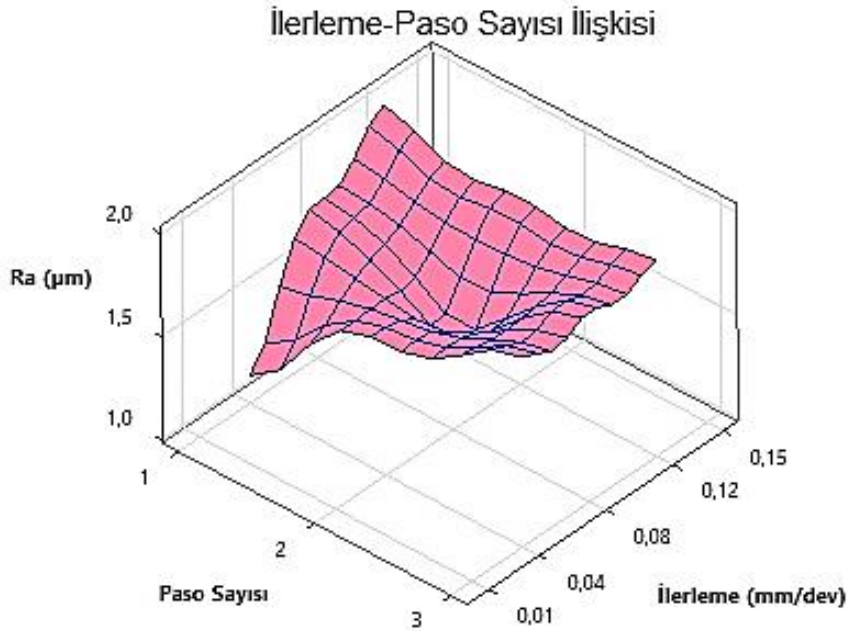
Şekil 7. 3. İlerleme ve paso sayısına göre Rz yüzey pürüzlülüklerin gösterimi.



Şekil 7. 4. İlerleme ve paso sayısına göre Ra yüzey pürüzlülük grafiği

Şekildeki 7.3 ve Şekil 7.4 grafiği beraber değerlendirildiğinde ilerleme değerinin artmasına paralel olarak paso sayısının 1, 2 ve 3 olması durumunun tamamında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı görülmektedir (Aydın vd. 2023). 1 paso ile bilyeli haddedeleme ilerleme arttıkça Ra değerlerinde belirgin bir fark görülmesine rağmen 2 paso ve 3 paso ile haddedeleme bu fark paso sayısının artması ile kapanmaktadır. Dolayısıyla burada yüksek paso sayısında ilerlemenin belirleyici rolünün daha da azaldığı şeklinde bir yargıya varılabilir. Genel bir kural olarak Ra değeri, ilerleme değerinin artışı ile orantılı

olarak artmaktadır (Sarhan vd. 2014; Luo vd. 2011; Başak, vd. 2009). Tüm paso sayılarında en düşük ilerlemede çok daha düşük Ra değerleri elde edilmektedir. İlerleme hızının 0,12 mm/dev olduğu durumda her paso sayısında ise yüzey pürüzlülük değerinde daha da arttığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak hadde kuvvetinin artmasıyla birlikte yüzey üzerinde deformasyonun arttığı ve bu deformasyon ile birlikte iş parçası üzerinde sıcaklık artışı ile mikroyapıda da farklı yapıların oluşması olarak söylenebilir (Maximov vd. 2020; Martins vd. 2022). Bu bulgular değerlendirildiğinde yüksek ilerleme hızı ve hadde kuvvetinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artmasına yönelik önceki çalışmalarda da benzer bulgular vardır (Sönmez vd. 2009). Sabit baskı kuvveti ile bilyeli haddelemede paso sayısının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalmanın olduğu, ilerleme hızının en düşük olduğu durumlarda daha iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir (Akyüz, 2020). Artan paso sayısına bağlı olarak ta yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir (Başak vd. 2015). Yapılan çalışmada da literatür bulguları ile paralel sonuçlara ulaşılmıştır. Bilyeli haddelemede, deneysel çalışmada seçilen parametrelerin (ilerleme hızı ve paso sayısı) ikili ilişkilerinin daha iyi anlaşılması için analiz yapılmış ve bunun sonucunda Şekil 7.5'teki grafik elde edilmiştir.



Şekil 7. 5. İlerleme ve paso sayısına göre Ra ikili ilişki grafiği

Şekil 7.5 incelendiğinde en iyi Ra değerlerinin düşük ilerleme ve düşük paso sayısında elde edildiği çok net bir şekilde görülmektedir. Yüksek ilerlemelerde paso

sayısının önemini yitirdiği ve yatay bir eğilimde benzer Ra değerleri ürettiği anlaşılmaktadır. Burada yüksek ilerlemelerde paso sayısının az olması işleme zamanı açısından daha verimli olacağı kanaatine varılabilir. Paso sayısının artırılmasının yüzey kalitesi bakımından çok fazla olumlu yönde fark oluşturmayacağı anlaşılmaktadır.

