



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

YENİ TİP İNSERT UÇ İLE AL6061 MALZEMEYE BİLYELİ PARLATMA YÖNTEMİ
UYGULANMASI VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

FEYZA AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Malzeme ve İmalat Anabilim Dalı

Danışman
Dr.Öğr.Üyesi Oktay ADIYAMAN

Ağustos-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır.

TEZ KABUL VE ONAYI

Feyza Aydın tarafından hazırlanan “Yeni Tip İnsert Uç İle Al6061 Malzemeye Bilyeli Parlatma Yöntemi Uygulanması Ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 23/08/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Malzeme ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr.Çetin ÖZAY

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN

.....

Üye

Doç.Dr.Hüseyin GÜRBÜZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

*Bu tez çalışması Batman Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) tarafından BTÜBAP-2022-YL-05 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza
Feyza AYDIN
Tarih: 23/08/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİ TİP INSERT UÇ İLE AL6061 MALZEMEYE BİLYELİ PARLATMA YÖNTEMİ UYGULANMASI VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Feyza AYDIN

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Malzeme ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN

2023, 94 Sayfa

Jüri

**Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN
Prof. Dr. Çetin ÖZAY
Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ**

Derin haddeme, malzeme yüzeylerinin iyileştirilmesi için uygulanan ve yaygın olarak kullanılan bir yüzey düzeltme metodudur. Bu metot ile malzeme yüzeyindeki mekanik özellikler (sertleşme, aşınma direnci, yorulma) ve yüzey pürüzlülüğünde iyileşmeler meydana gelmektedir. Bu çalışmanın amacı, yeni tasarlanmış ve mevcut katerlere takılabilen bir ezici uç ile farklı tornalama işlemlerine sahip (boyuna, konik, radüslü) Al6061-T6 malzemenin derin haddelenmesi yoluyla kullanılabilirliğinin araştırılması ve deneysel olarak derin haddeme sonuçlarının incelenmesidir. Çalışmada, WNMG insert uç modeli baz alınarak küresel uca sahip ezici tip uç imal edilerek, farklı parametreler kullanılmış ve Al6061-T6 malzemeye derin haddeme işlemi uygulanmıştır. Derin haddeme işlemleri CNC torna tezgâhında yapılmış ve işlem parametreleri olarak 143N, 330N, 495N haddeme kuvveti, 0.04 mm/dev, 0.08 mm/dev ve 0.12 mm/dev ilerleme miktarı ile 400 dev/dak, 600 dev/dak ve 800 dev/dak devir sayısı belirlenmiştir. Tornalanan Al6061-T6 parçalardaki yüzey pürüzlülüğü incelenmiş, parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri analiz edilmiştir. Çalışma sonunda mevcut standart tornalama katerlerine uyumlu olarak tasarlanan küresel uçlu ezici ucun derin haddemede kullanılabilir olduğu, farklı tornalama kontürlerine sahip torna parçalarının derin haddelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği görülmüştür. Mikrosertlik sonucunda Ra üzerinde en ideal parametreler tespit edilmiştir. Optik mikroskopta yüzey görüntüleri alınmış ve ilerlemenin artışıyla yüzeyde bozulmaların meydana geldiği görülmüştür. SEM görüntülerinde ince taneli tabakaların varlığından söz edilebilir. EDX analizlerinde yüzey üzerinde en fazla değişimin %C oranında olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Al6061, Bilyeli haddeme, Derin haddeme, Triboloji, Yüzey pürüzlülüğü

ABSTRACT

MS THESIS

APPLICATION OF BALL POLISHING METHOD TO AL6061 MATERIAL WITH NEW DESIGNED INSERT TYPE AND INVESTIGATION OF SURFACE PROPERTIES

Feyza AYDIN

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MATERIAL AND MANUFACTURING ENGINEERING**

**Advisor: Asst. Prof. Oktay ADIYAMAN
2023, 94 Pages**

**Jury
Asst. Prof. Oktay ADIYAMAN
Prof. Dr. Çetin ÖZAY
Assoc. Prof. Hüseyin GÜRBÜZ**

Deep rolling is a widely used surface treatment method for improving material surfaces. With this method, the mechanical properties (hardening, wear resistance, fatigue) and surface roughness of the material surface are improved. The aim of this study is to investigate the usability of Al6061-T6 material with different turning processes (longitudinal, conical, radius) by deep rolling and to experimentally examine the results of deep rolling with a newly designed insert that can be fixed to used tool holders. In the study, based on the WNMG insert tip model, a spherical tip insert type was manufactured, different parameters were used and deep rolling process was applied to Al6061-T6 material. Deep rolling processes were performed on a CNC lathe and the process parameters were 143N, 330N, 495N rolling force, 0.04 mm/rev, 0.08 mm/rev and 0.12 mm/rev with feed rate of 400 rpm, 600 rpm and 800 rpm. spindle speeds has been determined. Surface roughness of turned Al6061-T6 parts were investigated and the effects of parameters on surface roughness were analyzed. At the end of the study, it was seen that the insert tip designed in accordance with the used turning tool holders can be used in deep rolling, and it improves the surface roughness in deep rolling of turning parts with different turning contours. As a result of microhardness, the most ideal parameters were determined on Ra. Surface images were taken under the optical microscope and it was observed that the surface deformations occurred with the increase of the advancement. The presence of fine-grained layers can be mentioned in SEM images. In EDX analysis, it was observed that the maximum change on the surface occurred at the rate of %C.

Keywords: Al6061, Ball burnishing, Deep rolling, Surface roughnes, Tribology

ÖNSÖZ

“Yeni tip insert uç ile Al6061 malzemeye bilyeli parlatma yöntemi uygulanması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi” başlıklı tez çalışması 9 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler; Giriş, Alüminyum, Bilyeli veya Derin Haddeme, Aşınma, Yüzey Pürüzlülüğü, Triboloji, Materyal ve Yöntem, Deneysel Sonuçlar ve Bulgular, Genel Sonuçlar ve Önerilerdir. Giriş bölümünde konunun önemine ve konu ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. 2.3.4.5 ve 6. bölümde alüminyum tanımı, sınıflandırılması, genel özellikleri, bilyeli veya derin haddeme, avantajları, dezavantajları ve parametreleri, aşınma tanımı ve türleri, yüzey pürüzlülüğü ve tribolojik sistem ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Materyal ve Yöntem bölümünde; deney malzemesi, tasarımı, parametrelerin belirlenmesi ve deneylerin analizi ele alınmıştır. Deneysel Sonuçlar ve Bulgular bölümünde; yüzey pürüzlülüğü, düz yüzey ve konik yüzey korelasyonu, mikrosertlik analizi, optik mikroskop görüntüleri, SEM görüntüleri ve EDX görüntüleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Yüksek lisans tezim boyunca çalışmamın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak tezime yön veren, tez çalışmamın numune temini konusunda yardımını esirgemeyen, atölye çalışmalarında her zaman yanımda olan değerli hocam ve danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN’a sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmada desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI’ya ve görüntü analizi ve malzeme konularındaki sorunlarım için yardımlarını ve tecrübelerini ileten Sayın Doç. Dr. Musa KILIÇ’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasındaki finansal desteğinden dolayı BAP Koordinatörlüğü ve yetkililerine teşekkür ederim.

Her şeyden öte hayatımın her safhasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta canım annem ve canım babam olmak üzere aileme, biricik abim Bilal AYDIN’a sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmam boyunca yardımlarıyla yanımda olan biricik ablam Yüksek Jeofizik Mühendisi Sevda AYDIN’a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Feyza AYDIN
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xii
1.GİRİŞ	1
1.1.Kaynak Araştırması.....	3
2. ALÜMİNYUM	10
2.1. Alüminyum Alaşımları.....	12
2.1.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	12
2.2. Al Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler	15
2.3. Havacılık Alanı ve Alüminyum Alaşımları	15
2.3.1. Mekanik yüzey işlemleri	17
2.3.1.1. Mekanik Özellikler	18
3. BİLYELİ ve DERİN HADDELEME.....	20
3.1. Bilyeli Haddeleme ve Derin Haddeleme.....	22
3.2. Bilyeli Haddeleme ve Derin Haddeleme Yönteminin Temel Parametreleri.....	27
3.2.1. İlerleme hızı.....	27
3.2.2. Haddeleme kuvveti (Baskı kuvveti)	28
3.2.3 Paso sayısı	28
3.3. Bilyeli ve Derin Haddeleme Yönteminin Avantajları.....	29
3.4. Bilyeli ve Derin Haddeleme Yönteminin Dezavantajları	30
4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ.....	31
4.1. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler	33
4.2. Yüzey Kalitesinin Sayısal Olarak Değerlendirilmesi	33
4.2.1. Ortalama çizgi (M) sistemi.....	33
4.2.2. Zarf sistemi (E).....	34
5. TRİBOLOJİ	36
5.1. Tribolojik sistem	36
5.2. Aşınma	38
5.2.1. Aşınma türleri.....	39
5.2.1.1. Adhesif Aşınma	39
5.2.1.2. Abrasif Aşınma	40
5.2.1.3. TabakaAşınması.....	41
5.2.1.4. Koroziif Aşınma	41
5.2.1.5. Yorulma aşınması.....	42
5.2.1.6. Erezyon Aşınması.....	42
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44

6.1. Deney Malzemesi ve Deneylerin Uygulanması	44
6.2. Ezici Uç Tasarımın Yapılması	45
6.3. Bağlama Aparatının Tasarımı ve Montajı	47
6.4. Deney Tasarımı ve İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi	49
6.5. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	49
6.6. Deneylerin Analizi	51
6.6.1. Ra ölçümleri	51
6.6.2. Mikrosertlik ölçümleri	52
6.6.3. Optik mikroskop görüntüleri	52
6.6.4. SEM görüntüleri	53
6.6.5. EDX görüntüleri	54
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR	55
7.1. Yüzey Pürüzlülüğü	55
7.1.1. Sabit çaptaki yüzey pürüzlülükleri	55
7.1.2. Konik yüzeydeki yüzey pürüzlülükleri	61
7.2. Mikrosertlik Analizi	69
7.3. Optik Mikroskop Görüntüleri	74
7.4. SEM Görüntüleri	76
7.5. EDX Görüntüleri	81
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
8.1. Sonuçlar	93
8.2. Öneriler	94
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	104

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Yıllık primer alüminyum üretiminin ülkelere göre dağılımı (Handbook, 1997).....	12
Şekil 2.2. Alaşım seçimini etkileyen temel unsurlar	16
Şekil 3.1. Çelik bir milin haddelenmesi (Anonim, 2019).....	21
Şekil 3.2. İç delik haddeleme (Anonim, 2013).....	22
Şekil 3.3. Bilyeli haddeleme işleminde takım ve numunenin hareket şekli (Aviles ve diğ., 2013)	23
Şekil 3.4. Ezici bilye ile yüzeyde plastik deformasyon oluşumu (Öcalır, 2009)	24
Şekil 3.5. Bilyeli haddeleme yönteminin şematik olarak gösterilmesi (Hassan,1997) ..	25
Şekil 3.6. Bilyeli haddeleme işlemi ve malzemede meydana gelen deformasyon (Akkurt ve Ovalı,2009)	26
Şekil 3.7. Paso sayıları ile yüzey düzeltme aşamaları (Hassan, 1997).....	28
Şekil 4.1. Yüzey Şekilleri (Anonymous, 2019).....	31
Şekil 4.2. Yüzeyin eş yükseklik eğrileri (Demir, 2002)	32
Şekil 4.3. Yüzey profil şekilleri (Demir, 2002).a) Gerçek profil b) Aperiodyodik profil..	32
Şekil 4.4. Ortalama çizgi konumunun belirlenmesi (Scarr, 1991; Anonim, 2017)	34
Şekil 4.5. Zarf eğrisinin elde edilişi (John ve Joseph, 2001).....	35
Şekil 5.1. Tribolojik sistemin şematik gösterimi (Onaran, 1985)	37
Şekil 5.2. Bir adhesif aşınma örneği.....	40
Şekil 5.3. Bir abrasif aşınma örneği	41
Şekil 5.4. Korozyon aşınma şeması (Koç, 2004)	42
Şekil 5.5. Erozyon aşınmanın şematik görünümü.....	43
Şekil 6.1. İşleme biçimi a) Numune teknik resmi b) Numune bitmiş hali c) Ham malzemenin malafaya alınması d) Derin haddeleme işleminin yapılması	45
Şekil 6.2. Standart kesici uçlar ve tutucu takımları a) Kesici uç b) Dış kater c) İç delik kateri.....	46
Şekil 6.3. Kullanılan kesici uç a) WNMG tasarımı b) İmal edilen uç c) Standart katere ucun bağlanması.....	46
Şekil 6.4. a) Tasarım yapılan kater tutucu aparatının CNC tezgâh taretine bağlantısı b) Kater tutucu aparatın demontaj hali c) Kater tutucu aparatı d) Malzemenin	

derin haddeleme öncesi durumu ve bağlantı şekli e) Tasarlanan katerin torna taretine montajı işlemin yapımı.....	48
Şekil 6.5. Deney numunesi a) Teknik resim b) Numune örneği	49
Şekil 6.6. Yay kataloğu sıkma değerleri ve elde edilen haddeleme baskı kuvvetleri (Yüce Teknik, 2023)	50
Şekil 6.7. Yüzey pürüzlülük cihazı ve özellikleri.....	51
Şekil 6.8. Ra değerlerinin ölçüm bölge ve yüzeyleri.....	52
Şekil 6.9. Optik mikroskop.....	53
Şekil 6.10. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)	53
Şekil 6.11. EDX analizlerinde numuneler üzerinden alınan genel ve noktasal bölgeler	54
Şekil 7.1. Düz yüzeydeki (silindirik yüzey) Ra değerleri dağılımı	55
Şekil 7.2. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 400 dev/dak devir sayısı b) 600 dev/dak devir sayısı c) 800 dev/dak devir sayısı	57
Şekil 7.3. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 0,04 mm/dev ilerleme sayısı b) 0,08 mm/dev ilerleme sayısı c) 0,12 mm/dev ilerleme sayısı.....	59
Şekil 7.4. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 143 N haddeleme kuvveti b) 330 N haddeleme kuvveti c) 495 N haddeleme kuvveti	60
Şekil 7.5. Sinyal-gürültü tablosu	61
Şekil 7.6. Konik yüzeydeki (silindirik yüzey) Ra değerleri dağılımı	62
Şekil 7.7. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 400 dev/dak devir sayısı b) 600 dev/dak devir sayısı c) 800 dev/dak devir sayısı	63
Şekil 7.8. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 0,04 mm/dev ilerleme sayısı b) 0,08 mm/dev ilerleme sayısı c) 0,12 mm/dev ilerleme sayısı.....	64
Şekil 7.9. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 143 N haddeleme kuvveti b) 330 N haddeleme kuvveti c) 495 N haddeleme kuvveti	66
Şekil 7.10. Sinyal-gürültü tablosu	67
Şekil 7.11. İlerleme ve haddeleme kuvvetine bağlı olarak elde edilen Ra değerleri a) Ra düz kısım b) Ra konik kısım	68
Şekil 7.12. Devir sayısı ve haddeleme kuvveti ile ilgili elde edilen Ra grafikleri a)Ra düz kısım b) Ra konik kısım	69
Şekil 7.13. Mikrosertlik normal dağılım grafiği.....	70
Şekil 7.14. Haddeleme öncesi ve sonrası sertlik değişimi grafiği	71
Şekil 7.15. Sinyal-gürültü tablosu	72
Şekil 7.16. İşleme parametreleri ile mikrosertlik arasındaki ilişki grafiği	73

Şekil 7.17. Derin haddeleme öncesi yüzey optik görüntüsü.....	74
Şekil 7.18. 143 N haddeleme kuvvetinde elde edilen optik fotoğraflar a) $R_a=0,543$ b) $R_a=0,85$ c) $R_a=0,92$	75
Şekil 7.19. Derin haddeleme uygulanmış finiş tornalama yüzey görüntüleri	77
Şekil 7.20. 143 N haddeleme kuvvetinde elde edilen SEM görüntüleri.....	78
Şekil 7.21. 330 N haddeleme kuvvetinde elde edilen SEM görüntüleri.....	79
Şekil 7.22. 495 N haddeleme kuvvetinde elde edilen SEM görüntüleri.....	80
Şekil 7.23. Finiş operasyonu uygulanmış derin haddeleme öncesi genel SEM görüntüsü ve EDX analizi	81
Şekil 7.24. Derin haddeleme uygulanmış derin haddeleme öncesi genel SEM görüntüsü ve EDX analizi (330 N, 0,04 mm/dev ve 400 dev/dak)	82
Şekil 7.25. Derin haddeleme uygulanmış derin haddeleme öncesi genel SEM görüntüsü ve EDX analizi (330 N, 0,12 mm/dev ve 400 dev/dak)	83
Şekil 7.26. %C oranı ile devir sayısı ilişki grafiği a) 143 N b) 330 N c) 495 N.....	86
Şekil 7.27. %C oranı ile ilerleme ilişki grafiği a) 143 N b) 330 N c) 495 N.....	88
Şekil 7.28. %C oranı ile haddeleme kuvveti ilişki grafiği a) 400 dev/dak b) 600 dev/dak c) 800 dev/dak	90
Şekil 7.29. Haddeleme kuvveti ile ilerleme ilişkisinin %C oranı ile etkileşimi.....	91
Şekil 7.30. Haddeleme kuvveti ile devir sayısı ilişkisinin %C oranı ile etkileşimi.....	92
Şekil 7.31. İlerleme ile devir sayısı ilişkisinin %C oranı ile etkileşimi.....	92

TABLÖLAR LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Önemli metallerin yer kabuğundaki oranı	10
Tablo 2.2. Alüminyum metalinin mekanik özellikleri (Weissbach, 2000; Roberts, 2000)	11
Tablo 2.3. Dövme alüminyum alaşım grupları (Smith, 2001)	13
Tablo 2.4. Döküm alüminyum alaşım grupları (Roberts, 2000)	13
Tablo 2.5. Alüminyum ve biçimlenebilen alüminyum alaşımlarının dört rakamlı malzeme numarası sistemi (Yüksel ve Meran, 2016)	15
Tablo 6.1. Al6061-T6 kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri	44
Tablo 6.2. Deney tasarımı ve işlem parametreleri	49
Tablo 6.3. Seçilen faktör ve bu faktörlere ait seviyeler	50
Tablo 7.1. Deney parametreleri faktör seviyeleri ve Ra değerleri	55
Tablo 7.2. Deney parametreleri faktör seviyeleri ve Ra değerleri	62
Tablo 7.3. Deney parametreleri faktör seviyeleri ve Ra değerleri	70
Tablo 7.4. Deneylere göre C (Karbür) miktarı oranları	84

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

Al	: Alüminyum
cm	: Santimetre
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
g	: Gram
Mg	: Magnezyum
MPa	: Megapascal
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
Zn	: Çinko
L	: Uzunluk
Mm	: Milimetre
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
C	: Karbür
µm	: Mikron
dev/dak	: Devir/Dakika
mm/dev	: Milimetre/Devir
N	: Newton

Kısaltmalar

SEM	: Taramalı elektron mikroskop
EDX	: Enerji dağılım X ışını spektrometresi
ANOVA	: Varyans Analiz
BUE	: Build-Up Edge
DO	: Demir olmayan metaller
YSA	: Yapay sinir ağları
CNC	: Bilgisayarlı sayısal denetimli tezgahlar

1.GİRİŞ

Malzemelerin işlenen yüzeylerinde oluşan olumsuzlukları düzeltmek için yüzeylere taşlama (Çetin ve ark., 2018), honlama, lepleme (Akyüz ve ark., 2020), ses titreşimleri ile derin haddeleme (Zhu, 2009; Bozdana, 2008) farklı yüzey kaynak yöntemleri (Kiliç ve ark., 2020) gibi birçok ikincil işlem uygulanmaktadır. Prabhu ve arkadaşları yüzeyin düzeltilmesi için uygulanan yöntemleri iki ana kategoriye ayırmıştır. Bunların ilki taşlama vb. yöntemler gibi malzeme kaybını içeren, ikincisi ise bilyeli haddeleme (ball burnishing) ve derin haddeleme (deep rolling) yöntemleri gibi malzeme üzerinde yeniden dağıtma ile yüzeyin plastik olarak sıkıştırılmasına bağlı olarak çalışan ve malzeme kaybı içermeyen yöntemlerdir (Prabhu ve ark., 2011).

İşlenmiş parçaların yüzeyleri üzerinden herhangi bir talaş kaldırmadan, yüzeylerin ezilmesi yöntemiyle düzeltilmesi işlemi, haddeleme olarak tanımlanmaktadır. Yapılan haddeleme işlemi sonrası iş parçalarının yüzey kalitesi (Ra vb.) iyileştirilmekte, bunun yanında iş parçalarına ait mekanik özellikler olan mikrosertlik, yorulma direnci, aşınma direnci gibi özellikleri de iyileştirilmektedir. Haddeleme işleminin bu iyileştirici rolü sayesinde bu yöntem, taşlama vb. gibi diğer yüzey iyileştirme yöntemlerine göre daha çok tercih edilmektedir (Başak ve ark., 2015).

Makine elemanlarının yüzeylerinin iyileştirilmesi amacıyla ezici bir uç veya makara vasıtasıyla talaş kaldırmadan yüzeylerin plastik deformasyonu esasına dayanan derin haddeleme tekniği çoğunlukla tormalanmış ve taşlanmış iş parçalarının iç ve dış yüzeylerine uygulanır (Mendi ve ark., 1996; Özkan ve ark., 2006). Yöntem düşük ve yüksek deformasyon olmak üzere yüzeye uygulanan gerilme şiddetine bağlı olarak iki şekilde tanımlanmaktadır. Sabit veya yuvarlanmalı olan ezme takımı için gerekli manyetik baskı, hidrolik baskı, yay baskısı kuvvetiyle yapılmaktadır. Genel olarak araç süspansiyon sistemleri, kalıp yüzeyleri, miller, yatak yüzeyleri, kaynaklı bağlantılar ve türbin kanatlarının bağlantı kısımları gibi parçalara düşük deformasyonla haddeleme işlemi uygulanmaktadır (Rodríguez ve ark., 2012). Geleneksel hassas taşlama, tormalama ve honlama tekniklerine kıyasla, haddeleme işlemi 15 kat daha ekonomik bir işlemdir (Luca ve ark., 2002). İşlem sonucunda, malzemenin yüzey pürüzlülüğü (Ra) önemli ölçüde azalırken yüzey sertliği de artmaktadır. Ayrıca işlem sonucunda, yüzeydeki çekme gerilmeleri basma gerilmelerine dönüştüğünden dolayı, yorulma ömrü yüksek oranda iyileşme göstermektedir (Akyüz ve ark., 2020). Derin haddeleme işlemi

elik malzemelere uygulandığı gibi diğer hafif metallere de (pirinç, Al vb) uygulanabilmektedir.

Endüstride elikten sonra ikinci sırayı alüminyum almaktadır (Smith ve ark., 2001). Bu nedenle derin ve bilyeli haddeleme ile ilgili yapılan çalışmalar alüminyum ve alaşımlarına da uygulanmıştır. Haddeleme işleminin Al ve alaşımlarına uygulanışı gerek tornalama uygulamalarında silindirik yüzeylere (Hassan ve ark., 2000; Luo ve ark., 2011; Hassan ve ark., 1997; Yu ve ark., 1999; El Axir ve ark., 2003; Zhuang ve ark., 2014; Majzoobi ve ark., 2016) ve gerekse frezeleme uygulamalarında düzlemsel yüzeylere (Khabeery ve ark., 2001; Başak ve ark., 2009; Tadic ve ark., 2013) uygulanarak analiz ve araştırmalar yapılmıştır. Delik iç yüzeylerinin haddeleme sonrası dairesellikleri incelenmiş ve Ra bakımından işleme yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. (Akkurt ve Ovalı, 2009). Benzer bir başka çalışmada (Akkurt ve ark., 2009), farklı işleme yöntemlerinden delik tornalama, honlama, delik taşlama, raybalama, matkapla delme ve ezerek haddeleme işlemleri yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda Al-6061 alaşımı malzemenin delik iç yüzeyindeki Ra, mikro yapı ile yüzeydeki sertlik değişimleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca haddeleme yönteminde uygulanan işlem parametrelerinin (hadde basıncı ve paso sayısı) yorulma, artık gerilme, mikrosertlik ve Ra üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bilyeli haddeleme yöntemi yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği, paso sayısının Ra üzerinde %41 oranında etkili olduğunu göstermiştir. Uygulanan paso sayısı ve kuvvetin, yaklaşık 20 Hv oranında mikrosertliği arttırdığı belirlenmiştir. Malzemede yüzey altı kalıntı gerilmelerin ve hadde kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. Yorulma dayanımında iyileşme görölmüş gibi yorulma ömrünün arttığı gözlemlenmiştir (Akkurt ve ark., 2009). İşlem parametrelerinin sonuçlar üzerine etkisi yanında haddelemede kullanılan takımlarla ilgili de benzer çalışmalar bulunmaktadır. Bu nedenle değişik parametreler (haddeleme kuvveti, paso sayısı ve ilerleme miktarı) kullanılarak tasarlanan üç farklı aparat ile işlem parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda Al-6061-T6 malzemesi üzerindeki Ra ve yüzey sertliğine bağlı olarak karşılaştırılmıştır. En iyi Ra ve yüzey sertliğinin bilyeli ezici uca sahip aparat ile elde edildiği görölmüştür (Başak ve Sönmez, 2015). Farklı bir çalışmada ezici ucun farklı çaplardaki etkisi araştırılmış, 5083 Al-Mg malzeme yüzeyi 11.112 mm, 13.494 mm, 15.081 mm ve 16.669 mm bilye çapları ile farklı parametreler kullanılarak haddeleme işlemi uygulanmıştır (Başak, 2015). Frezeleme uygulaması şeklinde uygulanan haddeleme işlemi ile ilgili olarak basit bir ezici uç ile farklı işlem parametreleri kullanılarak ezerek parlatma işlemi yapılmıştır (Malyer ve ark., 2018).

Oluşan kalıntı gerilmeler sayısal analiz programında bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Haddeleme işlemi yapılan bütün yüzeylerde, basma kalıntı gerilmelerinin olduğu gözlenmiştir. Çalışmada, işlem parametreleri yanında haddeleme yönü ve yağlayıcı kullanımının etkisi de ayrıca incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle düz yüzeyler üzerine derin haddeleme ve bilyeli haddeleme uygulamalarının yapıldığı görülmektedir. Çekme numunesi veya yorulma deney numuneleri üzerindeki eğrisel formlar hariç, uygulamalarda ya delik içine ya da dış yüzeylerdeki silindirik yüzeylere haddeleme uygulamalarının yapıldığı görülmektedir. Ancak tornalanan parçalarda hem silindirik, hem konik, hem de eğrisel kontürlerin olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu formlara sahip tornalanan parçaların tüm yüzey kontürü (boyuna, konik, radüslü veya eğrisel) üzerinden derin haddeleme yöntemiyle yüzeylerinin iyileştirilmesi bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Derin haddeleme veya bilyeli haddeleme takımlarının da bu yüzeyleri haddelleyecek bir tasarımda imal edilmesi de ayrıca incelenmesi gereken başka bir konu başlığıdır. Tasarlanacak haddeleme ezici ucun mevcut takım tutuculara monte edilebilir olması da ayrıca bir avantaj sağlayacaktır. Bu çalışmada bahsi edilen bu amaçlara katkı sunmak amacıyla mevcut takım tutuculara monte edilebilen bir haddeleme ezici ucun tasarımı ve imalatı yapılmış, bu ezici uç ile farklı kontürlere sahip tornalanmış parçaların derin haddelenmesi incelenmiştir. Farklı işlem parametreleri kullanılarak derin haddelenmiş silindirik ve konik yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri incelenmiş, Ra üzerine bu parametrelerin etkisi incelenerek en fazla etkinin hangi parametre olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca derin haddeleme sonrası yüzey üzerinden mikrosertlik ölçümleri alınmış ve yüzey üzerindeki sertlik değişimleri incelenmiştir. Optik mikroskopta haddeleme öncesi ve sonrası yüzey görüntüleri alınmış ve yüzeyde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Al6061-T6 alüminyum numunenin 100X, 250X, 500X, 1000X ve 2000X büyütme SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri alınmış ve ayrıca EDX analizleri yapılmıştır. Yapılan EDX analizleri ile malzeme yüzeyindeki element değişimleri incelenmiş, hangi element değerinin arttığı ve bu değişimin etkileri incelenmiştir.

1.1. Kaynak Araştırması

Bilyeli haddeleme ve özelde de derin haddeleme üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalar genellikle farklı malzemeler üzerinde tekniğin

uygulanması, yüzey üzerinde meydana gelen farklı etkilerin (yüzey pürüzlülüğü (Ra), mikrosertlik, yüzey bütünlüğü vb) incelenmesi, işlem parametrelerinin sonuçlar üzerine etkilerinin incelenmesi ve bilyeli ve derin haddelemenin yapılmasında farklı aparatların denenmesi ve sonuçlarının incelenmesi üzerinedir. Farklı zamanlarda yapılan bu çalışmalara ait konumuz çerçevesindeki çalışmalar aşağıda daha detaylı olarak anlatılmaktadır. Bu çalışmalar şu şekilde sıralanabilir:

Akkurt ve ark. (2009), yaptıkları çalışmada geleneksel bitirme ve ezme işlemlerinin, Al 6061 malzeme üzerindeki yüzey pürüzlülüğü ve alüminyum alaşımı parçaların daireselliği üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, başka yöntemler ve ezme yönteminden elde edilen yüzey karakteristikleri incelenmiştir. Delme işlemi uygulanmış Al 6061 alüminyum deney numuneleri, delik yüzeylerindeki dairesellik yönünden analiz edilmiş ve sonuçlar diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak delik daireselliğinin önemli olduğu bu işlemlerde ezme yöntemi kullanılabilir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Elde edilmiş olan yüzey sertlikleri Al 6061 alüminyum alaşımı malzeme için kıyaslandığında ezme yönteminin üstünlüğünü ortaya çıkarmıştır.

Akkurt (2009), delik yüzeylerinde yüzey iyileştirme işlemlerinin alüminyum alaşımı malzemeler üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışma da farklı özelliklerdeki bitirme işlemleri, (raybalama, delik taşlama, delik tornalama, honlama, matkapla delme ve ezme işlemleri) sonucunda Al6061 alüminyum alaşımı malzemenin delik iç yüzeyindeki mikroyapı, sertlik ve Ra değişimleri kıyaslanmıştır.

Akyüz (2020), yaptığı çalışmada Al7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri, bilyeli haddeleme yönteminde işlem parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada işlem parametrelerinin (paso sayısı ve hadde basıncı) bilyeli haddeleme yöntemindeki Al7075-T6 alüminyum alaşımı üzerindeki Ra, sertlik, yorulma dayanımı, artık gerilme ve mikrosertlik bakımından etkileri araştırılmıştır. Hadde parametrelerinden paso sayısının yüzey pürüzlülüğünde tesirinin bilyeli haddeleme yönteminde istatistiksel ifadeyle %41 olduğu ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca hadde basıncının etkisinin %39.6 olduğu tespit edilmiştir. Paso sayısının ve hadde basıncının malzemenin mikrosertliğini arttırdığı, buna bağlı olarakta ortalama 20 Hv değerinde malzemenin mikrosertliğinin yükseldiği gözlenmiştir. Malzemede yüzey altı kalıntı gerilmelerinin hadde basıncının artışıyla beraber arttığı belirlenmiştir. Haddeleme ile malzemenin yorulma ömründe yükseldiği belirlenmiştir.

Aviles ve ark. (2013), benzer bir çalışma bilyeli haddeleme yöntemi ile AISI1045 çeliğinin yorulma ömrünü yükseltmek için yapılmıştır. Standartlara göre hazırlanmış yorulma numunelerinin yüzeylerine 6 mm çapında ezici bilyeyle ve yağlayıcı bir ortamda yüksek basınçlarda haddeleme işlemi uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda haddelemenin eğmeli yorulma dayanımını %21.25 oranında arttırdığını ortaya çıkarmışlardır.

Başak ve ark. (2015), haddeleme cihaz türünün (makaralı, bilyeli, çift makaralı) Al6061-T6 malzemesi üzerinde, yüzey sertliğine ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır. Haddeleme işlemi için çeşitli parametreler uygulanarak (haddeleme kuvveti, paso sayısı ve ilerleme miktarı) başka aparatın tasarım ve üretimi yapılmıştır. Ra ve yüzey sertliğinden kaynaklı Al6061-T6 malzemesi üzerinde bu parametrelerin etkileri kullanılarak aparatlarla elde edilen veriler kıyaslanmıştır. ‘Aparat 1’ olarak adlandırılan ve uç kısmında ezici olarak bilye tipi uç kullanılan aparat ile yapılan deneylerde yüzey sertliği ile pürüzlülüğü bakımından en iyi performansın elde edildiği tespit edilmiştir.

Başak (2015), Ra, haddeleme parametrelerinin yüzey sertliği (galetaj) ve 5083 Al-Mg malzeme yüzeyinin işlenmesi üzerine etkilerini incelemiştir. 5083 Al-Mg malzemesi, 11,112- 13,494- 15,081- 16,669 mm bilye çapı, 0,15-0,25-0,35-0,45 mm/dev ilerleme miktarı, 100- 200- 300- 400 N baskı kuvveti, 100- 200- 300 dev/dak devir sayısı şeklindeki farklı parametrelerle haddeleme işlemi uygulanmıştır. Haddeleme işlemindeki parametrelerin sertliğine ve Ra üzerine etkileri araştırılmıştır.

Baçoğlu ve ark. (2019), deneysel olarak merdane parametrelerinin ERD6112 kalite sac materyallerinin pürüzlülük aktarımına etkisini temper haddelemede incelemişlerdir. Bu pürüzlülük transferini ne ölçüde etkileyebileceği konusu homojen bir pürüzlülük transferi için nasıl ortamlarda temper haddeleme olması gerektiği ile ilgili malzeme özellikleri incelenmiştir. Laboratuvar ortamında çeşitli periyot ve ezme ölçülerinde ERD6112 kalite sac malzemeler temper haddelemeyle pürüzlendirilme işlemine tabi tutulmuştur. Bazı değişkenler kullanılarak ezme miktarı pürüzlülük aktarımına tesir eden, haddeleme hızı, merdane pürüzlülük değeri ile haddeleme kuvveti vb. veriler incelenmiştir. Haddeleme kuvvetinin artmasıyla beraber pürüzlülük transfer oranında artış görülmüştür. Yüksek ezme oranında ve pürüzlülük miktarı yüksek merdane uygulanması sürecinde ERD6112 kalite sac malzeme için pürüzlülük transferini arttırdığı gözlemlenmiştir. Pürüzlülük transferine tesir eden başka değişkenin

hız olduğu sonucuna varılmıştır. Malzeme için yüksek periyotlarda pürüzlülük ERD6112 kalite sac transferini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Buldum (2017), mikrosertlik ve Ra bakımından AZ31B magnezyum alaşımasının bilyalı parlatma yöntemi ile işlenmesinde etkisini araştırmıştır. Magnezyum alaşımlarının hafif ve yüksek dayanımlı malzeme olmasına karşın, diğer taraftan düşük korozyon dayanımı ve düşük yüzey yapısı sebebiyle bir takım sınırlamaları vardır. Kısıtlamaları ve özellikle de yüzey niteliklerini düzeltmek amacıyla devir sayısı, ilerleme, paso sayısı ve uygulanan kuvvet olmak üzere çeşitli değişkenlerle bilyalı parlatma yöntemi yapılmıştır. Taguchi yöntemi deney sayısını düşürmek için kullanılmıştır. S/N oranları yönünden en iyi parlatma şartları bu yöntem kullanılarak bulunmuştur. İlerleme hızı ve haddeleme kuvvetinin yüzey yapısını iyileştirmede, Ra ve sertlik testleri değerleri bakımından değerlendirildiğinde önemli bir yere sahip olduğu tespit edilmiştir. Yüksek haddeleme kuvveti ve düşük ilerleme hızı seçildiği zaman en iyi Ra değeri elde edilmiştir.

Çırak (2017), yüzey sertliğini inceleyerek ve yapay sinir ağları ile birlikte yüzey işleme sürecini araştırmıştır. Yüzey işleme işlemleri uygulanabilecek bir aparatla talaşlı imalat işlemi yapılmış, yüzeylere değişik parametreler kullanılarak yüzey işleme yöntemleri uygulanmıştır. Parça yüzey sertlik sonuçları ölçülmüş ve sonuçlar YSA (Yapay Sinir Ağları) ile yorumlanarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çorak (2018) tarafından yapılan çalışmada, akımı olmayan nikel-boron (Ni-B) kaplama üstüne bilyeli parlatma (ball burnishing) işlemi ile AISI 1045 çeliğinin korozyonlu yorulma yöntemi araştırılmıştır. Numunelerin bir bölümüne sadece bilyeli parlatma işlemi yapılmış diğer kalan kısmınaysa bilyeli parlatma işlemiyle beraber akımı olmayan nikel kaplama yöntemi kullanılmıştır. Yapılan deneyler hava alanının dışında %5 NaCl çözeltisinde döner eğilmeli yorulma koşullarında ($R=-1$) yapılmıştır. Korozyon ortamında uygulanan yorulma deneylerinde numunelere 240 ile 450 MPa değerleri ile farklı alternatif gerilmeler uygulanmıştır. Netice olarak çeliğin yorulma dayanımı üzerinde korozyonlu ortamın azaltıcı tesirinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapılan bilyeli parlatma yüzey işleminin korozyonlu yorulma dayanımında yükselişe neden olduğunu göstermiştir. Bilyeli parlatma işleminin sonuçları ile kıyaslandığında ikili yüzey işleminin (bilyeli parlatma ile Ni-B kaplama) korozyonlu yorulma mukavemetini düzelttiği ispatlanmıştır. Bu çalışmada elektron tarama mikroskobuyla, korozyon alanının numune yüzeyinin morfolojisi üstündeki tesirine ayrıca bakılmıştır.

Liviu ve ark. (2005) yaptıkları deneysel çalışmada, sertleştirilmiş çeliklerin bilyeli parlatma yöntemi ile çalışma parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada baskı kuvvetinin sağlanması için hidrolik etkili bir aparat geliştirilmiş ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi incelenmiştir. Çalışma sonunda haddeleme yöntemindeki en önemli parametrenin uygulanan kuvvet olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca önemli diğer bir sonuç olarak, bilyeli haddelemede en önemli faktörlerin başında iş parçasının haddeleme öncesi yüzey pürüzlülüğünün olduğu görülmüştür.

Malyer'in yaptığı çalışmada (2018), ezerek parlatma yapılan Al7075-T6 alüminyum malzemede ortaya çıkan kalıntı gerilmeler incelenmiştir. Deneysel sonuçlar sayısal analiz programı ile bulunan sonuçlarla kıyaslanmıştır. CNC frezede basit bir takım ve farklı parametreler kullanılıp ezerek parlatma işlemi yapılan numunelerin kalıntı gerilme değerleri X-ışını kırınımı tekniği ile ölçülmüştür. Tüm yüzeylerde derin haddeleme sonucunda basma kalıntı gerilmelerinin oluştuğu saptanmıştır. Bu numuneler üzerinde ortaya çıkan kalıntı gerilmelerin ilerleme, haddeleme paso derinliği, paso sayısı ve yanıl kayma mesafesi vb. işlem değişkenleri ile derin haddeleme işlemi uygulanmadan önce yüzeye yapılan frezeleme işlemi yönünden ve işlem esnasında uygulanan yağlayıcı gibi parametre ve ortamlara bağlı olduğu görülmüştür. Sayısal analiz yöntemiyle bulunan değerlerin ölçümler neticesinde elde edilen verilere sayısal olarak benzemediği ancak işlem parametrelerinin etkilerin yönü ve sıralaması olarak ölçüm sonuçları ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Özyaman (2017), bilyeli haddeleme tekniğiyle biçimlendirilmiş çelik boruların aşınma davranışları ve mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada, otomotiv, havacılık ve özellikle de savunma sanayinde bulunan av tüfeği üretim sektöründe, tüfek namlularının yapımında AISI 4140 çelik malzemesi incelenmiştir. "Ballising-Bilyeleme" şeklinde isimlendirilen soğuk plastik biçimlendirmenin malzeme üzerindeki kalıcı ölçüsel değişimler, mikrosertlik, Ra ve buna bağlı olarak değişen aşınma davranışları üzerindeki tesiri araştırılmıştır. Bu nedenle ezerek parlatma tekniklerinden bilyeleme (ballising) işlemi malzemeye bitirici proses olarak işlenmiştir. Bilyeleme işleminin malzemenin yüzey sertliğine, yüzey pürüzlülüğüne, iç çap, dış çap ölçülerine ve aşınma davranışına etkisi araştırılmıştır. ASTM G76-95 standart test metoduna uygun özel olarak tasarlanmış düzenek uygulanmıştır. Sonuç olarak numunelerin ağırlık kayıpları ölçülerek aşınmanın etkisini belirlenmiştir. Plastik

deformasyon miktarı yükseldikçe mikrosertlik değerlerinin yükseldiği ve aşınma miktarının düştüğü yapılan bilyeleme işlemi sonucunda görülmüştür.

