



**BİLYELİ HADDELEME YÖNTEMİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN
AA7075-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Mahmut AKYÜZ

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Teknolojileri Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ**

OCAK 2020

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLYELİ HADDELEME YÖNTEMİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN
AA7075-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mahmut AKYÜZ
(161143104)

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Teknolojileri
Programı: Konstrüksiyon ve İmalat

Danışman: Prof. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ

OCAK 2020

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLYELİ HADDELEME YÖNTEMİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN
AA7075-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mahmut AKYÜZ

(161143104)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 9 Eylül 2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 31 Ocak 2020

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Engin ÜNAL (F.Ü)
Dr. Öğr. Üyesi Zülküf DEMİR (B.Ü)

OCAK 2020

ÖNSÖZ

İmalat endüstrisinde makine parçalarının nihai yüzey işleme malzeme kalitesine doğrudan etki ettiğinden büyük bir yere ve öneme sahiptir. Bilyeli haddeleme yöntemi yüzey işleme yöntemleri arasında önemli bir metottur. Bu yöntemde seçilen parametrelerin, işleme etkilerinin deneysel olarak incelendiği bu çalışmanın, ülkemizin akademik camiası ve imalat sektörü başta olmak üzere bilim dünyası ve insanlık için faydalı olması ve katkı sağlaması dileklerimi sunarım.

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmanın gerçekleşmesinde ve süreçte maddi ve manevi yardımlarını, en zor zamanlarımda bile desteğini esirgemeyen, gerektiğinde her türlü fedakârlıktan kaçınmayan, tecrübesi ve bilgi birikimiyle beni aydınlatan, yol gösteren danışman hocam Sayın Ulaş ÇAYDAŞ başta olmak üzere, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü hocalarına, Erciyes Üniversitesi Havacılık Ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde-Motor Bölümü Öğr. Gör. Mahmut ÇELİK'e, Doç. Dr. Furkan SARSILMAZ hocama, Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü hocalarından sayın Doç. Dr. İbrahim CAN hocama, Dr. Öğr. Üyesi Engin Doğan ALNAK hocama, Araştırma Görevlisi Ferhat KOCA'ya, İmalat Mühendisliği bölümünde Dr. Öğr. Üyesi Onur ÖZSOLAK hocama, atölye sorumlusu İsmail AVCI'ya, Elazığ Gazi Endüstri Meslek Lisesi idari yönetimine, atölye çalışanlarına ve bilhassa deney numunelerinin işlenmesinde yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Makine Tek. Atölye Şefi Mesut ALP hocama, Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Atölyesinde yorulma deneylerini gerçekleştiren Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YÜCEL hocama, Araştırma Görevlisi Lutuf ERTÜRK'e, çalışmayı destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi personeline(Proje no: TEKF.18.07) ve son olarak da bu günlere gelmemde maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirmeyen, azmi, tecrübesi, kararlılığı ve bilgi birikimi ile hep bana yol gösteren, "Vatanımı en çok seven işini en iyi yapandır." düşüncesini yaşayarak bizzat öğreten, desteğini her zaman arkamda hissettiğim, Elazığ Milli Eğitim Müfettişi Mehmet ERTEM hocama ve hiçbir zaman benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Mahmut AKYÜZ

ELAZIĞ-2020

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. YÜZEY İYİLEŞTİRMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER	12
3.1 Bilyeli Haddelme	12
3.2 Derin Ezme	12
3.3 Bilyeli Yüzey Dövme	13
3.4 Lazer Şoku ile Ezme	14
3.5 Ultrasonik Nanokristal Yüzey Modifikasyonu	15
3.6 Kavitasyon ile Ezme	16
3.7 Ultrasonik Destekli Yüzey İyileştirme.....	17
4. BİLYELİ HADDELEME YÖNTEMİNİN TANIMLANMASI.....	19
4.1 Yüzeylerin Haddelenerek İşlenmesi	19
4.2 Bilyeli Haddelme Yöntemi	20
4.3 Bilyeli Haddelme Yönteminin Mekanikliği	25
4.4 Bilyeli Haddelme Yönteminin Avantajları	27

4.5	Bilyeli Haddeleme Yönteminin Dezavantajları	28
4.6	Bilyeli Haddeleme Yönteminin Temel Parametreleri.....	28
4.6.1	İlerleme Hızı	29
4.6.2	Baskı Kuvveti	29
4.6.3	Paso Sayısı.....	29
4.7	İşleme Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri	30
4.7.1	Yüzey Pürüzlülüğü	30
4.7.2	Yüzey Sertliği.....	31
4.7.3	Artık Gerilme.....	31
4.7.4	Yorulma Dayanımı	32
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
5.1	Deney Malzemesi	33
5.2	Deney Numunelerinin Hazırlanması	33
5.2.1	Yorulma Deney Numunelerinin Hazırlanması	33
5.2.2	Yüzey Pürüzlülüğü ve Mikro Sertlik Numunelerinin Hazırlanması	34
5.3	Haddeleme Aparatı	35
5.4	Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	35
5.5	Deneylerin Yapılması ve Ölçümler	36
5.5.1	Yorulma Numunelerine Bilyeli Haddeleme İşleminin Uygulanması	36
5.5.2	Yorulma Deneylerinin Yapılması ve Sonuçlar.....	37
5.5.3	Yorulma Numunelerinin Kırık Yüzeylerinin İncelenmesi	39
5.5.4	Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Ölçülmesi ve Sonuçları	44
5.5.5	Mikrosertlik Ölçümlerinin Alınması ve Sonuçlar	46
5.5.6	Kalıntı Gerilme Ölçümleri ve Sonuçları.....	47
6.	DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	50
6.1	Bilyeli Haddeleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri	50

6.1.1	Varyans Analizi (Anova).....	51
6.2	Bilyeli Haddleme Parametrelerinin Mikrosertlik Üzerine Etkileri	51
6.2.1	Varyans Analizi (Anova).....	53
6.3	Bilyeli Haddleme Parametrelerinin Yorulma Dayanımı Üzerine Etkileri	54
7.	SONUÇLAR.....	59
8.	ÖNERİLER.....	61
	KAYNAKLAR.....	62
	ÖZGEÇMİŞ.....	69

ÖZET

Talaşlı üretim imalat yöntemlerinde kullanılan kesici takımın cinsi ve geometrisi, takım tezgâhı, seçilen parametreler ve çevresel koşullara bağlı olarak talaşlı işlenmiş yüzeylerde takım izleri çizikler şeklinde, aşırı plastik deformasyon, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme, yırtılma ve mikro çatlaklar şeklinde birçok hasar meydana gelmektedir. Bu hasarlar, malzemenin başta yorulma dayanımı olmak üzere, aşınma direnci, korozyon dayanımı ve birçok mekanik özelliklerini etkilemektedir. Malzeme yüzeyinde meydana gelen bu olumsuzlukları gidermek için taşlama, honlama, lepleme gibi birçok özel yöntem kullanılmaktadır. Ayrıca bilyeli haddeme, derin haddeme gibi geleneksel olmayan yöntemlerde tercih edilmektedir. Bilyeli haddeme yönteminin avantajları ve kullanım kolaylığı sebebiyle yüzey işleme yöntemleri arasında, son zamanlarda daha çok tercih edilmektedir. Bu yöntemde, yüzeye belirli bir kuvvet ile bastırılan yuvarlanma elemanı yardımıyla yüzeylerden talaş kaldırılmadan, yüzeydeki mikro pürüzlülükleri küçük plastik deformasyonlara uğratarak yüzey kalitesi iyileştirilir. İşlemden malzemenin yüzey sertliği artarken, yüzeyin pürüzlülüğü ise önemli derecede azalmaktadır.