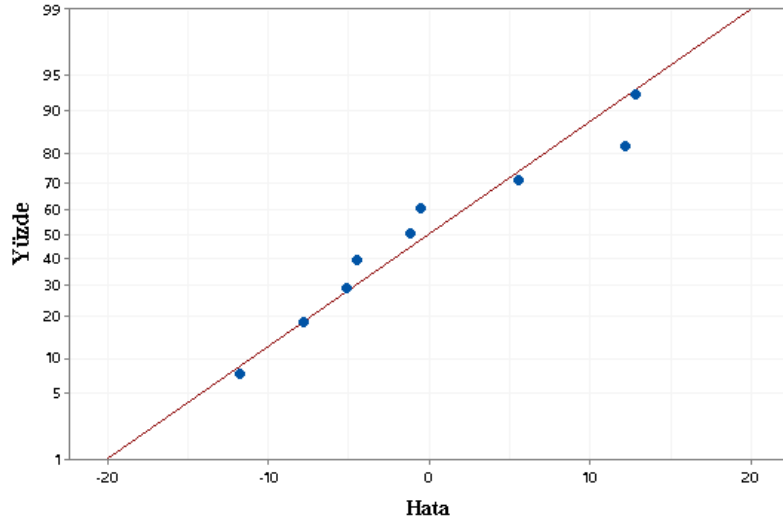
7.2. Mikrosertlik Analizi

Bilyeli haddeme yönüne paralel yönde ve haddelenmiş yüzey üzerinden 3 noktadan alınan, 143 N haddeme kuvveti ile 3 farklı ilerleme hızı ve 3 farklı paso sayısına göre haddelenen yüzeyden elde edilen mikrosertlik değerlerinin aritmetik ortalamaları Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7. 3. Mikrosertlik değerleri ve S/N (sinyal/gürültü) oranları

Deney No	İlerleme (mm/dev)	Paso Sayısı	Mikrosertlik Ortalama (HV _{0,5})	S/N
1	0,04	1	242,5	47,0475
2	0,04	2	251,4	48,0062
3	0,04	3	259,5	48,2827
4	0,08	1	221,5	46,9062
5	0,08	2	218,6	46,7917
6	0,08	3	251,4	48,0062
7	0,12	1	259,5	48,2827
8	0,12	2	263,2	47,6487
9	0,12	3	275,2	48,5215

Çizelge 7.3'teki elde edilen mikrosertlik değerlerinin istatistiksel analiz öncesi normal dağılım gösterip göstermediği analiz edilmiş ve Şekil 7.6'daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 7. 6. Bilyeli haddelemeki mikrosertlik değerleri dağılımı ve normallik testi

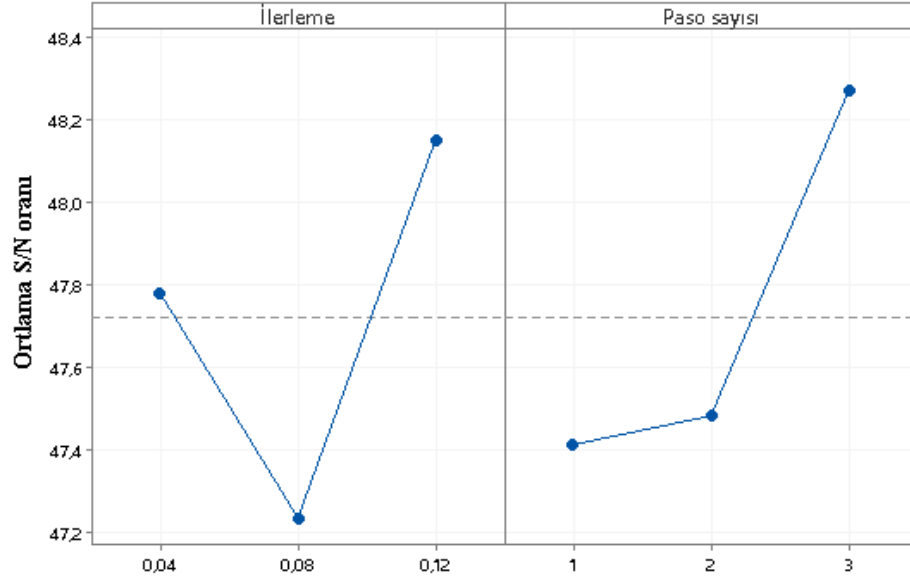
S/N oranlarına göre elde edilen artık (hata) değerlerinin normal dağılım grafiksel gösterimi Şekil 7.6’de görüldüğü gibidir. Şekil 7.6 dikkate alındığında elde edilen mikrosertlik değerlerinin lineer çizgi etrafında toplandığı ve çoğunlukla normal dağıldığı görülmektedir.

Çizelge 7.4’teki değerler Taguchi L9 tasarımına göre ve “En büyük en iyidir” kriterine göre değerlendirilmiş ve sinyal gürültü (S/N) oranları ile ilgili yanıt tablosu Çizelge 7.4’te verilmiştir.

Çizelge 7. 4. Mikrosertlik S/N oranları yanıt tablosu (En büyük en iyidir).

Seviye	İlerleme	Paso sayısı
1	47,78	47,41
2	47,23	47,48
3	48,15	48,27
Delta	0,92	0,86
Sıralama	1	2

Elde edilen mikrosertlik değerleri üzerinde işlem parametrelerinin sonuç üzerinde hangi seviyede etki yaptığını görmek için ise sinyal gürültü (S/N) analizi yapılmıştır. Sinyal gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında “en büyük en iyidir” temel kural referans alınmıştır. Bu analiz ile ilgili elde edilen grafik Şekil 7.7’de görülmektedir.