Rodriguez ve ark. (2012), derin bilyeli parlatma tekniği ile millerin yüzey iyileştirmesi konusunu incelemişlerdir. Bu çalışmada tornalama yöntemiyle karşılaştırmalı olarak AISI 1045 çeliğinin bilyeli haddelenmesinde, ilerleme hızı, haddeleme kuvvetinin yüzey pürüzlülüğü ve sertliği üstündeki etkileri incelenmiştir. 6 mm çapında silisyum nitrür seramik bir bilye ile yağlayıcı olarak emülsiyon yağı kullanılarak uygulanmıştır. Örneklerin yüzey altı mikrosertlik değerleri, yüzey topografyaları ve artık gerilmeleri araştırılmış ve bilyeli haddeleme yönteminin, dönme devinimi yapan makine elemanlarında, artık gerilmeleri ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmede etkin bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Sagbas (2011), yüzey yanıt yöntemi ve istenirlik fonksiyonu kullanarak bilyalı haddeleme işleminde yüzey pürüzlülüğünün analizini ve optimizasyonunu incelemiştir. Bu çalışmada AA 7178 alüminyum alaşımının bilyeli haddeleme işleminde, paso sayısı, ilerleme miktarı, baskı kuvveti ve hızının Ra üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ra ve haddeleme parametreleri ilişkisini belirlemek için regresyon modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada oluşturulan regresyon modelinin, yüzey pürüzlülüğünü % 2.82 oranında hata ile tahmin ettiği bulunmuştur. Ayrıca paso sayısı ve haddeleme kuvvetinin önemli faktörler olduğu belirlenmiştir.

Koçak (2020) tarafından yapılan çalışmada, Al6013 ve MS 58 malzemelere delik içi derin haddeleme yöntemi uygulanmıştır. Uygulamayla birlikte yüzeysel niteliklerin iyileştirilmesi konusu araştırılmıştır. Testlerde üç farklı ezme payı bırakılarak iki malzeme için işlemler ayrı ayrı uygulanmıştır. Numuneler mikrosertlik, mikroyapı ve Ra yönünden araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerlerinin Al6013 malzemede % 91,5 ve MS 58 malzemede ise % 89,6 oranında düştüğü gözlenmiştir MS 58 malzemenin tane yapısı ve sertlik artışı beraber incelendiğinde diğer malzemeye kıyasla daha küçük tane yapısına sahip olduğu ve MS 58 malzemenin yüzey sertliğinde daha fazla artış olduğu görülmüştür.

Özdemir (2019) yaptığı çalışmada, Ra üzerine işlem değişkenlerinin etkisini yüzey yanıt tekniği kullanarak analiz etmiştir. C45 imalat çeliğinin tornalanmasında kullanılan bağımsız değişkenlerin (ilerleme, kesme hızı, takım uç radyüsü ve kesme derinliği) bağımlı değişkenler (Ra) üstündeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca optimum kesme değerleri bulunmuştur. Deneylerde üç farklı kesme hızı (160 m/dak, 260 m/dak ve 360 m/dak), üç ilerleme miktarı (0,05 mm/dev, 0,18 mm/dev ve 0,31 mm/dev), üç

kesme derinliği (0,1 mm, 0,3 mm ve 0,5 mm) ve uç takım uç radyüsü (0,4 mm, 0,8 mm ve 1,2 mm) uygulanmıştır. Bağımlı değişken üstünde en etkin bağımsız değişkenin sırasıyla ilerleme miktarı ve takım uç radyüsü olduğu bulunurken, kesme hızı ve kesme derinliğinin tesirinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır. İlerleme miktarı artış gösterirken yüzey pürüzlülüğünün arttığı, takım uç radyüsü artışında ise azaldığı belirlenmiştir.

Yaka ve ark. (2016), AISI 1040 çeliğininin tornalamasında kesme değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini Taguchi tekniğiyle optimizasyonu ile araştırmışlardır. 46 HRc sertlikteki AISI 1040 çeliğine ilk olarak tornalama işlemi uygulanmıştır. Talaş derinliği, kesme hızı ve ilerleme değişkenlerine göre Taguchi L9 deney tasarımı ile deney tasarımı yapılmıştır. Uygulanan üç faktör bakımından Ra'ya en büyük etkinin ilerleme değerı olduğu deneysel sonuçlar baz alınarak belirlenmiştir. %95 güven seviyesi baz alınarak yapılan ANOVA analizi ile bu sonuç tespit edilmiştir. Taguchi analizi sonucu % 89 güvenilirlik oranı elde edilmiştir.

2. ALÜMİNYUM

Dünya ölçeğinde incelendiğinde toplam metal pazarının çelik ve demirden sonra alüminyumun ikinci sırada olduğu görülmektedir (Smith, 2001).

Tablo 2.1’de yer kabuğunun sahip olduğu metallerin oranları tablosu yer almaktadır (Weissbach, 2000).

Metal piyasasında çelik ile demirden sonra ikinci sırada bulunan alüminyum, tablo 2.1 ‘de de görüldüğü gibi yer kabuğunda en çok yer alan element olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 2.1. Önemli metallerin yer kabuğundaki oranı

Element	Al	Fe	Mg	Ti	Zn	Ni	Cu	Pb
% oran	7,5	4,7	1,9	0,58	0,02	0,018	0,01	0,002

Buna karşın demirin ifade ettiği değere alüminyum çıkamamıştır. Bunun nedenlerini de şu şekilde sıralayabiliriz:

- Alüminyum parçalanması çok sayıda mineralin bileşiminde bulunmaktadır.
- Sertleştirilemeyen alüminyum takım malzemesi olarak kesinlikle kullanılamaz.
- Yaklaşık 100 sene önce teknik anlamda üretilmeye başlanmış ve alüminyum 150 yıl önce element olarak keşfedilmiştir. Buna karşın demir elementi ilk çağlardan beri tanınmaktadır (Smith, 2001).

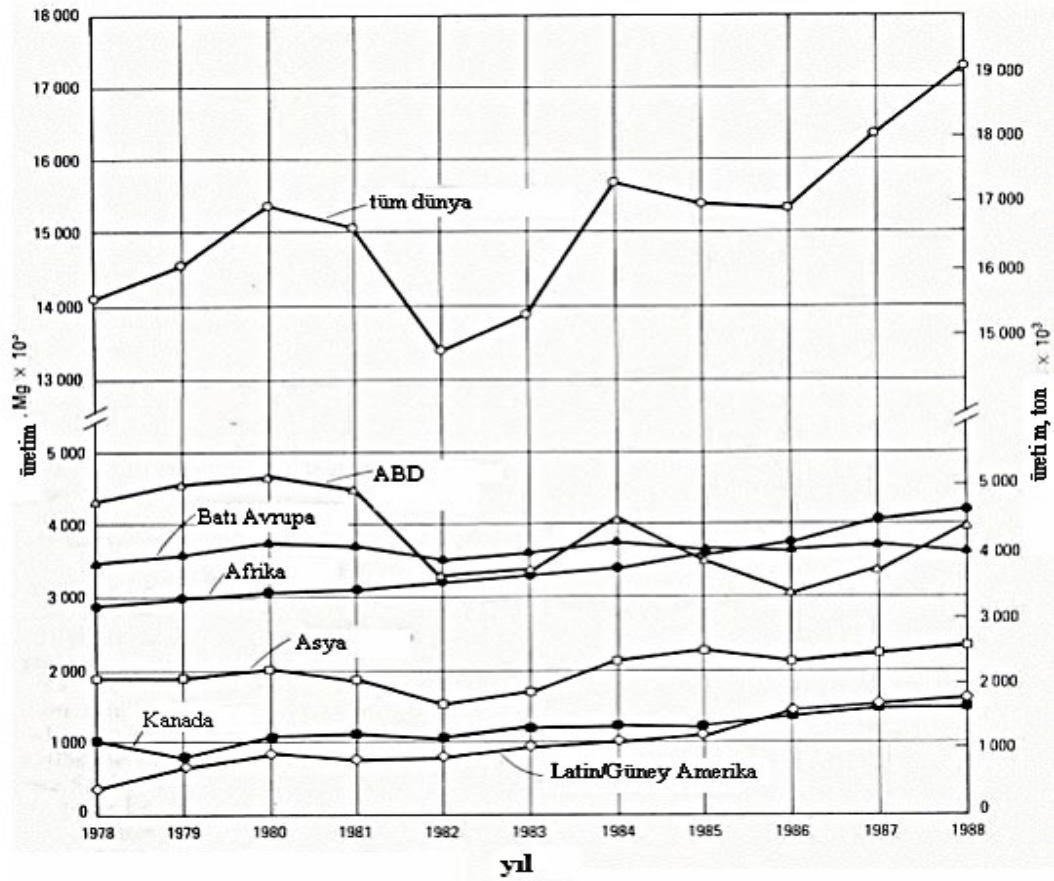
Yer kabuğunda, demir olmayan metaller (DO) daha az oranlarda yer almaktadır. Demir olmayan metallerin üretimi, çelik ve demir üretiminden oldukça düşüktür. Yüksek olan fiyatları da buna bağlanabilir (Weissbach, 2000). Bu metalin benzersiz özellikteki kombinasyonunu alüminyum endüstrisindeki hızlı büyümesi olarak göstermek mümkündür. Bu durum alüminyum mühendislik malzemelerinden birisi yapmakta ve çok yönlü bir özelliğe kavuşturmuştur. Alüminyum ağırlıkça hafif olduğu için karışımları yapı çeliklerinden çok dayanım göstermektedir. Alüminyumun iyi ısı, elektriksel iletkenliği ve yüksek ısı, ışık yansıtma özelliği de bulunmaktadır. Alüminyum dökülebilir, farklı şekillerde oluşturulabilir ve iyi yüzey kalitesi gösterebilir. Bu üstün nitelikleriyle mühendislik materyalleri olarak değer kazanmaktadır (Smith, 2001). Tablo 2.2’ de alüminyum metalinin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Oksijene rağmen yüksek afinitesi sebebiyle alüminyum, yüzeyde havanın temasıyla ince ancak yoğun oksit tabakasını (Al_2O_3) ifade eder. Bu tabaka alüminyumu öteki tesirlerden korur; fakat bazılar ve bazı asitlerle tuzlar bu tabakayı çözmektedir (Weissbach, 2000).

Tablo 2.2. Alüminyum metalinin mekanik özellikleri (Weissbach, 2000; Roberts, 2000)

Çekme Mukavemeti(σ_B)	40–80 MPa(*)
Akma Sınırı(σ_S)	10–30 MPa(*)
Sertlik(HB 2,5)	12–20
Elastiklik Modülü(E)	$7,1 \times 10^5$ MPa
Kayma Modülü(G)	$2,7 \times 10^5$ MPa
Çentik Darbe Sünekliği(α_k)	110 MPa
Kopma Uzaması	30–38 %(*)
Ergime Noktası	660°C
Dövülme Sıcaklığı	300–500°C
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	250–300°C
Yoğunluk (δ)	$2,7 \text{ g/cm}^3$
Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik (YMK)

(*) Safiyet Derecesine bağlı olarak



Şekil 2. 1. Yıllık primer alüminyum üretiminin ülkelere göre dağılımı (Handbook, 1997)

2.1. Alüminyum Alaşımları

2.1.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm olmak üzere iki sınıfta gruplandırılmaktadır (Baydemir, 2018). Döküm alüminyum ve dövme alüminyum karışımlarını elde etmek amacıyla dört basamaklı sayısal tasarım gösterimi kullanılmaktadır. Sondan iki hane alüminyumun saflığını ya da alüminyum alaşımını göstermektedir. Tablo 2.3'te dövülmüş alüminyum alaşımları gösterilmiştir (Ekerer, 2007).

Alüminyum ve alüminyum karışımlarını dökülmüş ve dökümhane ingotu olarak belirlemede kullanılan dört haneli sayısal bir tasarım sisteminde, ilk hane alaşım grubunu göstermektedir. Son basamak ise kesir işaretiyle diğerlerinden ayrılarak ürünün biçimini (örneğin dökümler veya ingotu) ifade etmektedir. Empirüte sınırlarının bir modifikasyonu ya da orijinal alaşım sayısal tasarımdan önce bir seri harfle gösterilmektedir (Ekerer, 2007).

Tablo 2.3. Dövme alüminyum alaşım gruplar (Smith, 2001)

Dövme alüminyum alaşım gruplar	
Alüminyum % minimum ve daha büyük	1 xxxx
Alüminyum alaşımları ana alaşım elementleri ile gruplandırılır.	
Bakır	2 xxxx
Silisyum ilave edilmiş bakır ve/veya magnezyumlu	3 xxxx
Silisyum	4 xxxx
Magnezyum	5 xxxx
Çinko	7 xxxx
Kalay	8 xxxx
Diğer elementler	9 xxxx
Kullanılmamış seriler	6 xxxx

Alüminyum döküm alaşımları daha yaygın olarak üç basamaklı ifade edilir. Tablo 2.4'te döküm alüminyum alaşımlarının gruplandırılması verilmiştir (Smith, 2001). 1909 yılında Wilm isminde bir araştırmacı %0.5 magnezyum, %3.5 bakır muhtevalı alüminyum alaşımını yaşlandırarak yüksek dayanımlı alüminyum alaşımı elde etmiştir. Bu alaşımların önemi yapısal malzeme olarak hemen anlaşılmıştır (Stubbington, 1988). Alaşım elementlerinin ilk görevi yüksek uzama kabiliyeti ile korozyona dayanıklılık gibi yararlı nitelikleri kötü doğrultuda tesir etmeden saf alüminyumun düşük akma sınırını arttırmaktır. Bakır, çinko, magnezyum ve silisyum az miktarlarda bile malzemeyi istenilen düzeye ulaştıran elementlerdir. Kübik yüzey merkezli alüminyum kristal kafes yapısı, bu elementlerden çok küçük miktarlarda alabilmektedir. Yabancı atomlar kristal kafesi içinde kaymaya karşı dayanımı yükseltirler. Şekil değiştirme kabiliyetinde ise bir etkilenme söz konusu değildir (Ekerer, 2007).

Tablo 2.4. Döküm alüminyum alaşım grupları (Roberts, 2000)

Alüminyum alaşım elementleri	Sembolik ifade
%99+Al	1xxx
Bakır	2xxx
Mangan	3xxx
Silisyum	4xxx
Magnezyum	5xxx
Magnezyum+Silisyum	6xxx
Çinko	7xxx
Lityum	8xxx

Alüminyum atomları ile alaşım elementlerinin çözünmeyen yerlerinden kırılğan, sert, intermetalik bileşikler elementlerin oranlarının yüksek olması durumunda oluşmaktadırlar. Mukavemet daha fazla yükselirken şekil değiştirme kabiliyeti kaybolmaktadır. Bu durumlar ele alındığında dövme alaşımları şekil değiştirme kabiliyetlerinin artması için, daha az alaşım oranı içinde bulundurulur. Burada alüminyum-silisyum alaşımı ayrı bir alüminyum alaşımı olarak göze çarpmaktadır. Bu tip alüminyum alaşımı içeriğindeki %12.6 silisyum oranı ile bir ötektik noktaya sahiptir ve bu yapıyla da bu alaşım en çok tanınmakta olan alüminyum döküm alaşımlarından biri olma özelliğine sahiptir (Ekerer, 2007).

Daha saf yapıda olan bakır elementi tarafından saf alüminyumun korozyona karşı yüksek dayanımı azaltılır. 0.1% Cu ile bu etkiyi sağlamak yeterlidir. Bakır, hurdaların tekrardan metal halinde ergitilmesi esnasında ayrıştırılamaz. Sıvı metalden dökme alaşımları yapılıyorsa, %1 miktarında bakır yapıdadır. Dökme alaşımları bu şekildeki korozyona dayanımlı olmamaktadır (Ekerer, 2007).

Ticari saflık değeri olarak yaklaşık %99,3 ila %99,7 oranına kadar değişmektedir. Alüminyum, yüksek saflıkta elektriksel iletken karışımlar ile reflektör levhalar vb. uygulamalarda seçilmektedir. Bakır ile demir ilaveli düşük saflıkta metal, ticari saf alüminyum karışımı olan 1100 karışımını imal etmek adına kullanılmaktadır. Şekillendirebilirlik ve kaynaklanabilirlik ile beraber sünek ve yumuşak bir alaşımdır. Tavlanmış %99,99 Al 'un çekme mukavemeti aşağı yukarı 45 MPa, akma mukavemeti 10 MPa ve uzaması % 50'dir (Smith, 2001; Davis, 1997).

Alüminyum hafif metaller grubundadır ve sık tercih edilen bir metal olduğu bilinmektedir. Hafif metal terimi, yoğunluğu en fazla 3.8 g/cm^3 olan metaller için adlandırılmaktadır. Ayrıca bu grubun içerisinde; berilyum, alüminyum, magnezyum, potasyum ve lityum bulunmaktadır. Sayılanlar arasında özellikle magnezyum ve alüminyum en çok tercih edilen metallerdir. Alüminyumun, yoğunluğunun az olmasıyla (2.7 g/cm^3) beraber, ısı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması bakımından ve atmosfer korozyonuna dayanıklılık, basit imal edilebilirlik gibi özellikleri de bulunmaktadır (Shi-Gang ve ark., 2006).

Daha önce de değinildiği gibi alüminyum alaşımları dövme ile döküm olmak üzere iki sınıfta adlandırılmaktadır. Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'ten farklı olarak, Alüminyum Birliği'nin (Aluminum Association) gruplandırmasına göre 4 rakamlı bir simgeyle belirtilmektedir (tablo 2.5). Bu tanımlamalardaki sayılardan ilk rakamı temel element, ikinci rakam ise esas alaşım miktarından farklı olarak yer alan element sayısını

ifade etmektedir. Serinin orijinal alaşım olduğunu ise ikinci rakamın 0 olması belirtmektedir. Sondan iki rakamın 1XXX serisi dışındaki alaşımlarda özel bir değeri bulunmayıp son iki rakam, belirtilen alaşımı o dizinin diğer alaşımlarından ayırmak için kullanılmaktadır (Baydemir, 2018).

Saf alüminyum gösteren 1XXX serisi, son iki rakamı alüminyumun saflık derecesinin göstergesi olarak, % 99'dan sonraki rakamları belirtmektedir (Yüksel ve Meran, 2016).

Tablo 2.5. Alüminyum ve biçimlenebilen alüminyum alaşımlarının dört rakamlı malzeme numarası sistemi (Yüksel ve Meran, 2016)

Al-Alaşımlar grubu	Ana alaşımlar elementi
Alaşımsız Al ($Al \geq 99,00$)	1XXX (1000 serisi)
Alüminyum-Bakır	2XXX (2000 serisi)
Alüminyum-Mangan	3XXX (3000 serisi)
Alüminyum-Silisyum	4XXX (4000 serisi)
Alüminyum-Magnezyum	5XXX (5000 serisi)
Alüminyum-Mg+Si	6XXX (6000 serisi)
Alüminyum-Çinko	7XXX (7000 serisi)
Alüminyum-Diğerleri	8XXX (8000 serisi)
Yedek Grup	9XXX (9000 serisi)

2.2. Al Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

Yaşlandırma ısı işlemleri uygulaması alüminyum alaşımlarına yapılmaktadır. Yaşlandırma işlemi, Al karışımlarının mekanik niteliklerini düzeltmenin yanında korozyon dayanımı ile elektriksel iletkenliklerini de değiştirmektedir (Askeland, 2010).

Bu işlem üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu dereceler çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma (çökelme) işlemlerinden oluşmaktadır. Aşırı doymuş katı fazdan yaşlandırma ısı işlemlerinden sonra mikro yapı içinde çok ince çökelti fazının dağılımı mekanik niteliklerin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Mikroyapı içerisinde oluşabilecek çökelti fazı doğal (tabii) olarak gerçekleşebileceği gibi yapay (sunî) olarak da gerçekleşebilmektedir. Al alaşımlarına genellikle yapay yaşlandırma ısı işlemleri uygulanmaktadır (Baydemir, 2018).

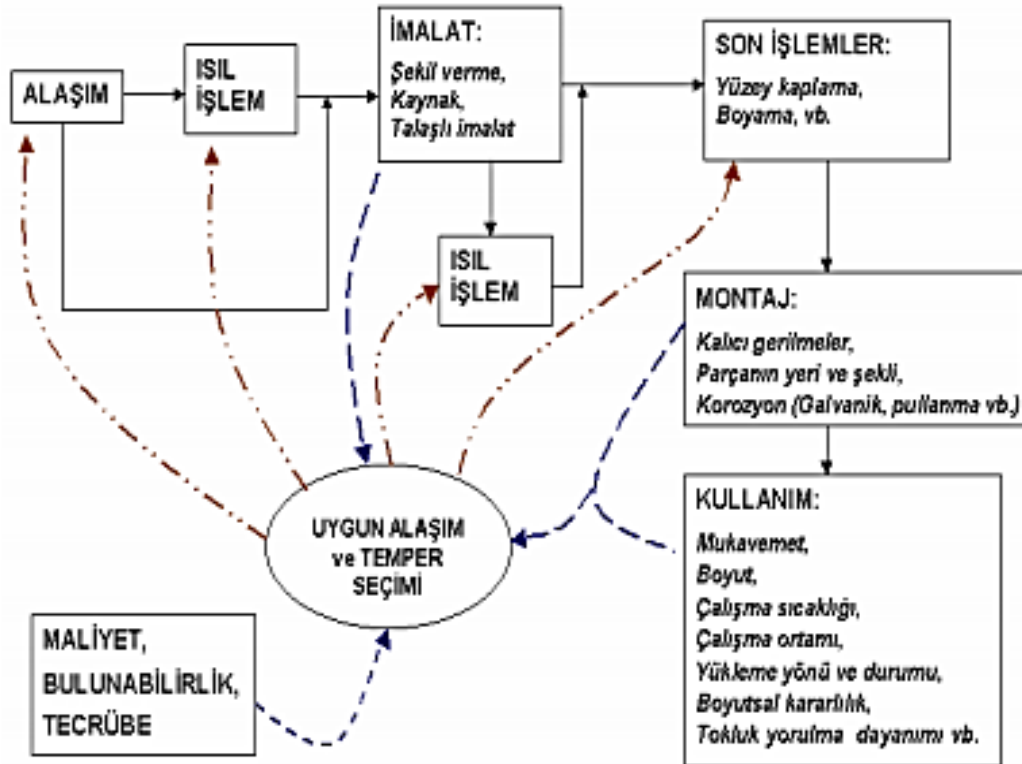
2.3. Havacılık Alanı ve Alüminyum Alaşımları

Hava aracı kullanan ya da işleten kurumların en büyük problemlerinden biri, farklı iyileştirmeler yaparak eldeki hava araçlarının günümüz teknolojilerinden

faydalanılır şekle getirilebilmesidir. Bilhassa askeri havacılıkta bu ihtiyacın gerekli bir olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmalardaki alaşım seçimi ile ilgili kaynaklara bakıldığında, karışımların ayrı ayrı ve genellikle belirli bir özelliğe göre incelendiği görülmektedir. Rastgele bir uygulamaya yönelik karışımın seçilebilmesinde çok sayıda kaynak incelenmelidir. Havacılık endüstrisinde yararlanılan yüksek dayanımlı alüminyum karışımlarından sac ve plaka biçiminde olanlar için, farklı uygulamalara yönelik uygun karışımların bulunmasını sağlayacak Visual Basic dilinde yazılmış bilgisayar programı geliştirilmiştir (Yurdakul ve ark., 2002).

Alaşım seçimi esnasında dikkate alınan ana faktör şekil 2.2’de şematik olarak verilmiştir (Yurdakul ve ark., 2002).

Havacılık alanında, aerodinamik yükler, kaldırma kuvveti, sürtünme, ani hızlanma ya da yavaşlamalar, iniş esnasında maruz kalınan yükler, silah atışı esnasındaki geri tepmeler ile aracın kendi ağırlığı gibi kuvvetler altında çalışan hava araçlarında güvenilirlik ile emniyet ön plana çıkan mühim unsurlardır. İmal edilen modüller her türlü çalışma şartında önceden belirlenen koşullara ulaşabilmelidir (Yurdakul ve ark., 2002).



Şekil 2.2. Alaşım seçimini etkileyen temel unsurlar (Yurdakul ve ark., 2002)

Bu nedenle hava aracı üstünde uygulanacak bir malzemenin uygulama koşullarının çok iyi anlaşılabilmesi ve bu koşullar sonucunda özelliklerine sahip çıkılabilmesi gerekmektedir (Yurdakul ve ark., 2002).

Günümüzde hava araçlarının gövde yapılarının büyük bölümü alüminyum alaşımları kullanılarak üretilmektedir (Rooy, 1995). Alüminyum ve alaşımlarını hafifliği, görünümü, işlenebilirliği, yüksek korozyon, fiziksel, mekanik özellikleri ve dayanımı birçok uygulama için uygun ve ekonomik yapan özellikler de önde gelmektedir. Bazı alüminyum karışımlarının kopma dayanımı 600 MPa yüksekliğine kadar çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıklar açısından çok uygun olmayan bazı alüminyum alaşımları 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilir. Alüminyumun; tuzlu su, su, hava ve petrokimyasallar da dâhil birçok kimyasal madde ortamında yüksek korozyon dayanımı bulunmaktadır (Craig, 1995). Alüminyumun bir diğer üstün özelliği ise mekanik özelliklerini korumasında düşük sıcaklıklarının olmasıdır. Yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarının kaynak özelliklerinin genel olarak iyi olmadığı bilinmektedir. Buna bağlı olarak hava araçları daha çok perçinli birleşim kullanımıyla üretilmektedir. Fakat az miktarda da olsa kaynak uygulanabilen yüksek dayanımlı alüminyum karışımı varlığından söz edilebilir (Yurdakul ve ark., 2002).

Genellikle alüminyum kaynakları için ısıtılma işlemi, çökelme sertleşmesi gösterebilen döküm ve işlenik kaynakların sertliğini ve mukavemetini yükseltmek amacıyla yapılan uygulamalarla sınırlı kalmıştır. Dayanımın artırılması için alüminyum alaşımlara yapılan ısıtılma işlemleri: su verme; aşırı doymuş yapının meydana getirilmesi, yaşlanma; çözünen atomların oda ısısında ya da daha yüksek ısılarda çökmesi (çökelme sertleşmesi), çözeltiye alma; fazların çözülmesi (katı çözeltinin oluşturulması) olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır (Yurdakul ve ark., 2002).

2.3.1. Mekanik yüzey işlemleri

Mekanik yüzey uygulamaları çok eski tarihlerden itibaren yapılmaktadır. Milattan önce 2700 yıllarında Haçlı seferlerindeki askerlerin kılıçlarının mukavemeti bu teknikle artırılırken, bazı illerde ise altın kasklara mekanik yüzey uygulamaları yapıldığı tespit edilmiştir. 1800'lü yıllarda tren akslarına, topçu silahlarının yüzeyleri dövülerek mukavemetleri artırma ve mekanik yüzey işlemleri yapılmıştır (Schulze, 2004).

Mekanik yüzey işlemlerinin günümüzdeki modern teknolojiyle beraber bilhassa demiryolu endüstri ve askeri vb. sahalarda yapılması kaçınılmaz olmuştur. Bilhassa uzay endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve yay imalatını, mekanik yüzey işlemleri bulunmadan tasarlamak imkânsızdır. 1930’lu yıllardaysa mekanik yüzey işlemlerinin yorulma mukavemetine direk etki ettiği, mekanik yüzey işlemi yapılan bir malzemenin parlatılan bir malzemeye kıyasla daha yüksek yorulma mukavemetinin olduğu neticesinden çıkarılmıştır. Mekanik yüzey işlemlerinin korozyonlu yorulmaya da yararlı etki ettiği daha sonraki zamanlarda keşfedilmiştir. Bilyalı dövme yöntemi anılan bu yıllarda bulunmuş ve çelik bilyaların 2-4 metre yükseklikten metallerin yüzeyine salınması şeklinde uygulanmıştır. Bu işlem sonucu yüzeyde hem malzemenin yorulma dayanım değerlerinde hem de sertlik miktarlarında bir artış olduğu ortaya çıkmıştır. Belirtilen mekanik özellikleri iyileştirici etkisinin meydana çıkarılmasının ardından bilyalı dövme işleminin 1870’li yıllarda Tilgham tarafından bilyaların basınçlı hava, su, merkezkaç kuvveti ya da buhar ile yüzeylere püskürtülebileceği kanısına varılmıştır. Bilyalı dövmeyle motor parçalarının yorulma mukavemetlerinin yükseltilebileceğini, General Motor’da çalışan John Almen göstermiştir. Ayrıca isminin verildiği Almen şeritlerini ilerleterek bilyalı dövme işlemi değişkenlerinin uygulama sahalarındaki ayrıtlara bakılarak belirlemiştir. Bilyalı dövme sonrası değişime uğrayan artık gerilme profilleri, gerek yorulma mukavemetinin artışında gerekse diğer mekanik niteliklerin yorumlanmasında tesirli bir değişken olmuştur (Schulze, 2004). Günümüzdeyse daha modern mekanik yüzey işlemleri bulunmuştur. Modern mekanik yüzey işlemleri su jeti ile dövme, çekiçe dövme, ses üstü bilyalı dövme ile lazerle dövme ile bilyalı dövme olarak sınıflandırılabilir (Varol, 2009).

2.3.1.1. Mekanik Özellikler

2.3.1.1.1. Sertlik

Herhangi bir maddenin, başka bir cismin batırılmasına karşı yaptığı dirence sertlik denir. Batırılan dalıcı ucun sertliğiyle ve biçimiyle uygulanan yükün büyüklüğü ve türü dalma olayını etkilemektedir. Bu nedenle sertlik değeri verilirken yapılan deneyin isminin açıklanması gerekmektedir. Sertlik ölçümünde, parçanın yüzeyinin çizilmesi, parçanın yüzeyine düşürülen bir cismin geriye sıçraması, parçaya bir cismin darbeli yükü batırılması, parçaya bir cismin statik yükü batırılması vb. yöntemler kullanılabilir. Sertlik deneyleri dinamik sertlik ve statik sertlik deneyleri olmak

üzere ikiye ayrılmaktadır. En çok kullanılan sertlik ölçme yöntemleri; Vickers, Rockwell ve Brinell isimlerini almaktadır (Güleç ve Aran, 1993).



3. BİLYELİ ve DERİN HADDELEME

İş parçası yüzeylerinin talaş kaldırılmadan ezilmesi işlemine haddeleme işlemi denir. Bu işlem malzemeye dair mekanik özelliklerin (yorulma direnci, sertleşme, aşınma direnci) iyileşmesine ve elde edilen yüzeyin kalitesinin de (Ra iyileşmesi) artmasını sağlamaktadır. Bu özelliklerin istendiği durumlarda haddeleme işleminin taşlama (yüzey ve silindirik) işlemine göre daha çok tercih edilen bir süreç olduğu görülmektedir (Başak, 2015).

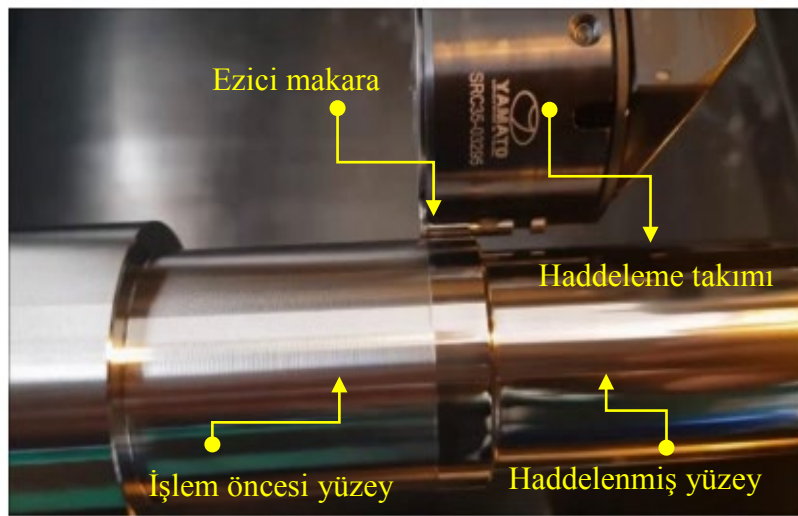
Makine imalat yönteminde çok eskilerden bu yana kullanılmakta olan haddeleme işlemi, uygulanan yüzeyde malzemeye ait seri üretimde verimliliği arttırması ve mekanik özellikleri iyileştirmesi (yüzeyin sertleşmesi) ile birlikte elde edilen yüzeyin üstün kalitesi nedeniyle taşlama yöntemine göre üstünlük oluşturmaktadır. İş parçasındaki yüzey pürüzlülüğüne ve yüzey sertliğine tesir edebilecek çok sayıda etken vardır. Bu etkenler, kullanılan takımın malzemesi, iş parçasının mekanik ve fiziksel özellikleri, kimyasal bileşimi, yüzey kalitesi ve rijitliği, geometrisi, soğutma ve yağlama ekipmanlarının kinematığı, işleme ya da şekil verme işleminin karakteristiği, ısı transfer özelliği ve akışkanlığı şeklinde sıralanabilmektedir (Başak, 2009; Vukelic ve ark., 2013).

Ra oranını iyileştirmek adına çok sayıda işleme metodu (taşlama, frezeleme, honlama, alıştırma, parlatma) uygulandığı gibi haddeleme işlemi de bu işlem adına uygulanan bir işleme tekniği olarak görülmektedir. Ucunda düzleştirici ve ezici olarak bilya veya makara kullanılan haddeleme işlemi iş parçasının yüzey katmanlarında talaş kaldırmaksızın plastik şekillendirme gerçekleştiren soğuk sonlandırma uygulaması şeklinde adlandırılmaktadır. Bu sonlandırma işleminin hedefi boyutsal bir doğruluk elde etmek değil parçaya ait çekme ve yorulma dayanımlarında iyileştirmeler oluşturmak, parça yüzey katmanlarında iyileştirilmiş mikrosertlik oranlarına kavuşmak, parça üzerinde uygun bir yüzey pürüzlülük değeri meydana getirmek, iş parçasının aşınma ve korozyon dirençlerini arttırmak şeklinde açıklanabilmektedir (Başak, 2015).

Literatür çalışmalarına bakıldığında haddeleme işleminin çeşitli malzemeler için kullanıldığı anlaşılmaktadır. Alüminyum alaşım ve karışımları ile çelik (plastik kalıp çelikleri, sertleştirilmiş çelik, çelik, ısıl işlem görmüş ve temperlenmiş çelik, St37, X5CrNiMo17-12- 2, AISI 5140) en fazla kullanılan uygulama malzemeleri şeklinde görülmektedir. Bunun sebebi ise çeliklerin ve alüminyum alaşımların, endüstrideki kullanım sahasının çok büyük olması olarak söylenebilmektedir. Literatür de pirinç,

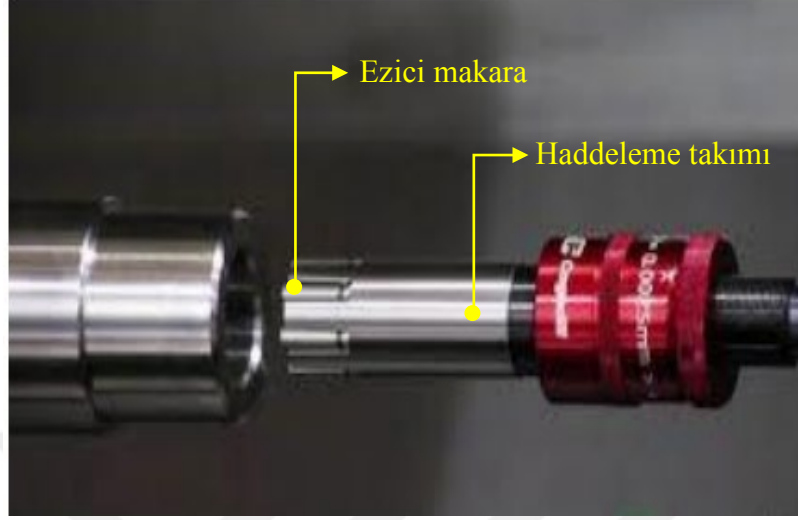
polimerler, bakır ve titanyum vb. malzemelere de haddeleme işlemi uygulandığı ve deneysel çalışmaların yapıldığı bilinmektedir (Başak, 2015). Son yıllarda magnezyum (Ramesh ve ark. 2021) ve titanyum ile ilgili uygulamalara da rastlanmaktadır (Huang ve ark. 2019; Wandra 2022).

İmalat sektöründe makine elemanları için şartlara bağlı olarak çeşitli nitelikte malzemelerden yararlanılmaktadır. Kullanılan her malzemenin yorulma dayanımı sertliği, yüzey pürüzlülük değeri, korozyon direnci ve aşınma direnci arasında farklılıklar bulunmaktadır. İş alanındaki ihtiyaçların karşılanabilmesi için malzemeye en uygun imalat yöntemi bulunup uygulanmaktadır. Uygulanan bu imalat metotları, istenilen nitelikleri sağlamada zaman zaman noksan kalmakta ve bu imalat yöntemlerine ek olarak farklı yollar kullanılmaktadır. Bunlar yüzey sertliği, yüzey pürüzlük değeri, yorulma dayanımı, korozyon direnci ve aşınma direnci gibi pek çok mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. İmalat alanında kullanılan talaşlı imalat metotları (tornalama, frezeleme vb.) elde edilen malzeme yüzeylerinde sınırlı yüzey kalitesine olanak vermektedir. Zaman zaman elde edilen yüzey değerleri uygulama nedenine birebir uymayabilmekte ve düzeltilmesi istenildiği zaman haddeleme ve taşlama gibi yüzey düzeltme işlemleri yapılmaktadır. Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme işlemi, üretim alanında yüzey bitirme yöntemleri olan lepleme, taşlama, honlama vb. klasik teknikleri adına uygulanmaktadır (Loh ve ark., 1989). Şekil 3.1’de çelik bir milin haddelenmesi ve işlem öncesinde ve sonrasında malzeme yüzeyinde ortaya çıkan olumlu farklılık görülmektedir (Akyüz, 2020).