Bu çalışmada da bilyeli haddeme yönteminin işlem parametrelerinin (hadde basıncı ve paso sayısı) AA7075-T6 alüminyum alaşımının üzerindeki, yorulma dayanımı, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme, mikrosertlik bakımından etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada, bilyeli haddeme yönteminin yüzey pürüzlüğünü iyileştirdiği, hadde parametrelerinden paso sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak (%41) hadde basıncından (%39.6) daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan kuvvet ve paso sayısının malzemenin mikrosertliğini artırdığı, kuvvet ve paso sayısındaki artışa bağlı olarak yaklaşık 20 HV oranında malzemenin mikrosertliğinin arttığı görülmüştür. Hadde kuvvetinin artması ile malzemede yüzey altı kalıntı gerilmenin arttığı gözlemlenmiştir. Malzemenin yorulma dayanımında iyileşme sağlandığı ve yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilyeli Haddeme, Yüzey İşleme, Yorulma Dayanımı.

SUMMARY

Experimental Investigation of the Effects of Ball Burnishing Process Parameters on Mechanical Properties of AA7075-T6 Aluminum Alloy

Depending on the type and geometry of the cutting tool used in machining production methods, the machine tool, the selected parameters and the environmental conditions, many damages occur in the form of scratches, excessive plastic deformation, surface roughness, residual stress, tearing and micro cracks on the machined surfaces. These damages affect the material's fatigue resistance, abrasion resistance, corrosion resistance and many mechanical properties. Many special methods such as grinding, honing and lapping are used in order to eliminate these problems on the surface of the material. It is also preferred in non-conventional methods such as ball burnishing, deep rolling. Due to the advantages and ease of use of the ball burnishing method, it has become more preferred among surface treatment methods in recent times. In this method, the surface roughness is minimized by small plastic deformations without removing chips from the surfaces with the help of the rolling element pressed against the surface with a certain force. While the surface hardness of the material increases in the process, the surface roughness decreases significantly.

In this study, the effects of the process parameters of ball burnishing method (burnishing pressure and number of passes) on AA7075-T6 aluminum alloy in terms of fatigue strength, hardness, surface roughness, residual stress, micro hardness were investigated experimentally.

As a result of the experiments, it has been determined that the ball burnishing method improves the surface roughness, and the number of passes among the rolling parameters is statistically more effective on the surface roughness (41%) than the rolling pressure (39.6%). It was observed that the applied force and number of passes increased the microhardness of the material and the microhardness of the material increased by approximately 20 HV depending on the increase in the number of force and passes. It has been observed that the sub-surface residual stress increases in the material with the increase of the burnishing force. It has been determined that the fatigue strength of the material is improved and the fatigue life increases.

Keywords: Ball Burnishing, Surface Treatment, Fatigue Strength.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1 Derin haddeme işleminde takım ve numunenin hareket şekli.....	12
Şekil 3.2 Bilyeli yüzey dövme işleminin gösterimi	14
Şekil 3.3 Lazer şoku ile ezme işleminin gösterimi.....	15
Şekil 3.4 Ultrasonik Nanokristal Yüzey Modifikasyonu işleminin gösterimi	16
Şekil 3.5 Kavitasyon ile Ezme işleminin gösterimi	17
Şekil 3.6 Ultrasonik Destekli Yüzey İyileştirme işleminin gösterimi.....	18
Şekil 4.1 Çelik bir milin haddelenmesi	19
Şekil 4.2 İç delik haddeme	20
Şekil 4.3 Bilyeli haddeme işleminde takım ve numunenin hareket şekli.....	21
Şekil 4.4 Ezici bilye ile yüzeyde plastik deformasyon oluşumu.....	22
Şekil 4.5 Bilyeli Haddeme Yönteminin şematik olarak gösterilmesi	22
Şekil 4.6 Bilyeli haddeme işlemi ve malzemede meydana gelen deformasyon.....	24
Şekil 4.7 Bilyeli haddeme yönteminde malzemeye etki eden kuvvetlerin gösterimi.....	26
Şekil 4.8 Profilometreye göre bir yüzeyin kesiti.....	30
Şekil 5.1 Yorulma deney numune boyutları.....	34
Şekil 5.2 Pürüzlülük deney numunesi boyutları.....	34
Şekil 5.3 Yamato SKUV 20-2,5R80 hadde aparatı.....	35
Şekil 5.4 BSD torna tezgâhında haddeme işleminin uygulanması.....	37
Şekil 5.5 Yorulma test cihazına yorulma numunesinin bağlanması	38
Şekil 5.6 Yorulma numunelerinin kuvvet-çevrim grafiği	39
Şekil 5.7 1 Numaralı deney numunesinin kırık yüzeyine ait makro görüntü.....	40
Şekil 5.8 A bölgesinin yakınlaştırılmış görüntüsü	41
Şekil 5.9 B bölgesinin yakınlaştırılmış görüntüsü	42
Şekil 5.10 C bölgesinin yakınlaştırılmış görüntüsü	43
Şekil 5.11 D bölgesinin yakınlaştırılmış görüntüsü	44
Şekil 5.12 Yüzey pürüzlülük numuneleri.....	45
Şekil 5.13 Yüzey pürüzlük değerlerinin grafiği	46
Şekil 5.14 Mikrosertlik ölçümü için metalografik olarak hazırlanmış numuneler.....	47

Şekil 5.15 Kalıntı gerilme ölçümü için hazırlanan numuneler.....	48
Şekil 5.16 Haddeme kuvvetinin kalıntı gerilmeye etkisi	49
Şekil 6.1 Bilyeli haddeme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	50
Şekil 6.2 Haddeme parametrelerinin yüzey sertliği üzerindeki etkileri	52
Şekil 6.3 Mikrosertlik değerlerinin grafiğı.....	53
Şekil 6.4 AA7075-T6 ana malzemesine ait Wöhler diyagramı.....	54
Şekil 6.5 1., 2. ve 3. numunelere ait S-N diyagramı	55
Şekil 6.6 4., 5. ve 6. numunelere ait S-N diyagramı	56
Şekil 6.7 7., 8. ve 9. numunelere ait S-N diyagramı	57
Şekil 6.8 Haddeme parametrelerinin yorulma ömrü üzerindeki etkileri	58

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1 AA7075-T6 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi	33
Tablo 5.2 AA7075-T6 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	33
Tablo 5.3 Taguchi L9 ortogonal dizinde hadde parametreleri ve faktör seviyeleri.....	36
Tablo 5.4 Yorulma deneyi test sonuçları	38
Tablo 5.5 Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	45
Tablo 6.1 Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu	51
Tablo 6.2 Mikrosertlik için ANOVA tablosu	54

SEMBOLLER LİSTESİ

Mpa	:Mega Pascal
kHz	:Kilo Hertz
HRC	:Rockwell C Sertliği
Al	:Alüminyum
kgf	:Kilogram Kuvvet
mm	:Milimetre
µm	:Mikrometre
F	:Mekanik Kuvvet
N	:Newton
Ra	:Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Hz	:Hertz

KISALTMALAR

AISI: Amerikan Standart Birimi

CNC: Bilgisayarlı Nümerik Kontrol

DIN: Alman Standartlar Enstitüsü



1. GİRİŞ

Makine elemanları, imalat sürecinde dökümden talaşlı üretime kadar birçok farklı işleminden geçmektedir. Bu işlemlerin temel amacı daha iyi ve işlevsel olarak daha kaliteli makine elemanları elde etmektir. Daha kaliteli ürünler elde etmek amacıyla imalat sürecinde farklı metotlar uygulanmaktadır. Böylece imalat sürecinin alt uzmanlık alanlara ayrılmasına ve malzemenin birden fazla işleme tabi tutulmasına neden olmuştur.