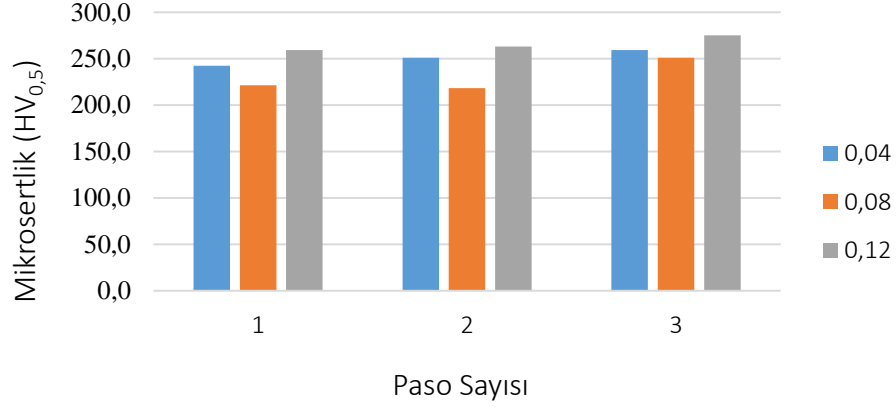


Sinyal-Gürültü Oranı: En büyük en iyidir

Şekil 7. 7. Mikrosertlik değerleri S/N (sinyal gürültü) tablosu.

Şekil 7.6 ve Şekil 7.7 birlikte değerlendirildiğinde Sinyal gürültü oranlarına göre en yüksek sertlik değerleri ilerleme değerinin 0,12 mm/dev ve paso sayısının 3 olduğu durumlarda elde edilmiştir. İlerleme değerlerinin düşük (0,04 mm/dev) ve yüksek (0,12 mm/dev) değerlerinde mikrosertlikte yüksek değerler elde edilmesine karşın orta değerde (0,08 mm/dev) düşük mikrosertlik değerleri elde edilmiştir. İlerleme değerlerinin düşük olması durumunda sürtünmenin artması ve böylece sıcaklık artışına da bağlı olarak pekleşme vb sert yapılar oluşma ihtimali mikrosertliği artırma eğilimini arttırmaktadır. Yüksek ilerlemelerde ise deformasyona uğrayan malzeme miktarı arttığından dolayı (Başak ve Sönmez, 2015) ve kalıntı gerilme artışına vb etkenlere bağlı olarak ta sertlik artışı yönünde bir eğilimin meydana geldiği söylenebilir. Benzer şekilde paso sayısının artması ile mikrosertlik değerlerinde bir artış meydana geldiği görülmektedir ve bu da literatürle uyumlu bir sonuçtur (Başak ve Sönmez, 2015). Şekil 7.7'den en ideal sertlik değerinin paso sayısının 3 olduğu durumda elde edildiği ve mikrosertlik üzerinde paso sayısının 3 ve ilerleme hızının ise 0,04 ve 0,12 mm/dev olduğu durumlarda anlamlı bir etkinin olduğu da anlaşılmaktadır.

İşleme parametreleri ile mikrosertlik sonuçları arasındaki değişimi görmek için yapılan analizler sonrası şekil 7.8'deki grafikler elde edilmiştir.

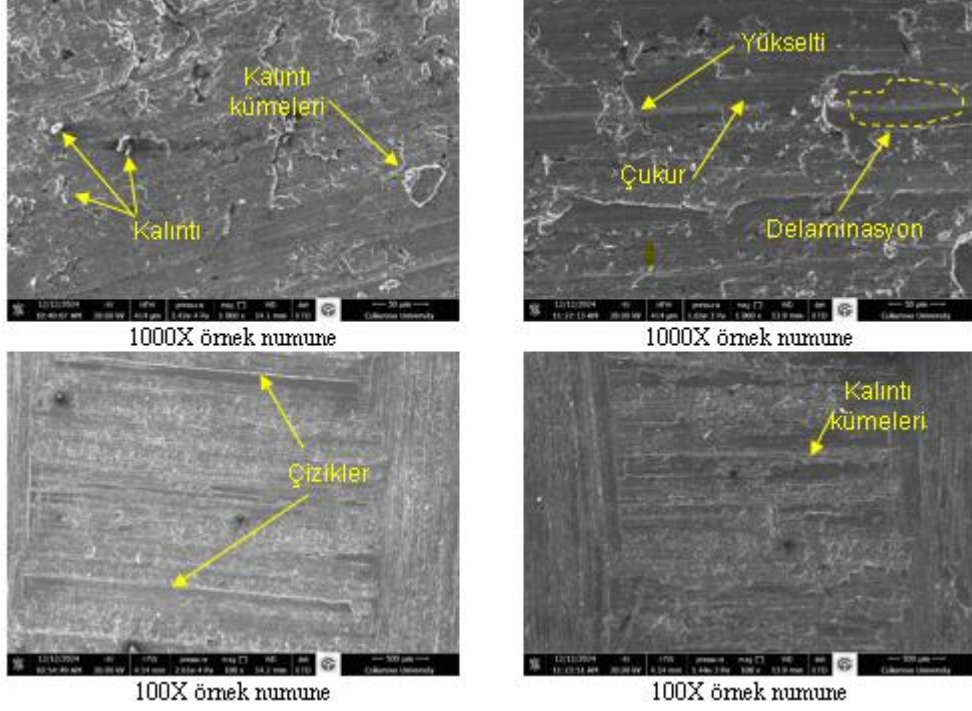


Şekil 7. 8. İlerleme ve paso sayısına göre mikrosertlik grafiği

Şekil 7.8 incelendiğinde paso sayısı artışında 1 ve 2 paso sayısına göre mikrosertlik değerlerinde bir artış meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca ilerleme değeri 0,08 mm/dev ara değerde tüm paso sayılarında en düşük mikrosertlik değerleri elde edilmektedir. Burada ayrıca mikrosertlik değerlerindeki değişim daha yatay düzeyde oluşmaktadır. Paso sayısı artışı ile her ilerleme değerinin kendi kategorisi içerisinde mikrosertliğin artmakta olduğu görülmektedir. Bilyeli haddeme veya derin haddeme çalışmaları incelendiğinde paso sayısı ve haddeme kuvvetinin etkisinin özellikle mikrosertlik üzerinde sınırları ve etkilerinin kesin sınırlarla çizilemediği görülmektedir. Cagan ve arkadaşları magnezyum için, haddeme ve ilerleme arasında iyi bir dengenin iyi bir Ra ve mikrosertlik için ideal olduğunu belirtmektedirler (Çagan vd. 2020). Bunun nedeninin mikrosertlik değerinin birçok parametrenin bileşiminin bir sonucu olmasından ve bu parametrelerin kontrolünün zor olması nedeniyle kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada da mikrosertlik anlamında çok kesin hatlarla sebep sonuç ilişkisi üretmek zorlaşmaktadır. Ancak kesin olarak paso sayısı artışı ile mikrosertlik değerinin arttığı söylenebilir.