Şekil 3.1. Çelik bir milin haddelenmesi (Anonim, 2019)

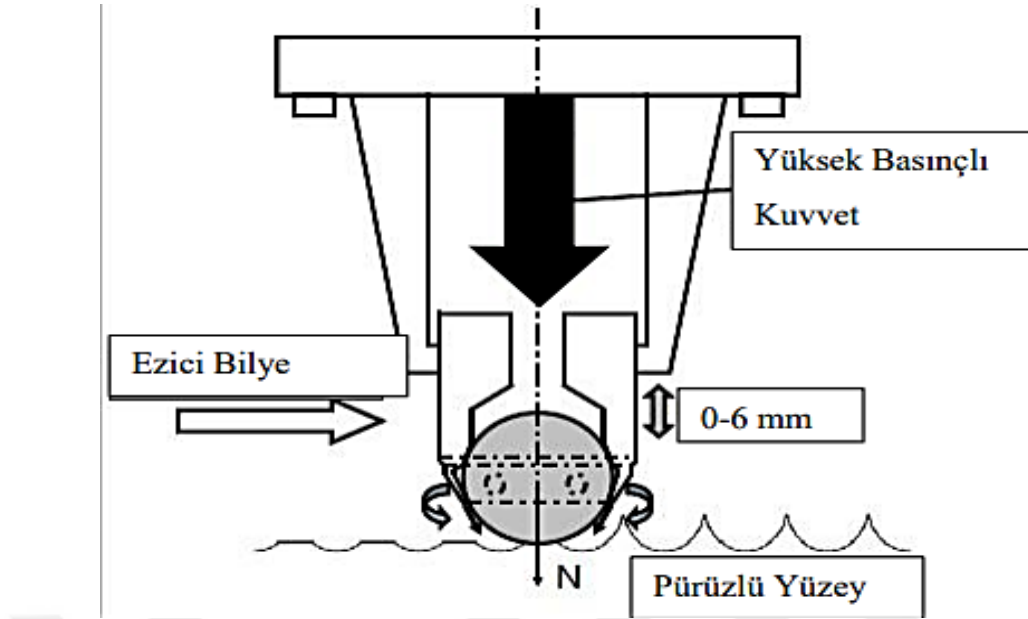
Şekil 3.2’de delinmiş bir iş parçasına bilyeli haddeleme tekniğinin uygulanma şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.2. İç delik haddeleme (Anonim, 2013)

3.1. Bilyeli Haddelme ve Derin Haddelme

Talaşlı üretimle üretilen malzemeler makine imalat sürecinde mekanik yüzey özellikleri açısından belirli bir düzeye ulaşmaktadır. Yüzey nitelikleri haddeleme, taşlama vb. sonlandırma işlemleri ile düzeltilmektedir. Bilyeli haddeleme (ball burnishing) veya derin haddeleme (deep rolling), imal edilen makine elemanlarında yüzeylerin talaş kaldırmadan plastik bozunmaya uğramasıyla yapılan, duyarlı bir yüzey işleme yöntemi şeklinde isimlendirilebilir. Bu işlem, metal parçaların silindirik, prizmatik, konik dış ve konik iç yüzeylerine uygulanabilirse de çoğunlukla tornalanmış ve taşlanmış iş parçalarının yüzeylerine uygulanır (Özkan, 2006; Mendi, 1996). Bu yöntemde, şekil 3.3'te şematik olarak verildiği şekliyle, yüzeye belirli bir kuvvetle bastırılan yuvarlanma veya sabit bir ezme takımı yardımıyla yüzeylerden talaş kaldırmadan, yüzeydeki mikro pürüz tepelerin küçük plastik bozunmalara uğratılarak düzleştirilmesi ile bir bakıma soğuk şekillendirme işlemi olarak söylenebilmektedir (El-Axir, 2000; Başak ve Sönmez, 2015).



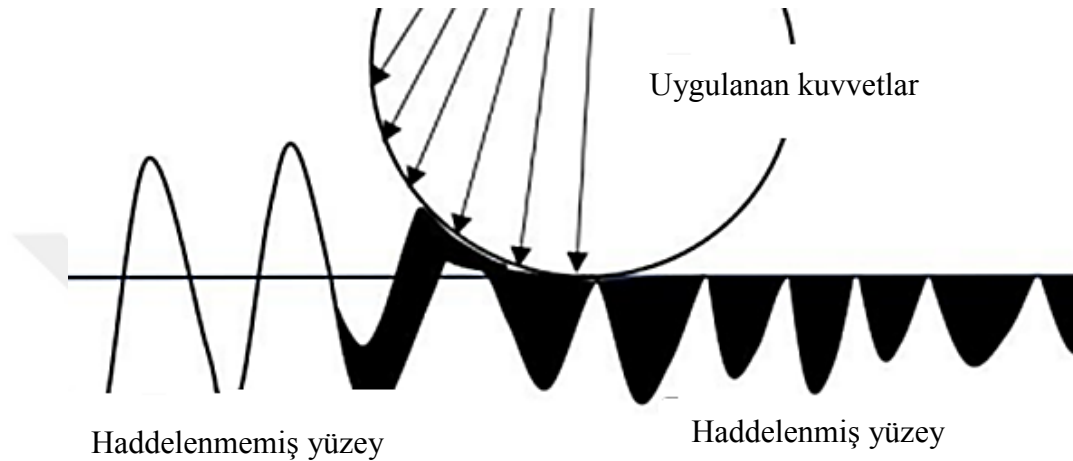
Şekil 3.3. Bilyeli haddeme işleminde takım ve numunenin hareket şekli (Aviles ve ark., 2013)

Yuvarlanmalı olan ezme takımı için gerekli olan baskı kuvveti hidrolik, yay veya manyetik baskı ile elde edilmektedir. Bu yöntem sonucunda, malzemenin yüzey sertliği artış gösterirken, pürüzlülüğü de büyük oranda azalma göstermektedir. Yüzeye uygulanmış olan gerilme şiddetine bağlı olan bu yöntem yüksek ve düşük bozulma olarak iki farklı seçenekte adlandırılmaktadır. Yüksek bozunmalarda yüzeye genellikle 30 MPa'dan daha yüksek basınçlar yapıldığından, yüzey altında oluşan artık çekme gerilme derinliğinin 1 mm'nin üstüne çıktığı görülmüştür (Akyüz, 2020).

Düşük deformasyonla haddeme, genelde miller, araç süspansiyon sistemleri, türbin kanatlarının bağlantı alanları, kaynaklı bağlantılar, kalıp yüzeyleri ile yatak yüzeyleri vb. parçalara uygulanmaktadır (Rodriguez ve ark., 2012). Bilyeli haddemenin, taşlama, honlama ve geleneksel hassas tornalama yöntemlerine kıyasla yaklaşık 15 kat daha fazla ekonomik olduğu belirtilmiştir (Luca, 2002). İşlem sonucunda, yüzeydeki çekme gerilmeleri basma gerilmelerine dönüştüğü için yorulma ömrü büyük ölçüde iyileşme göstermektedir (Akyüz, 2020).

Bilyeli veya derin haddeme yöntemi başta havacılık, medikal, otomotiv, tıp, kimya, nükleer endüstri ve paketlenme gibi sahalarda kullanılan çoğu farklı malzemelerinin haddelenmesinde kullanılmaktadır (Özkan, 2006). Talaşlı imalat neticesinde işlenmiş metal parçaların yüzeyleri profilometreyle bakıldığında, şekil 3.4'teki yapıya benzeyen yüzeylerin normalde düz olmadığı aksine yüzeyin girinti ve çıkıntılardan oluştuğu gözlenmektedir (Mendi, 1996). Haddeme işlemi ile

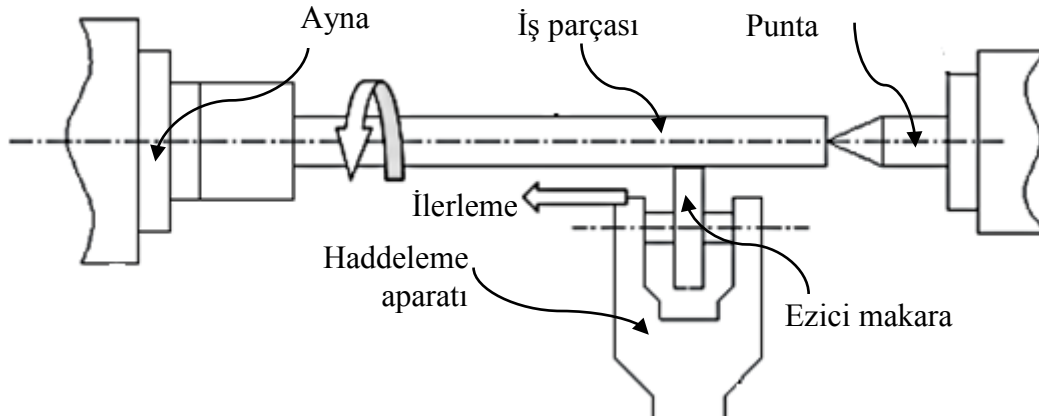
malzemelerin plastik şekil varyasyonundan faydalanılarak ortalama çizginin üstündeki çıkıntıların, dönerek veya sabit olarak çalışan çelik bilyeli veya makaralı bir ezici takım ile ezilmesiyle yüzeydeki girintili kısımlara doldurulması esastan oluşmaktadır (Akyüz, 2020). Bilye veya makaranın dönme hareketi yapması halinde bilyeli haddeleme, sabit olması durumunda ise derin haddeleme olarak işlem adlandırılmaktadır.



Şekil 3.4. Ezici bilye ile yüzeyde plastik deformasyon oluşumu (Öcalır, 2009)

Bilyeli haddeleme yönteminin torna tezgâhında kullanımına ait şematik gösterim Şekil 3.5'te görülmektedir.

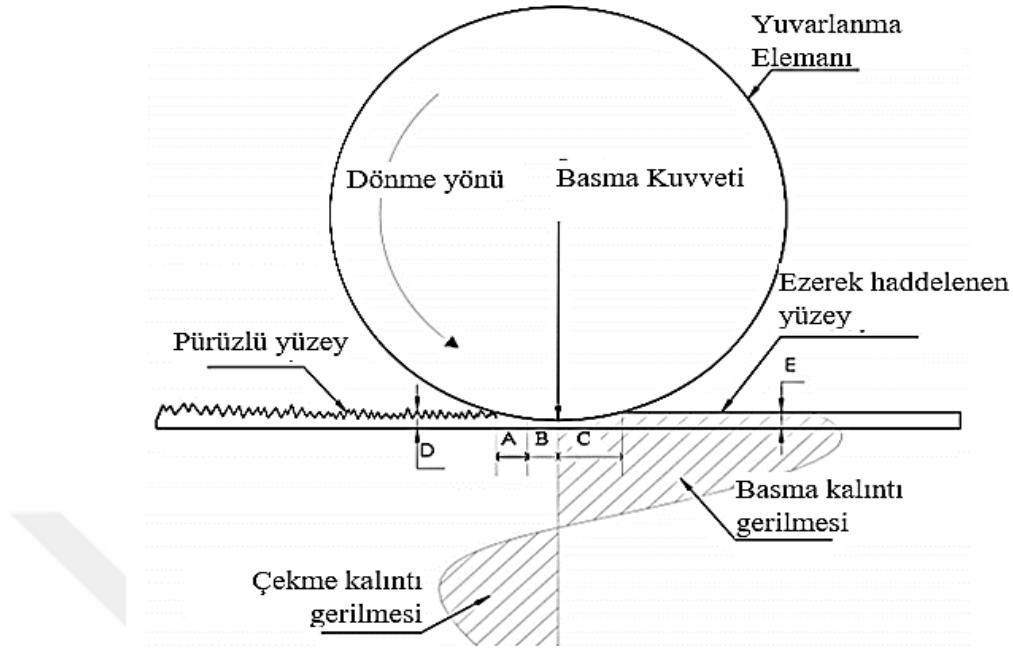
Şekil 3.5'teki haddeleme aparatı ezici olarak bir makara ile dönmekte olan iş parçası üzerinde ilerletilir. Malzemeye basınç uygulama işlemi sistemde kullanılan aparat yardımıyla yapılmaktadır. Aparata hareket verilerek parça eksenı boyunca ilerleme senkronizasyonu ile birlikte yüzeyin tamamı ezilerek şekillendirilmektedir. İş parçasında bozulma oluşarak yüzey kalınlığı malzemenin niteliklerine göre farklılık göstermektedir. Genel olarak tornalanmış yüzeylerde maksimum 15-20 mikron (μm) taşlanmış yüzeylerdeyse bu miktar en fazla 6-8 μm şeklinde öngörülmüştür (Luca, 2002). Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme yöntemiyle kompleks yüzeylerde düzgün yüzey bırakır ve düzgün şekil vermektedir (Yen ve ark., 2005). Bu yöntemle malzeme yüzeyinde bitirme özellikleri gelişmekte ve yüzey düzleşmektedir. Bilyeli veya derin haddeleme işleminde parça sökölmesi gerekmemektedir. Sadece ezici bir aparat kullanılmaktadır (Rodriguez ve ark., 2012).



Şekil 3.5. Bilyeli haddeleme yönteminin şematik olarak gösterilmesi (Hassan,1997)

Yapılan bu işlem soğuk işleme prosesi olarakta kullanılabilir. Bu proseste yüksek ve sert prosesleme niteliklerine sahip bir basınç, materyal yüzeyine yapılarak sıkıştırılmaktadır. Haddeleme sünek ve yumuşak materyallere uygulamanın yanı sıra sert metallere de uygulanabilmektedir. Haddeleme aparatıyla malzeme üzerine sıkıştırma yapıldığında materyal yüzeyi boyunca ince bir plastik akışa sebep olmaktadır. Malzeme yüzeyinden birkaç mikron dip kesiminde görülmekte ve lokal soğuk plastik bozunmasından kaynaklanan artık bası gerilmeleri malzeme üzerinden atılmaktadır. Prosesin uygulanması sonucunda yüzeyin korozyon direnci, yorulma mukavemeti, aşınma direnci özellikleri diğer yüzey yöntemlerine nazaran daha da iyileşmektedir (Prafulla ve ark., 2011). Şekil 3.6'da bilyeli haddeleme işlemindeki bilyenin yüzeydeki kalıntı gerilme dağılımı grafiği ve ezme işlemi şematik olarak gösterilmektedir.

Şekil 3.6'da görüldüğü üzere ön işlemi yapılmış iş parçasının (taşlama, tornalama, raybalama, delme) yüzeyine ilk temas A bölgesinde oluşmaktadır. İlerleme nedeniyle B bölgesine yapılan baskı kuvveti ile malzeme akma noktasına geçmektedir. Ayrıca bu bölgenin plastik bozunmasıyla D kesimindeki mikro pürüz tepeleri ezilmekte ve C kesimindeyse plastik deformasyonun ardından malzemede bir miktar elastik dönüşüm oluşmaktadır. E kesiminde de bilye malzemeye son kez temas ederek, yüzeyin pürüzsüz, parlak ve istenilen miktarlara gelmesini sağlamaktadır. Burada bilyeli haddeleme esnasında malzeme yüzeyinde oluşan gerilme yüzeyden eksene azalmaktadır. Oluşan gerilme, haddelemeye, malzeme cinsine ve işlem parametrelerine bağlı olarak yüzeye 1 mm'ye kadar nüfuz edebilmektedir. Haddeleme kuvveti bittikten sonra malzemede pekleşme ve dislokasyon artışı nedeniyle yüzey tabakasının aşağısında gerilim yığılması nedeniyle artık gerilmeler oluşmaktadır (Akkurt ve Ovalı,2009).



Şekil 3.6. Bilyeli haddeme işlemi ve malzemede meydana gelen deformasyon (Akkurt ve Ovalı, 2009)

Ra artması, yüzeydeki çentik etkisine sebep olduğundan materyal yüzeyinde çatlak oluşumuna sebebiyet vermektedir. İş parçasında meydana gelen çekme gerilmelerinin etkisi nedeniyle oluşan çatlağın ilerleme hızı artış göstermektedir. Başka bir oluşumsa yüzeyde meydana gelen basma kalıntı gerilmeleriyle çatlağın ilerleme süratinde yavaşlamanın oluşmasıdır. Malzeme yüzeyinde oluşan bu etkiler malzemenin mekanik özelliklerine etki etmektedir. Malzemede ortaya çıkan kalıntı gerilmeler yüzeyde basma gerilmesi, iç bölgedeyse çekme iç gerilmelerinin oluşması nedeniyle malzeme kesitinde denge hali ortaya çıkarmakta ve herhangi bir eksene göre momentlerin toplamını sıfırlamaktadır (El-Axir, 2000).

Bilyeli haddeme veya derin haddeme yönteminde asıl amaç belirli bir işlemi izleyen yuvarlanma veya ezici elemanın kendisine uygulanan kuvveti iş parçasının yüzeyine aktarmaktadır. Malzemeye göre uygulanacak kuvvetin şiddeti değişiklik gösterebilmektedir. Yüzeydeki mikro pürüz tepeleri bilyeli haddeme yönteminde plastik bozunmaya uğratılarak, şekil 3.6'da görüldüğü gibi malzeme yüzeyindeki çok küçük boşlukları doldurmaktadır. Bu nedenle haddeme aparatının iş parçası yüzeyinde belirli bir adım ve devirde etki göstermesi gerekmektedir. Kontrollü olarak yapılan bu bozunmanın tesiri nedeniyle yüzeydeki karışıklık giderilmektedir. Malzeme yüzeyinde sert bir tabaka oluşmakta bu sert tabaka ile aşınma direncinde pozitif bir iyileşme ve Ra değerlerinde azalma meydana gelmektedir (Akyüz, 2020).

Ezerek parlatma işlemi çelik malzemeler hariç diğer hafif metallere de (pirinç, Al vb) uygulanabilmektedir. Haddeleme işlemi, mekanik niteliklerin artırılmasının bazı nedenlerle taşlama (yüzey ve silindirik) işlemine göre seçilen bir yöntem şeklinde ortaya çıkmaktadır (Başak, 2015).

Ezerek haddeleme yönteminin yukarıdaki anlatıldığı şekliyle farklı uygulamalarının olduğu görülmektedir. Gerek uç yapısı, gerek işleme yöntemleri ve gerekse parametreler üzerinden çalışmalar hala devam etmektedir. Bu kapsamda yapılan bu çalışmada belirtildiği üzere alternatif ezme takımlarının tasarımı ile yeni tip ezme takımlarının elde edilmesi ve elde edilen bu ezme takımı ile farklı kontüre sahip tornalanmış parçaların haddelenmesine yönelik operasyonların kullanımının araştırılması önem kazanmaktadır.

3.2. Bilyeli Haddeleme ve Derin Haddeleme Yönteminin Temel Parametreleri

Bilyeli ve derin haddeleme tekniği uygulanırken bazı temel parametreler bulunmaktadır. İlerleme hızı, paso sayısı ve baskı kuvveti (hadde basıncı) gibi temel değişkenler bu parametrelerdir ve bu temel parametrelerin doğru seçilmesi bu parametrelerin direkt malzemeden beklenen yüzey özelliklerine tesir etmesi bakımından önemlidir (Akyüz, 2020).

3.2.1. İlerleme hızı

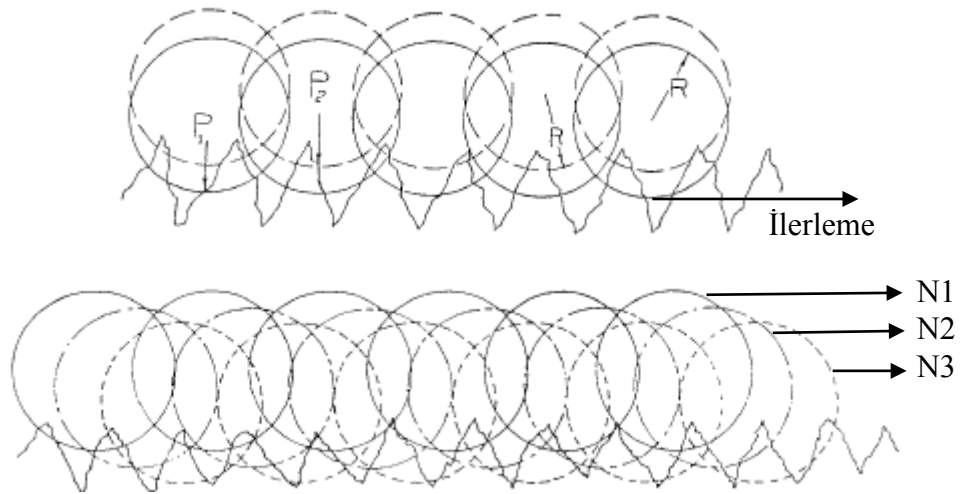
CNC tezgâhlarında, torna ve ilerleme hızı kalemliğinin malzeme üstündeki hızını belirtmektedir ve birimi mm/dak veya mm/dev şeklindedir. Bu parametre talaşlı imalatla her malzemenin işlenmesi için farklı parametre değerlerini almaktadır. Malzemeye uygun optimum ilerleme hızı yapılan deneysel çalışmalarla malzemeye uygun optimum ilerleme hızı seçilerek katalog şeklinde oluşturulmuştur. Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme tekniğinde, doğru sonuçlar bulmak amacıyla ilerleme hızı önemlidir. Her malzeme için bu değer bilinmemesi, tekniğin yeni oluşu ve deneysel çalışmaların istenilen seviyede olmaması sebebiyledir (Akyüz, 2020). Çalışmaların çoğunda özellikle de Ra değerlerinin değerlendirilen çalışmalarda en etkin parametrelerden biri olarak ilerleme değerinin olduğu belirtilmektedir.

3.2.2. Haddeleme kuvveti (Baskı kuvveti)

Haddeleme kuvveti, birimi Newton (N) olarak bilinen ve malzemede birim başına uygulanan yük olarak tanımlanır. Bazı çalışmalarda bar veya kg olarak ta ifade edilmektedir. Malzemede plastik şekil deformasyonu baskı kuvvetiyle oluştuğu için bu değerin seçimi direkt bulunacak sonuca etki etmektedir. Malzemede istenmeyen şekil değişimi ve yüzeydeki bozunmanın çok olması baskı kuvvetinin yüksek seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme tekniği temelde yüzeydeki tepe noktalarını plastik şekil farklılığına sebep olarak çukur olan alanları doldurma işlemidir. Böylelikle yüzeydeki çukur ve tepe noktaları birbirine yakınlaştırılarak daha doğru bir şekil bulunmaktadır. Bu sebeplere bakıldığında bilyeli haddeleme tekniğinde baskı kuvvetinin uygun seçilmesi önem arz etmektedir (Akyüz, 2020). Uygulanacak kuvvetin malzemenin akma sınırını aşacak şekilde verilmesi gerekmektedir.

3.2.3 Paso sayısı

Haddeleme işleminin yinelenmesi anlamına gelmektedir. İstenilen özelliklere göre bu değer belirlenmektedir. Bilyeli haddeleme işlemi, istenilen sayıda ya da kademeli tekrar edilebilmesi yüzey özelliklerini istenilen ölçülere getirmeyi amaçlamaktadır (Akyüz, 2020). İlk pasoda yüzey üzerindeki çukur (vadi) kısımları kademeli olarak sonrasında da ikinci ve üçüncü pasolarla kalan çukur kısımların doldurulması gerçekleştirilmektedir (şekil 3.7).



Şekil 3.7. Paso sayıları ile yüzey düzeltme aşamaları (Hassan, 1997)

3.3. Bilyeli ve Derin Haddeleme Yönteminin Avantajları

Bilyeli ve derin haddeleme yöntemi sahip olduğu avantajları sebebiyle yüzey iyileştirme yöntemleri içinde daha fazla ön planda görülmektedir. Yöntemin bazı avantajları aşağıda verilmiştir.

- Yüzey, yüksek kalitede bulunur.
- Yüzey kalitesinin iyi olması ve ek işleme gerek kalmadan kullanılabilmesi; doğru ölçü hassasiyeti sağlamaktadır.
- Yüksek duyarlılık isteyen parçaların yapımın da sonuncu işlem olarak kullanılmaktadır.
- Honlama, taşlama vb. materyallere yapılan ikincil operasyonlarda çoğunlukla yüzey pürüzlülük miktarında düzelme oluşurken bu teknikte yüzey pürüzlülük miktarı, korozyon direnci, aşınma direnci, yüzey sertliği, yorulma dayanımı gibi niteliklerde de düzelme olmakta, malzemenin akma ve çekme dayanımı yükselmektedir.
- Teknikte uygulanan aparatın imalatı ve tasarımı öteki tekniklere nazaran daha ekonomik ve kolaydır.
- Geleneksel yüzey işleme yöntemlerine göre işleme süresi çok kısadır.
- Bu üretim tekniği malzemeden talaş kaldırılmaksızın uygulanan bir tekniktir.
- Talaşlı üretime göre minimum fire ile üretim sağlanmaktadır.
- Malzeme liflerinin sürekliliği bozulmaz dolayısıyla üretilen parçaların mukavemetine iyi yönde tesiri olmaktadır.
- Haddeleme aparatını klasik tornalama tezgâhlarına bağlayarak işlem gerçekleştirilir, bu nedenle bilyeli haddeleme işlemini gerçekleştirilebilmek adına özel bir tezgâha gerek duyulmaz.
- Seri üretimde uygulanabilirliği, taşlama işlemine nazaran yüksektir.
- Çok ustalık istemeden gerçekleştirilebilen bir işlemdir.
- Konik ve silindirik materyallerin, prizmatik metal parçaların yüzeyine, iç ve dış yüzeylerine uygulanmaktadır.
- Bu işlem için kullanılan takımın tasarım süreci ve yapımı, öteki takımlara oranla basit ve maliyeti düşüktür.
- Yüksek üretim gücüne sahip bir tekniktir ve kısa zamanda istenen yüzey kalitesi elde edilmektedir.

- Elektrik gücü ve toplam enerji gereksinimi öteki yüzey işleme proseslerine nazaran çok düşüktür.
- Elde edilen yüzey kalitesi çok iyi olduğundan yüzeylerde sürtünmeyi azaltmakta ve enerji tasarrufu sağlamaktadır (Yen ve ark., 2005; Luo ve ark., 2006; Korzynski, 2009).

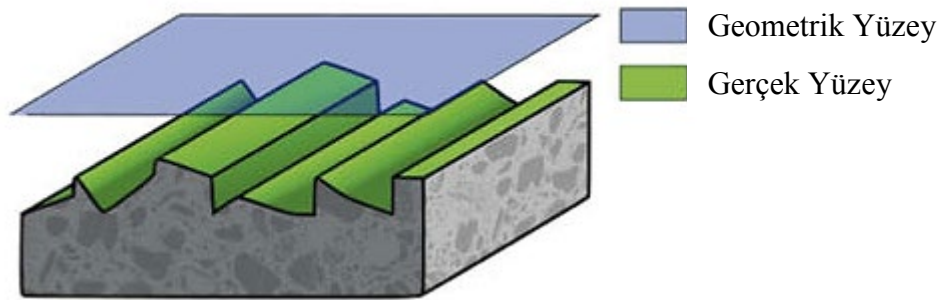
3.4. Bilyeli ve Derin Haddeleme Yönteminin Dezavantajları

Bu tekniğinde birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar aşağıda verilmiştir.

- Malzemenin ezilmesi prensibi ile yapılan bir işlem olduğundan malzemenin haddeleme işlemine tepki vermesi ezilme kabiliyetine bağlı ve yapısı sert malzemelerde olumlu etkisinin sınırlı bulunmasına sebeptir. Bu nedenle işlem ezilebilir yumuşak malzemelerde etkili ve olumlu neticelenmektedir.
- İşlemden etkili olan parametrelerden paso sayısı ve baskı kuvveti gibi değişkenlerin olması gereken değerde verilmemesi durumunda yüzeyde olumsuz sonuçlara neden olmaktadır.
- Bozunma başlatmak ve devam ettirmek adına yüksek kuvvetlere ihtiyaç vardır.
- Daha güçlü ve büyük tezgâhlar gerektirmektedir.
- Süneklik daha düşüktür.
- Yapılan çalışmaların yeterli düzeyde olmaması ve yöntemin yeni olması sebebiyle malzemeler için optimum değerlerin sınırlı olarak kaldığı bilinmektedir (Özgün, 2010; Öcalır, 2009; Yurtoğlu, 2005).

4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Seri üretime geçilmesiyle birlikte standart ürünlerin üretilmesi zorunlu hale gelmiştir. Yüzey kalitesi bu ürünlerin üretilmesinde ölçü tamlıklarının yanı sıra önde gelen etkenlerden biridir. Yüzey kalitesini iyileştirmede yalnızca materyal alanında gelişmelerin yanında soğutma sıvısı, kesici takım malzemesi, takım tutucu, takım geometrisi, takım tezgâhı ile işleme şekli vb. birçok sahada da yenilikler yapılmaktadır. Tasarımcıların, teknikerlerin ve diğer çalışanların birbirleriyle etkileşim halinde olmalarına, imal edilen malzemede Ra, bitirilmiş yüzey, yüzey yapısı ve yüzey karakteristik terimleri vb. sınıflandırmalar ve semboller olarak sağlamaktadır. Bu terminoloji bazı nitelikleri verilen bir yüzeyin yapımında belirtilen niteliklerin doğru olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır (Demir, 2002). Yüzey kalitesi modern talaş kaldırma tekniklerinde boyutsal yeterliliğin yanı sıra önemli bir yere sahiptir ve parçaların aşınmasında birbirleriyle çalışan yüzeylerin kalitesi önemli etkindir. Standartlara göre, yüzeyin nesneyi başka bir yüzeyden, alandan ya da maddeden ayırmasına ve bir nesnenin bir yüzey tarafından sınırlanmasına gerçek yüzey adı verilmektedir. Geometrik olarak mükemmel yüzey şeklinde düşünülmektedir. Gerçek yüzey ise cismi çevresindeki ortamdan ayıran ve sınırlayan yüzey olarak bilinmektedir (şekil 4.1).

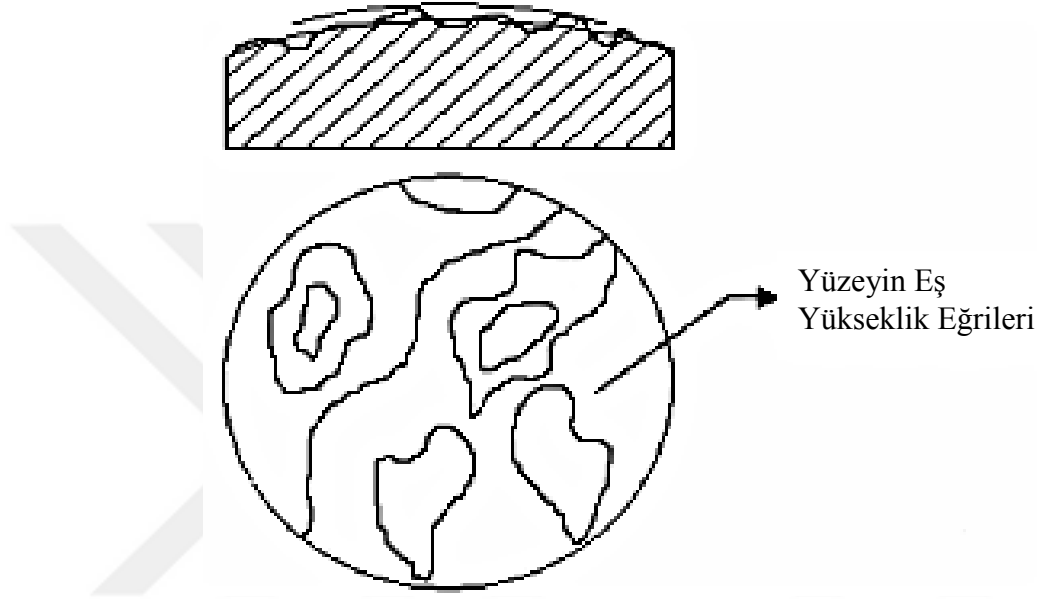


Şekil 4.1. Yüzey Şekilleri (Anonymous, 2019)

Yüzey yapısı, sapmaları gösterir ve sapmalar tekrarlı ya da gelişigüzel olabilir. Geometrik açıdan kusursuz yüzey olarak bilinen yüzeye geometrik yüzey adı verilmektedir. Projelerde ya da farklı teknik belgelerde anma biçimi olarak tarif edilen ideal yüzey olarak bilinmektedir (şekil 4.2) (Demir, 2002).

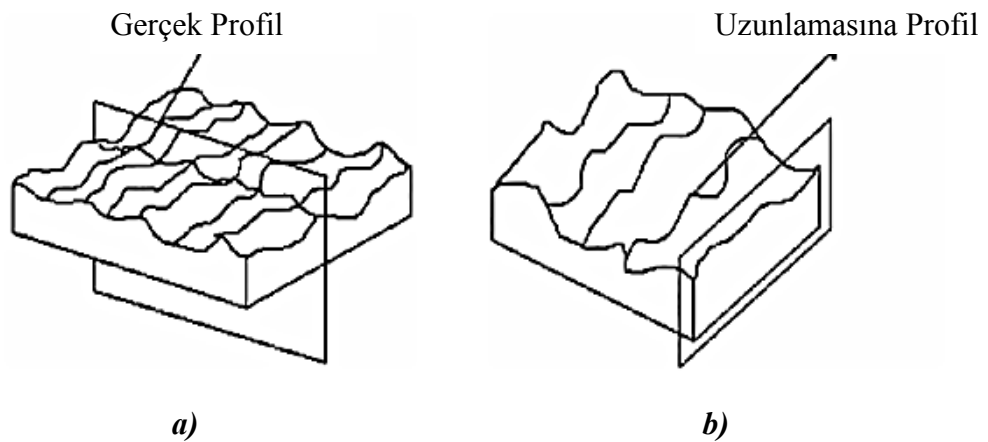
Ra, kullanılan imalat metotlarıyla ve diğer etkilerle meydana gelen alışılmış türde çoğunlukla farklı düzensizliklerle sınırlanan oldukça küçük aralıklı yüzey düzensizlikleridir. Kesici takımında BUE oluşumu, takımın hatalı bağlanması ile titreşim vb. etkiler düşürülürse ideal Ra sağlanabilmektedir (Bayrak, 2002).

Eş yükseklik eğrileri, gerçek yüzeyin eş aralıklı kesitle ortaya çıktığı ara kesitlere denmektedir (şekil 4.2).



Şekil 4.2. Yüzeyin eş yükseklik eğrileri (Demir, 2002)

Gerçek profil, pürüzlü bir yüzey ve bir düzlemin ortaya çıkardığı ara kesit çizgisinden oluşmaktadır (şekil 4.3).



Şekil 4.3. Yüzey profil şekilleri (Demir, 2002).a) Gerçek profil b) Aperiodyik profil

Aperiyodik (uzunlamasına) profilde gelişigüzel bir fonksiyonla ifade edilebilen periyodik olmayan, zamansız profiller olup kumlama ya da taşlama vb. imalat yöntemiyle oluşan profil şeklidir (şekil 4.3) (Scarr, 1991).

4.1. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler

Ra yukarıda da kısaca değinildiği gibi çok farklı parametrenin birleşimi ve etkileşiminden kaynaklanan bir sonuçtur. Bunları maddeler halinde sıralarsak yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- İşlenen malzemenin süreksiz talaş vermesi,
- Kesici takımdaki titreşimler,
- Talaş derinliği,
- İlerleme miktarı,
- Kesici takım geometrisi,
- Kesici ucun üstüne talaşın yapışması (BUE),
- Kesme hızı,
- İşlenen iş parçasında oluşan titreşim ve balans,
- Bir önceki yüzey kalitesi (Neşeli ve Yıldız, 2006; Gural, 1999).

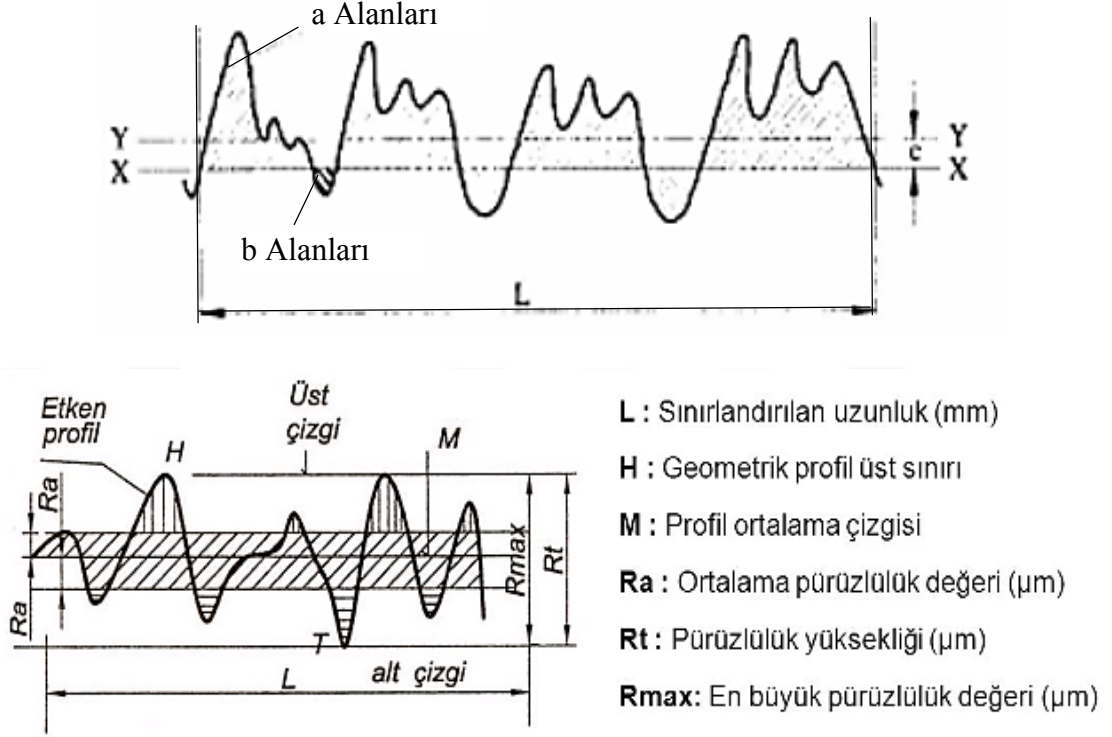
4.2. Yüzey Kalitesinin Sayısal Olarak Değerlendirilmesi

Ölçme sorunlarını minimuma düşürmek amacıyla ölçülecek yüzeyi üç boyuttan iki boyuta düşürerek ve grafiksel ortalamalarıyla neticeye bağlamak mümkündür. Bu teknikle yüzey kalitesini pratik olarak ölçmek çokta doğru olmaz. Bundan yola çıkarak yüzey kalitesinin sayısal olarak değerlendirilmesinin daha doğru olacağı grafik metodunu yorumlamanın basit olmadığından çıkarılabilir. Çoğunlukla zarf sistemi ve ortalama çizgi olarak bilinen yöntemler, yüzey kalitesinin sayısal olarak değerlendirilmesi yöntemi kullanılabilir (Tekaüt, 2008).

4.2.1. Ortalama çizgi (M) sistemi

Bulunan geometrik profili gösteren bir çizgi olarak tanımlanabilmektedir. Ortalama çizgi geometrik profili gösteren bir çizgiye konulmuştur. Nedeni ise çizgiyle profil arasındaki ordinatlarının karelerinin toplamı en düşük olacak şekilde

yerleştirilebilmelidir. Bu çizginin altında ve üstündeki profili oluşturan alanlar (a ve b) birbirine eşit olup, ortalama ya da merkez çizgisi pratikte profilin genel yönüne paralel bir çizgi şeklinde bulunabilir (Tekau, 2008).



Şekil 4.4. Ortalama çizgi konumunun belirlenmesi (Scarr, 1991; Anonim, 2017)

Bir profil için verilmiş olan ortalama çizginin konumu, aşağıda verilen 4.1. denkleminde açıklanan yöntemle bulunabilir. Bir XX doğrusu çizilir ve çizilen bu çizgi uygun örnekleme uzunluğu (L)'nin üstündeki profilin genel yönüne paralellik oluşturur. a ve b alanları, planimetre ya da ordinat metodu uygulanarak ölçülebilmektedir. Aşağıdaki eşitlikle, XX ve istenen ortalama çizgi YY arasındaki c mesafesi belirlenmektedir (Neşeli ve Yıldız, 2006).