Talaşlı malzeme kalitesini artırmak, fonksiyonlarını geliştirmek için imalat sürecinde onunda malzemeye nihai işlem olarak uygulanmaktadır. İmalat operasyonlarının temel amacı malzemeye istenilen özelliği kazandırmaktır. Benzer şekilde imalat sürecinin sonunda bizden daha pürüzsüz bir yüzey isteniyorsa taşlama, honlama gibi ikincil ek işlemler uygulanmaktadır. Uygulanan bu sonlandırma işlemleri, malzemenin niteliği ve iyileştirilmek istenen özelliğe göre değişiklik göstermektedir.

Talaşlı üretimde seçilen kesici takımın cinsi ve geometrisi, takım tezgâhı, işleme parametreleri ve çevresel koşullarına bağlı olarak işlenmiş yüzeylerde çizikler şeklinde takım izleri, aşırı plastik deformasyon, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme, yırtılma ve mikro çatlaklar şeklinde birçok hasarı meydana gelmektedir. Bu hasarlar, malzemenin başlangıçta yorulma dayanımı olmak üzere, aşınma direnci korozyon dayanımı ve birçok mekanik özelliklerini etkilemektedir. Malzemedeki bu olumsuzlukları gidermek önem arz etmektedir. Dolayısıyla makine elemanlarının servis koşullarında kullanılmadan önce bu yüzey hatalarının giderilmesi gerekmektedir. Malzemedeki bu tür olumsuzlukları gidermek için farklı yüzey işleme metodları kullanılmaktadır. Yüzey işleme, belirli fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikler sağlamak için tüm üretim işlemlerinin önemli bir bölümünü teşkil etmektedir[1]. Termal, termo-mekanik, kimyasal ve mekanik birçok yüzey iyileştirme yöntemine karşın, bilyeli haddeleme metodu sahip olduğu birçok ekonomik ve uygulama kolaylığı gibi avantajlarından dolayı daha tercihli hale gelmiştir. Bu yöntemde, yüzeye belirli bir kuvvet ile bastırılan yuvarlanma elemanı yardımıyla yüzeylerden talaş kaldırılmadan, yüzeydeki mikro pürüz tepeleri küçük plastik deformasyonlara uğratarak düzleştirilir. İşlem neticesinde, malzemenin yüzey sertliği artarken, pürüzlülüğü ise önemli derecede azalmaktadır. Yüzeye uygulanan gerilme şiddetine bağlı olarak, yöntem düşük ve yüksek deformasyon olmak üzere iki farklı aralıkta tanımlanmaktadır. Yüksek deformasyonlarda yüzeye genellikle 30 MPa'dan daha yüksek basınçlar uygulandığından, yüzey altında oluşan

artık çekme gerilmelerinin derinliği 1 mm'nin üzerine çıkmaktadır. Düşük deformasyonla haddeleme ise, genellikle kalıp yüzeyleri, miller, türbin kanatlarının bağlantı kısımları, araç süspansiyon sistemleri, kaynaklı bağlantılar ve yatak yüzeyleri gibi parçalara uygulamaktadır [2]. Bilyeli haddeleme, geleneksel hassas tornalama, taşlama ve honlama yöntemlerine nazaran yaklaşık 15 kat daha ekonomiktir [3]. İşlem neticesinde ayrıca, yüzeydeki çekme gerilmeleri basma gerilmelerine dönüştüğünden, yorulma ömrü önemli derecede iyileşmektedir. Yöntem başta havacılık olmak üzere, medikal, nükleer endüstri, otomotiv, paketleme, kimya, tıp gibi alanlarda büyük oranda kullanılmaktadır [4].

7XXX alüminyum alaşım serisinin sahip olduğu fiziksel ve mekaniksel özelliklerinden dolayı başta havacılık olmak üzere medikal, otomotiv ve tıp gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları, sahip oldukları fiziksel ve mekaniksel özellikler bakımından avantajlı olması sebebiyle her alanda kullanımı giderek artmaktadır. Ancak bu alaşım türündeki malzemelerin yorulma dayanımı, süneklik gibi bazı özelliklerinin iyi olmasına karşın yüzey sertliği, işlem sonrası yüzey pürüzlülüğü gibi özellikleri kötü olabilmektedir. Bu olumsuzlukları gidermek ve malzemeyi istenilen koşullara getirmek bu malzemeler üzerinde de yüzey işleme yöntemi olan bilyeli haddeleme işlemi son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada da bilyeli haddeleme yönteminin işlem parametrelerinin (hadde basıncı ve paso sayısı) AA7075-T6 alüminyum alaşımının üzerindeki, yorulma dayanımı, sertlik, artık gerilme bakımından etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Son yıllarda bu alandaki çalışmalar çokça yapılmakta iken ülkemizde ise maalesef yok denecek kadar az miktarda yapılmaktadır. Bu çalışmanın, yöntemin kullanılabilirliğinin kanıtlanması ile akademik ve endüstriyel uygulamalara ışık tutacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Aysun Sağbaşı [5] AA 7118 alüminyum alaşımının bilyeli haddeme işleminde, baskı kuvveti, paso sayısı, ilerleme miktarı ve hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada 62 HRC sertliğinde paslanmaz çelik bir bilye kullanılmıştır. Haddeme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin, yüzey pürüzlülüğü %2.82 oranında bir hata ile tahmin ettiği belirlenmiştir. Haddeme kuvveti ve paso sayısının istatistiksel olarak önemli faktörler olduğu tespit edilmiştir.

Chomienne ve arkadaşları [6] 15-5PH Martenzitik paslanmaz çeliklerin bilyeli dövme işleminde haddeme hızı, ilerleme miktarı, paso sayısı ve baskı kuvvetinin yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme, mikroyapı ve sertlik değişimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada SİN seramik bilye kullanmışlardır. Tornalanmış ve haddelenmiş yüzeyler karşılaştırılmış ve artık gerilme üzerinde en etkili faktörün baskı kuvveti olduğu tespit edilmiştir. Diğer faktörlerin ise önemli bir etkiye sahip olmadıkları gözlemlenmiştir.

Aviles ve arkadaşları [7] AISI 1045 çeliğinin yorulma ömrünü artırmak amacıyla yüzeye bilyeli haddeme işlemi uygulamışlardır. Çalışmada, standartlara uygun olarak hazırlanmış yorulma numunelerinin yüzeyine 6 mm çapında bilye ile yağlayıcı ortamında ve yüksek basınç değerinde haddeme yapılmıştır. İşlem sonrasında, haddemenin eğmeli yorulma dayanımını %21.25 oranında artırdığı belirlenmiştir.

Revankar ve arkadaşları [8] Ti-Al-4V alaşımının bilyeli haddelenmesinde hadde hızı, ilerleme miktarı, baskı kuvveti ve paso sayısının yüzey pürüzlülüğü ve sertliği üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada 8 mm çapında EN 31 çelik bir bilye ile SAE 40 yağlayıcı kullanılmıştır. Taguchi L25 ortogonal deneysel tasarım kullanılmış ve işlem parametreleri optimize edilmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme miktarı ve hızının; sertlik üzerinde baskı kuvveti ve paso sayısının daha etkili oldukları belirlenmiştir.

A. Rodriguez ve arkadaşları [9] AISI 1045 çeliğinin bilyeli haddelenmesinde, haddeme kuvveti, haddeme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü ve sertliği üzerindeki etkilerini, tornalama yöntemiyle karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Çalışmada 6 mm çapında silisyum nitrür seramik bir bilye emülsiyon yağı kullanılmıştır. Deneyler sonrasında numunelerin yüzey topografyaları, yüzey altı mikrosertlik değerleri ve

artık gerilmeler ölçülmüştür. Artık gerilme ölçüm sonuçları ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, bilyeli haddeleme yönteminin dönme hareketi yapan makine elemanlarında, yüzey pürüzlülüğü ve artık gerilmeleri iyileştirmek için ekonomik ve etkin bir yöntem olduğu saptanmıştır.