7.3. SEM Analizleri

Kaba tormalama, finiş tormalama ve bilyeli haddeme sonrası elde edilen yüzeylerin 1000 ve 100 büyütme ile SEM fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 9a, b, c, d, e, f). SEM fotoğrafları elde edilen yüzeyleri ve işlemin etki alanını gösteren yüzeylerin örnek görüntüleri görülmektedir (Şekil 7.9).



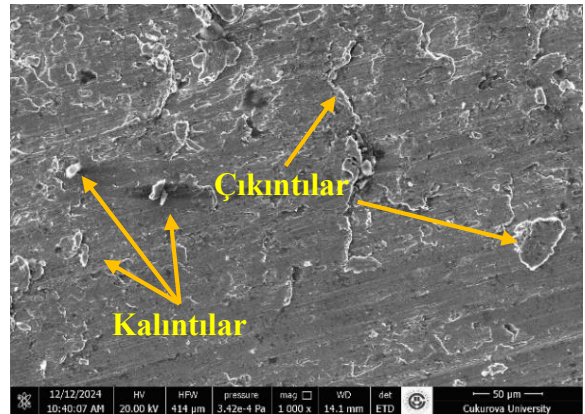
Şekil 7. 9. Örnek SEM görüntüleri

Şekil 7.9'daki görüntüler incelendiğinde bilyeli haddelemede yapılan diğer çalışmalara benzer şekilde yüzey üzerinde kalıntı kümelerinin, yükseltilerin, çiziklerin (scratches), oyukların, kalıntıların (debris) ve kanallar (grooves) gibi birçok unsurun bulunduğu görülmektedir. İşlem parametrelerine göre bu yapılar hem yüzey pürüzlülüğüne hem de mikrosertliğe etki etmektedirler.

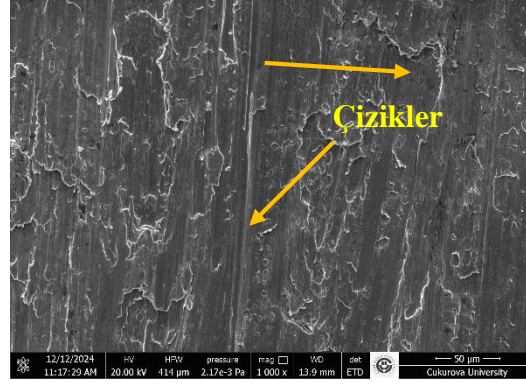
Elde edilen SEM görüntülerinden farklı ilerleme oranlarındaki görüntülerin yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde Şekil 7.10 ve 7.11'deki yapılar görülmektedir.



a) 143 N, 0,04 mm/dev ve 2 paso

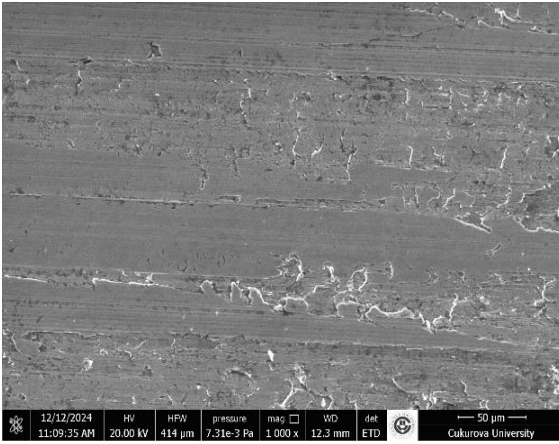


b) 143 N, 0,08 mm/dev ve 2 paso

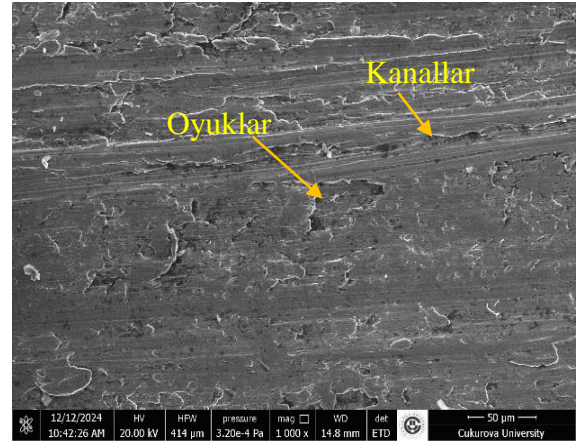


c) 143 N, **0,12 mm/dev** ve 2 paso

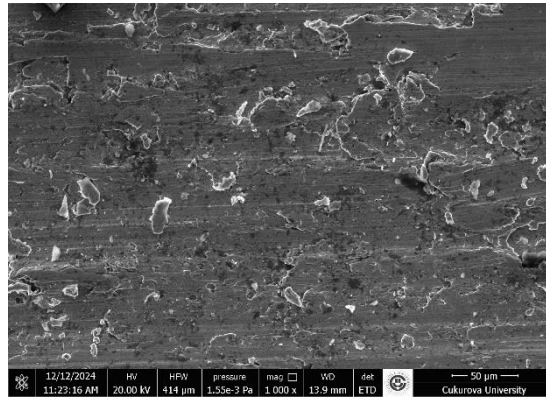
Şekil 7. 10. İlerleme hızı değişimin yüzey üzerindeki etkisi (2 paso)



a) 143 N, **0,04 mm/dev** ve 3 paso



b) 143 N, **0,08 mm/dev** ve 3 paso



c) 143 N, **0,12 mm/dev** ve 3 paso

Şekil 7. 11. İlerleme hızı değişimin yüzey üzerindeki etkisi (3 paso)