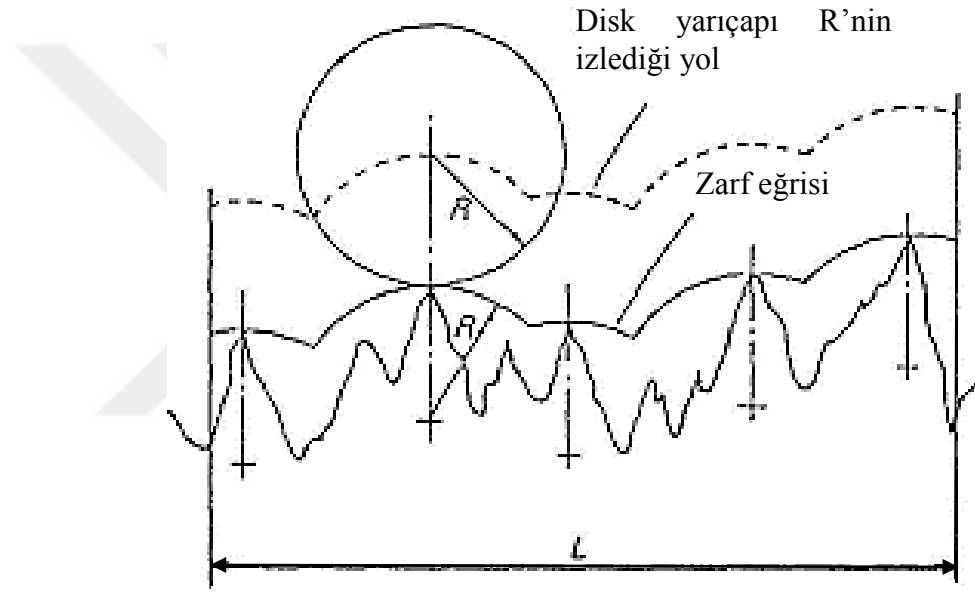
$$C = \frac{\sum \text{Alan}(a) - \sum \text{Alan}(b)}{L} \quad (4.1)$$

4.2.2. Zarf sistemi (E)

Bir dairenin yarıçapı tarafından üretilen bir çizginin izlere karşı yuvarlanabilmesine dayanmaktadır. R mesafesi tarafından düşey şekilde konulmuş olan

eğri daire merkezinin hareketinden meydana gelmektedir. Yüzeyin üstünde bulunan bu çizgi şekil 4.5'te görüldüğü gibi zarf eğrisi, ideal geometrik profile dik açılardan en yüksek profile doğru çizilen ordinatlardan oluşturulmaktadır (Tekaüt, 2008).

Zarf eğrisini yarıçap R 'nin dairesel yayları ordinatlar üzerindeki merkezleriyle birlikte tepelere doğru çizilerek oluşturmaktadır. Eğrinin meydana gelmesi yüzey kalitesinin grafik çıktısının yatay ile dikey eksenlerde aynı miktarda büyütüldüğünü belirtmektedir. Dikey büyümelerin yataydaki büyümelerden dikkati çekecek kadar çok olmasıyla dairesel yayların bozularak eliptik şekil oluşması olağan bir durumdur (Tekaüt, 2008).



Şekil 4.5. Zarf eğrisinin elde edilişi (John ve Joseph, 2001)

5. TRİBOLOJİ

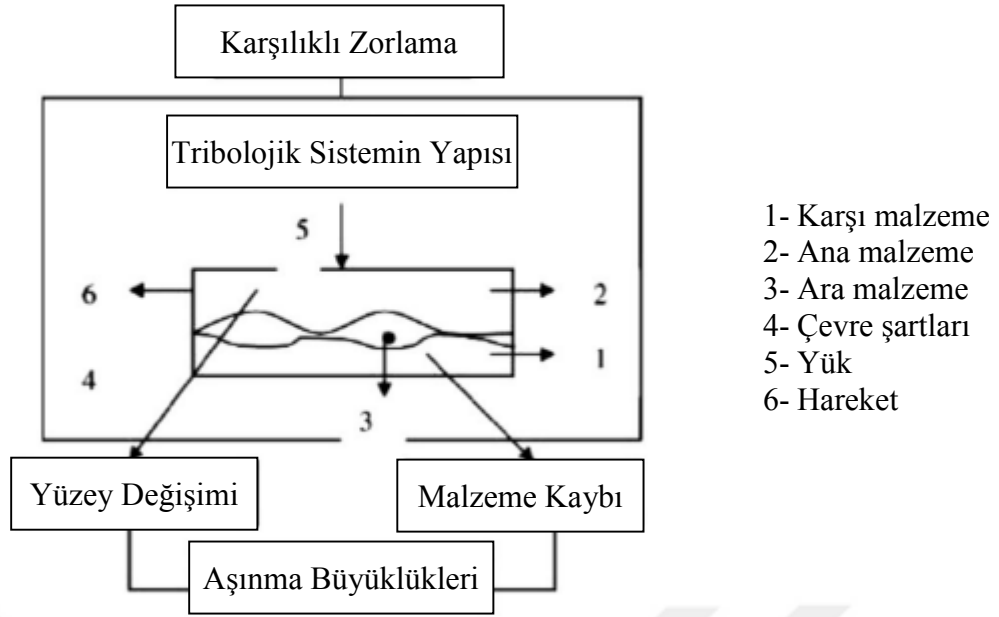
Bir izafi hareket halinde birbirleriyle etkileşime giren yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların tekniği ya da bilimi şeklinde tanımlanır. Yunanca kelime olarak sürtünme manasını içeren tribos sözcüğünden oluşturulan triboloji aşınma, sürtünme ve yağlanmanın bilimsel çalışmasını ve tribolojik bilgilerin uygulamasını kapsamaktadır (Zumgahr, 1987).

Triboloji, birbiriyle çalışan sistemlerde meydana gelen sürtünme, aşınma ve yağlama koşullarının incelenmesidir (Akça, 2019).

5.1. Tribolojik Sistem

Tribolojik sistemler, sürtünme ve aşınmaların meydana geldiği sistemlerdir. Mühendislik malzemelerindeki sürtünme ve aşınma davranışlarını tespit etmek için mekanik sistemleri tribolojik sistemler olarak düşünmek gerekmektedir. Başka bir deyişle, sürtünme ve aşınmayı içeren olayın bir sistem bütünlüğü olarak değerlendirilmesi gerekir (Akça, 2019). Şekil 5.1'de tribolojik bir sistem görülmektedir.

Sistemi oluşturan elemanlar, karşı malzeme (aşındıran), ana malzeme (aşınan), ara malzeme, hareket, yük ve çevre şeklinde söylenebilir. Sıralanan tüm bu sözcüklerin tamamını sistem içerisinde bulundurmaktadır. Ana malzeme ve karşı malzeme bir aşınma çifti meydana getirir. Az veya yoğun yük altında hareket etmeye başladıklarında aralarında belli bir ara malzeme varken aşınma başlamaktadır. Mineral, metal, ağaç, kauçuk, plastik, deri vb. katı cisimlerden ana malzeme oluşmaktadır. Aşındıran malzemeler de mineral, plastik, metal, ağaç vb. olduğu gibi sıvı ve gazlarla karışımı halinde de olabilmektedir. Ara malzelerse aşınma parçacıklar, yağlar vb. ya da hiçbir madde de olmayabilir. Yükleme darbeli, darbesiz, değişken, sabit, vb. ya da bunların birkaçının bir arada olması şeklindedir. Hareketse kayma, kaymalı yuvarlanma, darbe, yuvarlanma gibi şekillerdedir (Akça, 2019).



Şekil 5.1. Tribolojik sistemin şematik gösterimi (Onaran, 1985)

Model sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılınmasının sebebi olarak; test cihazlarının, gerçek sistemlerde tesirlerinin analiz yapılabilmesinin zorluğu ve ölçümlerinin fazlaca sürede, zorlukla uygulanabilmesinden kaynaklanmaktadır. Araştırmacılar çoğunlukla araştırdıkları sistemi düşünerek çalışmalarında uygulayacakları aşınma test cihazını seçip, tasarlarlar. Böylelikle bu test cihazları kısmi olarak standartlaştırılmış olur. Fakat standart test cihazlarında her sistemin koşullarını elde etmek pek kesin değildir (Koç, 2010; Güleriyüz, 2011).

Tribolojik sistemde unsurların birbiri ile etkileşimi ön planda olmasından dolayı burada aşınma mekanizmaları ön plana çıkmaktadır. Tribolojik sistemde meydana çıkan aşınma mekanizmaları farklı olabilir. Tribolojik sistem içinde abrasiv aşınma, adhesiv aşınma, korozyon aşınması ve yorulma aşınması gibi mekanizmalar şeklinde tanımlanan aşınma, genellikle tek bulunmamaktadırlar (Akça, 2019). Sistemde aşınma tek bir tür olarak çıkabileceği gibi ikili şekilde de çıkabilir. Tribolojik sistemlerde ana etken aşınma olayı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan tekli veya ikili aşınma türleridir.

5.2. Aşınma

Aşınma, dış etkiler altında yüzeylerde ortaya çıkan fiziki değişimler olarak tanımlanır (Akkurt, 1990). Mühendislik malzemelerde görülen yıpranmanın aşınma olarak sayılması adına aşağıda yer alan koşulları sağlaması gerekir.

- Sürtünmenin (bağıl hareketin) olması,
- İsteğimiz dışında oluşması,
- Yavaş ve devamlı olması,
- Mekanik bir tesir olması,
- Malzeme yüzeyinde farklılık oluşturmastır.

Aşınma, sürtünme halinde yer alan yüzeylerde mekanik tesirlerle amaçlanmadığı halde kopan malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde yüzeylerin ilk şekilleri değişir ve parçalar içerisindeki boşluklar büyümektedir. İstenen işleve normal halde ulaşılmaz (Akkurt, 1990).

Kompleks bir sistem niteliği belirten ve sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz olan aşınma, sanayide korozyonun ve yorulmanın dışında üçüncü büyük sorun şeklinde meydana gelmektedir. Bu sebeple günümüzde araştırmalar da aşınmayı azaltmayı ve sürtünmeyi düşürme üzerine yoğunlaşmaktadırlar. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılması malzeme kaybının önüne geçerek boyut hassasiyeti korunurken diğer yandan enerji savurganlığı da önlemiştir (Hutchings, 1992).

Aşınma, ne bir malzeme ne de bir malzemenin yüzey özelliğini oluşturmaktadır. Aksine bir sistem özelliğidir. Bundan sebeple çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın devamlı gözden geçirilmesi gerekmektedir (Özyaman, 2017).

Aşınmanın başlayabilmesi ve sürekliliğinin olabilmesi adına sürtünmenin oluşması gerekmektedir. Sürtünen iki nesnenin bağlantı kısmı, görünen bağlantı kısmından ufaktır. En hassas işleme teknikleriyle dahi uygulanan katı malzemeler asla düz yüzeye sahip olmamaktadırlar (Cöcen ve ark., 1997).

İmalat yönteminde, tam bir şekilde pürüzsüz düz yüzey bulunması mümkün değildir. Yüzey işlemede uygulanan yontucu araçlar ve kesiciler ne kadar hassas bir şekilde hazırlansa bile, işlemden sonra yüzeyde illaki birkaç mikron yüksekliğinde mikroskobik pürüzler oluşmaktadır (Portakal, 1974). Yüzeylerin birbirine değmesi ile yüzeylerde oluşan pürüzler birbirinden etkilenmektedirler. İlk değme, pürüz tepeleri

içinde meydana gelir ve pürüz tepeleri arasında yer alan girintilere değmezler. Temas halinde bulunan pürüzlerin toplam alanını, gerçek temas alanı göstermektedir. İlk temas eden pürüzler ezilerek şeklinin farklılaşması yük fazlalaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu olaydan sonra ise yeni ufak boyutlu pürüzler birbirleriyle temas haline geçerler. Pürüz sayısı, yüklemenin temas haline geçmesiyle düşer. Gerçek temas alanı görülen temas alanına yaklaşma işlemi olmaktadır. Sisteme yük ve hareket halinde bir enerji sokulmaktadır ki, temas halinde bulunan cisimlere bağlı hareket yaptırabilsin. Giriş ve çıkış arasında olan fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisi ile aşınmaya dönüşmektedir (Odabaş, 1991; İpek, 1992).

5.2.1. Aşınma türleri

Pek çok araştırmacı, malzemelerin aşınması üstüne hazırladıkları çalışmalar sonucunda aşınmayı çeşitli şekilde sınıflandırma yapmışlardır (İpek, 1992).

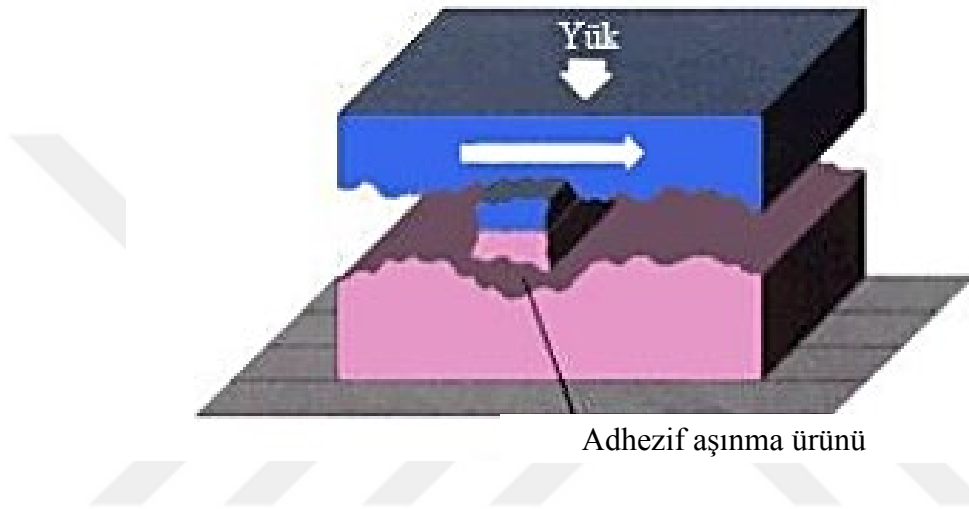
En genel bilinen aşınma türleri ise aşağıda yer almaktadır.

- 1) Adhesif aşınma
- 2) Abrasif aşınma
- 3) Tabaka aşınma
- 4) Koroziif aşınma
- 5) Yorulma aşınma
- 6) Erozyon aşınması

5.2.1.1. Adhesif aşınma

Moleküler kuvvetlerin tesiri altındaki temas yüzeylerinde meydana gelen alansal kaynak bağlarının kırılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri içerisinde kayma sürtünmesi yapan adhesif çekim kuvveti oluşması mümkündür ve moleküllerin birbirine yaklaştırılmasıyla ilgilidir. Temas esnasındaki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı ya da tesir eden bir kuvvetle, temasta olan çok ufak pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak tesir ederler. Basınç bu noktalardaki gerilme pürüzlerinin akma sınırını aşınca pürüzlerin birbirini çizmesine, plastik bozunmaya, yarması ile sıvanıp kaynaklanmalarına neden

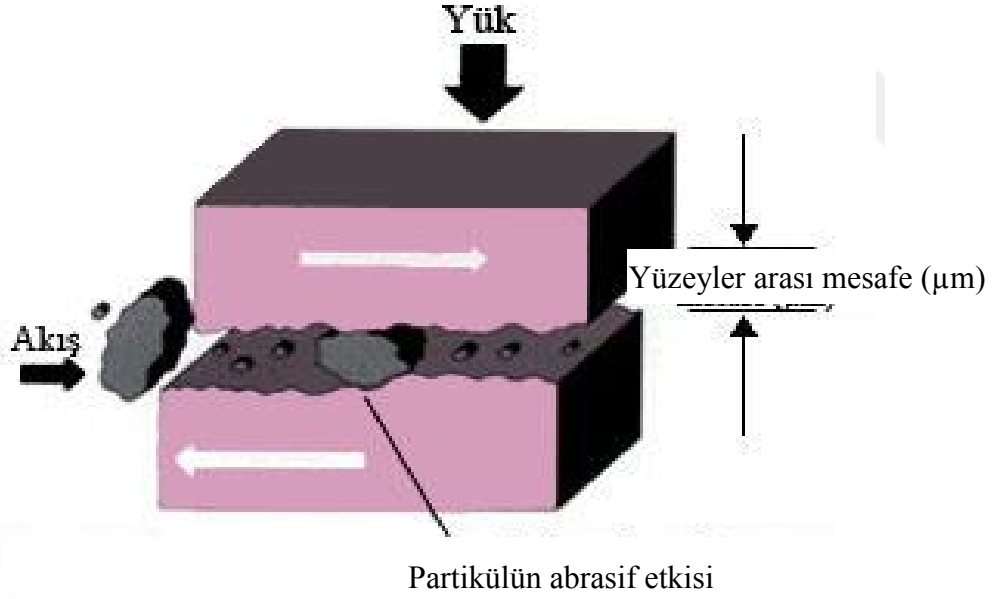
olmaktadırlar. Bunun yanı sıra pürüzlerin bozunması ve meydana gelen mikro yapı adhesif temas yüzeyi boyunca yayılım göstermektedirler. Çiftin karşılıklı hareket etmesindeyse yüzeyde olan absorbe olmuş sıvı ya da gaz molekülleri ile oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmaya sebep olmaktadır. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ile aşınmaya sebebiyet verirler. Bu tarz malzeme kaybı adhesif aşınmayı oluşturmaktadır (Onaran, 1985; Gürleyik, 1986; Odabaş, 1991; İpek, 1992).



Şekil 5.2. Bir adhesif aşınma örneği (Onaran, 1985; Gürleyik, 1986; Odabaş, 1991; İpek, 1992)

5.2.1.2. Abrasif aşınma

Hareketin etkisi ile uygulanan yük; sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri ya da taneleri aracılığıyla ötekini çizerek üstünden mikro talaş kaldırması durumuna denilmektedir. Abrasif aşınma; katı/mineral, katı/sıvı, katı/katı gibi pek çok sürtünme elemanlarında oluşan tarifi kapsamaktadır (Habig, 1980; Karamış, 1986).



Şekil 5.3. Bir abrasif aşınma örneği (Habig, 1980; Karamış, 1986)

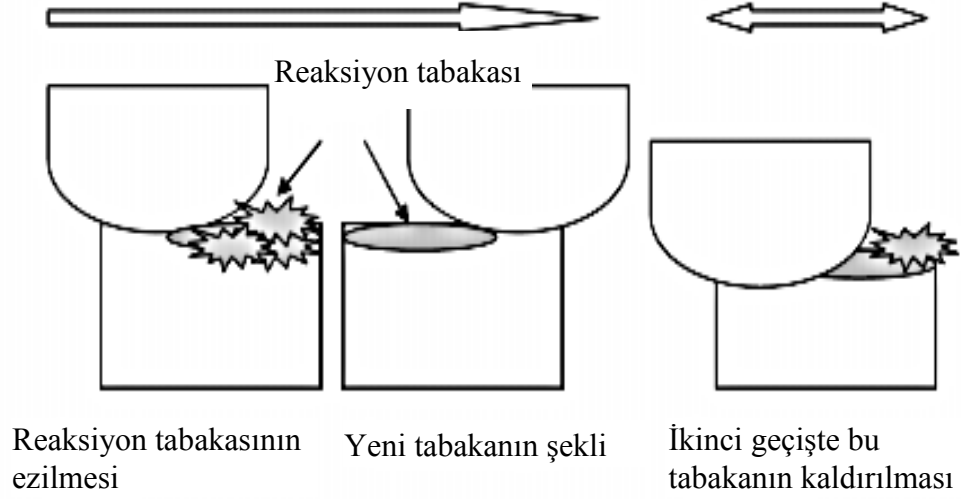
5.2.1.3. Tabaka aşınması

Temas eden iki cismin izafi hareketi esnasında, hareketin başlatılması ile devamında gerekli kuvvet, farklılık göstermesi durumuna tabaka aşınması denir. Sürtünme hali içerisindeki bu iki direnç farkı bilhassa ufak kayma hızlarında sürtünme titreşimlerinin oluşmasını sağlamakta ve tribolojik zorlanmalara işaret etmektedir. Temas yüzeyleri içerisinde ufak genlikli titreşimlerin sonucu bir oksit film meydana gelmekte ve sürtünmeyle hızlanmaktadır. Yüzeyin içerdiği bazı maddelerin tepkimesi sonucunda ortaya çıkan oksit tabakası da tribo oksidasyon şeklinde tanımlanmaktadır. Gaz ya da sıvı bir atmosferdeki oksijenin kısmi basıncı dayanımına, oksit oluşma hızına ve biçimine tesir etmektedir (Tekin, 1986).

5.2.1.4. Koroziif aşınma

Temas yapısı değişik tabakaların oluşmasıyla sürtünme hareketi ve tabakaların parçalanıp yüzeylerinde meydana gelen mekanik yıpranmaların dışında kimyasal ile elektro-kimyasal tahribatların meydana gelmesine korozyon adı verilmektedir. Metal alaşımlarının ya da metallerin çevreleriyle (gaz, katı ve sıvı ortamlar) kimyasal ya da metalurjik ilişki nedeniyle yüzeylerinde aşınma sonucu ortaya çıkan hasara koroziif

aşınma adı verilmektedir. Bu aşınma için gerekli olan koşul, sürtünme hareketinin ve korozyonun bulunmasıdır. Korozif aşınma, abrasif ve adhesif aşınmalarla meydana gelebilir (Tekin, 1986). Korozif aşınma şeması şekil 5.4’ te ki gibidir.



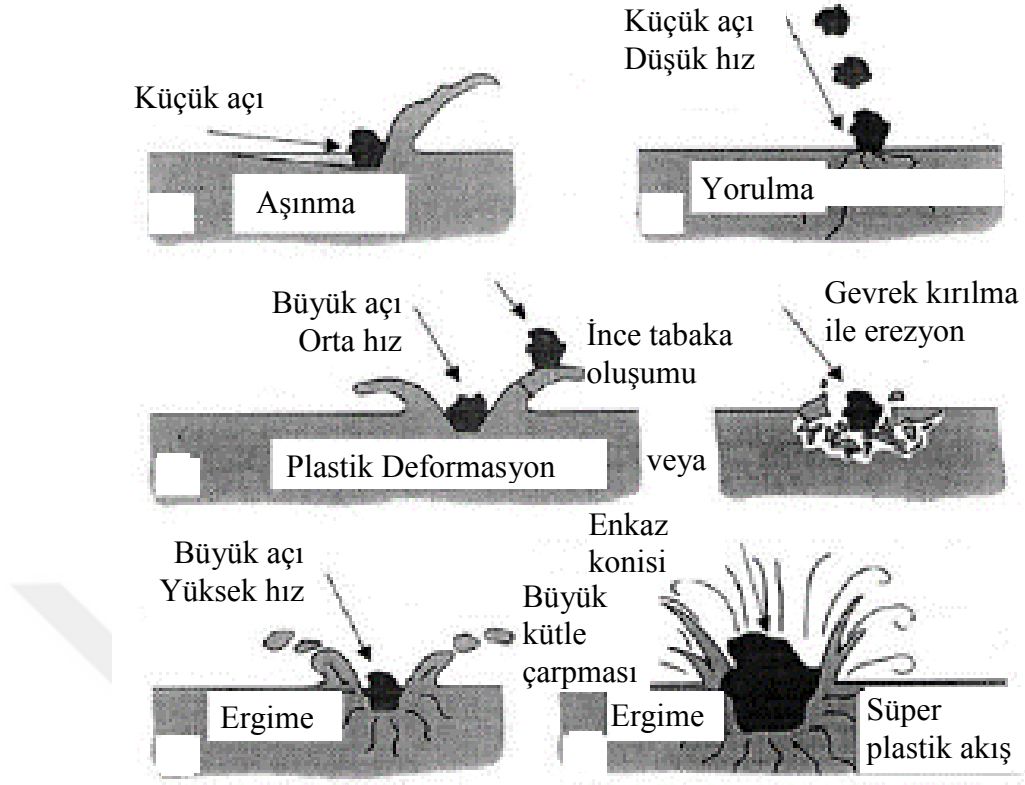
Şekil 5.4. Korozif aşınma şeması (Koç, 2004)

5.2.1.5. Yorulma aşınması

Yorulma olayı mühendislik malzemelerinde yinelenen zorlanmalar altında, zamanla ortaya çıkar ve sürekli yüzeyden başlar. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlanma altında olduğunda ya da sürtünme elemanları yinelenen gerilimlerle etkileştiklerinde bu gerilmelerin neden olduğu mikro çatlaklar yoluyla yorulma aşınması söylenilen pulcuklar halinde malzeme kopmaları meydana gelmektedir. Bu durum sırasında içyapıda yırtılmalar ile parçalanmalar meydana gelerek yüzeyde kısmi çözümler oluşmaktadır (Gürleyik, 1980).

5.2.1.6. Erozyon aşınması

İçerisinde katı parçacıklar olan akışkanın yüzeye çarpması neticesinde oluşmaktadır. Başka bir ifadeyle, belirli bir hızı bulunan katı parçacıkların metal yüzeye çarptığında, yüzeyin üst katmanında malzeme kaybı oluyorsa, meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir (şekil 5.5).



Şekil 5.5. Erozif aşınmanın şematik görünümü (Özyaman, 2017)

Üst tabakadaki malzeme kaybı devam ediyorsa uygulama alanına bağlı önemli mekanik problemlere yol açabilmektedir. Makine elemanlarının erozif durumlarda olması halinde yüzeylere sıvı damlaları ya da katı parçacıklarının çarpması neticesinde malzeme uygulama süreleri düşmektedir (Özyaman, 2017).

Orta hızlı ve düşük hızlı katı parçacık aşınmasına uğrayan sünek metal materyaller önce ağırlık kaybı bulunmadan yüzeyde bozulma oluşur. Daha sonra ise malzeme kaybı prosesi oluşmaktadır (Bayındır, 2009).

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Deney Malzemesi ve Deneylerin Uygulanması

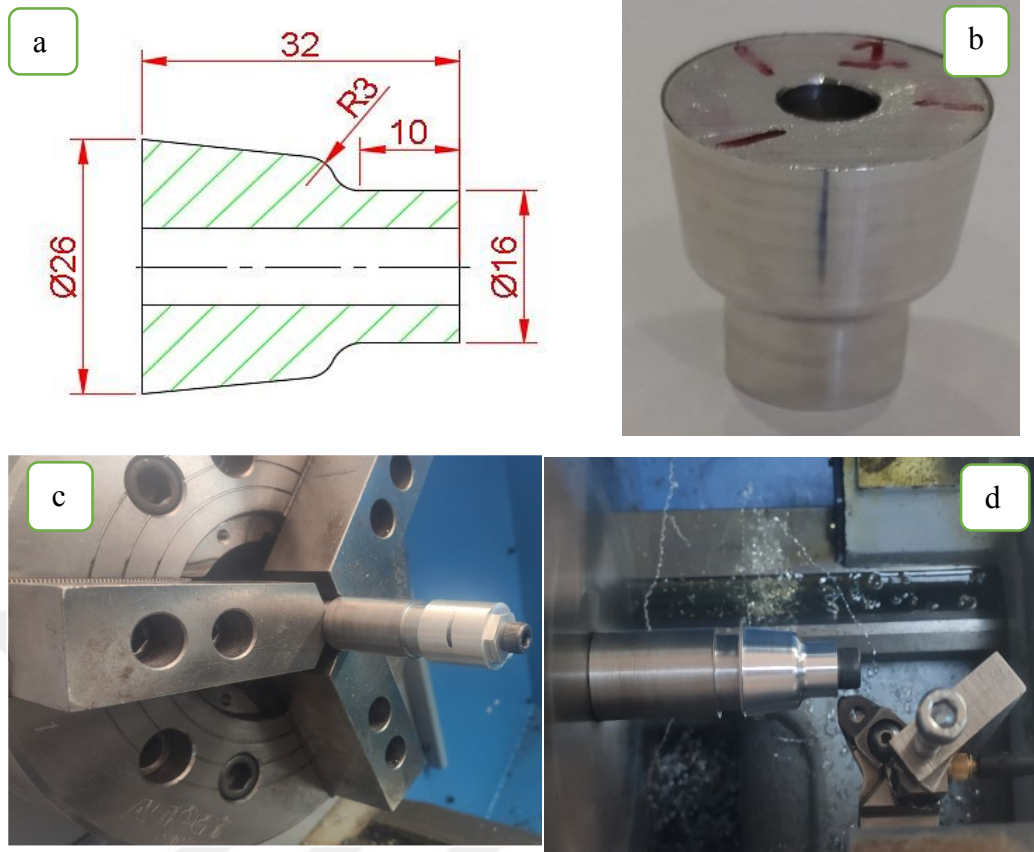
Deneylerin uygulanmasında haddeleme işleminin uygulanacağı malzeme cinsi olarak Al6061-T6 malzeme kullanılmıştır. Bu malzemenin seçilmesindeki en önemli kriter hem literatür olarak referans alınabilecek çok sayıda çalışmada ele alınması hem de endüstriyel uygulamalarda havacılık, otomotiv vb. ana akım sektörlerde çok fazla kullanılmasıdır. Tüm haddeleme işlemleri SMARC marka CAK6166B X200 model CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Al6061-T6 malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve mekanik nitelikler tablo 6.1’de gösterilmektedir.

Tablo 6.1. Al6061-T6 kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Kimyasal İçerik				Mekanik Özellikler	
Elementler					
Al	Kalan	Zn	0,25	Temper	T6
Si	0,4-1,0	Cr	0,1	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	240-270
Cu	0,6-1,1	Fe	0,5	Çekme Mukavemeti (Mpa) min-max	260-310
Mn	0,2-0,8	Ti	0,1	Uzama ($\square$ 50) min-max	20
Mg	0,8-1,2	Diğer	0,15	Sertlik(brinel) min-max	95

Derin haddeleme için 30 mm çapında ve 32 mm boyunda Al6061-T6 malzemedan numuneler kesilerek ortası delinmiş ve sonrasında standart bir işleme sağlanması amacıyla bir malafa yardımıyla CNC aynasına bağlanmıştır. Bağlanan numunelere ait teknik resim ve bağlantı şekli, şekil 6.1’de verilmiştir.

Şekil 6.1 a’da teknik resmi verilen numuneler, öncelikle kaba ve finiş tornalama ile işlenmiş ve sonrasında iş parçasına ezici uç ile derin haddeleme işlemi uygulanmıştır. Tüm derin haddeleme işlemleri yağlı ortamda gerçekleştirilmiştir.

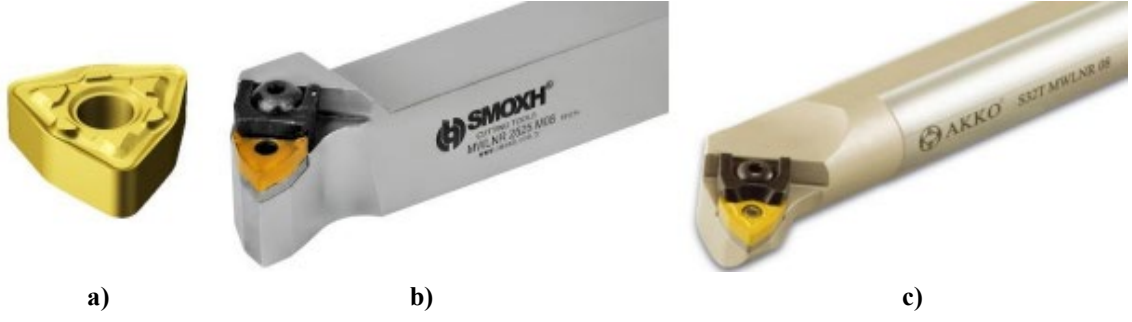


Şekil 6.1.İşleme biçimi a) Numune teknik resmi b) Numune bitmiş hali c) Ham malzemenin malafaya alınması d) Derin haddeleme işleminin yapılması

Deneylerde kullanılan kesme yağı, SKF markalı ve mineral esaslı olan kesme yağı kullanılmıştır (yoğunluk 20°C; 0.930 g/mL, viskozite 20°C; 14 cSt, parlama noktası; 180°C-200 °C).

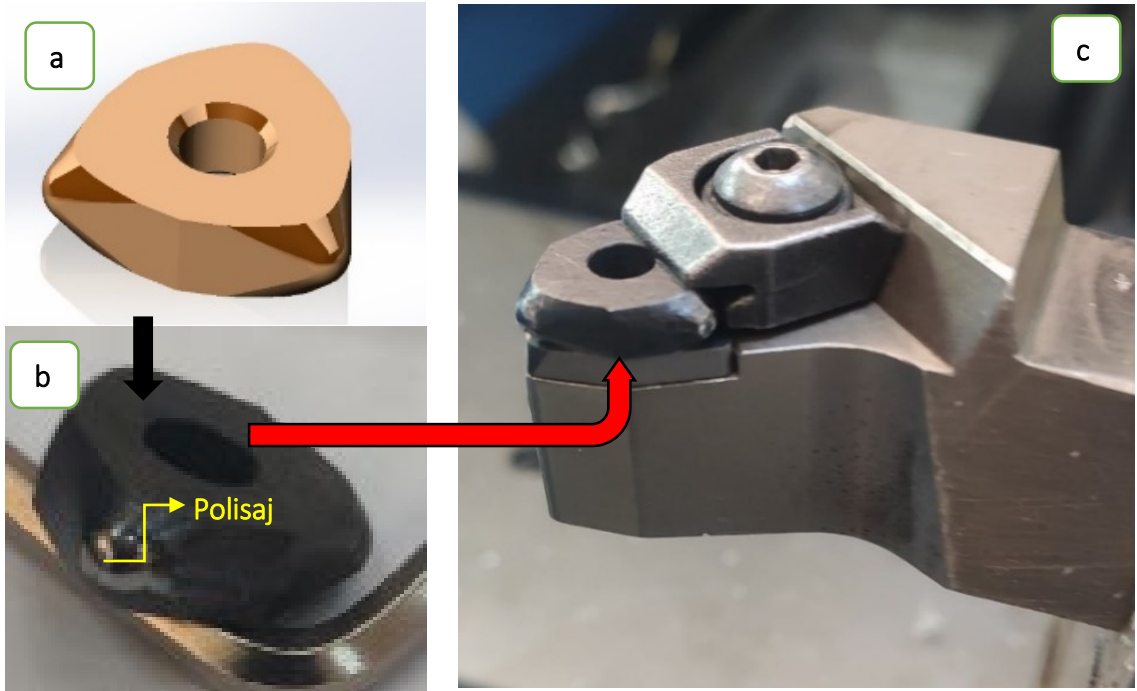
6.2. Ezici Uç Tasarımın Yapılması

Endüstride kullanılan kesici uçlar arasında en yaygın olarak kullanılan uç tiplerinden biri WNMG insert uçlar olup bu kesici uçlar dış kesme uygulamalarında MWLNR kodlu takım tutuculara iç kesme operasyonlarında ise S25S MWLNR kodlu takım tutuculara bağlanmaktadır (şekil 6.2).



Şekil 6. 2. Standart kesici uçlar ve tutucu takımları a) Kesici uç b) Dış kater c) İç delik kateri

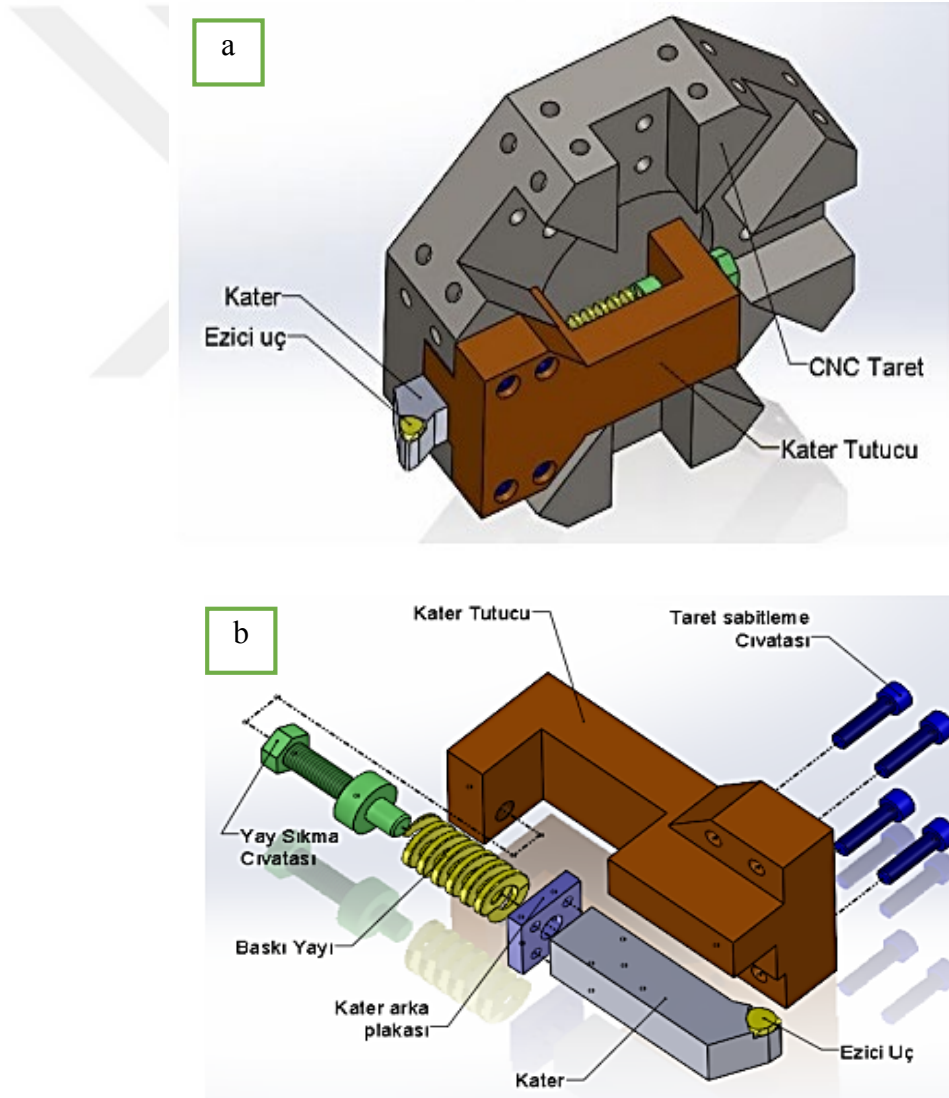
Derin haddelemede mevcut takım tutuculara bağlanabilen WNMG uç formunda yeni bir uç tasarımı yapılmış olup tasarlanan ucun kesici kenar formu 1 mm uç radüslü küresel tipli olarak tasarlanmıştır (şekil 6.3 a). Tasarlanan ve üretilen (şekil 6.3 b) ezici uç, konik ve eğrisel kontüre sahip kaba ve finiş olarak tornalanan deney numunelerine (şekil 6.1 b) derin haddeleme işlemi uygulamasında kullanılmıştır. Tasarımı yapılan küresel uçlu WNMG tip uç ve MWLNR kodlu takım tutuculara bağlanmış (şekil 6.3 c) ve böylece esnek ve özel bir takım tutucu ihtiyacı ortadan kalkmıştır. Üretilen ezici uç üzerindeki küresel burun kısmına sürtünmeyi azaltmak amacıyla ayrıca polisaj işlemi uygulanmıştır (şekil 6.3 b).