Hiegemann ve arkadaşları [10] bilyeli dövme yönteminde, yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek amacıyla analitik bir model geliştirmişlerdir. Modelde, yuvarlanan bilye ile iş parçası arasındaki temas basıncı esas alınmıştır. Çalışmada ayrıca geliştirilen modelin uygunluğu deneysel olarak da farklı bilye çapları ve malzemeler için test edilmiştir. Deneylerde C45 ve C60 alt katmanlar yüzeylerine WC kaplanmış, 12.7 mm ve 6.35 mm çaplarında bilyeler kullanılmıştır. Deneysel ve model tahmin sonuçlarının tutarlı olduğu ve analitik modelin deney yapmadan birçok malzeme için kullanılabilceği vurgulanmıştır.

John ve arkadaşları [11] AISI D3 takım çeliğinin CNC torna tezgâhında bilyeli haddelenmesinde, haddeleme hızı, baskı kuvveti ve ilerleme miktarının, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme, mikro sertlik ve ovalik üzerindeki etkilerini, deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada 8 mm çapında tungsten karbür bilye kullanılmıştır. İşlem Deform 2D paket programı yardımıyla da simüle edilmiştir. Sonuç olarak, deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları arasında, yüzey pürüzlülüğü ve artık gerilme için sırasıyla %8.69 ve %3.94 oranında bir fark belirlenmiştir.

Başak, H. [12], AL 7075 T6 malzemesi ile prizmatik geometriye sahip alüminyum alaşım numuneler üzerinde deneyler yapmıştır. Bu işlem için özel bir haddeleme aparatı tasarlamıştır. Deneylerinde devir sayısı, paso sayısı, ilerleme hızı ve baskı kuvvetinin yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemiştir.

Hassan ve Sulieman [13], pirinç malzemelerinde yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için bilyeli haddeleme yöntemini uygulamışlardır. Bilyeli haddeleme yönteminden sonra pirinç malzemesine basit bir aşınma testi uygulamışlardır. Bilyeli haddeleme işleminden sonra hadde kuvvetinin veya haddeleme sırasında paso sayısının artmasına bağlı olarak pirinç malzemesinin aşınma direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu uygulama sonucunda bilyeli haddeleme yönteminin aşınma direncini arttırmak için kullanılabilceğini söylemişlerdir.

Hassan Maqableh [14], çalışmalarında ilerleme kuvveti kullanılan takım sayısı gibi parametrelerin bilyeli haddeleme işlemine etkilerini gözlemlemişlerdir. Numunelerin deneyden önceki yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliği gibi parametrelerin haddeleme işleminde kullanılan aparatın bilye çapının ve işlem sırasında yapılan yağlamanın

haddelemeye etkilerini gözlemlemişlerdir. Deney malzemeleri pirinç ve alüminyum olarak belirlenmiştir. Deneyler esnasında yağlamanın yüzey daireselliği yüzey sertliğine etkilerini incelemişlerdir. Bu işlemlerden sonra sonuç olarak başlangıçtaki haddeleme parametrelerinin bilyeli haddeleme yöntemine etkilerinin olduğunu belirlemişlerdir.

Axir ve Ark [15], dönel parçalarda haddeleme hızı, haddeleme zamanı, batma derinliği ve malzemenin başlangıçtaki sertliği parametrelerini beş farklı numunede uygulayarak iş parçası çapı, yuvarlaklığı ve yüzey sertliğindeki değişimleri incelemişlerdir. Bu deneyler sonucunda haddeleme zamanı ve batma derinliğinin dönel iş parçası yuvarlaklığı ve çapına etkilerinin önemli faktörler olduğunu göstermişlerdir. Bu bağlamda haddeleme hızının artması sertlikte azalmalara sebebiyet vermiştir. Benzer şekilde iş parçasının başlangıçtaki sertliğinin azalmasına sebebiyet verdiğini söylemişlerdir.

Klocke ve Liermann [16], yapmış oldukları çalışmada dönel parçaların hidrostatik olarak çalışan bilyeli haddeleme aparatı ile hadde işlemini gerçekleştirmişlerdir. Malzeme üzerindeki pürüzlü yüzeyin daha da düzgünleştiğini ve yüzey kalitesinin geliştiğini gözlemlemişlerdir. Yüzey üzerindeki pürüzlülük deneyler sonunda üst değerinin orjinal yüzey pürüzlülüğüne göre en çok %30 ile %50 arasında olumlu olarak iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Zhang ve Lindeman [17], çalışmalarında dönel haddeleme işleminin AZ80 numunesinin yorulma performansını geliştirdiğini belirtmişlerdir. En elverişli şartlarda numunenin yorulma performansında %110 gibi bir iyileşme söz konusudur. AZ80 için haddeleme işlemi, yorulma ömrünü arttırmada püskürtmeli sertleştirmeden daha iyi olduğunu yaptıkları deneylerle göstermişlerdir.

Axir ve İbrahim [18], bilyeli haddeleme yöntemini, haddeleme hızı, baskı kuvveti, ilerleme oranı, yüzey pürüzlülüğü, 1,2,3 bilye ucu kullanılarak gösterdiği değişimi gözlemlemişlerdir. Haddeleme aparatı kullanılarak yapılan çalışmada en iyi yüzey karakteristiklerinin elde edilebileceğini söylemişlerdir. Hadde ilerleme oranı ve haddeleme kuvvetinin kontrol değerinde yüzey karakterlerinde önemli bir rolü olduğunu belirlemişlerdir.

Khabeery ve Axir [19], alüminyum alaşım olan 6061-T6 numunesi için geleneksel yöntemler yerine bilyeli haddeleme aparatı kullanılarak haddeleme işlemini yapmışlardır. Deneysel çalışmada yüzey pürüzlülüğünü geliştirmek için en uygun haddeleme parametrelerini kullanmanın işlem üzerinde önemli olduğu göstermişlerdir. Ayrıca deneysel çalışmada yüksek batma oranı ve düşük haddeleme hızının ve 3 veya 4 pasonun düzgün

yüzeyler ortaya çıkarmada daha etkili olduğunu belirlemişlerdir. Haddeme hızının artırılması artık gerilmenin maksimum değerini azaltmıştır. Artık gerilme paso sayısı ve batma derinliğinin artması ile artmaktadır.

Liviu ve arkadaşları [20], baskı kuvvetinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisine hidrolik prensip ile çalışan bir aparat ile deneyimlemiştir. Bu çalışmalar sonunda haddeme yönteminin en önemli parametreleri arasında uygulanan kuvvet olduğunu söylemişlerdir. Çalışmada diğer bir önemli faktör ise iş parçasının ilk yüzey pürüzlülüğü olduğu gözlenmiştir.

Janos ve arkadaşları [21], haddeme işleminde manyetik prensiplerden yararlanmışlardır. Tavlanmış çeliklerde manyetik destekli döner haddeme bilyeleri kullanılarak yüzey kalitesindeki artma yüzey sertliğindeki iyileşmeye ek olarak çapakları bertaraf etmek için uygun bir yöntem olduğunu ispatlamışlardır. Tavlı çelikler üzerinde manyetik destekli döner haddemeyi bilyeler kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Yüzey sertliğindeki iyileşme ve yüzey kalitesindeki artmaya ek olarak çapakları bertaraf etmek için uygun bir yöntem olduğunu ispatlamışlardır.

Hongyun ve arkadaşları [22], haddeme yönteminin alüminyum alaşım üzerindeki silindirik yüzeyli polikristal elmas alet ile deney düzeneği gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde en uygun haddeme derinliği 2 mm ve en uygun haddeme adımını 10,2 mm / dev olarak gözlemlemiştir. Bunlara ek olarak deney esnasında kesme sıvısı kullanılarak yüzey pürüzlülüğünün iyileşebileceğine kanaat getirmişlerdir.