Şekil 7.10 ve 7.11 birlikte değerlendirildiğinde hem 2 pasodaki hem de 3 pasodaki ilerleme hızı artışlarında yüzeyin durumunun kötüleştiği görülmektedir. Şekil 7.10'da

ilerleme artışına bağlı kalıntı ve topaklanmanın, yüzey üzerindeki çizik, kanal vb. unsurların arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Yüzey üzerindeki ilerlemeye bağlı farklılıkların yani yüzey bozulmalarının veya diğer tabirle kalıntı vb diğer unsurların artmasının 3 pasolu operasyonlarda daha da belirgin bir farklılıkla görüldüğü de ayrıca görülmektedir (Şekil 7.11). 3 pasolu operasyonlarda (Şekil 7.11) ilerleme değerinin 0,04 mm/dev olduğu durum ile 0,12 mm/dev olduğu durum arasındaki yüzey bozulması çok daha belirgin bir farkla kendini göstermektedir.

Paso sayısı artışının etkisine bakıldığında, 2 pasodan 3 pasoya geçişte de (Şekil 7.10 a ve 7.11 a), (Şekil 7.10.b ve 7.11 b) (Şekil 7.10 c ve 7.11 c) çok fazla fark olmamasına rağmen yine de bir miktar yüzeylerde bozulmaların meydana geldiği görülmektedir. Paso sayısı arttığında da yüzeylerde bozulmaların arttığı bu görüntülerden de anlaşılmaktadır.

İlerlemenin 0,12 mm/dev olduğu durumlarda en kötü yüzey yapısının görüldüğü Şekil 7.10 c ve 7.11 c'den anlaşılmaktadır. En iyi yüzey yapıları ise en düşük ilerlemelerde kaydedilmiştir (Şekil 7.10 a ve 7.11 a).

Mikrosertlik değerlerinde paso sayıları ve ilerleme artışları arasında bariz bir farklılığın olmadığı (Çizelge 7.3 ve Şekil 7.8), bu farkın daha yatay bir eğilimde olduğu dikkate alındığında, işleme zamanı anlamında çok büyük bir gereklilik olmadığı, tasarımı yapılan bilyeli haddeleme aparatı ile bilyeli haddeleme işlemi, ilerleme değerinin 0,04 mm/dev olduğu durumlarda yapılmalıdır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Yapılan bu deneysel çalışmanın temel amacı tasarlanan ve üretilen bilyeli haddeleme aparatının bilyeli haddeleme işleminde kullanılabilirliğini araştırmak ve bu aparat ile AISI 1050 çelik malzemeye yapılan bilyeli haddeleme işleminin sonuçlarını incelemektir.

Bilyeli haddeleme yönteminde farklı parametreler kullanılarak sabit hadde kuvveti, ilerleme hızı ve paso sayısının AISI 1050 çelik malzeme üzerindeki, mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçları ve incelenen sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır.

- Tasarımı yapılan bilyeli haddeleme aparatının bilyeli haddeleme için uygun olduğu görülmüştür.
- İlerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili olduğu parametre olduğu görülmüştür.
- 0.04 mm/dev ilerleme değerinde en iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmekle birlikte ilerleme artışı ile Ra değerlerinde yükselme görülmüştür.
- Paso sayısına bağlı olarak, paso sayısı artışı ile Ra değerinde yükselme kaydedilmiştir.
- İlerleme değerinin düşük ve yüksek değerlerinde mikrosertlik değerinde artma görülmüş, orta ilerleme değeri olan 0,08 mm/dev ilerlemede ise daha düşük mikrosertlik değerleri elde edilmiştir.
- Paso sayısının artması ile lineer olarak mikrosertlik değerlerinin arttığı görülmüştür.
- Mikrosertlik anlamında en ideal parametrenin ilerleme değerlerinde 0,04 ve 0,12 mm/dev ve paso sayısının 3 olduğu durum kaydedilmiştir. Ra anlamında ise en ideal parametreler 0,04 mm/dev ilerleme değeri ve paso sayısının 1 olduğu durumlarda gerçekleşmiştir.
- Parametrelerin Ra üzerindeki etkisi ve sonuçların farkları arasında daha keskin sonuçlar üretmesine karşılık, mikrosertlik üzerinde daha yatay bir eğilimle fark ürettiği görülmüştür.