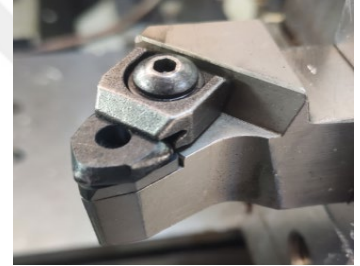
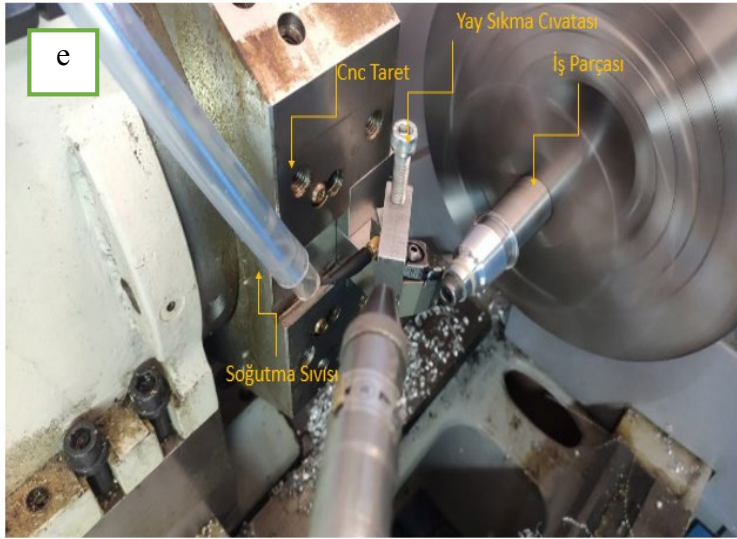
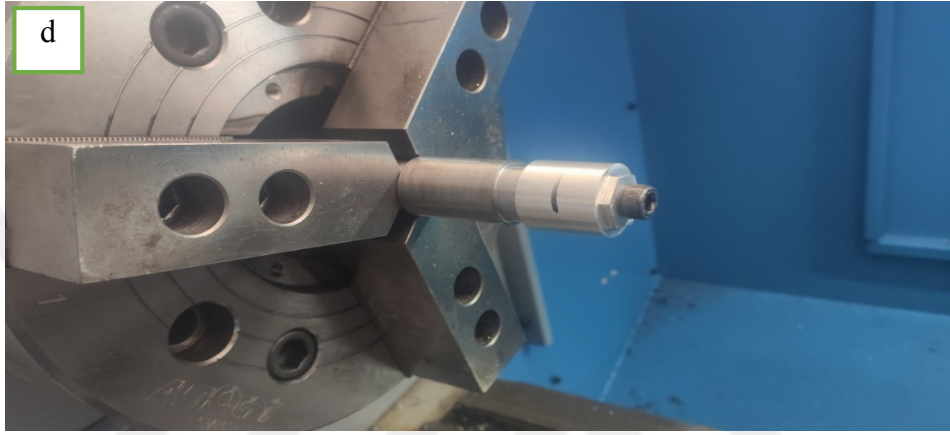
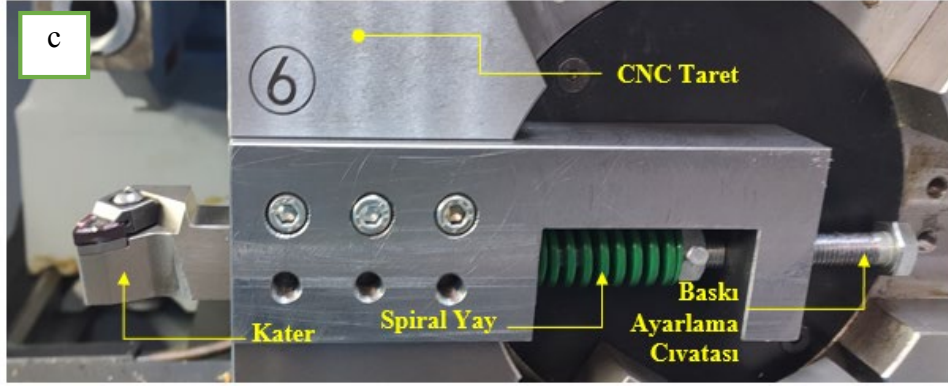


Şekil 6. 3. Kullanılan kesici uç a) WNMG tasarımı b) İmal edilen uç c) Standart katere ucun bağlanması

6.3. Bağlama Aparatının Tasarımı ve Montajı

(Şekil 6.4 a) da gösterilen uç radüsüne sahip küresel uçlu haddeleme uç ile bu ucun bağlanacağı kater, farklı haddeleme baskısı ile derin haddeleme işleminde kullanılması amacıyla, CNC torna tezgâhının taretine bağlanabilmesi için özel bir kater tutma aparatı tasarlanmıştır (şekil 6.4 b ve c). Bu bağlama aparatında haddeleme kuvvetinin ayarlanması için baskı yayı kullanılmış ve yay sıkma cıvatası ile bu ayar yapılmıştır (şekil 6.4 b ve c). Deney numunelerin CNC torna aynasına bağlanması için özel bir bağlama malafası tasarlanmış ve deney parçaları aynaya bağlanan bu malafa ile bağlanarak işlenmiştir (şekil 6.4 d ve e).

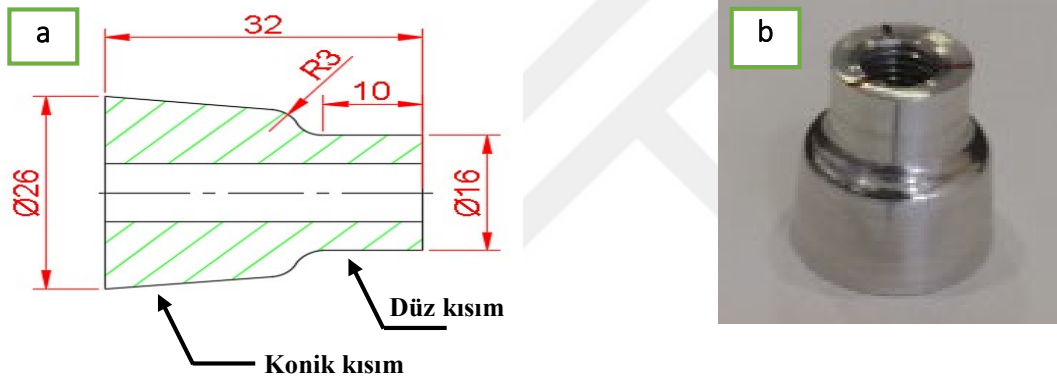




Şekil 6.4. a) Tasarım yapılan kater tutucu aparatının CNC tezgâh taretine bağlantısı b) Kater tutucu aparatın demontaj hali c) Kater tutucu aparatı d) Malzemenin derin haddeleme öncesi durumu ve bağlantı şekli e) Tasarlanan katerin torna taretine montajı işlemin yapımı

6.4. Deney Tasarımı ve İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi

Deneylerin yapılmasında şekil 6.4 d’de gösterilen hammaddenin şekil 6.5 a’daki şekilde gösterilen parça boyutlarına getirilmesi ve sonrasında şekil 6.3 b’de gösterilen ezici uç ile derin haddeleme işleminin yapılması aşamasına gelinmiştir. Derin haddelemeye hazır hale getirmek amacıyla iş parçası önce 0,1 mm paylı olacak şekilde kaba tornalama ile tornalanmış ve sonrasında finiş tornalama ile derin haddelemeye uygun hale getirilmiştir. İş parçasının işlenmesi için ilk olarak kaba boşaltma işlemi için WNMG 080408 uç kullanılmış sonrasında finiş işlemi için VBMT 160404 uç kullanılmıştır. Finiş işlemi resim ölçülerine (şekil 6.5 a) getirilen deney numuneleri derin haddelenerek işlem tamamlanmıştır (şekil 6.5 b). Tüm derin haddeleme işlemleri yağlı ortamda yapılmıştır.



Şekil 6.5. Deney numunesi a) Teknik resim b) Numune örneği

6.5. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Tüm deneylerde L27 ortogonal deney tasarımı referans alınarak haddeleme kuvveti, ilerleme miktarı ve devir sayısı olacak şekilde 3 farklı işlem parametresi ve bu parametrelere ait her bir parametre için 3 seviye belirlenmiştir. Tablo 6.2’de deneylerde uygulanacak işlem parametreleri (faktörler) ve bu faktörlere ait seviyeler verilmektedir.

Tablo 6.2. Deney tasarımı ve işlem parametreleri

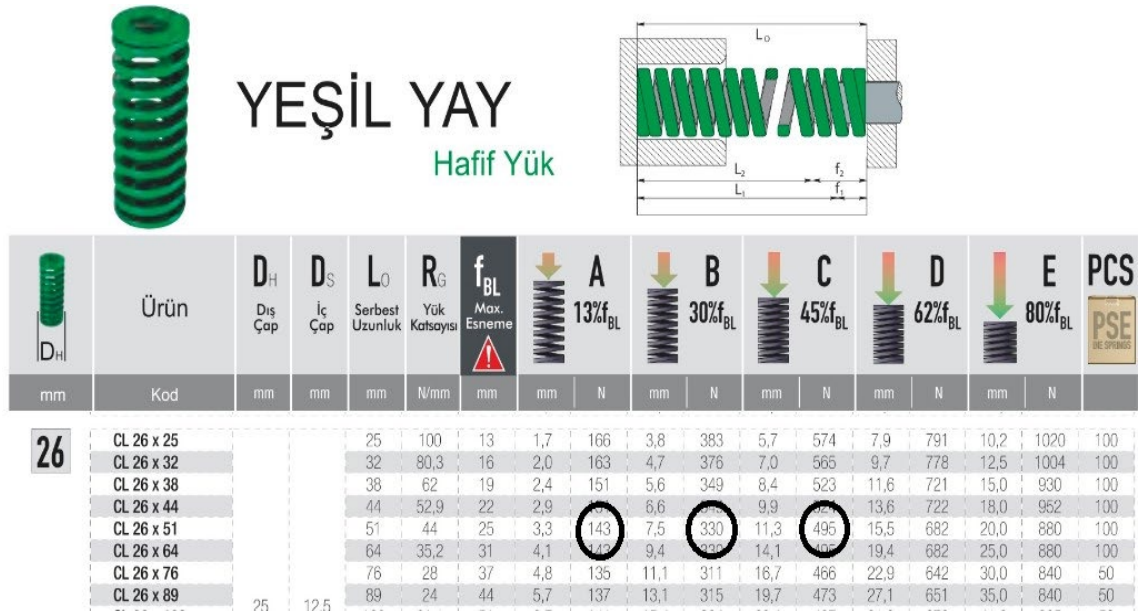
Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Haddeleme Kuvveti (N)	143	330	495
İlerleme (mm/dev)	0,04	0,08	0,12
Devir Sayısı (dev/dak)	400	600	800
Paso sayısı	1		
Haddeleme Ortamı	Yağlı		

Yapılan 27 deneyde kullanılan parametreler ve bu parametrelerin deneylerdeki dağılımı tablo 6.3'te gösterilmektedir.

Tablo 6.3. Seçilen faktör ve bu faktörlere ait seviyeler

Deney sıra no	Haddeleme kuvveti (N)	İlerleme (mm/dev)	Devir Sayısı (dev/dak)	Deney sıra no	Haddeleme kuvveti (N)	İlerleme (mm/dev)	Devir Sayısı (dev/dak)
1	143	0,04	400	15	330	0,12	600
2	143	0,08	400	16	330	0,04	800
3	143	0,12	400	17	330	0,08	800
4	143	0,04	600	18	330	0,12	800
5	143	0,08	600	19	495	0,04	400
6	143	0,12	600	20	495	0,08	400
7	143	0,04	800	21	495	0,12	400
8	143	0,08	800	22	495	0,04	600
9	143	0,12	800	23	495	0,08	600
10	330	0,04	400	24	495	0,12	600
11	330	0,08	400	25	495	0,04	800
12	330	0,12	400	26	495	0,08	800
13	330	0,04	600	27	495	0,12	800
14	330	0,08	600				

Ezici ucun haddeleme sırasındaki baskısı, şekil 6 c'de gösterilen baskı ayarlama cıvatasının ileriye doğru sıkılmasıyla spiral yay boyunu kısaltması suretiyle yayın katere yaptığı baskı kuvveti ayarlanmış, spiral yayın ne kadar sıkılması gerektiği ise yay kataloğundan (şekil 6.6) veriler okunarak elde edilmiştir.



Şekil 6.6. Yay kataloğu sıkma değerleri ve elde edilen haddeleme baskı kuvvetleri (Yüce Teknik, 2023)

6.6. Deneylerin Analizi

6.6.1. Ra ölçümleri

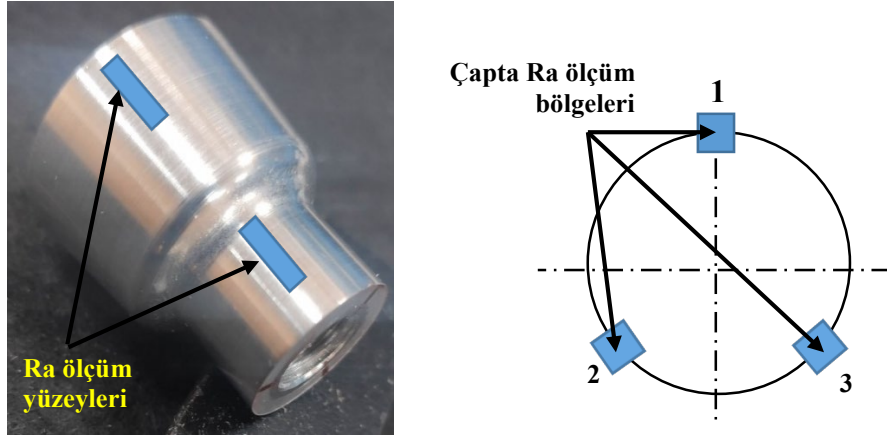
Yapılan Taguchi deney tasarımı “en küçük en iyi” (smaller is better) prensibine göre sonuçlar üretilmiştir. İşlenen 27 adet numunenin yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmıştır. Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ölçümünde, “Surface Roughness Tester SRT-6210” markalı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaza ait özellikler şekil 6.7’de görülmektedir.



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

Şekil 6.7. Yüzey pürüzlülük cihazı ve özellikleri

İşlenebilirlik işlemleri sonucunda işlenen tüm düz ve konik yüzeylerin Ra ölçümleri yapılmıştır. Derin haddemeleme işlemi uygulanmış iş parçası üzerindeki ölçümlerde, hem düz kısımdaki hem de konik kısımdaki yüzey pürüzlülüğünün kıyaslanması ve farklılığın tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca konik ve düz kısımdaki elde edilen Ra değerleri arasında bir korelasyonun ve derin haddemenin konik yüzey üzerinde de iyileştirici etkisinin olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Ölçümler düz ve konik yüzeylerdeki çap üzerinden ve numune tornalama eksenine paralel doğrultuda alınmıştır. Her ölçüm çapı eşit açılarda çevresel 3 bölge seçilerek ve her bir bölge üzerinden 3 ölçüm alınarak alınmıştır. Her noktadan alınan 3 ölçümün aritmetik ortalama değerleri alınmış ve elde edilen sonuç Ra değeri olarak kabul edilmiştir (şekil 6.8).



Şekil 6.8. Ra değerlerinin ölçüm bölge ve yüzeyleri

6.6.2. Mikrosertlik ölçümleri

Deney numunelerinin mikrosertlik ölçümleri için düz ve konik yüzeylerden numuneler alınmış ve alınmış numunelerin yüzeyleri üzerinden mikrosertlik değerleri Bingöl Üniversitesi laboratuvarlarındaki AOB markalı Vickers mikrosertlik cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler, vickers sertlik ölçme yöntemine göre alınmış ve 30 gr yük altında uygulanmıştır. Her numune üzerinde düz ve konik yüzey üzerindeki farklı noktalardan 3 sertlik ölçümü yapılarak elde edilen bu değerlerin aritmetik ortalaması o numuneye ait sertlik değeri olarak kaydedilmiştir.

6.6.3. Optik mikroskop görüntüleri

Derin haddeme uygulanmış yüzeylerin yüzey özelliklerinin görüntülenmesi amacıyla Batman Üniversitesi bünyesindeki optik mikroskop cihazıyla yüzey görüntüleri alınmıştır. Çekilen optik fotoğraflarda yatay çizgiler parça eksenine dik yönü temsil etmektedir. Alınan optik fotoğraflar silindirik yüzeylerin tepe noktalarından alınmıştır. Optik mikroskop gösterimi şekil 6.9’da belirtilmiştir.



Şekil 6.9. Optik mikroskop

6.6.4. SEM görüntüleri

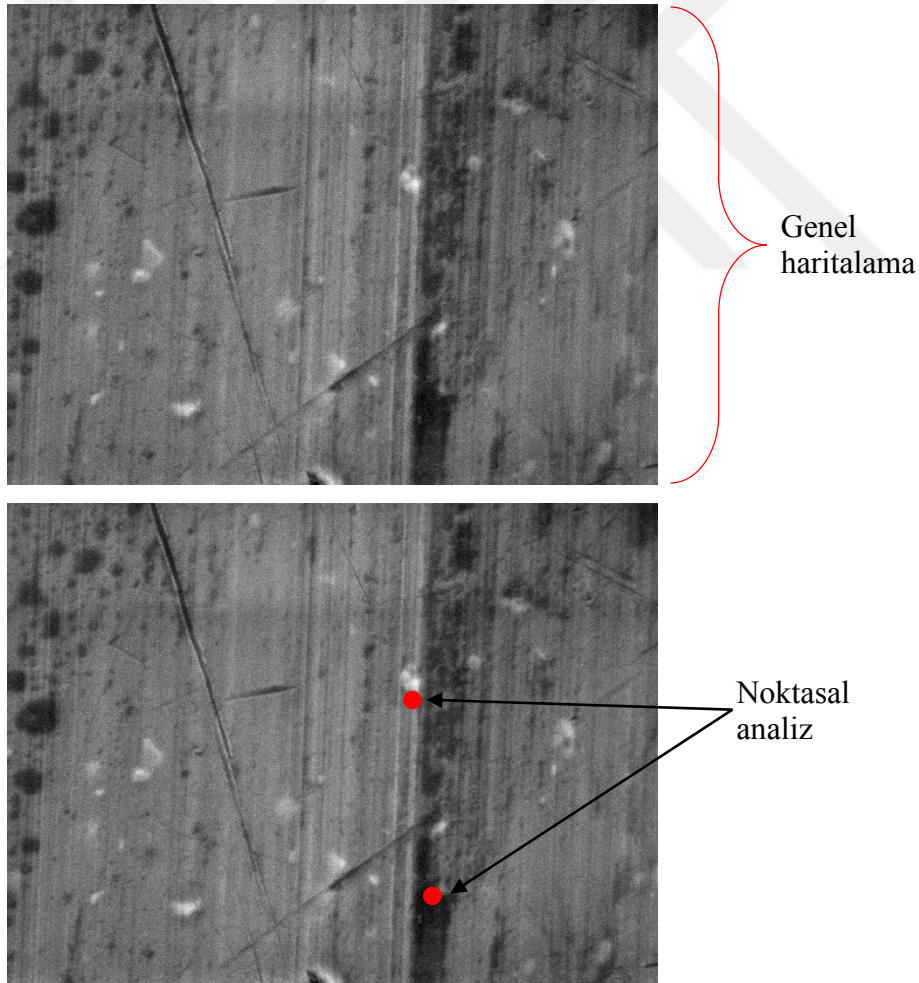
Derin haddelenmiş yüzeylerin daha detaylı incelenmesi, karbür, kanal, çizik ve mikroyapılarının incelenmesi amacıyla SEM analizleri yapılmıştır. Bu amaçla Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarındaki SEM cihazı (şekil 6.10) kullanılarak görüntüler alınmıştır.



Şekil 6.10. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

6.6.5. EDX görüntüleri

Ezici uçların derin haddedelemde kullanılması sonrasında ezici uç malzemesinin derin haddelenmiş deney parçası ile reaksiyona girip girmediğinin kontrolü, elementel difüzyonun saptanması, yüzeyde oluşan karbür vb. oluşumların tespiti amacıyla noktasal ve yüzeysel olarak EDX analizi ve haritalama yapılmıştır. Bu amaçla Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarındaki cihazla EDX analizi yapılarak grafik görüntüleri alınmıştır. Görüntülerin alınmasında genel haritalama için bir fotoğraflama, karbür vb. yapıların tanımlanması amacıyla noktasal olarak analizler alınmıştır (şekil 6.11). Genel haritalamada yüzey üzerindeki dağılım, noktasal analizde ise oluşan farklı bölgelerin elementer yapılarının tespiti amaçlanmıştır.



Şekil 6.11. EDX analizlerinde numuneler üzerinden alınan genel ve noktasal bölgeler

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR

7.1.Yüzey Pürüzlülüğü

7.1.1. Sabit çaptaki yüzey pürüzlülükleri

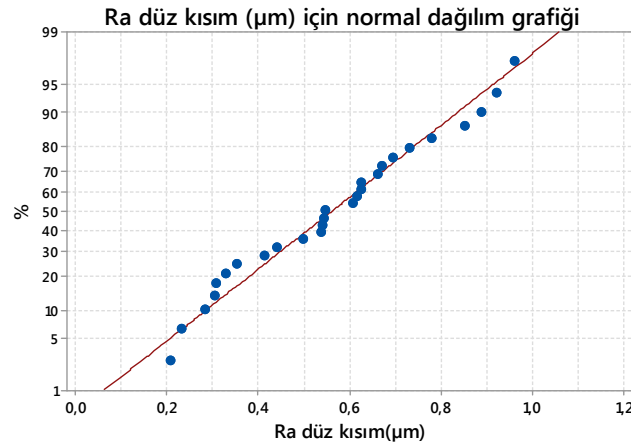
Taguchi L27 deney tasarımına göre derin haddeleme uygulanmış deney parçaları yüzeyleri üzerinden alınan yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri tablo 7.1’de gösterilmektedir.

Tablo 7.1. Deney parametreleri faktör seviyeleri ve Ra değerleri

Deney No	A	B	C	Ra Düz (μm)	Deney No	A	B	C	Ra Düz (μm)
1	1	1	1	0,543	15	2	3	2	0,778
2	1	2	1	0,85	16	2	1	3	0,546
3	1	3	1	0,92	17	2	2	3	0,67
4	1	1	2	0,412	18	2	3	3	0,606
5	1	2	2	0,694	19	3	1	1	0,353
6	1	3	2	0,961	20	3	2	1	0,731
7	1	1	3	0,304	21	3	3	1	0,616
8	1	2	3	0,441	22	3	1	2	0,23
9	1	3	3	0,498	23	3	2	2	0,888
10	2	1	1	0,281	24	3	3	2	0,625
11	2	2	1	0,329	25	3	1	3	0,306
12	2	3	1	0,66	26	3	2	3	0,623
13	2	1	2	0,208	27	3	3	3	0,541
14	2	2	2	0,536					

Elde edilen bu değerlerin öncelikle normal dağılım gösterdiklerinin kontrol edilmesi ve grup desenini bozan bir ölçümün varlığının olup olmadığının saptanması gerekmektedir. Bu amaçla normallik testi yapılmış ve şekil 7.1’de verilen grafik elde edilmiştir.

Şekil 7.1’deki Ra değerleri dağılımı incelendiği zaman, elde edilen sonuçların normal dağılım sergiledikleri görülmektedir.

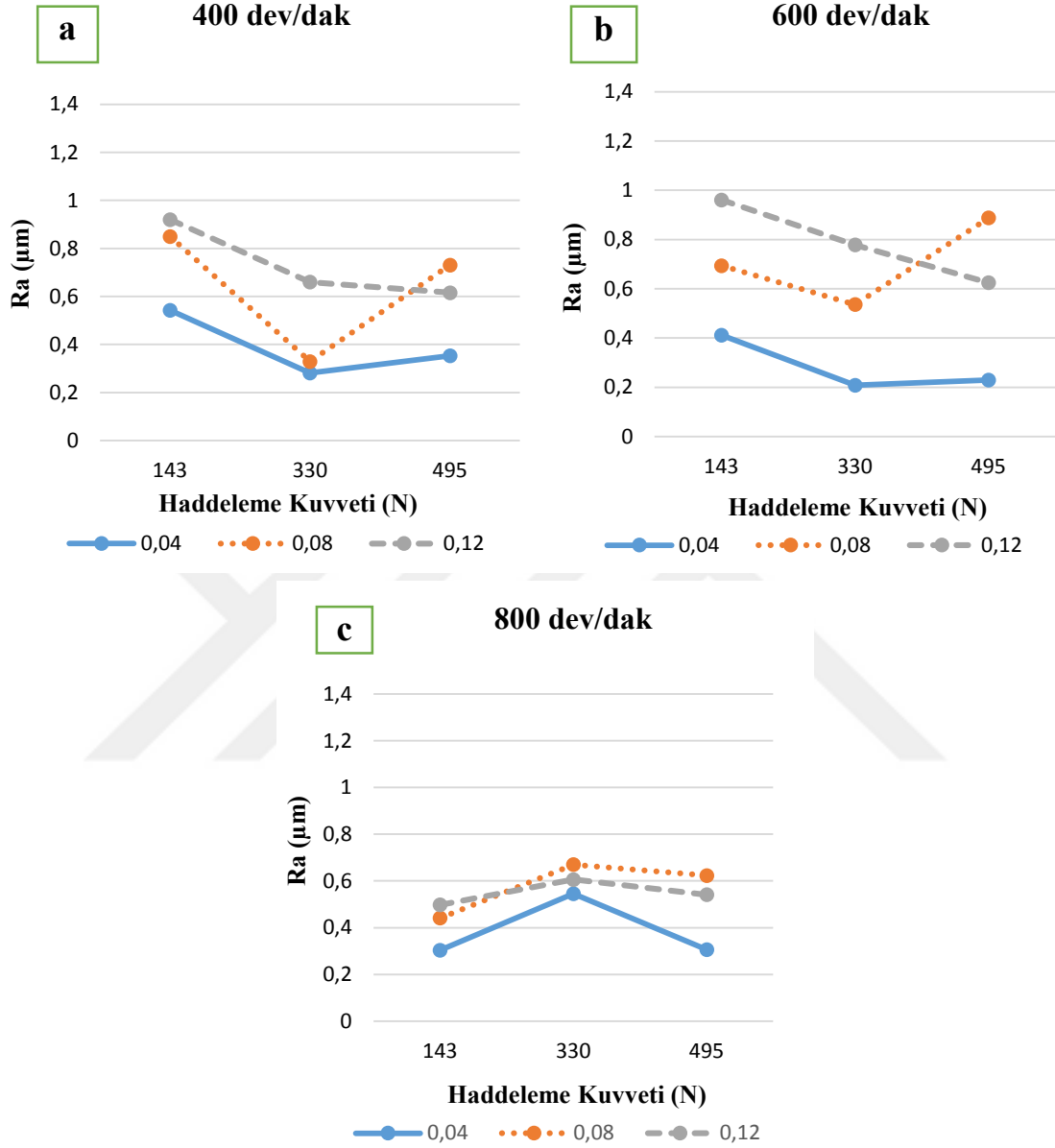


Şekil 7.1. Düz yüzeydeki (silindirik yüzey) Ra değerleri dağılımı

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen Ra değerlerine yönelik devir sayısının haddeme kuvvetine göre Ra üzerindeki etkisi incelenmiş ve şekil 7.2'deki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 7.2 incelendiğinde, haddeme kuvvetinin en düşük değerinde (143 N) düşük devirlerde yüzey pürüzlülüğünün yüksek çıkmasına karşın yüksek devirlerde daha düşük Ra değerlerinin olduğu görülmektedir (şekil 7.2 a ve c). Ayrıca tüm ilerleme değerlerinde, en düşük ilerleme değerleri uygulandığında Ra değerlerinde de en düşük değerler elde edilmiştir. İlerlemenin 0,08 mm/dev olduğu durumlarda 400 ve 600 dev/dak değerlerinde, 0,04 mm/dev ilerlemeye göre daha düşük Ra değerleri elde edilmiştir ancak 800 dev/dak devir sayısında bu sıralama değişmiştir (şekil 7.2 c). Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında 0,08 mm/dev ilerleme değerinde en düşük Ra değerleri elde edilmektedir (şekil 7.2 a ve b) ancak yüksek değerlere çıkıldığında bu eğilim değişmektedir (şekil 7.2 c). Bu nedenle düşük ve orta devir sayılarında 0,08 mm/dev ilerlemenin seçilmesi tavsiye edilebilir ve bu yönüyle yapılan diğer çalışmalara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Genel bir kural olarak Ra değeri, ilerleme değerinin artışı ile orantılı olarak artmaktadır (Sarhan ve ark., 2014; Luo ve ark., 2011; Basak ve ark., 2009). Burada önemli diğer bir husus ta ilerleme değerlerinin çok küçük seçilmesi durumunda Ra değerlerinin benzer şekilde her zaman azalmadığı ve burada her malzeme için farklı ilerleme sınır değerlerinin bulunmasıdır. Bu çalışmada da 0,08 mm/dev ilerlemede 0,04 mm/dev ilerlemeye göre daha düşük Ra değerleri elde edilmiştir. Bunun 0,04 mm/dev ilerlemenin parça yüzeyindeki girintileri doldurma noktasında yetersiz kalmasından kaynaklandığı veya düşük ilerleme değerlerinde ezici uç ve parça yüzeyi temasının artışı (Maximov ve ark., 2020) sonucu oluşan ısı nedeniyle de (Martins ve ark., 2022) elde edilebileceği düşünülmektedir. Derin haddemede temel prensibin yüzey üzerindeki çıkıntılı yapının baskı ile yüzey üzerindeki çukurlara doldurulması ile deformasyona uğratılması olduğu bilinmektedir. Ancak yeterli ilerleme değerinde bu deformasyonun tam olarak yerine getirilemeyeceği nedeniyle Ra değerinde istenen değerler elde edilememiştir. Cagan ve arkadaşları magnezyum için, haddeme ve ilerleme arasında iyi bir dengenin iyi bir Ra için ideal olduğunu belirtmektedirler (Cagan ve ark., 2020). Haddeme kuvvetinin Ra üzerinde optimum değerlerinin özellikle 400 ve 600 dev/dak devirlerde, 330 N olduğu durumlarda olduğu ayrıca görülmektedir (şekil 7.2 a ve b). Yüksek devirlerde ise haddeme kuvvetinin etkisinin Ra üzerinde daha az etkili olduğu ve yataya doğru eğilim gösterdiği görülmektedir (şekil 7.2 c). Buradan en iyi Ra değerlerinin 0,04 mm/dev ilerleme, 330

N haddeleme kuvveti ve 600 dev/dak devir sayısında elde edildiği kanaatine varılabilir (şekil 7.2 b).

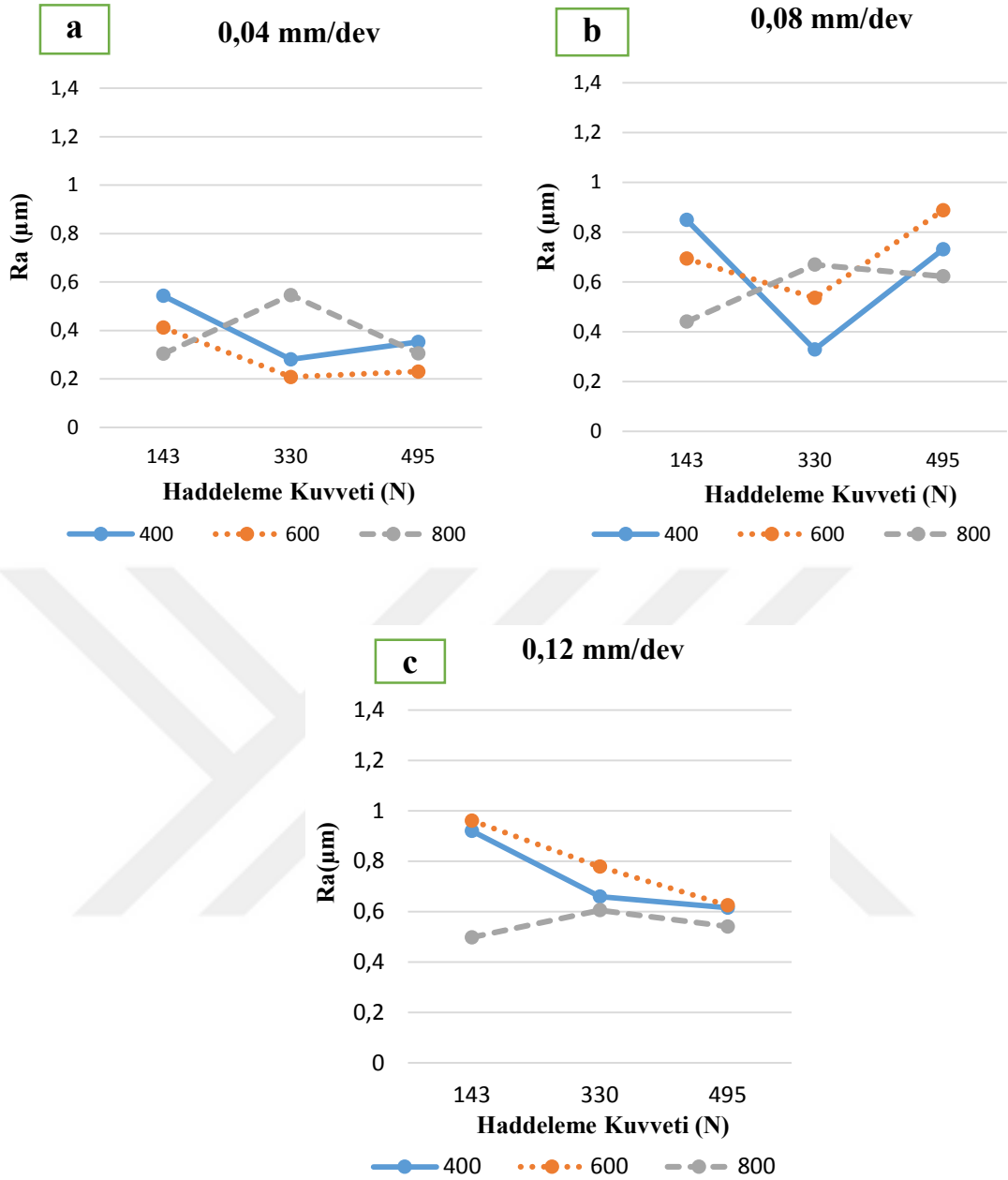


Şekil 7.2. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 400 dev/dak devir sayısı b) 600 dev/dak devir sayısı c) 800 dev/dak devir sayısı

Devir sayısının farklı ilerleme değerlerindeki Ra üzerindeki etkisi incelenmiş ve şekil 7.3'teki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 7.3'te gösterilen üç grafik beraber incelendiğinde ilerleme artışına bağlı olarak Ra değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Ayrıca 0,04 mm/dev ve 0,08 mm/dev ilerlemelerde düşük 400 dev/dak ve 600 dev/dak devir sayılarında en iyi Ra

değerlerinin 330 N'luk haddeleme kuvvetinde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca 0,04 mm/dev ve 0,08 mm/dev ilerleme değerlerinde tüm devir sayılarının ve haddeleme kuvvetlerinin Ra üzerindeki etkisi birbirinin aynı eğilimde gerçekleşmiş, bu devir ve haddeleme kuvvetlerinde benzer tepkiler alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğünde en büyük artış ilerlemenin en yüksek olduğu 0,12 mm/dev değerinde elde edilmiştir. En yüksek ilerleme değerinde (0,12 mm/dev) ise haddeleme kuvvetinin artışına paralel olarak Ra değerlerinde düşüş gözlenmiştir (şekil 7.3 c). Devir sayısının artışı ve azalmasına bağlı olarak stabil bir yönelim gözlenmemiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde benzer olarak ilerlemenin azalması, ezici uç yakınındaki yüzey tabakalarının deforme olması ve bununla da daha yüksek iş parçası sıcaklıklarının oluşmasına sebep olduğu ifade edilmiştir. Yüksek ilerlemelerde ise derin haddeleme için daha fazla güç (bilye-iş parçası temas bölgesinde kısmen ısıya dönüşür) gerektiği belirtilmiştir (Martins ve ark., 2022). İlerlemenin düşük ve yüksek oluşu bu nedenle yüzey üzerinde Ra bakımından farklılıklara neden olmaktadır. Bu veriler ışığında ilerlemenin etkisi konusunda ilerleme değerinin düşük veya yüksek olmasından ziyade malzeme cinsi ve diğer parametreler ile birlikte optimum değerlerin belirlenmesi gerektiği kanaati oluşmuştur.

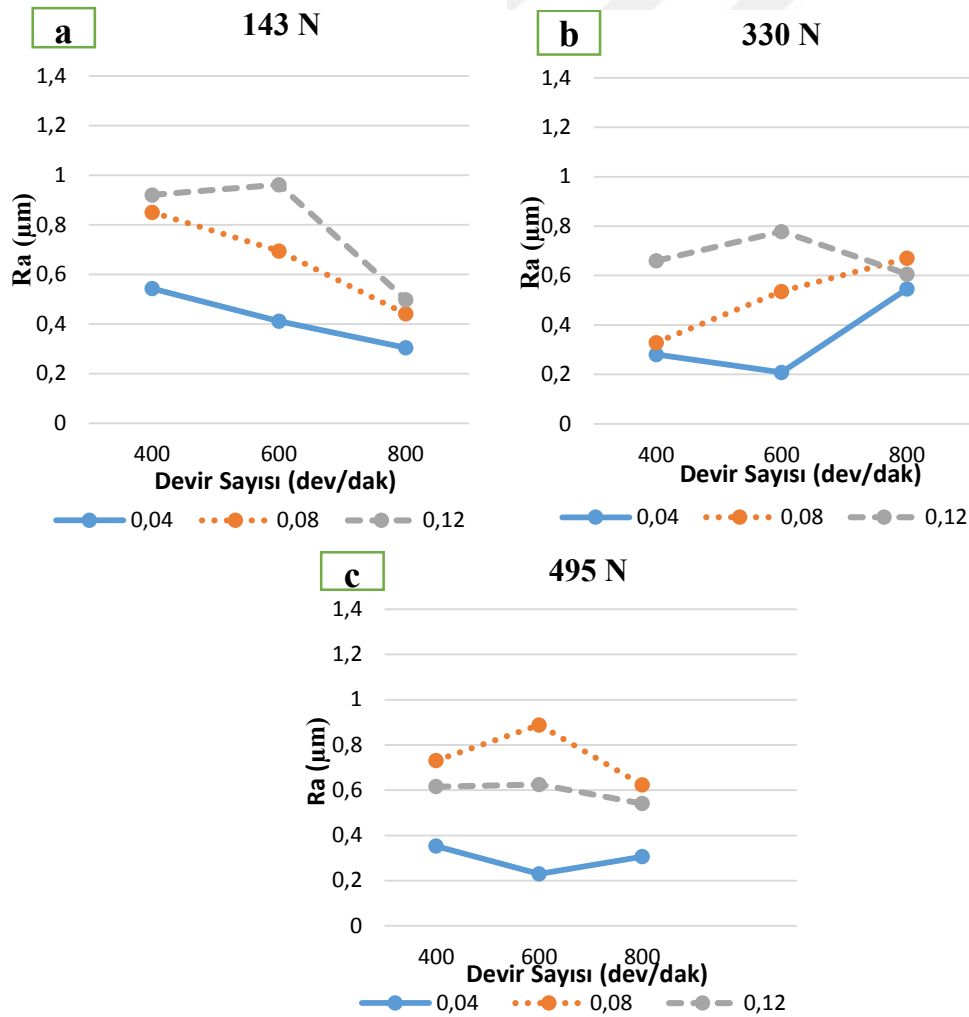


Şekil 7.3. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 0,04 mm/dev ilerleme sayısı b) 0,08 mm/dev ilerleme sayısı c) 0,12 mm/dev ilerleme sayısı

Konu haddemele kuvveti ve Ra değerleri arasındaki ilişki bakımından değerlendirildiğinde şekil 7.4'teki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 7.4'teki grafikler incelendiğinde düşük haddemele kuvvetinde (143 N) her üç ilerleme değerinde de devir sayısının artışı ile Ra değerlerinde aşağı yönlü bir yönelim gözlenmektedir (şekil 7.4 a). Haddemele kuvveti 330 N değerine yükseltildiğinde 0,04 ve 0,08 mm/dev ilerleme değerlerinde devir sayısının artışı ile Ra'da iyileşme görülmekte ancak yüksek ilerlemede aynı eğilimin olmadığı görülmektedir (şekil 7.4 b). En iyi yüzey pürüzlülük değerleri için düşük haddemele

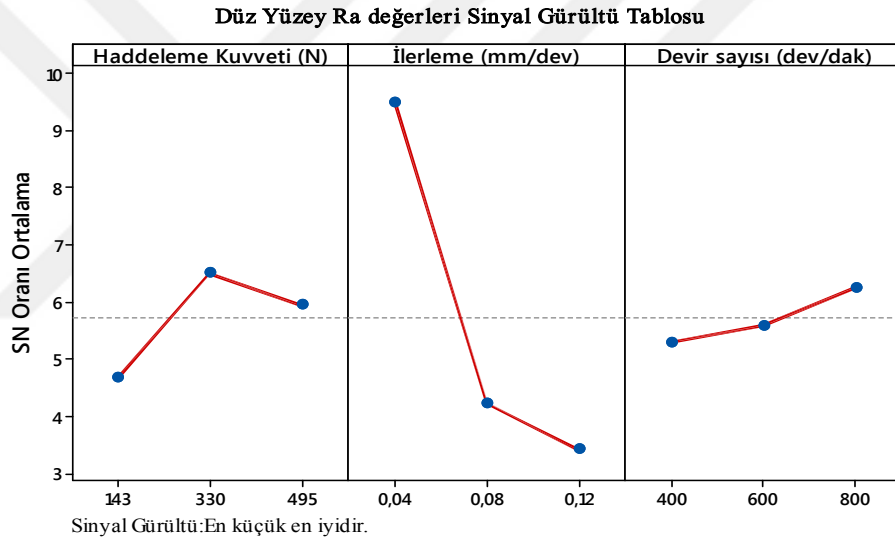
basıncında (143N) yüksek devir ve düşük ilerleme değerleri, orta haddeleme basıncında (330 N) ise düşük devir ve düşük ilerleme seçilmelidir (şekil 7.4 a ve b). Tüm haddeleme kuvvetlerinde ve tüm devir sayılarında en düşük ilerleme değerlerinde Ra değerleri en düşük çıkmıştır. Yapılan başka bir çalışmaya bakıldığında, düşük ilerleme hızı ve yüksek haddeleme kuvvetleri seçildiğinde en iyi Ra değerleri bulunmuştur (Buldum ve ark., 2017). Baskı kuvvetinin artışının yüzey pürüzlülüğünde artışa neden olduğu söylenmesine karşılık (Abrao ve ark., 2014; Prabhu ve ark., 2011), bunun tersi olarak baskı kuvvetinin artmasının, daha kötü yüzey kalitesine yol açtığını belirten çalışmalar da mevcuttur (Abrao ve ark., 2015). Bazı çalışmalar bu durumu yorumlarken, baskı kuvvetinin belirli değeri aşması durumunda malzemenin aşırı yüklenmesi sonucu bozulmaların oluştuğunu belirtmişlerdir (Zhu ve ark., 2009). Şekil 7.4'teki grafikler haddeleme kuvvetlerinin azalması veya artmasıyla Ra değerinin yönelimi ile ilgili olarak net bir sonuca varma imkânı vermemektedir.