El-Axir [23], yapmış olduğu deneysel çalışmalarında en uygun haddeme parametrelerini gözlemlemeyi amaçlamıştır. Çalışmalarında haddeme yönteminde birçok faktörün önemli olduğunu gözlemlemiştir. Haddeme işleminde haddeme adımı, paso sayısı, haddeme hızı ve haddeme kuvveti gibi parametrelerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey mikrosertliği üstündeki etkilerini araştırmak için de deneysel çalışmalar yapmıştır. Deneysel çalışmalarında St-37 malzemesinde iki farklı profil üzerinde araştırmalar yaparak, numune parçalar üzerinde yağlama uygulayıp, kullanılan profilleri de tornaya bağlayarak haddeme işlemini gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında elde ettiği deneysel sonuçlar matematiksel modelleme ile elde ettiği sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar aralarında iyi sayılabilecek derecede birbirine yakındır. Yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik üzerinde mil hızı hadde adımı, paso sayısı ve hadde kuvvetinin önemli etkilere sahip değişkenler olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda iyi yüzey sonlandırması ve yüksek yüzey mikrosertliği için en uygun mil hızı 150 ile 230 dev/dk arasındadır. Yüzey mikrosertliği için

uygun haddeleme kuvveti 35 kgf iken iyi yüzey sonlandırması için 25 kgf'dir. Yapılan deneylerde elde edilen en iyi değere ulaşmak için haddeleme adımının en düşük değerde olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek paso sayısı, yüzey mikro sertliği için en iyi sonuç iken yüzey sonlandırma için 3-4 pasonun daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Hassan ve Momami [24], soğuk şekillendirme olan haddeleme ve kumlama (bilyeleme) ile ilgili çalışmalarında gözlemler yapmışlardır. Plastik deformasyon ile geliştirme üzerinde ve metalik yüzey özelliklerinde iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Birinci yöntem yüzey pürüzlülüğünü azaltmakta olduğu gözlemlenmişken birinci yöntemin aksine ikinci yöntem yüzey pürüzlülüğünü artırdığı tespit edilmiştir. Yapmış oldukları deneylerde parçaya haddeleme yaparak kumlama işlemi uygulamışlar ve kumlama ile oluşmuş olan yüzey pürüzlülüğünü azaltmak istenmiştir. Metalik yüzey özelliklerine uygulanan kumlama iyileştirmesinden sonra haddeleme işleminin uygulanması yüzey iyileştirmede daha da ilerleme sağlanabileceği deneysel olarak anlaşılmıştır. Çalışmalarda paso sayısı, haddeleme adımı, hızı ve bilye çapı gibi değişkenler sabit tutulup haddeleme kuvvetinin etkileri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Araştırmaların sonuçlarına göre metalin kabul edeceğinden daha fazla baskı kuvveti sonucunda bu iki işlemde de plastik deformasyonlar oluşmakta, uygulanan aşırı kuvvet sebebiyle metalik yüzeyde bozulmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Kumlama yönteminde malzemenin yüzey sertliği %72 artarken ve devamında bilyeli haddeleme işleminin uygulanması ile bu değer %110'a çıkmaktadır. Bir başka parametre olan yoruma dayanımı ise kumlama ile %54'lük bir iyileşme ve bunun devamında bilyeli haddeleme uygulanması %65'e çıktığı tespit edilmiştir. Malzemenin korozyon dayanıklılığı ise darbeli çelikleme ile kötüleşirken haddeleme işleminde ise iyileştiği deneyler sonucunda belirlenmiştir.

Hassan [25], haddeleme ile ilgili çalışmalarını alüminyum-bakır alaşımları üzerine yapmıştır. Alüminyum-bakır numuneleri üzerinde haddeleme kuvveti, hızı ve adımı gibi farklı haddeleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine olan etkilerini araştırmıştır. 30 mm çapındaki numuneler döküm metal kalıpta üretilmiş olup, haddeleme için 10 mm çapında tek kullanımlık karbon çelik malzemesinden imal edilen bilyeli haddeleme aparatı kullanılmıştır. Deney numuneleri torna tezgâhında yüksek hız çeliği kesici takım ile işlenerek 25 mm'ye düşürülmüştür. İşlem akabinde kesici takım çıkarılarak yerine haddeleme aparatı takılmıştır. Torna tezgâhında numunelerin işlenmesi ve haddeleme işlemi esnasında soğutma sıvısı kullanılmamıştır. Deneyler sonucunda döküm, tornalama ve tek paso haddeleme işlemlerine tabi tutulan numunelerin yüzey profilleri incelenmiştir.

Numunelere dökümden sonra uygulanan tornalamanın yüzey pürüzlülüğüne etkisi çok az olmasına karşın akabinde yapılan haddeleme işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi çok iyi olmuştur. Deneyler esnasında haddeleme işlemi gerçekleştirilirken haddeleme kuvveti, hızı ve adımının artırılması yüzey pürüzlülüğünün azaldığını belirlenmiştir. Belirli bir kuvvete kadar kuvvetin artırılması yüzey pürüzlülüğünü azalttığı gözlemlenirken belirlenen kuvvetin üzerinde kuvvet uygulandığında yüzey pürüzlülüğünü artmaktadır. Benzer durum haddeleme hızında da gözlemlenmiştir, belirli bir limite kadar hızın artırılması yüzey pürüzlülüğünü azaltırken bu limitten sonraki artışın yüzey pürüzlülüğünde de artışa sebebiyet verdiği gözlenmiştir. Haddeleme adımı gözlemlenirken de belirli bir sınır aşıldığında yüzey pürüzlülüğünde bozumalar meydana gelmektedir. Malzeme de haddeleme kuvvetinin artması ile yüzey sertliği artmakta ve buna karşın haddeleme hızı ve haddeleme adımı artırılması yüzey sertliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Black ve arkadaşları [26], haddeleme yöntemi için matematiksel analizler ile deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Analizler neticesinde öngörülen sonuçlar ile deneysel veriler detaylı olarak incelenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen haddeleme kuvveti, haddeleme katmanı derinliğinde ve katmandaki plastik zorlamayı hesaplayabilmek için kayma çizgisi alan modeli ile eşitlikler elde etme yoluna gidilmiştir. Deney numunesi olarak alüminyum-magnezyum alaşımı kullanılmıştır. Çalışmalarda hidrolik akışkan kuvveti deney numunesine dikey baskı oluşturacak şekilde bir aparat kullanılmış ve numune hareketli makineye bağlanarak yatay düzlemde hareket ettirilmiştir. Deney numuneleri işlenirken yağlama yapılmış ve bu işlem için birden fazla yağ kullanılmıştır. Analizler ve deneysel çalışmalardaki kuvvet oranı ile ilgili veriler arasında iyi bir ilişki olduğu saptanmış ve matematiksel analiz ile kuvvet oranı hassas bir şekilde belirlenmiştir. Benzer şekilde haddeleme katmanındaki zorlama ve derinlik değerlerindeki karşılaştırmalar birbiri ile örtüşmüştür. Çalışmalarda yüzey pürüzlülüğü incelenirken safir ve yüksek hız çeliği takozlar kullanılmıştır. Deney numunelerinde kayma hızına paralel konumda iken elde edilen değerler paralel konumda iken elde edilen değerlere göre daha iyi sonuç vermiştir. Bu iki durumda yapılan incelemelerde safir ezici yüksek hız çeliğinden imal edilmiş eziciye göre daha iyi pürüzlülük değeri elde edilmiştir.

Hassan ve arkadaşları [27], deneysel çalışmalarında haddeleme kuvveti ve paso sayısının optimize edilmesini çalışmışlardır. Haddeleme işlemi 10 mm'lik bilyeli aparatı ile torna tezgâhında yapılmıştır. Deney düzeneği ise tepki yüzey modeline göre dizayn edilmiştir. Haddeleme kuvveti ve paso sayısı kullanılarak on farklı deney grubu

hazırlanmıştır. Beş farklı haddeme kuvveti ve yine beş farklı paso sayısı kullanılarak on farklı deney grubu hazırlanmıştır ve sonuç olarak haddeme kuvveti arttıkça iş parçasının yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve paso sayısının ortalama değerlerde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Pirinç malzemeler üzerinde yapılan bu deneyde matematiksel modelleme göre teorik olarak en uygun pürüzlülük değeri olan $0.172 \mu\text{m}$ değerine ulaşabilmek için en uygun haddeme kuvveti 203 N ve en uygun paso sayısı iki paso olarak tespit edilmiştir.