8.2. Öneriler

- Yeni haddeleme aparatının bilyeli haddeleme yönteminde kullanılan parametrelerin yorulma ve aşınma direncine olan etkileri ile ilgili çalışmaların yapılması önerilmektedir.
- Yeni haddeleme aparatı ile bu çalışmada AISI 1050 çeliği bilyeli haddeleme işlemi uygulanmıştır. Daha farklı malzemelerle aynı işlem tekrar yapılarak sonuçları araştırılmalıdır.
- Bu çalışmada sadece düz yüzeyler haddelenmiştir. Farklı konik açılı, iç ve dış radüslü ve belirli kontüre sahip profiller de haddelenerek yeni haddeleme aparatının işlevselliği ve sonuçları denenmelidir.
- Bu çalışmada ezici uç olarak çelik bilye kullanılmıştır. Farklı malzemeden bilyeler (elmas, CBN, seramik vb) kullanılabilir.
- Haddeleme işlemi bilyeli küresel ezici uç ile farklı parametreler kullanılarak (devir sayısı, haddeleme kuvveti, ilerleme miktarı ve paso sayısı gibi) aynı malzeme ya da farklı malzeme üzerindeki mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılarak çıkan sonuçlar ile karşılaştırılması ile ilgili geniş çaplı çalışmalar yapılabilir.
- Çalışma kalıntı gerilme, mikroyapı incelemesi, titreşim, sıcaklık vb gibi sonuçlara etkisi konularında da genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- Adıyaman, O., Aydın, F., Kılıç, M., (2023). Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme yöntemleri. Mühendislik Bilimleri Sorunlar, Fırsatlar ve Araştırmalar, *Livre De Lyon*, 158-175.
- Akça, H. (2019). *3D yazıcı ile kemik tozundan biy.-uyumlu implant üretimi ve performansının incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Akkurt, A. ve Ovalı, İ. (2009). Ezme ve geleneksel bitirme işlemlerinin al 6061 alüminyum alaşımı parçaların yüzey pürüzlülüğü ve daireselliği üzerine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3), 371-382.
- Akkurt, S. (1990). Poliasetalin kuru ve su ile yağlama koşullarında sürtünme katsayısı ve aşınma bakımından incelenmesi. 4. *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, OTDÜ*, Ankara, 585–594.
- Akyüz, M. (2020). *Bilyeli haddeleme yönteminde işlem parametrelerinin aa7075-t6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması*. [Yüksek Lisans Tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Alkan, Z., Varol, R., & Selver, R. (2016). Bilyeli dövme uygulanmış AA1050 alüminyum malzemenin metalografik incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(3), 524-529.
- Avcu, Y. Y., Gönül, B., Yetik, O., Sönmez, F., Cengiz, A., Guney, M., & Avcu, E. (2021). *Modification of surface and subsurface properties of AA1050 alloy by shot peening*. *Materials*, 14(21), 6575.
- Avcu, Y. Y., Iakovakis, E., Guney, M., Çalım, E., Özkılınç, A., Abakay, E., & Avcu, E. (2023). *Surface and tribological properties of powder metallurgical Cp-Ti titanium alloy modified by shot peening*. *Coatings*, 13(1), 89.
- Avilés, R., Albizuri, J., Rodríguez, A., & De Lacalle, L. L. (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.
- Axir, MH. El. (2003). Çeşitli malzemeler için ortogonal parlatma parametrelerinin yüzey özelliklerine etkisi. *Malzeme işleme teknolojileri dergisi*, 82-89.
- Aydın, F., Adıyaman, O. (2022). Yeni Tip İnsert Uç ile AL 6061 Malzemeye Bilyeli Parlatma Yöntemi Uygulaması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. *Bilimsel Araştırma Projeleri*, 58-72.
- Basak H. ve Goktas H. H. (2009). Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic, *Materials and Design*, 30, 1275–1281.

- Basak, H., & Goktas, H. H. (2009). Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic. *Materials & Design*, 30(4), 1275-1281.
- Başak, H. (2015). *Haddeleme (Galetaj) ile 5083 al-mg malzeme yüzeyinin işlenmesi, haddeleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimler Dergisi, Ankara. 3(2):471-476.
- Başak, H. ve Sönmez, F. (2015). Haddeleme işleminde haddeleme aparat tipinin (bilyeli, makaralı, çift makaralı) yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 18 (3), 125-132.
- Başak, H. ve Yücel, M. (2015). Haddeleme İşleminin Silindirik Parçalarda Uygulaması Deney Sonuçlarının Yapay sinir Ağları İle Modellenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik dergisi*, 111-120.
- Bayındır, M. K. (2009). *Katı parçacık erozyon aşınmasının alüminyum alaşımları üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Entitüsü, Konya.
- Bozdana A. T. ve Gindy N. N. Z. (2008). Comparative experimental study on effects of conventional and ultrasonic deep cold rolling processes on Ti–6Al–4V. *Materials Science and Technology*, 24(11), 1378-1384. Doi: 10.1179/174328408X302431.
- Buldum, B. B. (2018). Investigation of surface roughness and microhardness in ball burnishing process of AZ31B magnesium alloy. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 152-161.
- Cagan, S. C., Pruncu, C. I., & Buldum, B. B. (2020). An investigation into ball burnishing process of magnesium alloy on CNC lathe using different environments. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(4), 1061-1070. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.06.008>
- Chen, M., He, J., Wang, M., Li, J., Xing, S., Gui, K. ve Liu, Q. (2022). Effects of deep cold rolling on the evolution of microstructure, microtexture, and mechanical properties of 2507 duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 845, 143224.
- Cherif, A., Pyoun, Y., & Scholtes, B. (2010). Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) on residual stress state and fatigue strength of AISI 304. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19, 282-286.
- Cöcen, Ü., Belevi, M., & Önel, K. (1997). Tane Silisyum Karbür Katkılı Alüminyum Bazlı Kompozitlerin Aşınma Davranışı, 7. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, DE Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 155-187.
- Çelik, M. (2023). Ezerek Parlatma Yönteminin Inconel 718 Alaşımının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 333-342.