Şekil 7.4. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 143 N haddeleme kuvveti b) 330 N haddeleme kuvveti c) 495 N haddeleme kuvveti

Derin haddelenmiş parçalarda istenilen tolerans ve tamlığın elde edilebilmesi için yüzey kalitesinin en ideal seviyede olması gerekir. En yüksek yüzey kalitesi, yüzey pürüzlülük değerinin en düşük olması ile elde edilebilmektedir. Düz yüzeydeki 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 7.5). Bu analizde sinyal gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında “en küçük en iyi” referans alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Şekil 7.5’te yüzey pürüzlülüğüne etki eden grafik incelendiğinde Ra üzerinde en ideal parametrelerin, haddeleme kuvvetinde 330 N, ilerleme değerinde 0,04 mm/dev ve devir sayısında ise 800 dev/dak olduğu görülmektedir.



Şekil 7. 5. Sinyal-gürültü tablosu

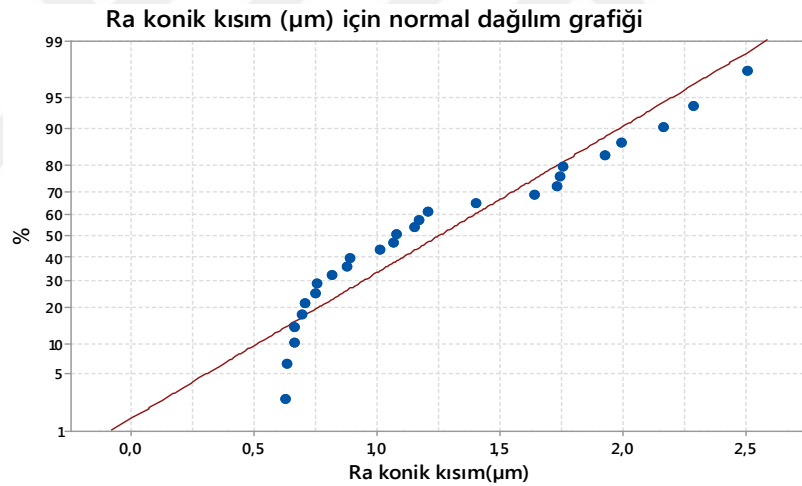
7.1.2. Konik yüzeydeki yüzey pürüzlülükleri

Taguchi L27 deney tasarımına göre işlenen deney parçaları üzerinden alınan yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri tablo 7.2’de verilmektedir. Elde edilen bu değerlerin öncelikle normal dağılım gösterdiklerinin kontrol edilmesi ve grup desenini bozan bir ölçümün varlığının saptanması gerekmektedir. Bu amaçla normallik testi şekil 7.6’da görülmektedir.

Tablo 7.2. Deney parametreleri faktör seviyeleri ve Ra değerleri

Deney No	A	B	C	Ra Konik (μm)	Deney No	A	B	C	Ra Konik (μm)
1	1	1	1	0,81	15	2	3	2	1,99
2	1	2	1	0,746	16	2	1	3	0,626
3	1	3	1	1,396	17	2	2	3	1,148
4	1	1	2	0,705	18	2	3	3	1,74
5	1	2	2	1,753	19	3	1	1	0,66
6	1	3	2	2,286	20	3	2	1	1,166
7	1	1	3	0,753	21	3	3	1	1,926
8	1	2	3	0,883	22	3	1	2	0,69
9	1	3	3	2,503	23	3	2	2	1,005
10	2	1	1	0,659	24	3	3	2	1,726
11	2	2	1	1,06	25	3	1	3	0,875
12	2	3	1	2,163	26	3	2	3	1,076
13	2	1	2	0,628	27	3	3	3	1,636
14	2	2	2	1,201					

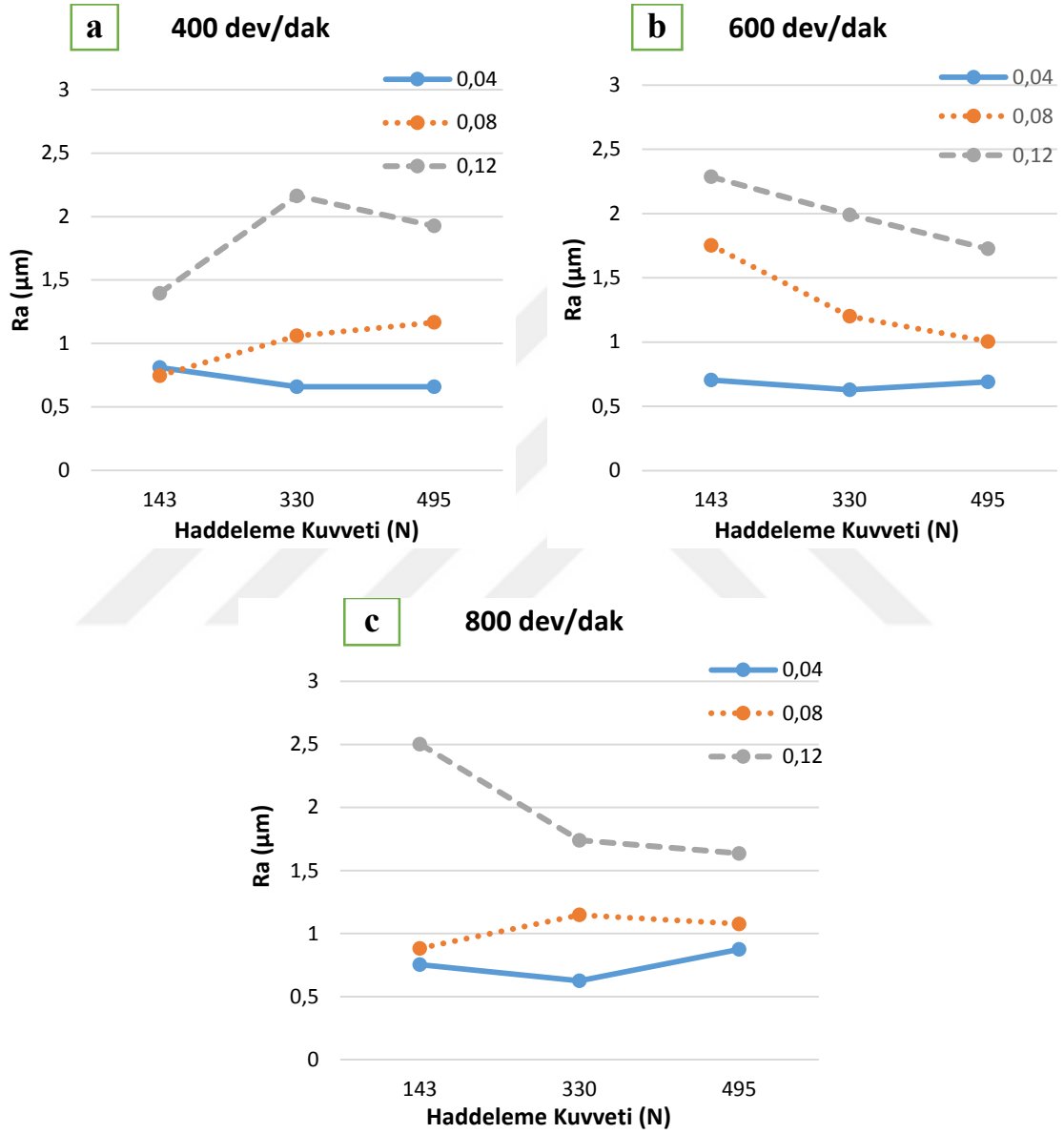
Şekil 7.6 incelendiğinde bazı değerlerin normal dağılım eğrisinden saptığı görülmektedir. Bu da konik kısımda derin haddede bazı işlem parametrelerinde kararsız bir durumun oluştuğunu göstermektedir.

**Şekil 7.6.** Konik yüzeydeki (silindirik yüzey) Ra değerleri dağılımı

Yüzey pürüzlülük değerleri işlem parametreleri yönünden incelendiğinde devir sayısına bağlı olarak ilerleme ve Ra arasında şekil 7.7’teki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 7.7’de devir sayısına bağlı olarak parametrelerin Ra üzerinde etki grafikleri verilmektedir. 400 dev/dak her üç ilerlemede de 330 N haddede 0,08 mm/dev ve 0,12 mm/dev yukarı doğru bir yönelme varken 0,04 mm/dev ise aşağı doğru bir eğilim söz konusu olmuştur (şekil 7.7 a). 143 N haddede her üç ilerlemede bir artış yaşanmışken haddeme kuvvetindeki artış 330 N olduğu zaman 0,12 mm/dev ve 0,08 mm/dev azalma meydana gelmiş ve haddeme kuvveti arttıkça yani 495 N olduğu

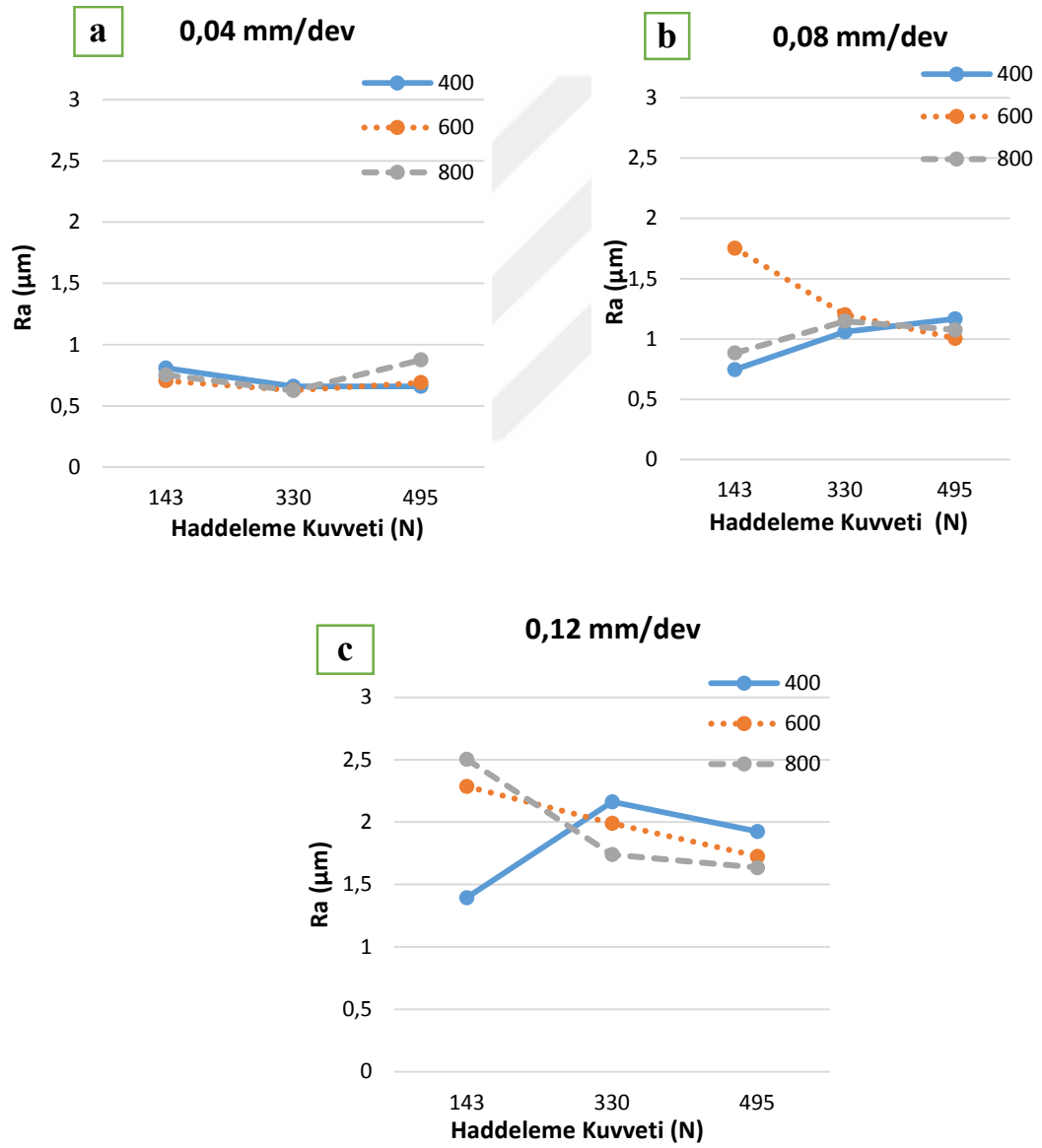
zaman azalma yaşanmaya devam etmiştir (şekil 7.7 b). İlerlemenin 0,08 mm/dev olduğu zaman 400 dev/dak, 600 dev/dak ve 800dev/dak değerlerinde, 0,04 mm/dev olduğu zamana göre daha düşük Ra değerleri bulunmuştur (şekil 7.7 a, b ve c). (Şekil 7.7 c) grafiğine bakıldığında haddeme kuvvetinin artması ile 0,12 mm/dev ilerlemede aşağı yönde bir eğilim söz konusu olmuştur.



Şekil 7.7. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 400 dev/dak devir sayısı b) 600 dev/dak devir sayısı c) 800 dev/dak devir sayısı

İlerlemeye bağlı olarak devir sayısı ile Ra arasındaki incelendiğinde ise şekil 7.8'deki grafikler elde edilmiştir.

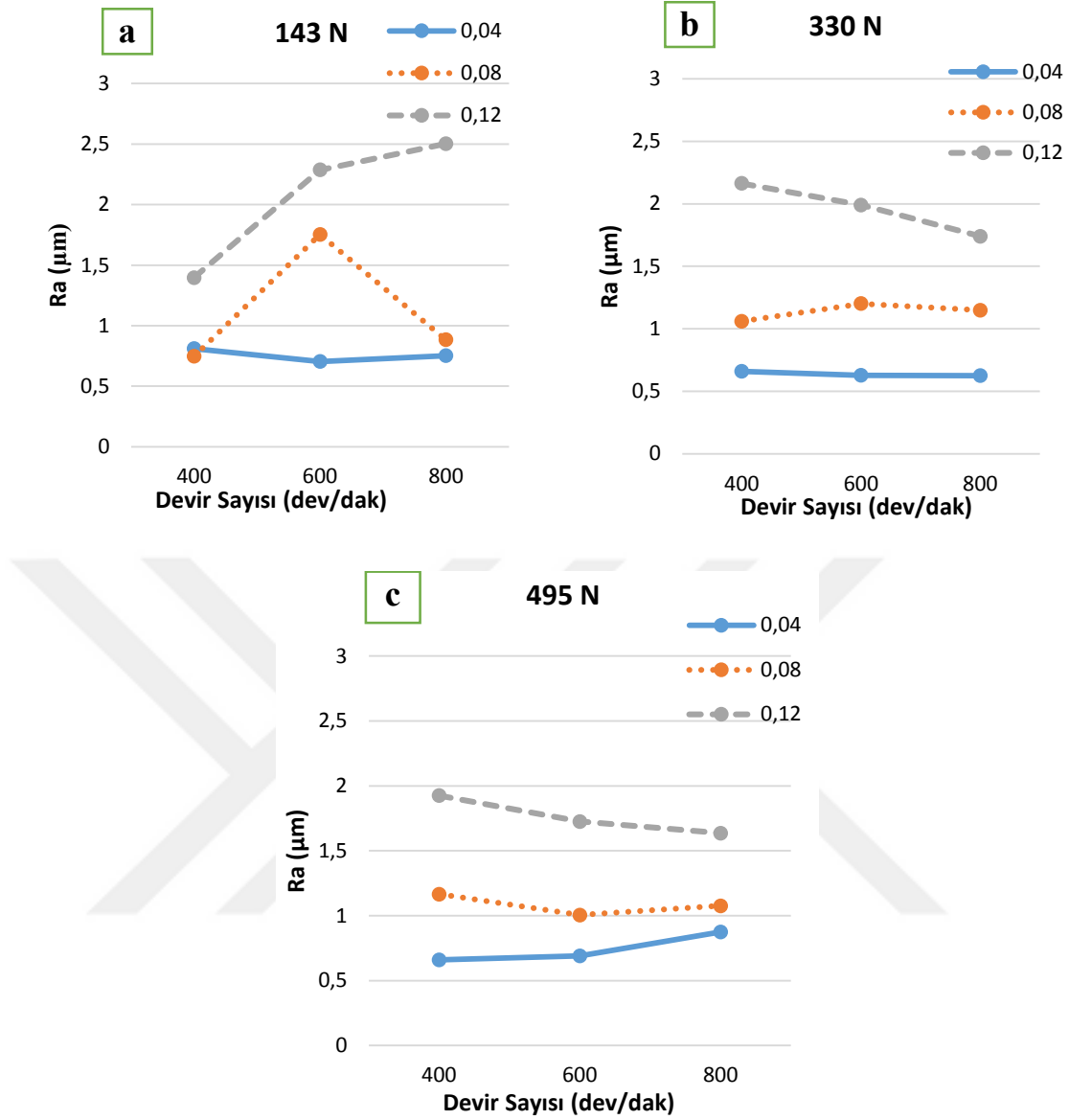
Şekil 7.8 a’da görüldüğü üzere düşük ilerlemelerde Ra değerlerinin haddeleme kuvvetinin ve devir sayısının artışına rağmen yatay düzeyde ve birbirine yakın Ra değerleri olduğu görülmektedir. Bu durum 0,08 ve 0,12 mm/dev ilerlemede yüksek haddeleme kuvvetinde (495 N) de benzer şekilde birbirine yakın oluşmaktadır. Ancak ilerlemenin artışı ile Ra değerlerinde yükselme meydana gelmektedir (şekil 7.8 b ve c). Ra değeri, ilerleme değerinin artışı ile orantılı olarak artmaktadır (Sarhan ve ark., 2014; Luo ve ark., 2011; Basak ve ark., 2009). Her üç grafik beraber değerlendirildiğinde devir sayısının artışının Ra üzerinde anlamlı bir değişiklik oluşturmadığı, ilerleme artışı ile Ra da yukarı doğru bir eğilim olduğu görülmektedir.



Şekil 7.8. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 0,04 mm/dev ilerleme sayısı b) 0,08 mm/dev ilerleme sayısı c) 0,12 mm/dev ilerleme sayısı

Haddeleme kuvvetine bağı Ra değerleri değişimi incelendiğinde ise şekil 7.9'daki grafikler elde edilmiştir.

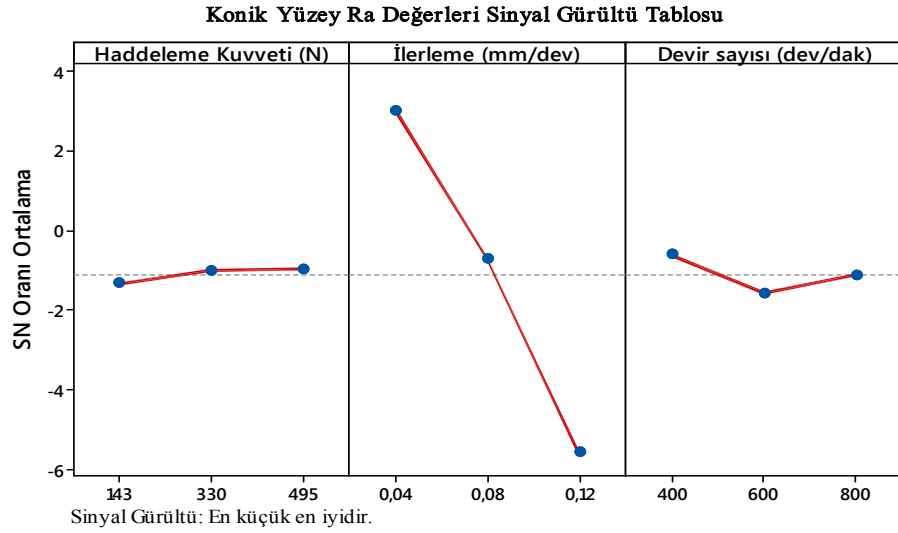
Şekil 7.9'daki grafikler incelendiğinde ilerleme artışı ile Ra değerlerinde de bir artış gözlenmektedir. Burada da devir sayısı artışı ile Ra değerlerinde belirgin bir artış veya azalışın olmadığı görülmektedir. Ayrıca düşük haddeleme kuvvetlerinde kararsızlıkların daha belirgin olduğu görülmekte, bu durum stabil ve kararlı bir yüzey yapısı için 330 N ve 495 N'luk haddeleme kuvvetlerinin daha uygun baskı kuvvetleri olduğunu sonucuna götürmektedir. Baskı kuvvetinin artışının yüzey pürüzlülüğünde artışa sebep olduğu söylenebilir (Abrao ve ark., 2014; Prabhu ve ark., 2011). Buradan en düşük Ra değerlerinin 0,04 mm/dev ilerlemede, 600 dev/dak devir sayısı ve 330 N'luk haddeleme kuvvetinde elde edilebildiği belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.9. Deney parametrelerinin Ra üzerinde etki grafikleri a) 143 N haddeme kuvveti b) 330 N haddeme kuvveti c) 495 N haddeme kuvveti

İş parçasının istenilen tolerans ve tamlığın elde edilebilmesi için yüzey kalitesinin en ideal seviyede olması gerekir. Yüzey kalitesi yüzey pürüzlülük değerinin en düşük olması ile elde edilebilmektedir. Bu nedenle Sinyal Gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında “en küçük en iyi” analizi yapılmıştır. Konik yüzey Ra değerleri sinyal-gürültü tablosu şekil 7.10’da verilmiştir.

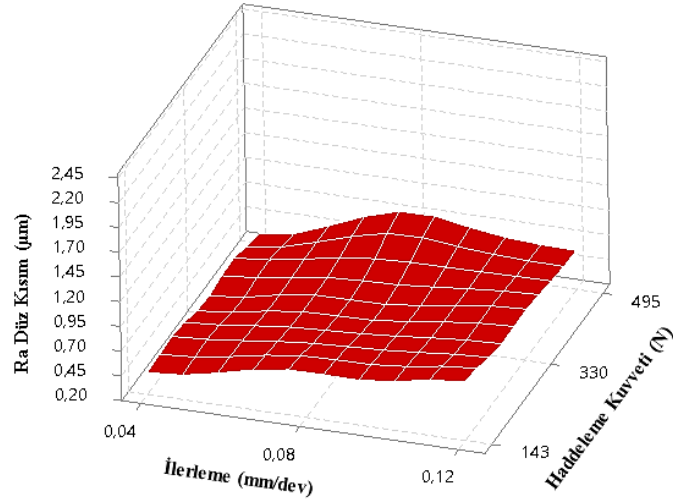
Şekil 7.10’daki yüzey pürüzlülüğüne etki eden grafik incelendiğinde konik yüzeydeki elde edilen Ra değerleri üzerinde en ideal parametre, haddeme kuvvetinde 495 N, ilerleme miktarında 0,04 mm/dev ve devir sayısında ise 400 dev/dak olduğu görülmektedir.



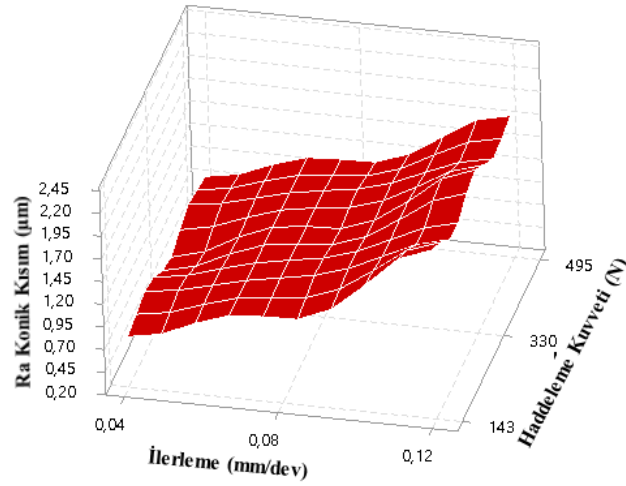
Şekil 7.10. Sinyal-gürültü tablosu

İşlem parametrelerinin tek başına Ra üzerindeki etkilerinin incelenmesi yanında parametrelerin ikili olarak etkisinin incelenmesi de sonuçların değerlendirilmesi açısından daha sağlıklı sonuçlar verecektir. Bu nedenle düz ve konik yüzeylerdeki elde edilen Ra değerlerinin ikili olarak parametrelere bağlı olarak nasıl davranış sergiledikleri incelenmiş ve şekil 7.11'deki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 7.11'deki grafikler incelendiğinde düz kısımdaki (a) Ra değerlerinin konik kısıma (b) göre daha küçük değerlerde olduğu, parametre değişimlerine göre düz kısımda (a) daha yatay bir seyir izlediği anlaşılmaktadır. Ayrıca en düşük Ra değerlerinin düşük ilerlemede olduğu haddelme kuvvetinin değişiminde konik yüzeyde (b) yukarı doğru bir artışın olduğu görülmektedir. Her iki yüzeyde de ilerleme artışı ile Ra değerlerinde artış oluşmaktadır. Burada Ra değerlerinde konik yüzeyde (b) daha yüksek Ra elde edilmesi, artan talaş hacmi sonucu daha fazla plastik deformasyona uğrayan malzemenin sonucu ile alakalı olduğu düşünülmektedir.



a)

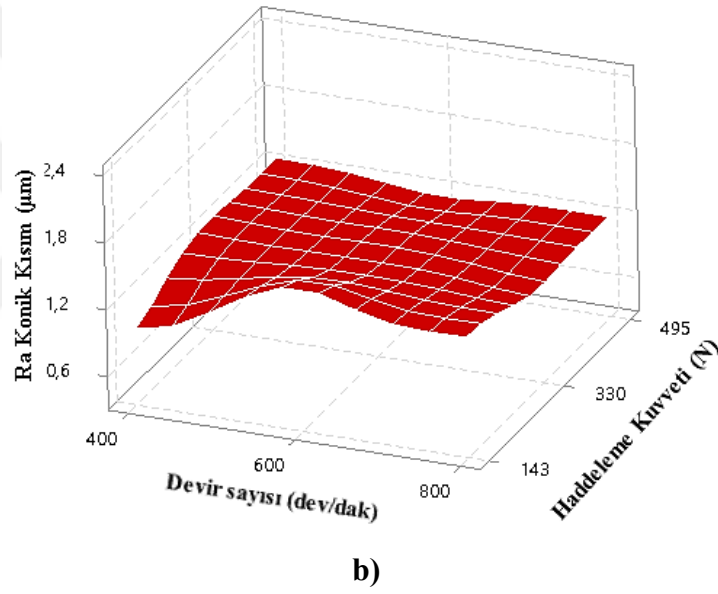
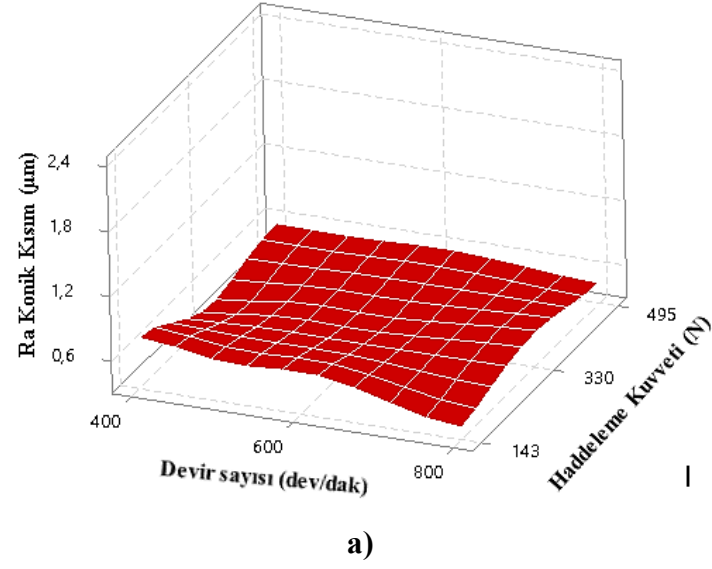


b)

Şekil 7.11. İlerleme ve haddeme kuvvetine bağlı olarak elde edilen Ra değerleri a) Ra düz kısım b) Ra konik kısım

Haddeme kuvveti ile devir sayısı arasındaki ilişki incelendiğinde şekil 7.12'deki grafikler elde edilmektedir.

Şekil 7.12'de görüldüğü üzere düz kısımdaki (a) Ra değerleri konik kısımdaki (b) Ra değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Tüm haddeme kuvveti ve devir sayısı değişimlerinde Ra değerleri arasında belirgin farklar görülmemektedir. Bu da bizi bu iki değer in Ra üzerinde çok fazla etkin olmadıkları sonucuna ulaştırmaktadır.



Şekil 7.12. Devir sayısı ve haddelene kuvveti ile ilgili elde edilen Ra grafikleri a)Ra düz kısım b) Ra konik kısım

7.2. Mikrosertlik Analizi

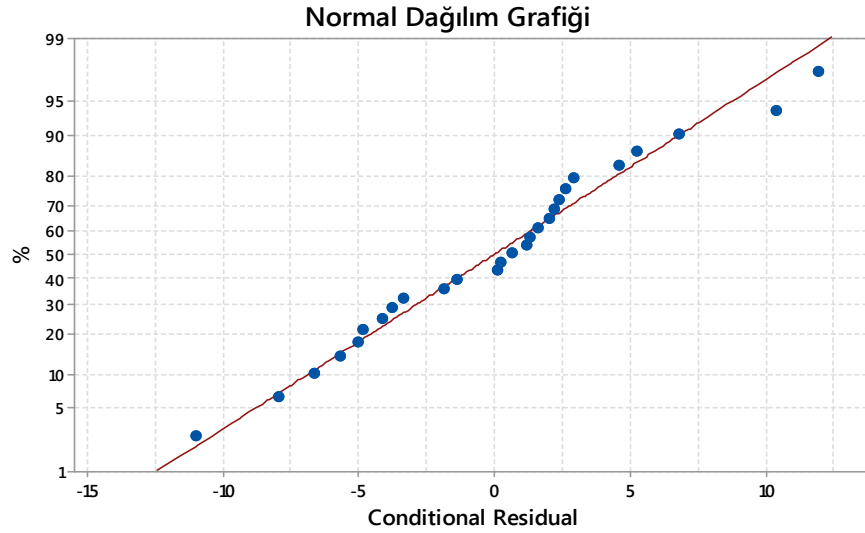
Derin haddelene işlemi uygulanmış deney numuneleri üzerinden alınan mikrosertlik ölçüm değerleri tablo 7.3'te verilmektedir.

Tablo 7.3. Deney parametreleri faktör seviyeleri ve Ra değerleri

Deney No	A	B	C	Mikrosertlik	Deney No	A	B	C	Mikrosertlik
1	1	1	1	158	15	2	3	2	158,63
2	1	2	1	163,53	16	2	1	3	167,13
3	1	3	1	165,26	17	2	2	3	155,9
4	1	1	2	154,8	18	2	3	3	160,7
5	1	2	2	164,1	19	3	1	1	168,1
6	1	3	2	169,6	20	3	2	1	159,53
7	1	1	3	162,73	21	3	3	1	161,46
8	1	2	3	163,7	22	3	1	2	165,4
9	1	3	3	158,76	23	3	2	2	174,7
10	2	1	1	164,46	24	3	3	2	164,96
11	2	2	1	173,26	25	3	1	3	162,63
12	2	3	1	164,86	26	3	2	3	156,86
13	2	1	2	151,8	27	3	3	3	157,5
14	2	2	2	165,66					

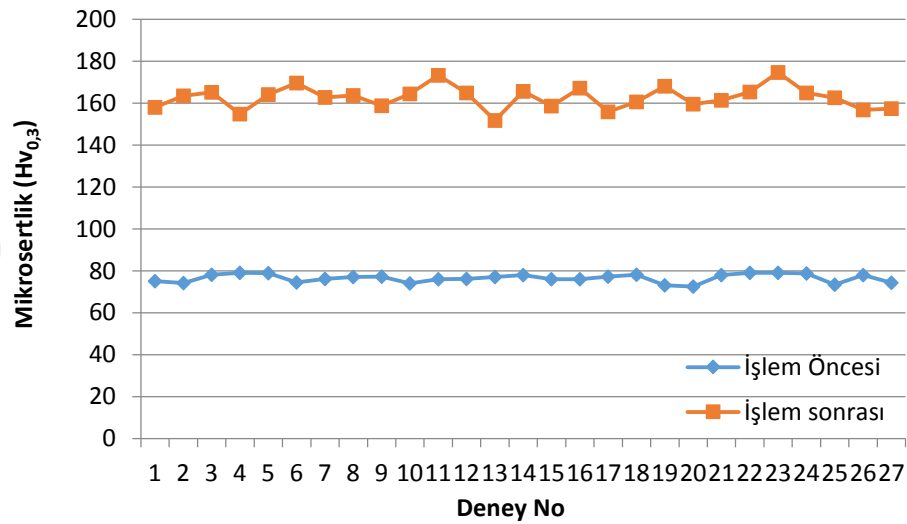
Tablo 7.3'teki elde edilen mikrosertlik değerlerinin istatistiksel analiz öncesi normal dağılım gösterip göstermediği analiz edilmiş ve şekil 7.13'teki grafik elde edilmiştir.

Şekil 7.13 incelendiğinde elde edilen sonuçların normal şekilde dağılım gösterdikleri görülmektedir. Haddelme işlemi uygulanan yüzeylerde yüzey sertliklerinin arttığı bilinmektedir. Çalışmada haddelmenin bu etkisini gözlemek amacıyla haddelme işlemi öncesi ve sonrasında mikrosertlik değerlerindeki artış ölçülmüştür.

**Şekil 7.63.** Mikrosertlik normal dağılım grafiği

Ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi şekil 7.14'teki grafikte görülmektedir.

Şekil 7.14 incelendiğinde, haddeleme öncesinde 70-75 Hv_{0,3} aralığında olan mikrosertlik değerlerinin haddelemenin etkisi ile %100 oranına yakın oranda arttığı ve 160-180 Hv_{0,3} aralığında sertlik değerleri elde edildiği görülmektedir. Buradan haddelemenin tüm şartlarda işlem ile birlikte yüzey sertliğini arttırdığı sonucuna ulaşılabilmektedir. Tayeb ve ark. Al6061 malzemeye ezerek parlatma işlemi uygulandığı zaman farklı işlem parametrelerine bağlı olarak 78-92 HRB(150-200 Hv) mikro sertlik bulunduğunu söylemişlerdir (Tayeb ve ark., 2007). Egea ve ark. Al2050 malzemenin ezerek parlatma işleminden sonra yüzey sertliğinin %37,5 arttığını ve 140-160 Hv mikro sertlik bulunmuştur (Egea ve ark., 2019). Koçak çalışmasında Al6013 malzeme için % 10 sertlik artışı ve MS 58 malzeme için % 20 sertlik artışı tespit etmiştir. İşlem sonrasında bulunan mikro sertlik değerleri literatürdeki değerlere benzer şekildedir (Koçak, 2020).

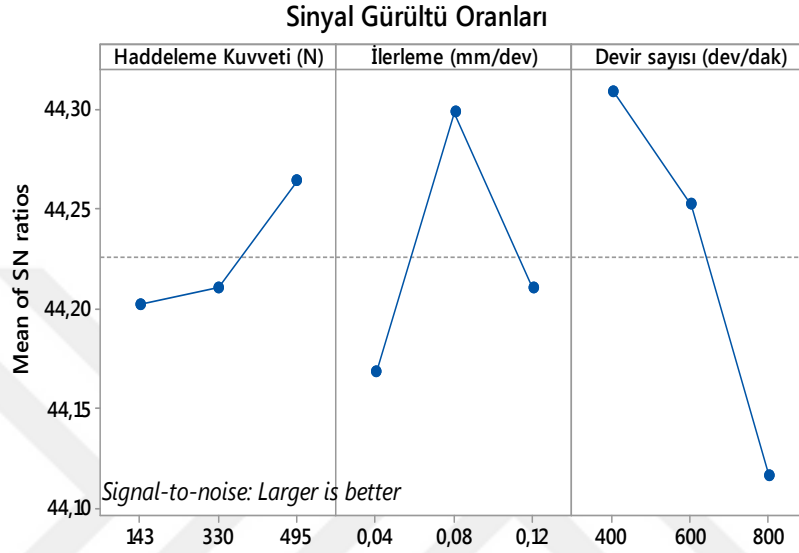


Şekil 7.74. Haddeleme öncesi ve sonrası sertlik değişimi grafiği

Elde edilen mikrosertlik değerleri üzerinde işlem parametrelerinin sonuç üzerinde hangi seviyede etki ettiğini görmek için ise sinyal gürültü analizi yapılmıştır. Sinyal gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında “en büyük en iyi” prensibi referans alınmıştır. Bu analiz ile ilgili elde edilen grafik şekil 7.15’te görülmektedir.