Yu ve Wang [28], alüminyum malzeme üzerinde küresel yüzeyli polikristal haddeme aparatı ile yaptıkları deneylerde farklı parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Mevcut problem için en uygun haddeme parametreleri ile bazı haddeme mekanizmaları tartışılmıştır. Deneyler sırasında otomatik ilerlemeli torna tezgâhı özel hazırlanmış küresel haddeme aparatı ile kuru haddeme yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda alüminyum alaşım üzerinde $0.5 \mu\text{m}$ olan pürüzlülük $0.026 \mu\text{m}$ inebilmektedir. En küçük ilerleme değeri ile de en iyi yüzey kalitesine ulaşabilmiştir. Haddeme aparatının bilye çapı ise 1 mm seçilmesine rağmen 0.5 mm lik küre çapı daha iyi haddeme kalitesi vermektedir. Düşük hızlarda haddeme rijit haddemeye göre daha küçük olduğu ve aparat yayın sertlik katsayısı arttıkça daha kaliteli haddemeye ulaşabileceği deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır. Ayrıca deneyler sonucunda heterostatik haddemenin homostatik haddemeye göre son yüzey işleme operasyonu için daha iyi neticeler verdiği görülmüştür.

Shiou ve Chen [29], yaptıkları çalışmalarda hem yüzey haddeme hem de serbest yüzey haddeme konularını araştırmış araştırmalarında serbest yüzey olarak plastik enjeksiyon kalıbının iç yüzeyi kullanılmıştır. Deneylerde gerekli bilyeli haddeme kuvvetini hesaplamak, bilyeli haddeme aparatı tasarımı gibi faaliyetler ile freze tezgahında Taugchi'nin ortogonal çoğaltma metodu ile optimum düzlem haddeme parametrelerini bulmaya çalışmıştır. Yapılan deneyler sonucu ilk kez tasarlanan haddeme aparatının hem düzlemsel haddeme hem de serbest yüzey haddemede kullanılabileceği belirtilmiştir. Düzlemsel Haddeme için optimum parametreler Taugchi'nin L18 matrix hesaplamalarıyla tespit edilmiştir. Serbest yüzey haddeme için kullanılan plastik enjeksiyon kalıbında haddeme hızı 200 mm/dk , haddeme kuvveti 300 N ve haddeme adımının $40 \mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir. İş parçasının düzlem haddeme için yüzey pürüzlülüğü $1 \mu\text{m}$ den $0.07 \mu\text{m}$ kadar iyileştirilmiştir. Deneyler sonucunda düzlem yüzey haddeme %62, serbest yüzey haddeme de %77.8'lik bir yüzey pürüzlülüğü iyileşmesi görülmüştür.

Hassan [30], demir içermeyen alüminyum ve pirinç malzemeler üzerinde bilyeli ve pirinç malzemeler üzerinde bilyeli ve makarnalı haddeme aparatıyla haddeme deneyleri

yapmış. Yaptığı deneylerde haddeleme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğinin gibi değişken haddeleme parametrelerinin iki farklı alarım üzerinde yaptığı etkileri incelemiştir. Çalışmalar sırasında her iki aparatta da kullanılacak olan numuneler torna tezgâhında 32 mm'den 28 mm'ye talaş kaldırılarak işlenmiş daha sonra haddeleme aparatı kesici takım ile yer değiştirilerek yine aynı tezgâhta haddeleme operasyonuna tabi tutulmuştur. Haddeleme operasyonu sırasında yağmalama kullanılmamış fakat numune haddeleme operasyonu öncesinde alkol ile temizlenmiştir. Aparat için ise partiküllerin iş parçası ile aparat arasına girerek haddeleme yüzeyine zarar vermemesi için temizleme işlemine sürekli devam edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda hem bilyeli haddeleme aparatının hem de makaralı haddeleme aparatının yüzey pürüzlülüğü en küçük değerine çekmek için haddeleme kuvvetini ve paso sayısının arttırmak gerekliliğini ortaya koymuştur. Yüzey sertliği ise her iki aparatta haddeleme kuvveti ile paso sayısının arttırılması ile geliştirilmiştir. İki aparatın kıyaslanması sırasında bilyeli haddeleme aparatının makaralı haddeleme aparatına göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha iyi yüzey sertliği verdiği gözlemlenmiştir.

Stodolnik [31], fizik ve sürtünme bilimi ile ilgili parametreleri kullanarak NV206 tip bilyeli yatak iç halkası için haddelemenin etkilerini incelemiştir. İç halka LH15 çelikten imal edilmiş ve çok ince işçilikle son işlem operasyonu sonlandırılmıştır. İşlem parametreleri çevresel hız $v=9.5$ m/dk, adım 0,04 mm/dev ve paso sayısı sabit 1 olarak deneyler yapılmıştır. Yağlama için plastik yağlayıcı LT4 kullanılmıştır. Halka parçaları 4.62 mm haddelenmiş, 200-1300 N kuvvetle 63 HRC sertlik değerine ulaştırılmıştır. Hertz temas gerilimi 4700-8800 MPa'dır. Haddeleme sonrası pürüzlülük $Ra=0.12$ den $0.06 \mu m$ ye düşmüştür. Kayan haddelenmiş halkalarda $3 \mu m$ aşağıda % 1.5-2.5 mikro sertlik artışı olmuştur. Yüzeyde daha derinlere inildikçe orantılı olarak F kuvveti gözlenmiştir. 1200 N'luk haddeleme kuvveti ile baskı kuvvetinin düştüğü gözlenmiştir. Halkanın kayma ve yuvarlanma karşısındaki dayanımı $F=1200$ N ile %38 artarak oldukça dikkat çekici bir artış olmuştur.

Basak ve Goktaş [32], haddeleme işlemi için alüminyum alarım AL 7075 T6 malzemeler üzerinde elde edilen deneysel verilere Fuzzy Logic (Bulanık Mantık) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde %2.55 yüzey sertliğinde %0.62 hata ile bu yöntemin haddeleme için uygun olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Yapılan bu çalışmada, bilyeli haddeleme yönteminin yüzey pürüzlüğünü iyileştirdiği, hadde parametrelerinden paso sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak (%41) hadde basıncından (%39.6) daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan kuvvet ve

paso sayısının malzemenin mikrosertliğini artırdığı, kuvvet ve paso sayısındaki artışa bağlı olarak yaklaşık 20 HV oranında malzemenin mikrosertliğinin arttığı görülmüştür. Hadde kuvvetinin artması ile malzemede yüzey altı kalıntı gerilmenin arttığı gözlemlenmiştir. Malzemenin yorulma dayanımında iyileşme sağlandığı ve yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir.