- Çetin, Ö., Ballıkaya, H., Altuğ, M., Savaş, V. ve Sağlam, M. (2018). Investigation of the effects of processing parameters on the vibration of tangential cylindrical grinding method. *Science and Eng. J of Firat Univ.*, 30(1), 311-317.
- Çorak, S., 2018, *Bilyeli parlatma (ball burnishing) yüzey işlemleri yapılmış AISI 1045 çeliğinin korozyonlu yorulma davranışı üzerine akımsız nikel-boron (Ni-B) kaplamasının etkisi*. [Yüksek Lisans tezi]. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Demir, K. (2002). *Yüzey pürüzlülüğü ve pürüzlülüğün ölçülmesi*. [Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi, 26, 40-44.
- Dülek, E., Karataş, Ç., & Sarıtaş, S. (2003). Bilyeli dövülmüş Ç1020 malzemede kalıcı gerilmenin katman kaldırma yöntemi ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3).
- El-Axir, M. H. (2000). An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(11), 1603-1617.
- Enes Çelik (2024, Eylül 9). Çeliğin özellikleri. <https://www.uslularhadde.com>
- Gürleyik, M. Y. (1986). Makine mühendisliğinde aşınma olayları. *Mühendis ve Makine*, 27(323), 3-14.
- Hassan A.M. (1997). An Investigation into the surface characteristics of burnished cast Al-Cu Alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(6), 813-821.
- Hassan, A. M., & Sulieman, Z. S. (1999). Bilyeli parlatma işlemiyle pirinç bileşenlerin aşınma direncinin iyileştirilmesi. *Malzeme İşleme Teknolojisi Dergisi*, 73-80.
- Herbster, M., Harnisch, K., Haberland, E., Kriegel, P., Döbberthin, C., Heyn, A. ve Halle, T. (2021). Endoprotezlerin aşınma direncini artırmak için derin haddelenen CoCr28Mo6 dövme alaşımının yüzey altı koşullarına etkisi. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*; 118, 104398, doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104398., 118.
- Huang, J., Zhang, K. M., Jia, Y. F., Zhang, C. C., Zhang, X. C., Ma, X. F. ve Tu, S. T. (2019). Effect of thermal annealing on the microstructure, mechanical properties and residual stress relaxation of pure titanium after deep rolling treatment. *Journal of materials science & technology*, 35(3), 409-417.
- Hutchings, I. M., & Shipway, P. (1992). Tribology: Friction and Erosion of Engineering Materials. *Edward Arnold, London*, 137.
- Karamış, M. B. (1986). Traktör hızı ve pulluk çalışma derinliğinin uç demiri aşınma hızına etkileri ve optimizasyonu. *Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, OTDÜ*, Gaziantep, 668-677.
- Kiliç, M., Batı S., Biliz, I., Demir, F., & Ceyhan, A. A. (2020). SHS yöntemiyle üretilen cr takviyeli katmanlı NiAl-Ni3Al intermetalik bileşiğinin mikroyapı ve mikrosertlik

- özelliklerinin belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 862-874.
- Koç, R. (2010). Bilgisayar kontrollü aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı, 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi (TİMAK-2010)*, 11-12.
- Lacelle, A., Celaya, A., Lamikiz, J., Albizuri, A., Rodrigez-Ln. ve Lopez de. (2012). Derin bilyeli parlatma tekniği ile millerin yüzeylerinin iyileştirilmesi. *Yüzey ve Kaplama teknolojisi*, 2817-2824.
- Loh, N. H., Tam, S. C., & Miyazawa, S. (1989). A study of the effects of ballburnishing parameters on surface roughness using factorial design. *Journal of Mechanical Working Technology*, 18(1), 53-61.
- Luca, L. (2002). Sertleştirilmiş Çelik Bileşenlerin Bitirme İşlemi Olarak Bilyalı Parlatma İşleminin Kullanımına Yönelik Araştırmalar. *Toledo Üniveritesi*.
- Luo H., Wang L., & Zhang C. (2011). Study on the aluminum alloy burnishing processing and the existence of the outstripping phenomenon. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1), 88-90. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00847-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00847-0)
- Luo, H. L. (2006). Parlatma parametrelerinin parlatma kuvveti ve yüzey mikrosertliğine etkisi. *Uluslararası ileri üretim teknolojisi*, 707-713.
- Maiß, O., & Röttger, K. (2022). Çeşitli Derin Haddeme İşlemleri için Yüzey Kalitesinin İzlenmesi – Limitler ve Deneysel Sonuçlar. *Procedia CIRP*, 857-862.
- Malyer, E. (2018). Ezerek parlatma yapılan AA7075-T6 alüminyum alaşımında meydana gelen kalıntı gerilmelerin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 21(3), 565-573. Doi: 10.2339/politeknik.389592.
- Martins, A. M., Leal, C. A., Campidelli, A. F., Abrao, A. M., Rodrigues, P. C., Magalhães, F. C., & Meyer, K. (2022). Assessment of the temperature distribution in deep rolling of hardened AISI 4140 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 686-694. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.052>
- Maximov, J. T., Duncheva, G. V., Anchev, A. P., & Dunchev, V. P. (2020). Slide burnishing versus deep rolling-a comparative analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(7), 1923-1939. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05950-2>
- Meletlioğlu, E. (2014). Ti-6Al-4V implant malzemesinin yorulma ve fretting yorulması davranışı üzerine ball burnishing mekanik yüzey işleminin etkisi. (*Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü*).
- Mendi, F. (1996). Takım tezgahları teori ve hesapları, ISBN:975-06008-0-3, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 5-40.