Şekil 7.15’te mikrosertliği etki eden grafik incelendiğinde Ra üzerinde en ideal parametre değerlerinin haddeleme kuvvetinde 495 N, ilerlemede 0,08 mm/dev ve devir sayısında ise 400 dev/dak olduğu görülmektedir. Hadde basıncının 495 N olduğu deneylerde ortalama değerlerin üzerinde sertlik artışlarının olduğu 143 N ve 330 N değerlerinde ise ortalamanın altında sertlik değerlerin olduğu görülmektedir. İlerleme

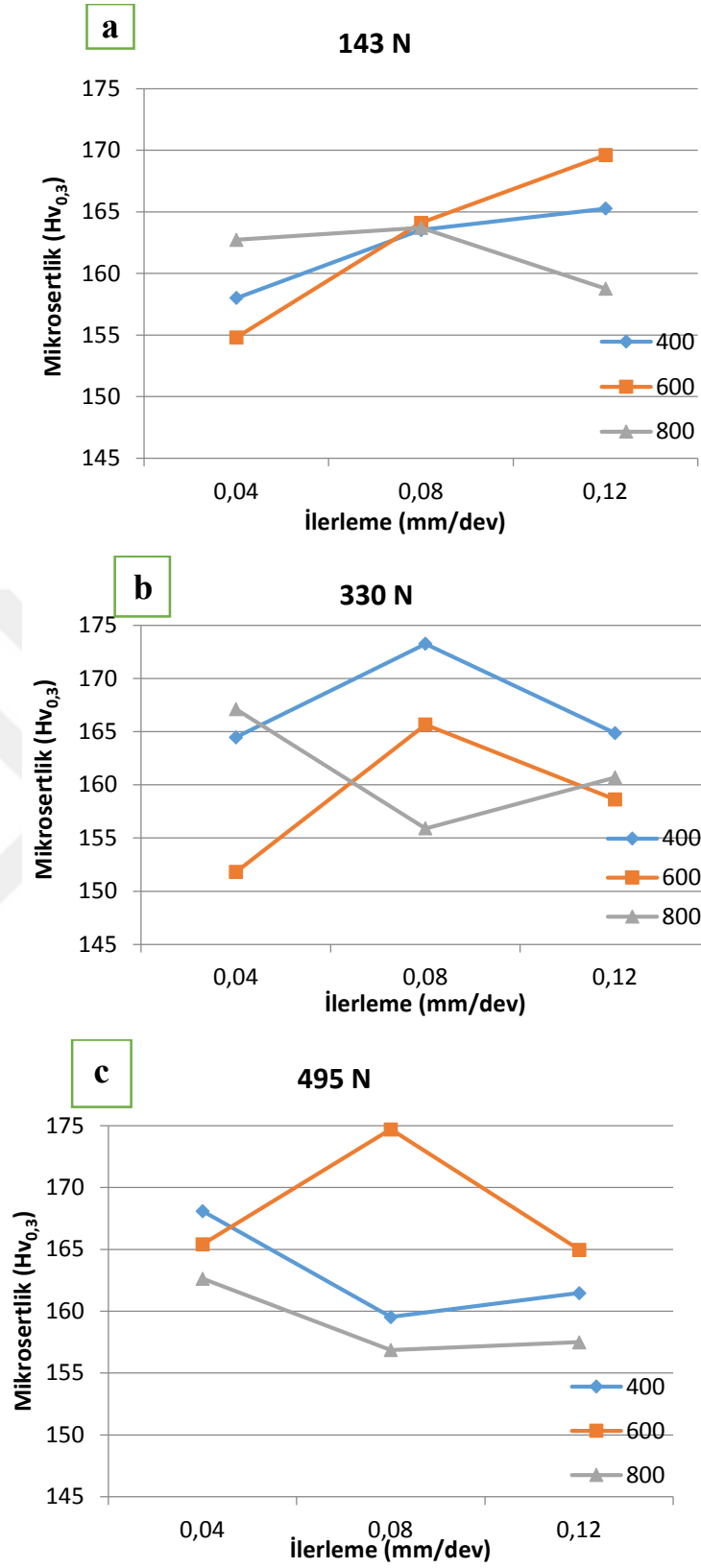
değerinde ise 0,04 mm/dev ve 0,12 mm/dev değerlerinin sertlik anlamında istenilen değeri oluşturmadığı ve 0,08 mm/dev değerinin sertlik için optimum seviye olduğu söylenebilir. Devir sayısı ile sertlik arasında ters bir orantının olduğu görülmektedir. Burada sürtünmeye bağlı sıcaklığa bağlı olarak sertlikte artışın olduğu ve bu değerinde 400 dev/dak'da elde edildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.15. Sinyal-gürültü tablosu

İşleme parametreleri ile mikrosertlik arasındaki değişimi görmek için yapılan değerlendirmelerde şekil 7.16'daki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 7.16 incelendiğinde mikrosertlik ile parametreler arasında sonuca varmak için yeterli bir eğilimden söz etmek zor görünmektedir. Tüm parametreler ve parametre seviyeleri ile gerek Ra ve gerekse mikrosertlik sonuçları beraber değerlendirildiğinde literatürdeki çalışmalarında en önemli problem noktası olan kesin denebilecek kanaatlere ulaşılamaması problemi bizim çalışmamızda da benzer şekilde oluşmuştur. Genel kanaatler elde edilmesine karşın talaşlı üretim veya taşlama gibi yüzey düzeltme operasyonlarındakine benzer kesinlikte kanaatlerin oluşması için bilyeli ve derin haddemele ile ilgili daha fazla çalışmanın yapılmasını gerektirmektedir.

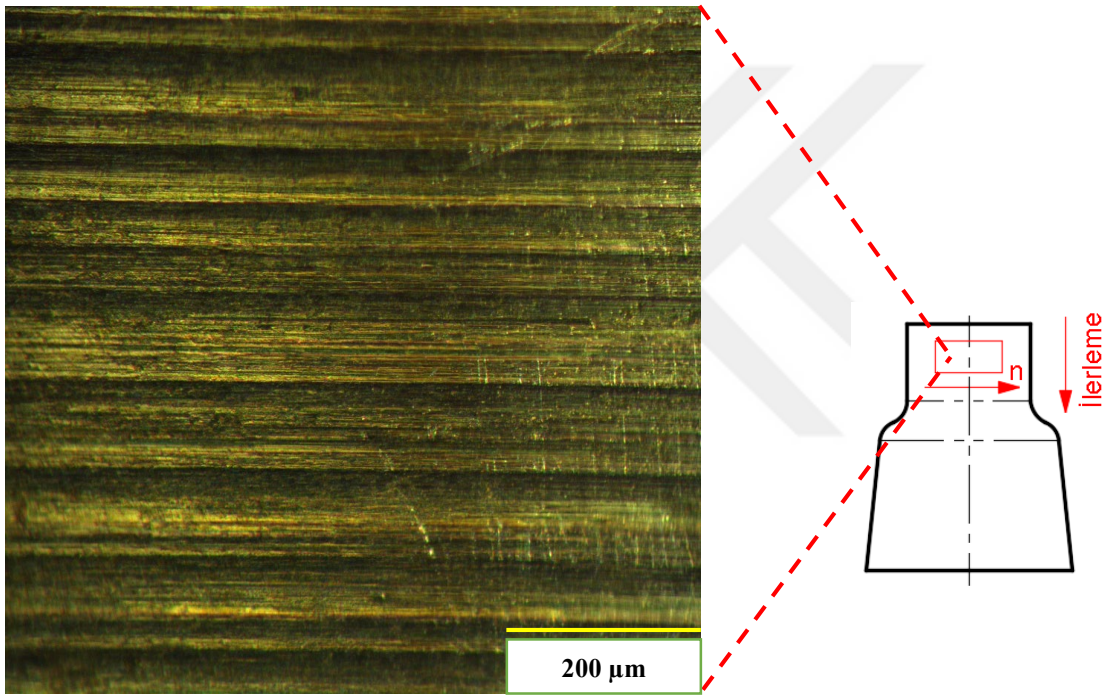


Şekil 7. 16. İşleme parametreleri ile mikrosertlik arasındaki ilişki grafiği

7.3. Optik Mikroskop Görüntüleri

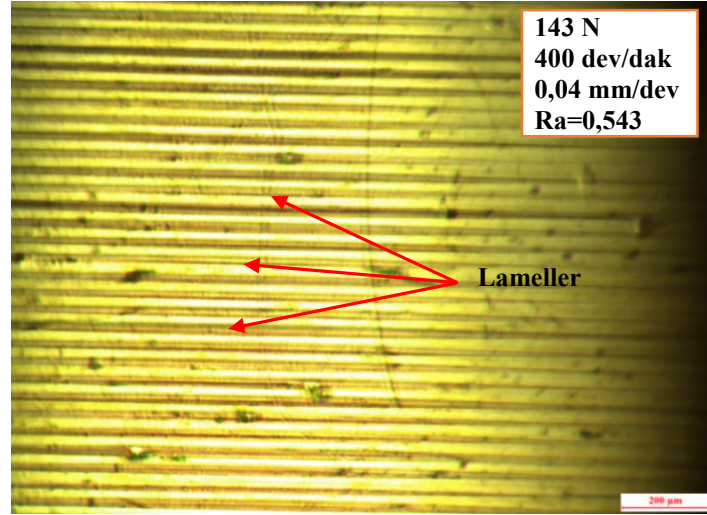
Derin haddeleme sonrası yüzey özelliklerinin incelenmesi için hem optik mikroskop görüntüleri hem de SEM görüntüleri çekilmiştir. Çekilen optik fotoğraflarda yatay çizgiler parça eksenine dik yönü temsil etmektedir. Alınan optik fotoğraflar silindirik yüzeylerin en tepe noktalarından alınmıştır. Haddeleme yapılmadan önce finiş tornalama operasyonu uygulanmış yüzey görüntüsü şekil 7.17’de görülmektedir.

Şekil 7.17 incelendiğinde genel anlamda literatürde tornalama operasyonu sonucu oluşan normal görüntünün burada da oluştuğu görülmektedir.

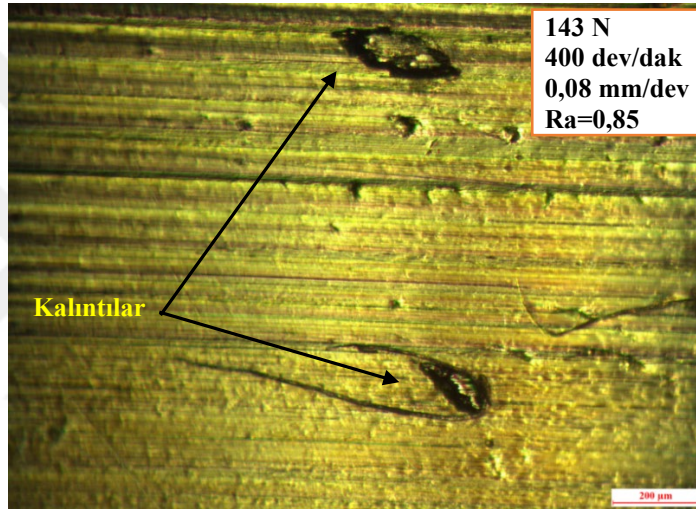


Şekil 7.17. Derin haddeleme öncesi yüzey optik görüntüsü

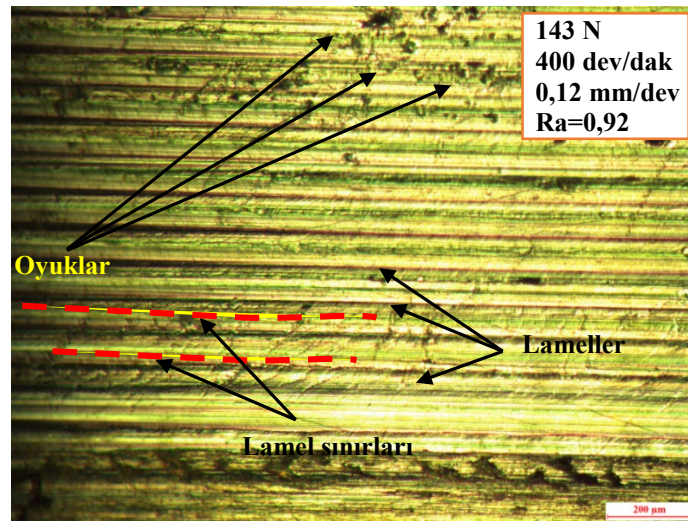
Haddeleme sonrası elde edilen görüntülerde ise şekil 7.18’deki görüntüler elde edilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 7. 18. 143 N haddeme kuvvetinde elde edilen optik fotoğraflar a)Ra=0,543 b)Ra=0,85 c)Ra=0,92

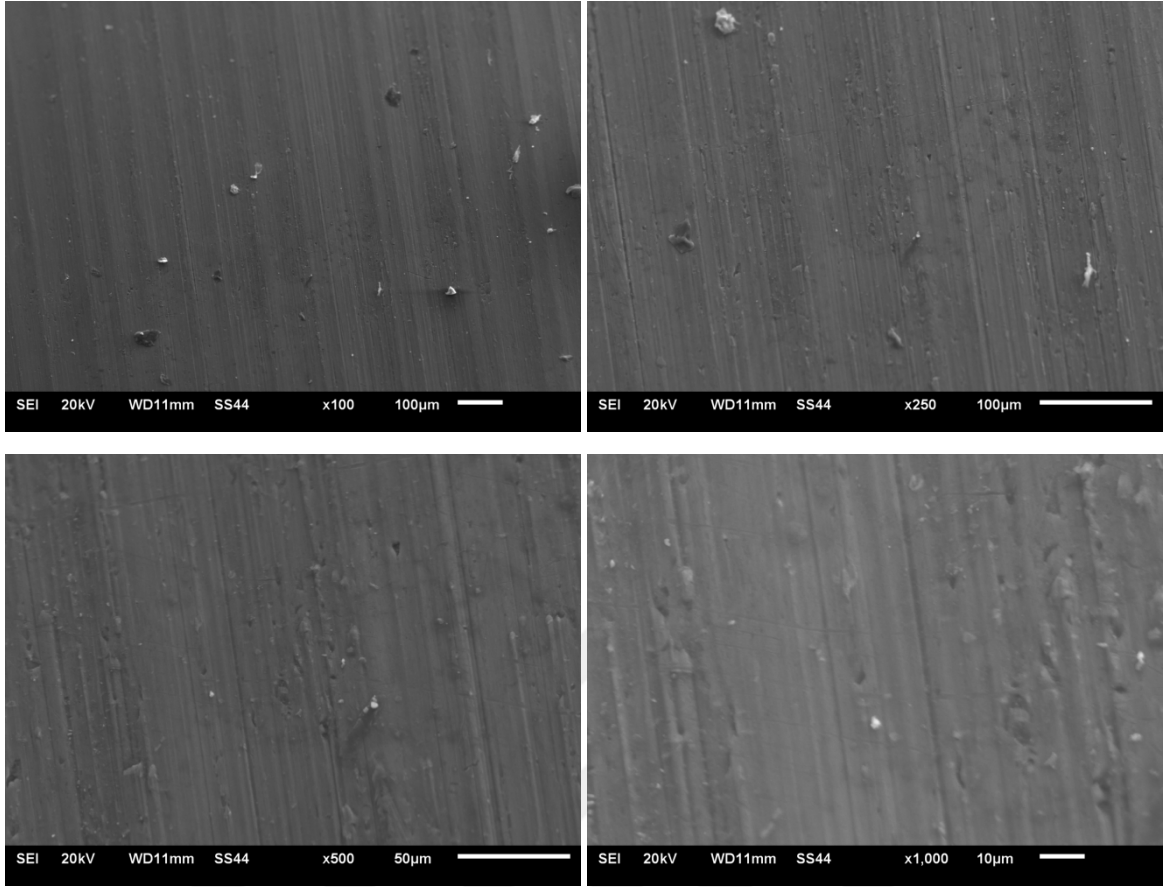
Numuneler Şekil 7.17’de ve Şekil 7.18’de verildiği üzere 200x büyütülerek alınmıştır. Görüntülerde parçacıkların genel olarak homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Al6061 alüminyum alaşımında küçük ebatlarda mikro gözeneğe sahip olduğu görülmektedir. Şekil 7.18’deki mikroskop görüntülerine bakıldığı zaman parlak yüzeyler tepe şeklinde oldukları için daha parlak olarak görülmekte, koyu bölgeler ise derin yarıklar şeklinde erozyon aşınmasına uğramıştır. Derin haddelemede sürtünmeden dolayı bazı yerlerde kalıntılar bazı yerlerde de oyuklar oluşabilmektedir.

Genel anlamda derin haddelemede şekil 7.18’de görülen yüzey yapısı daha önceki çalışmalarda da görülmektedir (Herbster ve ark., 2021; Chen ve ark., 2022). Ayrıca şekil 7.18 incelendiğinde ilerlemenin artışı ile yüzeyde bozulmaların meydana geldiği açık bir şekilde görülmektedir. Literatürde (Prabhu ve ark.) derin haddelemede baskı kuvvetinin artması ile yüzey pürüzlülüğünde artışın olduğu ifade edilmektedir.

7.4. SEM Görüntüleri

Derin haddeleme sonrası elde edilen yüzeylerin analizi ve yüzey morfolojisi ile ilgili değerlendirmeler için SEM analizleri yapılmıştır. Öncelikle kıyaslama amacıyla derin haddeleme öncesi finiş tornalama operasyonu uygulanmış yüzeyin SEM görüntüleri çekilmiş (şekil 7.19) ve derin haddeleme sonrası incelenmesi ve kıyaslanması amaçlanmıştır.

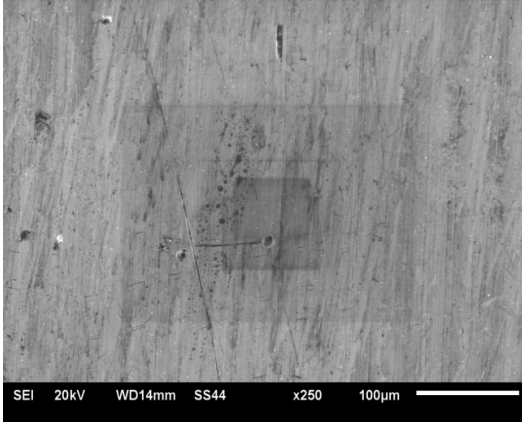
Şekil 7.19 incelendiğinde yüzey üzerinde bazı kalıntıların bulunduğu görülmektedir.



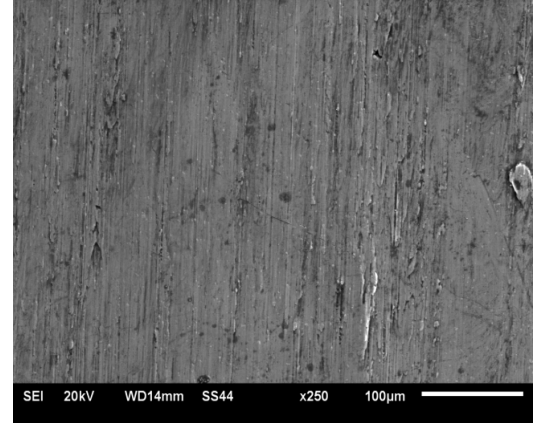
Şekil 7.19. Derin haddeleme uygulanmış finiş tornalama yüzey görüntüleri

Burada haddeleme kuvvetinin etkisini görmek için yapılan SEM görüntülerde şekil 7.20'deki yapılar elde edilmiştir.

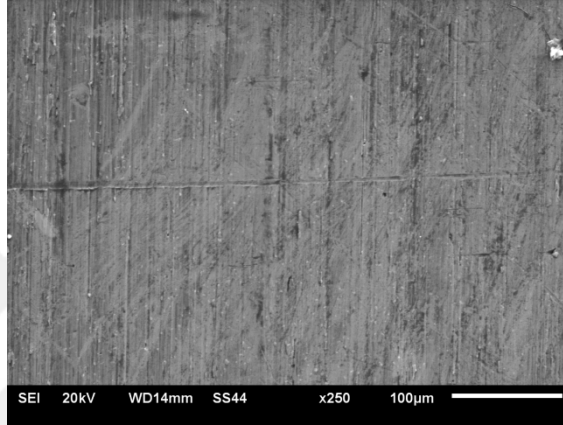
Şekil 7.20 incelendiğinde ilerleme artışına bağlı olarak yüzeylerde oyuk, çizik ve kalıntıların arttığı görülmektedir. Bu durumun sonucu olarak Ra değerlerinde artış olduğu kaydedilmektedir. Derin haddeleme mekaniği incelendiğinde ezmeden dolayı oluşan bir plastik deformasyonun olduğu görülmektedir. Bu plastik deformasyonun işlem parametrelerine göre şekillendiği, artık veya çukur gibi oluşumlar ürettiği ve yüzey topoğrafyasını her parametrenin etkisine bağlı ortaya çıktığı kesindir. Bu mekanik çok karmaşık, malzeme cinsi, oluşan sürtünme davranışları, ısı vb. sonuçlarla oluşan ve henüz üzerinde belirli bir modellemenin kanıtlamadığı bir işlem cinsidir. Yapılan çalışmalarda bazı sonuçlara ulaşılsa da konu henüz tam anlamıyla netlik kazanmamıştır. Bu nedenle çok daha fazla çalışmanın yapılması gerekmektedir.



Ra=0,543 µm 143N, 0,04 mm/dev, 400 dev/dak



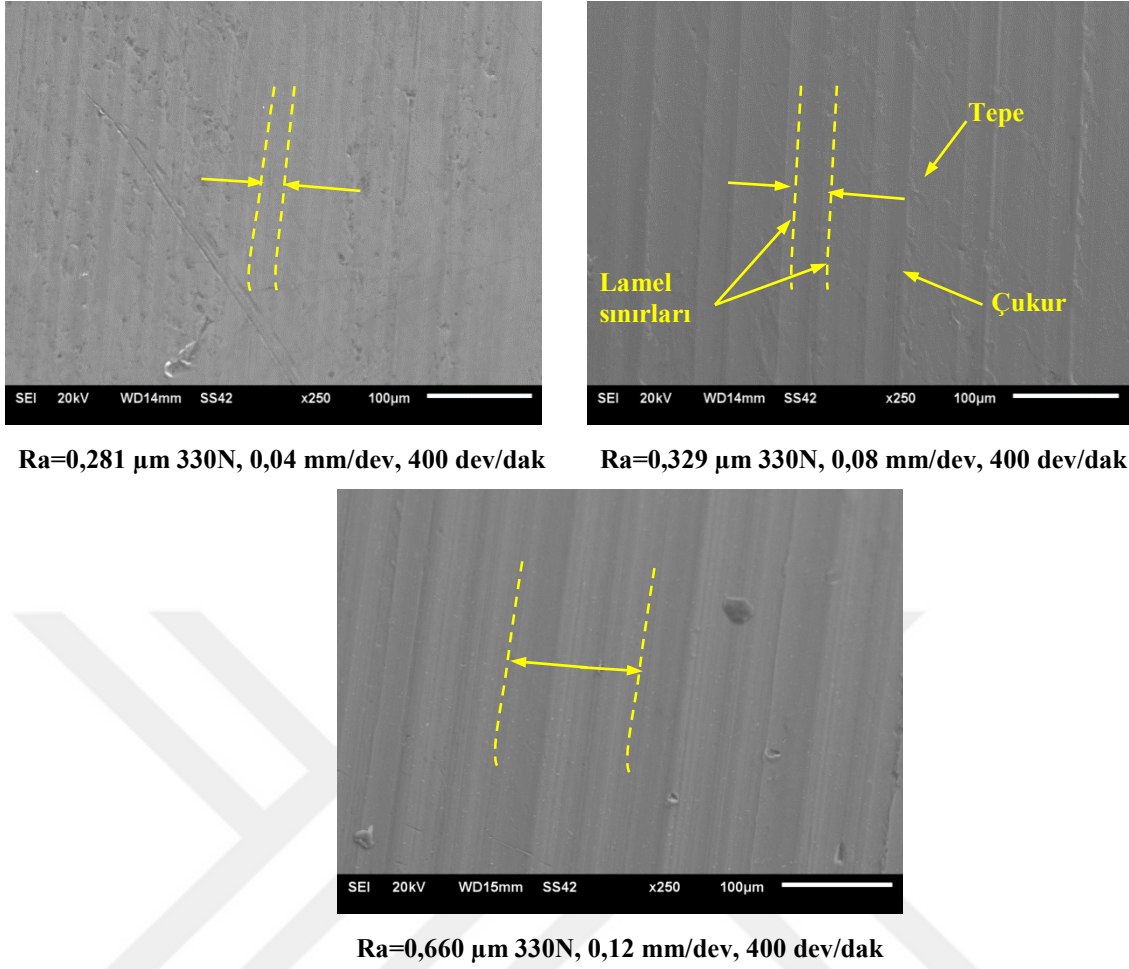
Ra=0,850 µm 143N, 0,08 mm/dev, 400 dev/dak



Ra=0,920 µm 143N, 0,12 mm/dev, 400 dev/dak

Şekil 7.20. 143 N haddeleme kuvvetinde elde edilen SEM görüntüleri

Haddeleme kuvvetinin artışına bağlı olarak incelendiğinde şekil 7.21'deki yapılar elde edilmiştir.

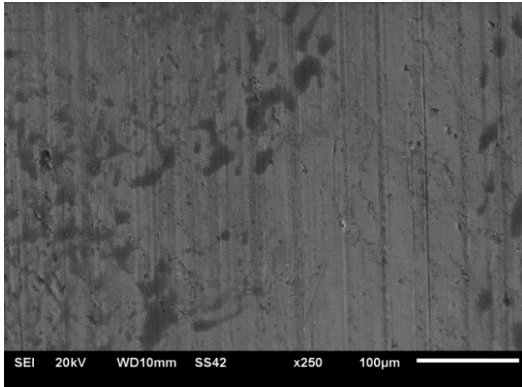


Şekil 7.21. 330 N haddeleme kuvvetinde elde edilen SEM görüntüleri

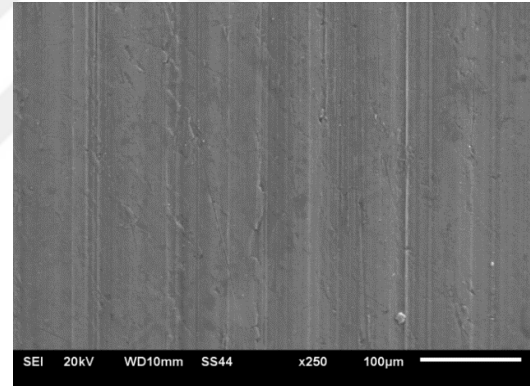
Şekil 7.20 ve şekil 7.21 beraber incelendiğinde yüzey topoğrafyasının daha da düzgün hale geldiği, kalıntı, oyuk yapılarının azaldığı ve buna bağlı olarak ta Ra değerlerinde 143 N haddeleme kuvvetine göre azalmaların meydana geldiği görülmektedir. 330 N haddeleme kuvvetinde ise ilerleme miktarının artışına bağlı olarak Ra değerlerinde artma görülmektedir. Derin haddelemede birinci paso finiş pasosundan kalan tepelerin ilk plastik deformasyonu ile çukur kısımlara doldurulduğu pasodur. Haddeleme kuvvetinin az oluşu, bu pasoya bağlı olarak daha az tepe oluşumunun vadilere dolması şeklinde sonuç ortaya çıkarmaktadır. Haddeleme kuvvetinin artışı ile birlikte baskı kuvvetinin daha çok malzeme miktarının vadilere dolmasını sağlamakta ve bunun sonucu olarak daha düzgün bir yüzeyin oluşumuna neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak ta Ra değerleri daha da düşmektedir. İlerleme artışına bağlı olarak Ra artışı da şekil 7.21'dekine paralel olarak artmaktadır. Burada Ra değerlerini belirleyen en önemli husus şekil 7.20'de de görüldüğü üzere lamelli yapı arasındaki mesafenin

ilerlemeye paralel artması ve Ra değerlerine bunun yansımasıdır. 495 N haddeleme kuvveti uygulanmış SEM görüntüleri ise şekil 7.22’de verilmektedir.

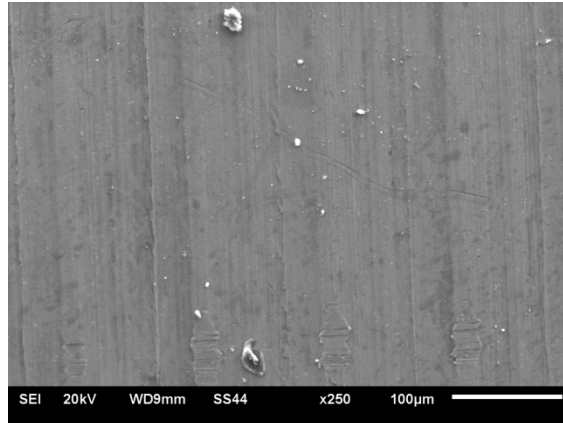
Şekil 7.22 incelendiğinde ve 143 N ve 330 N’luk haddeleme kuvveti ile elde edilen şekil 7.20 ve şekil 7.21’deki yapılar göz önüne alındığında 330 N’luk haddeleme kuvvetinin en iyi Ra değerleri ürettiği söylenebilir. Burada haddeleme baskı kuvvetinin artışı, malzeme yüzeyinde ilerleme artışına bağlı olarak aşırı plastik deformasyona, yüzey üzerindeki vadilerin hacminden daha fazla malzeme ile dolarak burada yüzeyde bozulmalara neden olduğu kanaatine varılmıştır. Bu noktada derin haddeleme öncesi Ra değerleri önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Derin haddelemenin işlem öncesi Ra değerleri ve buna bağlı olarak tepe ve vadi hacimlerinin belirlenmesi ve sonrasındaki uygulanacak derin haddelemenin parametrelerinin buna göre belirlenmesi gerekmektedir. Bu konuda optimizasyona yönelik çalışmalar yapılmakta ve yapılmalıdır. Derin haddeleme öncesi Ra değerlerinin etkinliğini gösteren çalışmalar mevcuttur (Prabhu ve ark., 2020; Prabhu ve ark., 2011).



Ra=0,353 μm 495N, 0,04 mm/dev, 400 dev/dak



Ra=0,731 μm 495N, 0,08 mm/dev, 400 dev/dak



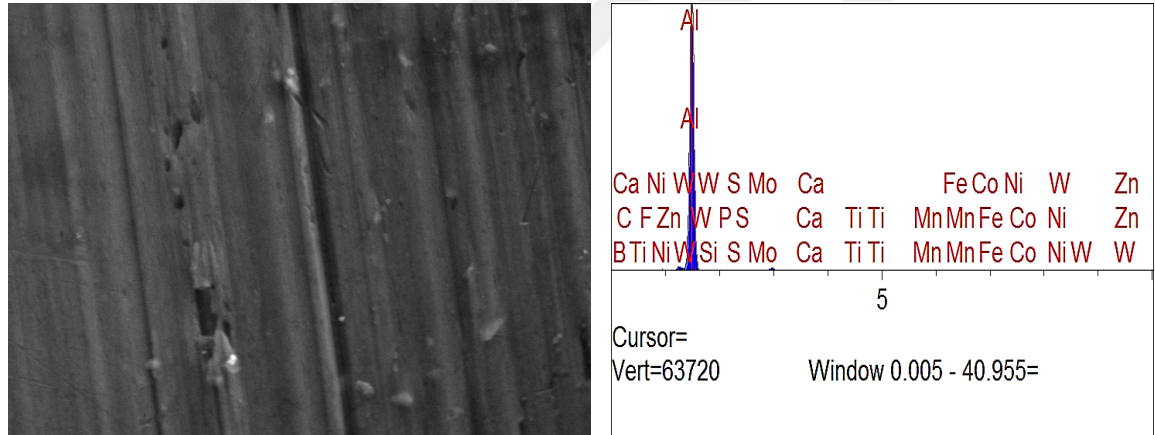
Ra=0,616 μm 495N, 0,12 mm/dev, 400 dev/dak

Şekil 7. 22. 495 N haddeleme kuvvetinde elde edilen SEM görüntüleri

7.5. EDX Görüntüleri

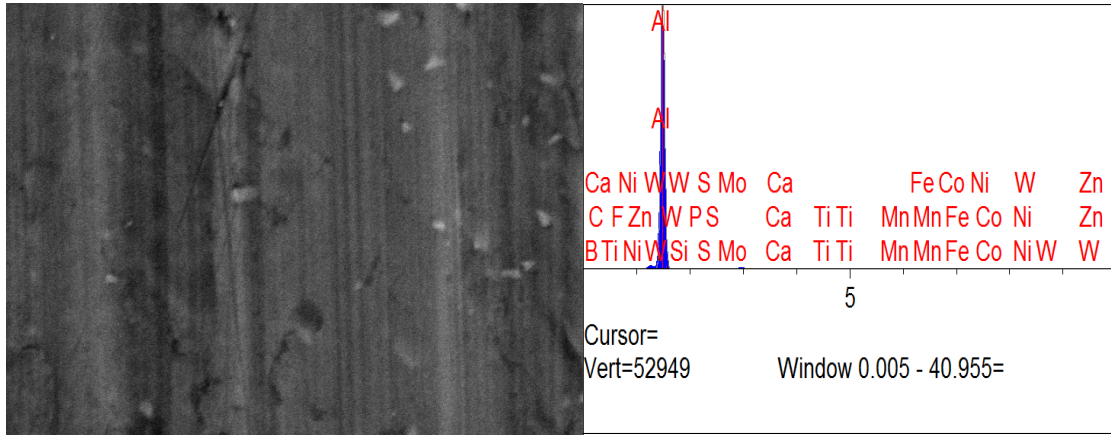
Derin haddeleme işleminde işlenen yüzey üzerindeki faz farklılıklarının ve oluşan yapıların analizi amacıyla yüzeyler üzerinden EDX analizleri yapılmış, SEM görüntüleri alınmıştır. Öncelikle finiş tornalama operasyonu uygulanmış yüzeylerdeki yapının incelenmesi ve sonrasında derin haddeleme işlemi uygulanmış yüzeylerdeki değişimle karşılaştırılması amacıyla derin haddeleme öncesi yüzey durumu çekilmiştir. Analizlerde numune üzerinde alınan yüzeyin genel haritalanması (mapping) yapılmış, sonrasında ise yüzey üzerindeki farklı yapıların olduğu noktalardan analizler yapılmıştır. Finiş operasyonu uygulanmış yüzey SEM görüntüleri ve EDX analizleri şekil 7.23'te görülmektedir.

Şekil 7.23 finiş operasyonu sonrası genel görüntü haritasıdır. Burada işlemeye bağlı olarak %5,236 oranında C (karbür) oluştuğu görülmektedir. Genel Al yapısı oran olarak %93,17 olarak oluşmuştur. İşlemeye bağlı olarak Al6061-T6 sınıfı alüminyum içeriğinde bulunmayan C elementi, oluşan sürtünme ve ısı sonucu oluşmaktadır.



Şekil 7.83. Finiş operasyonu uygulanmış derin haddeleme öncesi genel SEM görüntüsü ve EDX analizi

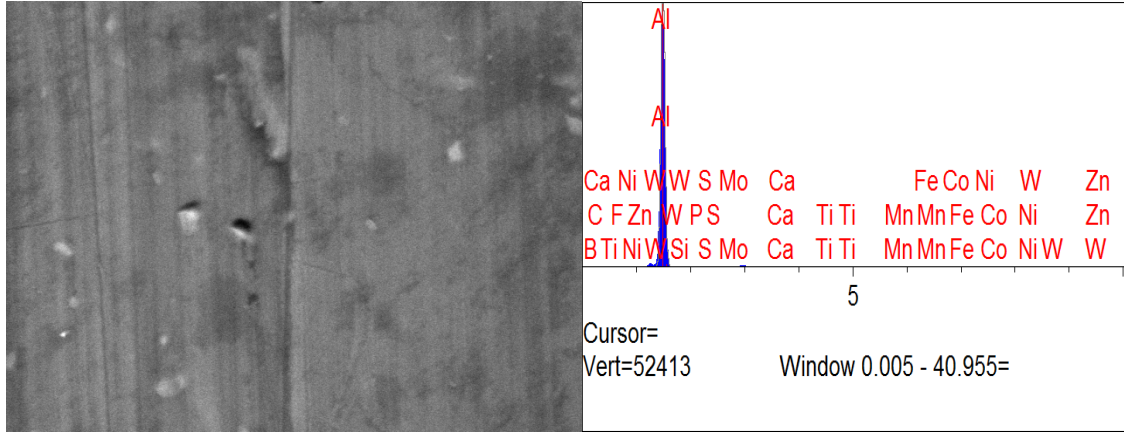
Derin haddeleme sonrası elde edilen grafiklere bakıldığında ise şekil 7.24'teki veriler oluşmaktadır.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
C	Ka	4.91	1.374	4,050	wt.%
Al	Ka	8,938.99	24.561	94.204	wt.%
Si	Ka	12.17	2.178	0.380	wt.%
Ti	Ka	2.56	1.633	0.053	wt.%
Mn	Ka	11.73	1.577	0.320	wt.%
Fe	Ka	8.43	1.491	0.256	wt.%
Co	Ka	1.27	1.255	0.045	wt.%
Zn	Ka	3.41	1.146	0.209	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Şekil 7.24. Derin haddeleme uygulanmış derin haddeleme öncesi genel SEM görüntüsü ve EDX analizi (330 N, 0,04 mm/dev ve 400 dev/dak)

İlerlemenin etkisinin incelenmesi ile ilgili de şekil 7.25'teki veriler elde edilmiştir.



Elt	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
C	Ka	6.71	1.396	3.797	wt.%
Al	Ka	7,278.39	22.170	94.700	wt.%
Si	Ka	9.61	2.058	0.357	wt.%
Ti	Ka	2.04	1.457	0.051	wt.%
Fe	Ka	7.61	1.341	0.277	wt.%
Co	Ka	1.10	1.094	0.047	wt.%
Zn	Ka	4.22	1.048	0.312	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Şekil 7.25. Derin haddeleme uygulanmış derin haddeleme öncesi genel SEM görüntüsü ve EDX analizi (330 N, 0,12 mm/dev ve 400 dev/dak)

Şekil 7.24 ve 7.25 beraber değerlendirildiğinde, ısınma ve sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklık etkisiyle C oluşumu gözlenmektedir. Şekil 7.24'te ilerlemenin 0,04 mm/dev olduğu durumda oluşan C oranı 4,050 iken Şekil 7.25'te ilerlemenin 0,12 mm/dev olduğu durumda 3,797 olmuştur. Bu da ilerleme artışı ile birlikte yüzey üzerinde oluşan C miktarının azaldığını göstermektedir. Burada ilerlemenin düşük olması ezici ucun malzeme üzerinde süre ve yol anlamında daha fazla kaldığını, bunun sonucu olarak ta sürtünme, aşınma ve ısı oluşumunun artışı ile C (karbür) miktarında artış meydana geldiği kanaati oluşmuştur. Bu durumun işlem parametreleri ile C miktarı arasındaki ilişkiye yönelik incelenmesi için diğer tüm deneylerdeki analizler de incelendiğinde C oranları ile ilgili veriler Tablo 7.4'te görülmektedir.

Tablo 7.4. Deneylere göre C (Karbür) miktarı oranları

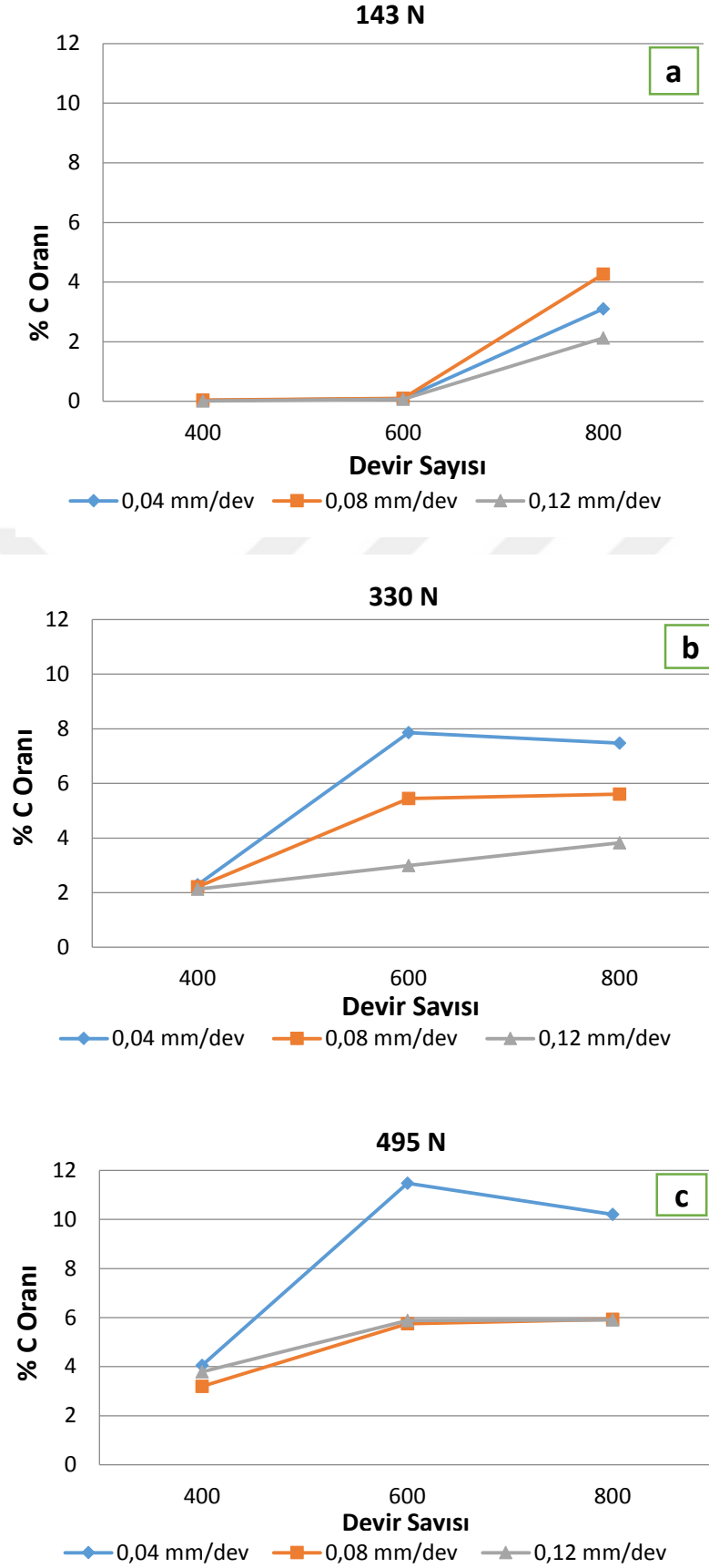
Deney sıra no	Haddeleme kuvveti (N)	İlerleme (mm/dev)	Devir Sayısı (dev/dak)	C Oranı
1	143	0,04	400	0,034
2	143	0,08	400	0,045
3	143	0,12	400	0,018
4	143	0,04	600	0,088
5	143	0,08	600	0,098
6	143	0,12	600	0,076
7	143	0,04	800	3,099
8	143	0,08	800	4,264
9	143	0,12	800	2,124
10	330	0,04	400	2,285
11	330	0,08	400	2,21
12	330	0,12	400	2,123
13	330	0,04	600	7,86
14	330	0,08	600	5,45
15	330	0,12	600	2,99
16	330	0,04	800	7,47
17	330	0,08	800	5,605
18	330	0,12	800	3,82
19	495	0,04	400	4,05
20	495	0,08	400	3,2
21	495	0,12	400	3,79
22	495	0,04	600	11,48
23	495	0,08	600	5,756
24	495	0,12	600	5,88
25	495	0,04	800	10,211
26	495	0,08	800	5,927
27	495	0,12	800	5,91
Parlatmasız				5,236

Parametrelerin grafiksel olarak incelenmesi durumunda her üç haddeleme kuvvetinde devir sayısı ile %C oranı ilişkisi grafiksel olarak şekil 7.26'da gösterilmektedir.