3. YÜZEY İYİLEŞTİRMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmede geleneksel ve geleneksel olmayan birçok yöntem kullanılmaktadır. Taşlama, raybalama, honlama gibi geleneksel yöntemler sıkça kullanılmaktadır. Fakat malzemeden beklenen yüzey tamlığını sağlamada bu yöntemler yetersiz kalabilmekte ve dezavantajları sebebiyle tercih edilmeyebilmektedir. Yüzey kalitesini artırmak için yeni yöntemler kullanılmaktadır. Geleneksel olmayan yöntemlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

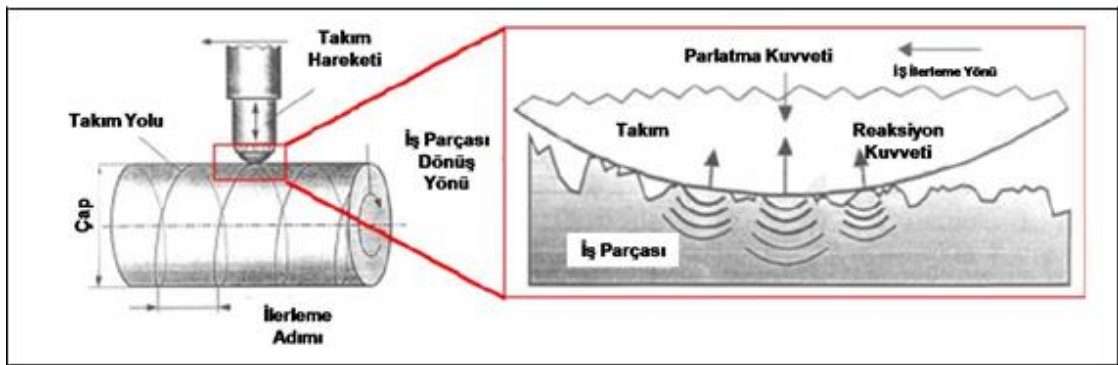
3.1 Bilyeli Haddeleme

Bilyeli haddeleme yöntemi, yüzey işleme yöntemleri arasında, kullanım kolaylığı ve sahip olduğu avantajlarından dolayı son zamanlarda daha tercihli hale gelmiştir.

Yöntem ile ilgili daha detaylı bilgi bir sonraki ana bölümde daha detaylı anlatılacaktır.

3.2 Derin Ezme

Derin Ezme (Deep Rolling), çalışma prensibi bakımından bilyeli haddeleme yöntemine benzemektedir. Bu yöntemde dönen iş parçasının yüzeyine bir aparat yardımıyla yüksek basın uygulanmakta ve yüzey tabakasında gerilmeler oluşturmaktadır. Bu yöntem işleme, yüzeydeki mikro çıkıntılar basma aparatı yardımıyla plastik deformasyona uğratarak şekil 3.1'de görüldüğü gibi yüzeydeki mikro çukurlara doldurulmaktadır. Yöntemin temel mekaniği temas bölgesinde iş parçası ile küresel bilye arasında oluşturulan yüzey basıncıdır. Bu yüzey basıncı ile akma mukavemeti aşıldığından yüzeyde artık gerilmeler ve mikro yapısal deformasyonlar (sertleşme/yumuşama) meydana gelir [33,34].



Şekil 3.1 Derin haddeleme işleminde takım ve numunenin hareket şekli [34].

Bu yüzey işleme metodunda yüzey pürüzlülük değeri düşük fakat bası artık gerilme derinliği büyüktür [35]. Bunun nedeni malzemenin yorulma dayanımını artırmaktır. Bu yöntemin uygulandığı malzemelerde basma artık gerilme hali, pekleşme özelliği olan malzemelerde yüzey sertlik artışı ve başlangıca göre daha iyi bir kalitesi oluşmaktadır. Bu yöntem otomobil endüstrisinde pistonlarda çalışma koşullarını iyileştirmek ve hava endüstrisinde ise türbin kanat kanatçıklarının yorulma direncinin iyileştirilmesinde daha çok kullanılır [36].

3.3 Bilyeli Yüzey Dövme

Bilyeli yüzey dövme (Shot Peening), küçük çaplı demir ve demir dışı olan işlem görecekt iş parçasından daha sert malzemenin imal edilmiş silindirik şeklindeki malzemeler vasıtasıyla çalışma parçası yüzeyine kontrollü şekilde püskürtülerek yüzeyde plastik deformasyon oluşturma işlemi şeklinde tanımlanabilir. Gerçekleştirilen bu işlem soğuk işlem prosesidir. Şekil 3.2’de bilyeli yüzey dövme işleminin gösterimi verilmiştir. Bu yöntem daha çok otomotiv sektöründe malzemelerin yorulma davranışını geliştirmek için kullanılır [37]. Bu yöntem neticesinde malzeme yüzeyi deformasyonla sertleşir ve malzemenin sertlik dayanımı da artırılmış olur [35].

Bu yöntemde karmaşık geometriye sahip ve her şekildeki malzemelere kolaylıkla uygulanabilir. Bundan dolayı yöntemde iş parçasında geometri sınırlaması yoktur ve bu konuda yöntem çok esnekler. Yöntem uygulandıktan sonra malzemedeki yorulma ömrünün artışı, yüzeyde artık gerilme oluşumu ve deformasyon sertleşmesi de meydana gelmektedir. Ancak iş parçasının yüzey pürüzlülüğünün artması ile gerilme ve şekil değıştirme genliğinde artış olurken yorulma ömrünün azalmasına sebep olmaktadır [38].



Şekil 3.2 Bilyeli yüzey dövme işleminin gösterimi [34].

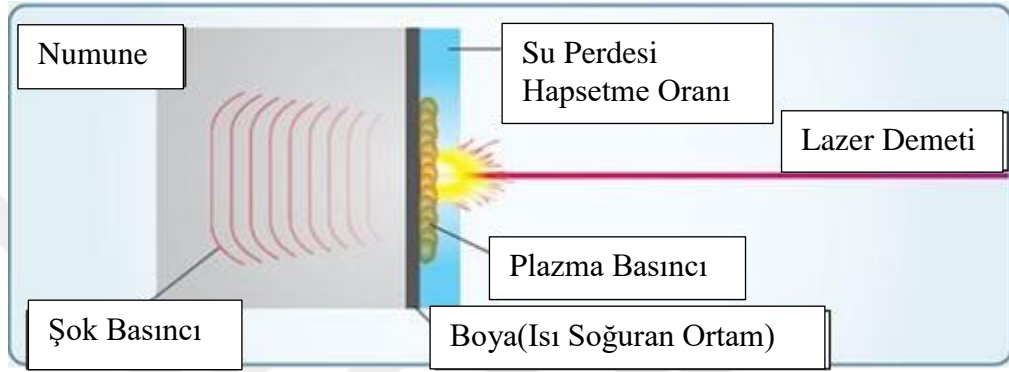
3.4 Lazer Şoku ile Ezme

Lazer Şoku ile Ezme (Laser Shock Peening), mekanik yüzey işleme yöntemleri arasında yeni sayılabilecek yöntemlerden biridir. Yöntemde yüksek enerjili lazer ışını kullanılmaktadır. İşlemin uygulanmadan önce saydam olmayan bir tabaka iş parçasının yüzeyine sürülmektedir. Bu tabaka, ıslak veya kuru boya, siyah bant veya metal folyo ile oluşturulmaktadır. Bunu saydam olmayan yüzeyin oluşturulmasının nedeni Şekil 3.3'te de görüldüğü gibi iş parçasına yönlendirilen ışın demetinin termal etkilerini önlemek ve malzeme yüzeyinde daha tutarlı bir tabaka oluşturmaktır. Daha sonra malzeme yüzeyinde ikinci bir tabaka olan saydam tabaka oluşturulur. Bu tabakayı oluşturmak için su kullanılır. İşlemden su lazer ışını geçirerek plazma bulutunun oluşmasını sağlamaktadır.

Yöntem gerçekleştirilirken lazer ışını parçaya yönlendirilir ışını saydam olmayan tabakaya çarparak ilerleyişini sürdürmez. Daha sonra saydam olan yüzeyde yani suda buharlaşmalar meydana gelmekte ve bu buhar alanları lazer ışını içerisine çekerek hızla büyümekte olan bir plazma bulutu oluşturmaktadır. Bu plazma bulutları parça yüzeyi ile sınırlandırıldığından yüksek basınç dalgaları meydana gelmektedir. Bu yüksek basınç dalgaları malzemenin akma noktasını geçince malzeme yüzeyinde plastik deformasyona neden olmaktadır. İşlem sonrasında malzemede artık gerilme oluşmaktadır.