- Neşeli, S., & Yıldız, S. (2006). *Tornalamada takım geometrisi ve tırlama titreşimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya. 49-53.
- Odabaş, D. (1991). *Kuru sürtünme şartlarında termomekanik faktörlerin AISI 3315 çeliğinin aşınma davranışına olan etkilerin teorik ve deneysel araştırılması*. [Doktora Tezi]. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri. 58-76.
- Onaran, K. 1985. Malzeme Bilgisi, s. 87-95, Çağlayan Basımevi, İstanbul.
- Öcalır, Ş. (2009). *Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyum alaşımı birleştirmelerde optimum parametrelerin belirlenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Özkan, S. (2006). *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalarda haddeleme (burnishing) ile yüzeylerin işlenmesi, haddelemenin yüzey pürüzlülüğüne ve sertleşmeye etkisinin*. [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özyaman, M. (2017). *Bilyeleme yöntemiyle şekillendirilmiş çelik boruların aşınma davranışları ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- PPortakal, A. (1974). Kaymalı düz yataklarda yüzey pürüzlülüğü ve aşınma hızı. *Mühendis ve Makine*, 19, 400-408.
- Prabhu, P. R., Kulkarni, S. M., & Sharma, S. S. (2011). An experimental investigation on the effect of deep cold rolling parameters on surface roughness and hardness of AISI 4140 steel. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60, 1594-1598.
- Ramesh, S., Anne, G., Bhat, N., Aithal, G., Nayaka, H. S., & Arya, S. (2021). Surface modification of multi-directional forged biodegradable Mg-Zn alloy by ball burnishing process: Modeling and analysis using deep neural network. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 423-434.
- Rodríguez, A., De Lacalle, L. L., Celaya, A., Lamikiz, A., & Albizuri, J. (2012). Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*, 206(11-12), 2817-2824.
- Ryan, J. (2024, 8 Eylül). *Surface Prep: Eliminating Chances for Concrete Failure*. Youtube. <https://www.concretedecor.net/departments/surface-preparation/surface-prep-eliminating-chances-for-concrete-failure/>
- S Sarhan, A. A., & El-Tayeb, N. S. M. (2014). Investigating the surface quality of the burnished brass C3605—fuzzy rule-based approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71, 1143-1150. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5543-3>

- Sağbaşı, A. (2011). Bilyeli parlatma prosesinde yüzey pürüzlülüğünün tepki yüzey metodolojisi ve arzu edilebilirlik fonksiyonu kullanılarak analizi ve optimizasyonu. *Mühendislik Yazılımındaki Gelişmeler*, 992-998.
- Scarr, A.J.T. (1991). Metrology and precision engineering. *Mc.Graw-Hill Publishing Company Limited*, New York, 24-28.
- Schulze, V. (2004). Modern Mechanical Surface Treatments. 1st edition, Wiley Wch, 368.
- SKUV - Roller Burnishing Tool (2024, 18 Eylül). *Single Roll Burnishing Roboto*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=wV6S8eIpdqk>
- Soyama, H., Odhiambo, D., & Saito, K. (2003). Cavitation shotless peening for improvement of fatigue strength. *Shot Peening*, 435-440.
- Sönmez, F., Başak, H., & Baday, Ş. (2016). Haddeleme işleminin yüzey yanıt yöntemi ile analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 4(4), 275-283.
- Tekin, E. (1986). Madencilikte Kullanılan Aşınma Dayanımlı Demir Alaşımları. *2 Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ*, Ankara, 401-409.
- Vukelic, D., Miljanić, D., Randjelović, S., Budak, I., Dzunic, D., Erić, M., & Pantić, M. (2013). Burnishing process based on the optimal depth of workpiece penetration. *Materials and technology*.
- Wandra, R., Prakash, C., & Singh, S. (2022). Experimental investigation and optimization of surface roughness of β -Phase titanium alloy by ball burnishing assisted electrical discharge cladding for implant applications. *Materials Today: Proceedings*, 48, 975-980.
- Yalçınkaya, A. (2019). *Bilyalı dövme prosesi uygulanan tank palet pimlerinin yorulma analizi* (Master's thesis, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü).
- Yen, Y. C., Sartkulvanich, P., & Altan, T. (2005). Finite element modeling of roller burnishing process. *CIRP annals*, 54(1), 237-240.
- Yıldız, T., & Gör, A. K. (2006). Aşınma Sistemleri. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 86-91., 86-91.
- Yılmaz, S. S., Ünlü, B. S., & Varol, R. (2008). Borlama ve bilyalı dövmenin demir esaslı T/M malzemelerde aşınma ve mikro yapı özelliklerine etkisi. *Celal Bayar University Journal of Science*, 4(1), 1-8.
- Yu, X., & Wang, L. (2012). Küresel yüzeyli polikristalin elmas takımlam parlatılmış bir alüminyum alaşımın yüzey pürüzlülüğü üzerinde çeşitli parametrelerin etkisi. *Uluslararası Makine aletleri ve üretim dergisi*, 459-469.
- Yurtoglu, H. (2005). Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Degiskenler İçin Türkiye Örneği. *Basılmamış DPT Uzmanlık Tezi*, Ankara.

Yüce Teknik, (2024, 8 Eylül). <https://www.yuceteknik.com/Mekanik-Kalip-Yaylari-Yesil-Yay,PR-1779.html>

Zhang-J. ve Lindemann. (2005). Bilyeli dövmenin yüksek mukavemetli dövme magnezyum alaşımı AZ80'in yüksek çevrim yorulma özelliklerine etkisi. *Scripta Materialia*, 485-490.

Zhu, Y. L., Wang, K., Li, L., & Huang, Y. L. (2009). Evaluation of an ultrasound-aided deep rolling process for anti-fatigue applications. *Journal of materials engineering and performance*, 18(8), 1036-1040. Doi:10.1007/s11665-008-9341-2.

Zum Gahr, K. H. (1987). *Microstructure and wear of materials* (Vol. 10). Elsevier