Şekil 7.26 incelendiğinde haddeleme kuvvetinin artışı ile %C oranlarında doğru orantılı olarak bir artış gözlenmektedir. Ayrıca her üç grafikten devir sayısının artışı ile de artış olduğu görülmekte ancak 400 dev/dak ile 600 dev/dak arasında belirgin bir fark görünmesine rağmen 600 dev/dak ile 800 dev/dak arasında özellikle 330 N (şekil 7.26 b) ve 495 N (şekil 7.26 c) haddeleme kuvvetlerinde yatay yönde birbirine yakın %C karbür değerleri elde edilmektedir. İlerleme olarak bakıldığında ise her üç haddeleme kuvvetinde en düşük ilerleme değeri olan 0,04 mm/dev değerinde en yüksek %C miktarları oluşmaktadır. Ayrıca şekil 7.26 a'da da görüldüğü üzere düşük haddeleme

kuvveti uygulandığında yüksek devirlerde karbür oluşmakta, düşük devirlerde yüzey yapısında herhangi bir karbür miktarına rastlanılmamaktadır. Burada %C miktarının sürtünme ve sıcaklıktan kaynaklı olarak değiştiği, devir sayısının artışı ile ısı artışının %C oranını arttırdığı düşünülmektedir. İlerlemenin az oluşunda ise ezici ucun parça üzerinde daha fazla teması neticesinde sürtünmeye bağlı ısı artışının %C değerini arttırdığı düşünülmektedir.

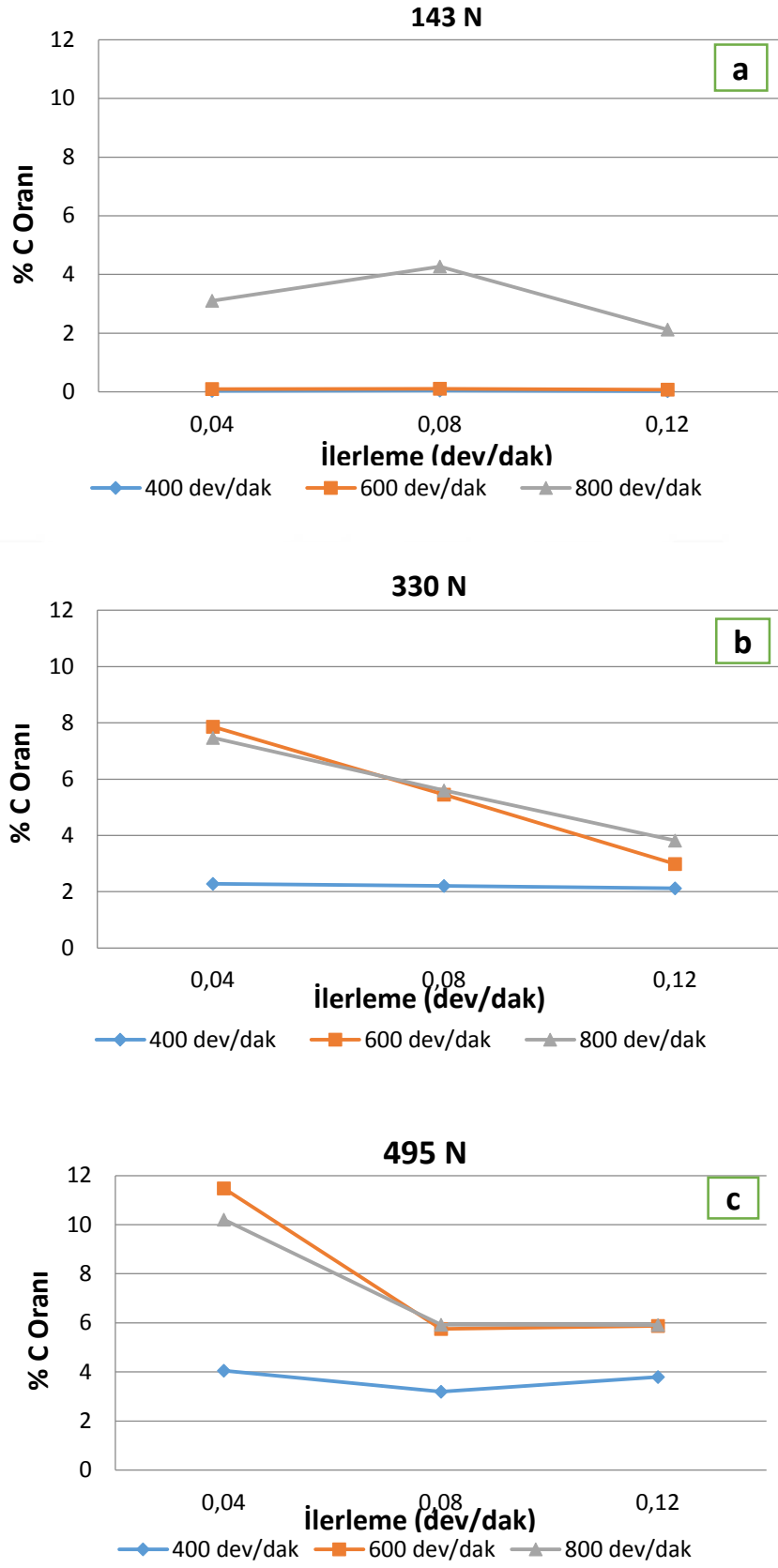




Şekil 7. 96. %C oranı ile devir sayısı ilişki grafiği a) 143 N b)330 N c)495 N

İlerlemeye bağılı olarak %C oranının farklı devirlerdeki davranışına yönelik yapılan analizlerde şekil 7.27’teki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 7.27 incelendiğinde düşük haddeleme kuvvetinde 400 dev/dak ile 600 dev/dak devirlerde ilerleme artışının %C oranına etkisi bulunmamakta (şekil 7.27 a), 800 dev/dak devirde ise %C miktarında bir artış gözlenmekte ancak ilerleme değerinin artışına rağmen yatay seyrin çok değişmediği görülmektedir. Burada haddeleme kuvvetinin 143 N olarak düşük olması ile malzeme üzerinde yüzeyin plastik deformasyonuna ait büyük yapı değişikliklerinin olmaması, sürtünme ve aşınma mekanizmaları ile oluşan ısının artmaması nedeniyle %C miktarında artış görülemediği düşünülmektedir. Daha yüksek haddeleme kuvvetlerinde ise (şekil 7.27 b ve c) 400 dev/dak düşük devir sayısında ilerleme artışına bağılı olarak benzer şekilde %C oranında yatay bir eğilim görülmekte, daha yüksek devirlerde ise ilerleme artışı ile %C oranının ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir. En yüksek haddeleme kuvvetinde ise (495 N) 0,08 mm/dev ile 0,12 mm/dev ilerleme değerinde birbirine yakın %C değerleri elde edilmektedir.

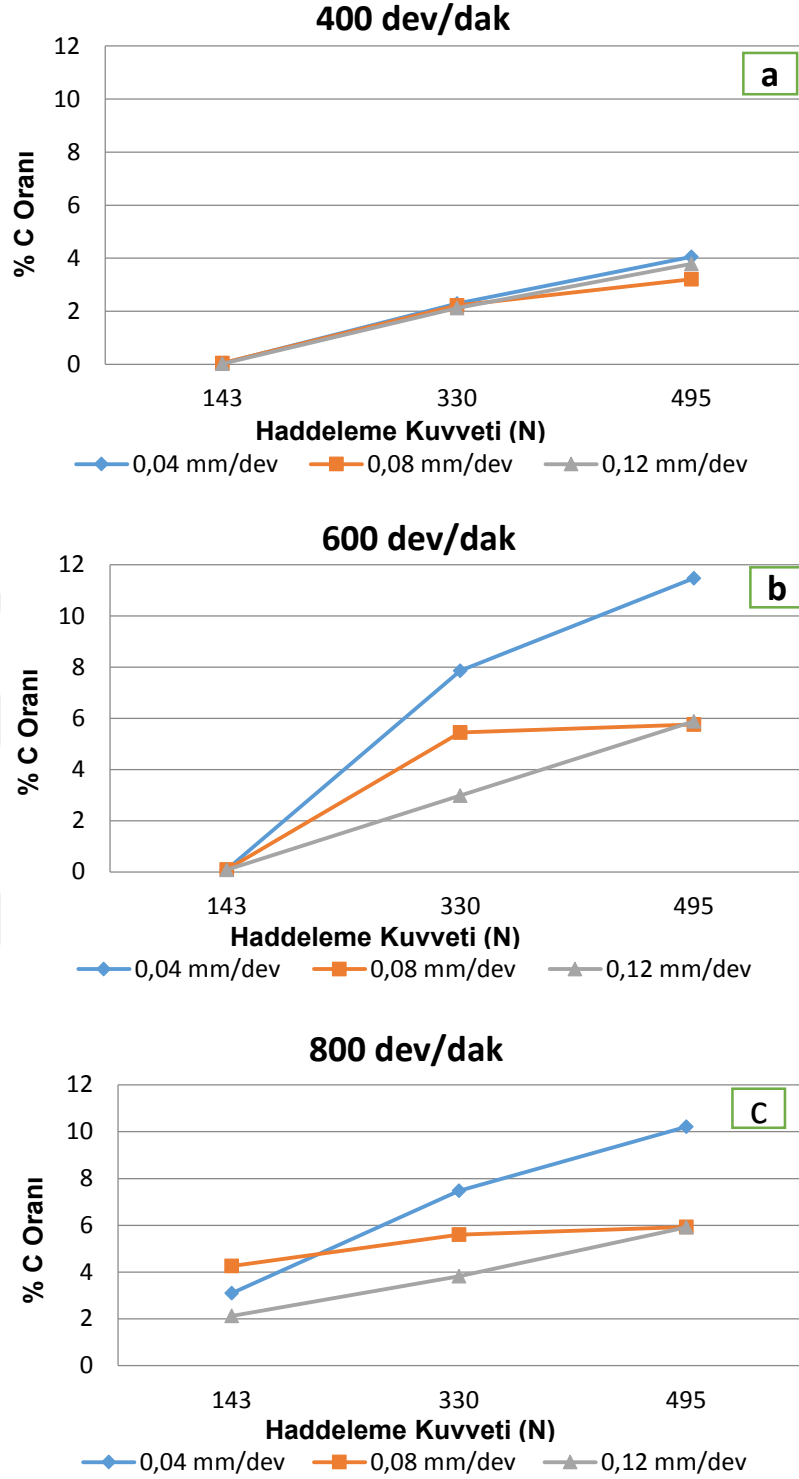


Şekil 7. 27. %C oranı ile ilerleme ilişki grafiği a) 143 N b)330 N c) 495 N

Haddeleme kuvvetinin devir sayısına bağılı olarak %C miktarında meydana getirdiği etki şekil 7.28’de görülmektedir.

Şekil 7.28 incelendiğinde tüm deney şartlarında haddeleme kuvvetinin artışı ile %C oranının arttığı görülmektedir. Ayrıca devir sayısının artışı ile de haddeleme kuvvetinin artışında %C oranının arttığı gözlenmektedir. Burada ilerleme artışı düşük devirlerde herhangi bir farklılık oluşturmamaktadır (şekil 7.28 a), diğer durumlarda %C oranı düşük ilerlemeden yüksek ilerlemeye doğru azalma eğiliminde olduğu da görülmektedir (şekil 7.28 b ve c).



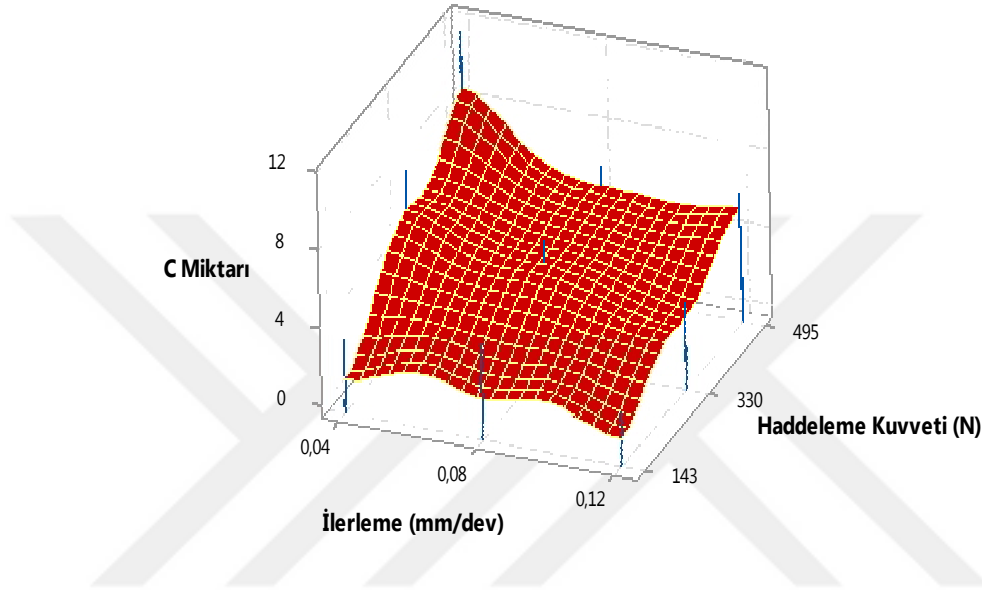


Şekil 7. 28. %C oranı ile haddeme kuvveti ilişki grafiği a) 400 dev/dak b) 600 dev/dak c) 800 dev/dak

Parametrelerin ikili kombinasyonlarına bakıldığında şekil 7.29'deki grafik elde edilmiştir.

Şekil 7.29 incelendiğinde en düşük %C oranının ilerleme değerinin ve haddeme kuvvetinin en az olduğu durumlarda olduğu görülmektedir. Burada %C

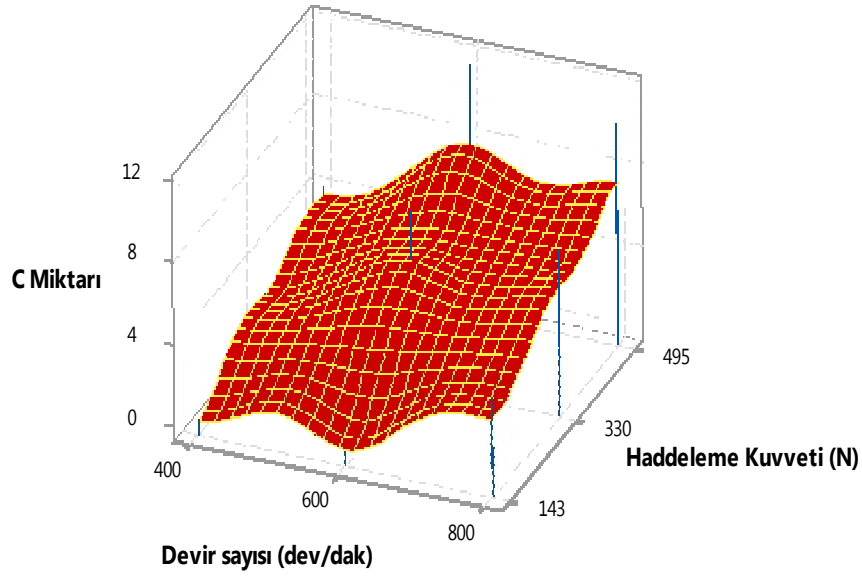
oranının artması istenen durumlarda ilerleme değerin düşük değerde tutularak haddeleme kuvvetinin artırılması %C oranını arttıracaktır. İlerleme değerin düşük oluşu yüzey üzerinde derin haddeleme sırasında temas uzunluğu arttırması, haddeleme kuvvetinin artışıda malzemenin plastik deformasyona daha çok zorlanması anlamında etkisinin olduğu, bunun sonucunda da malzemedeki sıcaklığın artarak % C oranını arttırdığı düşünülmektedir.



Şekil 7. 29. Haddeleme kuvveti ile ilerleme ilişkisinin %C oranı ile etkileşimi

Haddeleme kuvveti ile devir sayısı arasındaki ilişki incelendiğinde ise şekil 7.30'daki grafik elde edilmektedir.

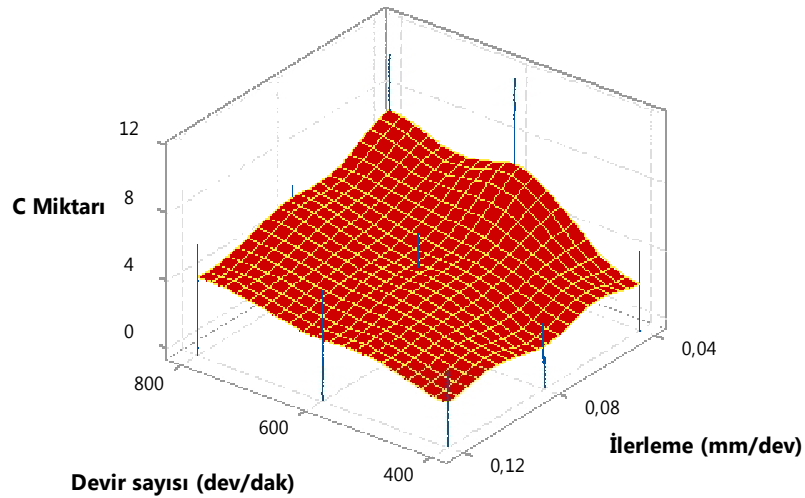
Şekil 7.30'da devir sayısı ve haddeleme kuvvetinin her ikisinin de artışı ile %C oranında artış gözlenmektedir. Burada devir sayısının artışının malzeme üzerinde temas süresini ve plastik deformasyona uğrayan malzemeyi arttırması, daha çok sürtünme oluşması nedeniyle sıcaklığın arttığı meydana getirmesi nedeniyle %C oranının arttığı düşünülmektedir.



Şekil 7.30. Haddemele kuvveti ile devir sayısı ilişkisinin %C oranı ile etkileşimi

Devir sayısı ile ilerleme ilişkisi incelendiğinde şekil 7.31'deki grafik elde edilmiştir.

Şekil 7.31 incelendiğinde ilerleme ile devir sayısı beraber düşünüldüğünde düşük ilerleme değerlerinde ve yüksek devir sayılarında % C oranının arttığı görülmektedir. Ancak burada diğer ikili etkileşimlerden farklı olarak daha yatay bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla %C oranı ile ilgili istenilen etkinin oluşması için diğer ilişkiler üzerinde değişiklik yapmanın daha etkin olacağı sonucuna varılabilir.



Şekil 7. 31. İlerleme ile devir sayısı ilişkisinin %C oranı ile etkileşimi

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Yapılan konik, radüslü ve boyuna tornalama operasyonları için kullanılabilen ve mevcut kater üzerine monte edilebilen ezici uç ile Al6061-T6 alüminyum malzemenin derin haddeleme yöntemi ile işlenmesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekildedir:

- Finitş tornalama işlemleri uygulaması sonrasında tüm derin haddeleme işlemleri uygulanmış yüzeylerde Ra değerlerinin azaldığı görülmüştür.
- Yeni tasarlanan ucun derin haddelemede kullanımının uygun olduğu ve aynı anda konik, radüslü ve boyuna haddeleme işlemlerinde kullanılabileceği tespit edilmiştir.
- Devir sayısının yüksek olduğu durumlarda Ra üzerinde ilerleme değerlerinin etkisinin azaldığı ve haddeleme kuvvetinin değişiminin de buna paralel olarak daha az etkili olduğu görülmüştür.
- Tüm haddeleme kuvvetlerinde ve tüm devir sayılarında en düşük ilerleme değerlerinde Ra değerleri en düşük çıkmıştır.
- Silindirik yüzey ve konik yüzey arasındaki korelasyonda pozitif yönde bir korelasyon olduğu sonucuna varılmıştır.
- Daha iyi Ra değerleri için düşük ve orta ilerleme, orta değerlerdeki devir sayıları ve haddeleme kuvveti uygulanmalıdır.
- Haddeleme işleminin yağlı ortam seçilerek uygulanması daha iyi Ra değerleri için daha uygundur.
- Mikrosertlik sonucuna bakıldığı zaman Ra üzerinde en ideal parametre olarak, haddeleme kuvvetinde 495 N, ilerleme değerinde 0,08 mm/dev ve devir sayısında ise 400 dev/dak olarak bulunmuştur.
- Regresyon analizi ile Ra üzerinde en etkili parametrenin ilerleme değeri olduğu görülmüştür.
- Oluşan görüntülerin optik mikroskop görüntüleri numunelerden alınan 200x görüntüleri alınmış ve görüntülerin homojen olarak dağıldığı görülmüştür.
- Malzeme EDX analizleri yapılmış ve yüzey üzerinde en fazla değişimin %C oranında olduğu görülmüştür.
- %C oranının ilerleme ile ters orantılı olduğu görülmüş ve en düşük ilerlemede en yüksek %C oranı elde edilmiştir.

- Haddeleme kuvveti ve devir sayısı ile %C oranı arasında ise doğru orantılı olarak haddeleme kuvveti ve devir sayısının artışı ile %C oranında artış meydana gelmiştir.
- Devir sayısı ve haddeleme kuvveti artışının temas uzunluğunu arttırması ve plastik deformasyona uğrayan malzeme üzerine baskının artmasına bağlı olarak artık gerilmenin artışı ve sıcaklığın artışına bağlı olarak %C oranını arttırdığı düşünülmektedir.
- SEM analizlerinden ilerleme artışı ile lamelli yapılar arasındaki mesafenin azalması sonucu Ra değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

8.2. Öneriler

Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme yöntemlerinde çalışmalar devam etmektedir ve yöntem ile ilgili henüz çok net sonuçlara ulaşılamamıştır. Bundan sonraki çalışmalar ile ilgili öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Çalışmada silindirik ve konik yüzey üzerinde Ra, mikroyapı ve mikrosertlik değerleri araştırılmıştır. Radüslü yüzeylerde gözle görülür bir iyileşme görülmektedir ancak bu yzeylerin de incelenerek radüslü yüzeylerdeki etkinin incelenmesi gerekmektedir.
- Derin haddeleme öncesi finiş operasyonu ile elde edilen Ra değerlerinin derin haddeleme sonrası elde edilecek sonuçlar üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle farklı ilk Ra değerlerine sahip parçalarda derin haddeleme uygulaması yapılarak ilk Ra değerlerinin etkisi incelenmelidir.
- Tasarımı ve imalatı yapılan ezici ucun seramik, elmas, CBN gibi farklı malzemelerle imal edilen şekilleri denenmelidir.
- Eğrisel kontüre sahip parçaların derin haddelenmesi sonlu elemanlar gibi yöntemlerle analiz edilmeli ve modellenmelidir.
- Konu titreşim, ses gibi sonuçlarla değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abrão, A.M.; Denkena, B.; Köhler, J.; Breidenstein, B.; Mörke, T. 2014, The influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1060 high carbon steel. *Procedia CIRP*, 13, 31–36. Doi: 10.1016/j.procir.2014.04.006.
- Adıyaman, O., 2022, Kesme Parametrelerinin talaş baskı faktörü (TBF) ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin anova ve regresyon ile araştırılması, *2nd International Scientific Research Congress*, Bursa, 121-133.
- 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, S., 1990, Poliasetalin kuru ve su ile yağlama koşullarında sürtünme katsayısı ve aşınma bakımından incelenmesi, 4. *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 585–594.
- Akkurt, A., 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, A., 2009, Delik yüzeylerine uygulanan yüzey iyileştirme işlemlerinin alüminyum alaşımı malzemeler üzerinde araştırılması, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük.
- Akyüz, M., 2020, Bilyeli haddeleme yönteminde işlem parametrelerinin aa7075-t6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması (Yüksek Lisans Tezi), *Fen Bilimleri Enstitüsü Fırat Üniversitesi*, Elazığ.
- A. Rodríguez , L.N. López de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, J. Albizuri., 2012, Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface & Coatings Technology*, 206, 2817–2824.
- Askeland, D., R., 1994, The science and engineering of metarials, 2. Edition, *İstanbul, Chapman&Hall*, s.423.
- Avilés, R., Albizuri, J., Rodríguez, A. and LN López de Lacalle, 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.
- Anonymous, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=wV6S8eIpdqk> [Erişim Tarihi: 23/08/2023]
- Anonymous, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=1BWzWhyh038> [Erişim Tarihi: 23/08/2023]
- Anonim, 2018, www.aluminyumsanayi.com [Erişim Tarihi: 20/08/2023]

- Anonymous, 2019, www.concretedecor.net/departments/surfacepreparation/surface-prep-eliminating-chances-for-concrete-failure/ [Erişim Tarihi: 20/08/2023]
- Anonim, 2017, <https://slideplayer.biz.tr/slide/10516994/> [Erişim Tarihi: 20/08/2023]
- Basak H., 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.
- Başak, H., 2015, Haddeme (Galetaj) ile 5083 al-mg malzeme yüzeyinin işlenmesi, haddeme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2):471-476.
- Başak, H., Sönmez, F., 2015, haddeme işleminde haddeme aparat tipinin (bilyeli, makaralı, çift makaralı) yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 18 (3), 125-132.
- Başıoğlu, F., Kurgan, N., 2019, Temper haddemede merdane parametrelerinin erd6112 kalite sac malzemelerin pürüzlülük transferine etkisinin deneysel incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 344-356.
- Baydemir, E., 2018, Sıcak presleme yöntemi ile üretilen aa6061 matrisli Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), *Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
- Bayrak, M., 2002, Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi ve uzman sistemle karşılaştırılması (Doktora Tezi), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-35.
- Bayındır, M. K., 2009, Katı parçacık erozyon aşınmasının alüminyum alaşımları üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Bozdana A. T. 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., 2017, AZ31B magnezyum alaışımının bilyalı parlatma yöntemi ile mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğünün araştırılması”, *Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Dergisi*, 6(1), 152-161.
- Bhushan, B. 2000, Modern Tribology Handbook, *CRC Press*, London.
- 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. Doi:10.1016/j.jma.2020.06.008.

- Chen, M., He, J., Wang, M., Li, J., Xing, S., Gui, K., 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. Doi: 10.1016/j.msea.2022.143224.
- Craig, D., B., Anderson D.S (ed. by), 1995, Handbook of Corrosion Data, *A.S.M International*, 16-18.
- Cöcen, Ü., Belevi, M., ve Önel, K., 1997, Tane silisyum karbür katkılı alüminyum bazlı kompozitlerin aşınma davranışı, 7. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, D.E.Ü. Denizli, 155-187.
- Çetin, Ö., Ballıkaya, H., Altuğ, M., Savaş, V., 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.
- Çırak, B., 2017, Yüzey işleme sürecinde yüzey sertliğinin incelenmesi ve yapay sınır ağları ile yorumlanması, *Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(2), 34-49.
- Çorak, S., 2018, Bilyeli parlatma (ball burnishing) yüzey işlemi yapılmış AISI 1045 çeliğinin korozyonlu yorulma davranışı üzerine akımsız nikel-boron (Ni-B) kaplamasının etkisi (Yüksek Lisans Tezi), *Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Davis, J., R., *ASM Handbook*, Vol. 2 Chapter 1, 1997, 65-68-172.
- Demir, K., 2002, Yüzey pürüzlülüğü ve pürüzlülüğün ölçülmesi (Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, 26, 40-44.
- El-Tayeb, N. S. M., Low K. O., and Brevern P. V. 2007, Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061. *Journal of materials processing technology*, 186.1-3, 272-278.
- El-Axir, M. H., 2000, An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(11), 1603-1617.
- El-Axir, M.H., El-Khabeery, M.M. 2003, Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 82–89. Doi: 10.1016/S0924-0136(02)00269-8.
- Ekerer, F. A. 2007, Alumina-SiC partikül destekli T/M Al-matriksli kompozitlerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi (Doktora Tezi), *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Erdoğan, Y., E., 2014, PA 66 kompozit malzemeden imal edilmiş asansör kapı makaralarının tribolojik özelliklerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-12.

- Egea A.J.S., Rodríguez A., Celentano D., A.Calleja, Lacalle L.N., 2019, Joining metrics enhancement when combining FSW and ball-burnishing in a 2050 aluminium alloy, *Surface & Coatings Technology*, 367, 327–335.
- Güleç, Ş., Aran A.1993, Malzeme bilgisi, *Çeviri İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi*, 2.basım, 190 s.
- Güleryüz, K., 2011, Deformasyon yaşlanmasının aa7075 alaşımının mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına etkisi (Yüksek Lisans Tezi), *Karabük üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- Gürleyik, M. Y., 1986, Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları, *Mühendis ve Makine*, 27, 3-14.
- Gural, A., 1999, Çift fazlı çeliklerde martenzit hacim oranı ve morfolojisinin işlenebilirlik özellikleri üzerine etkileri (Yüksek Lisans Tezi), *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Hassan, A. M., 1997, The effects of ball-and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals. *Journal of materials processing technology*, 72 (3), 385-391.
- Hassan A. D., Maqableh A. M. 2000, The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components. *Journal of Materials Processing Technology*, 102 (1-3), 115-121. Doi: 10.1016/S0924-0136(00)00464-7.
- Hassan A. M., Momani A. M. S. 2000, Further improvements in some properties of shot peened components using the burnishing process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40 (12), 1775–1786. Doi: 10.1016/S0890-6955(00)00018-3.
- 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.
- Habig, K. H., 1980, Verschleiß UND Härte von Werkstoffen, *Hanser- Verlag*, München- Wien, Germany, 547-554.
- Handbook, Astm (1997) Vol. 2 Chapter 1, s:8.
- Herbster, M., Harnisch, K., Haberland, E., Kriegel, P., Döbberthin, C., Heyn, A., Halle, T. 2021, Effect of deep rolling on subsurface conditions of CoCr28Mo6 wrought alloy to improve the wear resistance of endoprostheses. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 118, 104398. Doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104398
- Hutchings, I. M. 1992, Tribology, *Edward Arnold*, London.
- Huang, J., Zhang, K. M., Jia, Y. F., Zhang, C. C., Zhang, X. C., Ma, X. F., 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.
- İpek, R., 1992, Makine Elemanları, Cilt 2, *İstanbul: İTÜ Matbaası*, 76-79.
- John, L.Y., 2001, Joseph, C.C., A Systematic approach for identifying optimum surface roughness performance in end-milling operations, *Journal of Industrial Technology*, 17(2), 1-8.
- Karamış, M.B., 1986, Traktör hızı ve pulluk çalışma derinliğinin uç demiri aşınma hızına etkileri ve optimizasyonu, 2. *Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu*, ODTÜ, Gaziantep, 668 -677.
- Khabeery M. M., Axir M. H. 2001, Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41(12), 1705–1719. Doi: 10.1016/S0890-6955(01)00036-0.
- 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)*, Balıkesir, 129-137.
- Koç, R., 2004, Vagon boji bagalarına alternatif polimer malzemelerin deneysel incelenmesi (Doktora Tezi), *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 121-142.
- Koçak, H., 2020, Al 6013 ve MS 58 malzemelere delik içi ezerek parlatma işlemi uygulanmasıyla yüzeysel özelliklerin iyileştirilmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(4), 972-980.
- Korzynski, M., 2009, A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction. *Journal of materials processing technology*, 209(1), 625-633.
- Kostilnik, T., 1994, Shot Peening. *Metals Handbook Tenth Edition*, 5: 126-135.
- Liviu, L., Sorin, N., Ioan, M., 2005, Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. *Precision Engineering*, 29, 253–256.
- Liviu Luca, 2002, Investigations into the use of ball-burnishing of hardened steel components as a finishing process (PhD dissertation). *University of Toledo*, USA
- Loh, N. H., Tam, S. C., Miyazawa, S., 1989, A study of the effects of ball burnishing parameters on surface roughness using factorial design. *Journal of Mechanical Working Technology*, 18(1), 53-61.

- Luo, H., Liu, J., Wang, L., Zhong, Q., 2006, The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7-8), 707-713.
- 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, 88-90.
- 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.
- Majzoobi, G.H., Jouneghani, F.Z., Khademi, E. 2016, Experimental and numerical studies on the effect of deep rolling on bending fretting fatigue resistance of Al7075. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 82, 2137–2148. Doi: 10.1007/s00170-015-7542-z.
- 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. Doi: 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. Doi: 10.1007/s00170-020-05950-2.
- Mendi, F., 1996. Takım tezgâhları teori ve hesapları, ISBN:975-06008-0-3, Ankara.
- 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.
- Onaran, K. 1985. Malzeme Bilgisi, s. 87-95, *Çağlayan Basımevi*, İstanbul.
- 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.
- Öcalır, Ş., 2009, Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyum alaşımı birleştirmelerde optimum parametrelerin belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin.
- Özdemir, M., 2019, Yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etki oranlarının yüzey yanıt yöntemi kullanılarak analizi. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Part C*, 7(3):639-648.
- Özgün, S., 2010, Galetaj yöntemiyle işlemede yüzey kalitesinin yapay sinir ağları ile modellenmesi (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 incelenmesi (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.
- Prafulla Chaudhari, GK Awari and SS Khandare, 2011, Investigation on micro and macro properties of ball burnished component, *VSRD-TNTJ*, 2(3), 137-143.
- Prabhu, P. R., Kulkarni, S. M., Sharma, S. 2020, Multi-response optimization of the turn-assisted deep cold rolling process parameters for enhanced surface characteristics and residual stress of AISI 4140 steel shafts. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11402-11423.
- 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.
- Robert, S. G. 2000), High Performance Alloys. *Trans Tech Publications LTD*, USA.
- Rooy, E. L., 1995, Properties and selection non ferrous alloys and special-purpose materials, introduction to aluminum and aluminum alloys, *Vol. 2, A.S.M Handbook, American Society For Metals*, 1-27, Ohio.
- Rodríguez, A., LN Lopez de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, and J. Albizuri, 2012, Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*, 206(11-12), 2817-2824.
- Sarhan A. A. D., 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.
- Sagbas, A., 2011, Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function, *Advances in Engineering Software*, 42(11), 992-998.
- Stubbington, C.A. 1998, Materials trends in military airframes, *Metals and Materials*, 4, 424-431.

- Shi-Gang X. and Li-Xin S. 2006, Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina, *Materials Chemistry and Physics*, 97, 132–136.
- Schulze, V., 2004, Modern Mechanical Surface Treatments, *1st edition, Wiley Wch*, 368.
- Scarr, A.J.T. 1991, Metrology and precision engineering'', *Mc.Graw-Hill Publishhing Company Limited*, New York, 24-28.
- Smith, F. W., 2001, Çeviri: Erdoğan M., University Of Central Florida, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri Demir Dışı Alaşımlar Cilt:2, *Nobel yayınları*, Ankara.
- Tadic B., Todorovic M. P., Luzanin O., Miljanic D., Jeremic M. B., Bogdanovic B., Vukelic D. 2013, Using specially designed high-stiffness burnishing tool to achieve high-quality surface finish. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 601–611. Doi: 10.1007/s00170-012-4508-2.
- Tekaüt, İ., 2008, Takım tezgâhlarındaki kesici takım titreşiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Yüksek Lisans Tezi), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Tekin, E., 1986, Madencilikte kullanılan aşınma dayanımlı demir alaşımları, 2 *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ*, Ankara, 401-409.
- Travieso Rodríguez, J.A., González Rojas, H., Schulz Pérez, R., 2009, Ball Burnishing Process to 67 Improve Surface Roughness TMT 2009. *The 13 th International Research/Expert Conference*, Hammamet, Tunisia
- Varol, R., 1990, 2024 Alüminyum alaşımlarının yorulma ömrü üzerine farklı bilyalı dövme işlem parametrelerinin etkisi (Doktora Tezi), *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 127.
- Varol, R., 2009, Metal imalat sanayisinde modern yöntemler ve mekanik yüzey işlemleri uygulaması.
- Vukelic D., Miljanic D., Randjelovic S., Budak I., Dzunic D., Eric M., Pantic M. 2013, A burnishing process based on the optimal depth of workpiece penetration. *Materials and technology*, 47, 1, 43–51.
- Yaka, H., Akkuş, H., Uğur, L., 2016, AISI 1040 çeliğinin tornalamasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin Taguchi metodu ile optimizasyonu'', *Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 283-288.
- Yen, Y.C., Sartkulvanich, P., Altan, T., 2005, Finite element modeling of roller burnishing process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(1), 237-240.
- Yılmaz, I. Ö., Toktaş, G., 2013, Otomotiv sac şekillendirme kalıplarında kullanılan malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 54(647), 47-52.

- Yu X., Wang L. (1999). Effect of various parameters on the surface roughness of an aluminium alloy burnished with a spherical surfaced polycrystalline diamond tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39(3), 459–469. Doi: 10.1016/S0890-6955(98)00033-9.
- Yurdakul, M., Özbay, O., İç, Y. T., 2002, Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(2), 1-23.
- Yurtoğlu, H., 2005, Yapay sinir ağları metodolojisi ile öngörü modellemesi: bazı makroekonomik değişkenler için türkiye örneği (Uzmanlık Tezi). *DPT Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü*.
- Yüce Teknik, 2023, <https://www.yuceteknik.com/Mekanik-Kalip-Yaylari-Yesil-Yay.PR-1779.html> [Erişim Tarihi: 20/08/2023]
- Yüksel, M., Meran, C., 2016, Malzeme Bilgisi, *Düzeltilmiş 3.Baskı, Denizli TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayınları* MMO/545/3, 497-499.
- Zum Gahr, K. H. 1987, Microstructure and wear of materials (Vol. 10). *Elsevier*.
- 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, 1036-1040. Doi:10.1007/s11665-008-9341-2.
- Zhuang, W., Liu, Q., Djugum, R., Sharp, P.K., Paradowska, A. 2014, Deep surface rolling for fatigue life enhancement of laser clad aircraft aluminium alloy. *Applied Surface Science*, 320, 558–562. Doi: 10.1016/j.apsusc.2014.09.139.
- 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.
- Wolfgang, Weissbach., 2000, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, *İstanbul Birsen Yayınevi*.