Yapılan araştırmalarda lazer ışını ile ezme yönteminin malzeme mekanik performansına önemli katkılar sağladığı ve yüzeyde oluşturduğu artık gerilmeler ile meydana gelen bası ve çekme hali yorulma ve çatlak oluşumu ile meydana gelen hasarları gidermektedir.

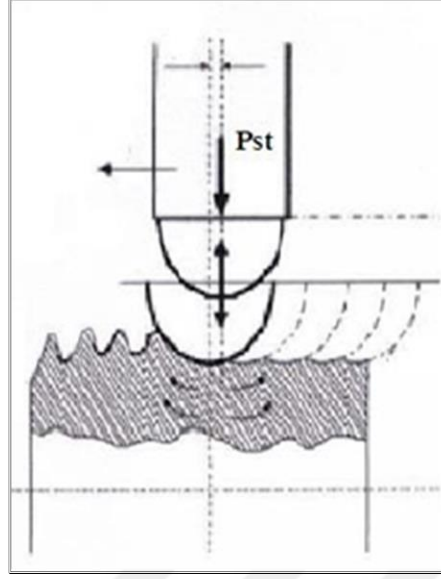
Yöntemin dezavantajı, proseste kullanılan araç ve gereçlerin pahalı olması ve bun aparatları muhafaza etmenin zor oluşudur. Yöntemi gerçekleştirmek için işlem öncesi ve sonrası deneyimli operatöre ihtiyaç duyulmasıdır [36,39].



Şekil 3.3 Lazer şoku ile ezme işleminin gösterimi [34].

3.5 Ultrasonik Nanokristal Yüzey Modifikasyonu

Ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM)) ile yüzey işleme iş parçasına ultrasonik bir cihaza bağlı tungsten karbür top ile iş parçası yüzeyinde milimetre kare başına 1.000, 10.000 çekimlerde saniye başına en az 20.000 kez veya daha fazla vurma olayıdır. Yöntemin malzemeye uygulanış biçimi Şekil 3.4'te şematize edilmiştir. Bu yöntem yüzey işlemede yeni bir teknolojidir. Yöntemde ultrasonik cihazla oluşturulan bu soğuk dövme şeklinde oluşturulan bu vuruşlar, malzemenin yüzey tabakasında ağır plastik deformasyonlar oluşturur, bu deformasyonlar sebebi ile malzeme yüzeyinde nano mikro kristal yapılar meydana gelir, geleneksel metotlara kıyaslandığında artık gerilme dağılımları hakkında bilgi mevcut değildir [40]. Yöntem sonucunda yüzey tabakalarının nano mikro yapı değişikliği ile eşzamanlı olarak Hall-Petch ilişkisine göre iş parçasının dayanımı ve sünekliğini geliştirebilir. Proses çalışma parçasının yorulma direncini sırasıyla artıracak olan yüzey pürüzlülüğünü geliştirir ve bası artık gerilmesine sebep olur [34,41].



Şekil 3.4 Ultrasonik Nanokristal Yüzey Modifikasyonu işleminin gösterimi [34].

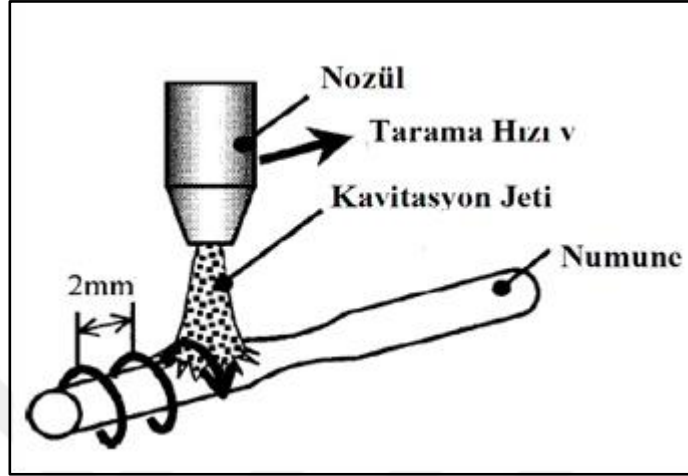
3.6 Kavitasyon ile Ezme

Kavitasyon ile Ezme (Cavitation Peening) sırasında, su jetinden çıkan yüksek basınçlı su nozuldan çıkarak basınç seviyesi daha düşük bir ortama geçtiği için kabarcıklar art arda oluşur ve artar, bu da temas ettiği malzeme yüzeyinde yüksek darbe yüklerine yol açar. Kavitasyon darbesi kullanan bu işleme metodu “Kavitasyon ile Ezme (Cavitation Peening)” diye adlandırılır. Kavitasyon ile Ezme olayında, kavitasyon normalde su dolu bir hazne içine yüksek hızlı su jetinin enjekte edilmesi vasıtasıyla üretilir. Kavitasyon ile Ezme işlemi şematik gösterimi Şekil 3.5’te verilmiştir.

Kavitasyon ile ezmenin ilk aşamasında, en belirgin değişiklik, iş parçası yüzeyindeki kütle kaybı yerine yüzeyde oluşan plastik deformasyondur. Burada meydana gelen plastik deformasyon, mekanik yüzey özellikleri için faydalıdır. Kavitasyona maruz kalma süresi arttıkça, çökme olaylarının sayısındaki artıştan dolayı metal yüzeyde erozyon ve hasar meydana gelir. Bu bakımdan, işlem süresi, bu imalat işlemi sırasında numune yüzey özelliklerini geliştirmek için anahtar bir parametredir. Bununla birlikte, kavitasyon ile ezme süresinin yüzey özellikleri üzerindeki etkisi henüz tam olarak araştırılmamıştır. Yöntemde hava kabarcıkları ile oluşan plastik deformasyon, yüzey sertliği, mikro sertlik ve pürüzlülüğünün iyileşmesine katkı sağlar.

Kavitasyon hakkındaki genel araştırma konuları, mühendislik uygulamalarındaki aşınma gibi negatif etkiler üzerine yoğunlaşmıştır. Kavitasyon ile Ezme ile pürüzlülükteki

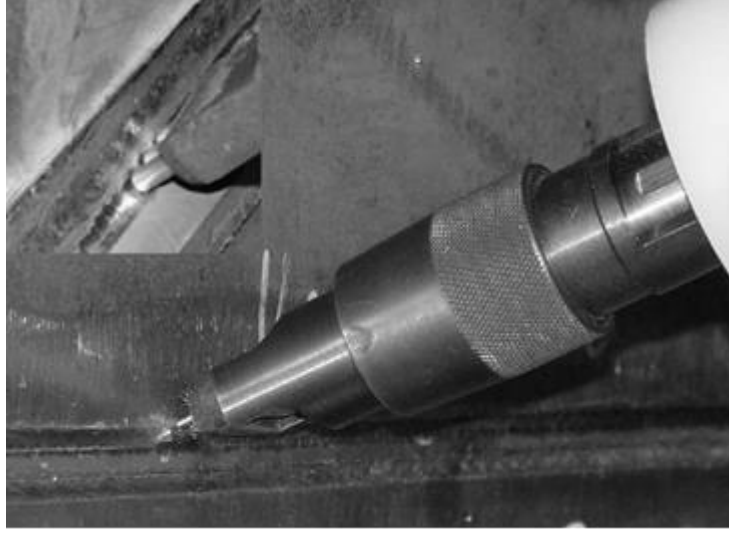
artış, katı cisim çarpışmaları olmadığı için ihmal edilebilir ve işlem maliyetleri düşüktür. Başlangıç kavitasyon bölümünde, kütle kaybı olmadan malzemenin yüzey altında plastik deformasyon vardır. Böylece bası artık gerilmesi morfolojik hasar olmadan elde edilebilir [42,43].



Şekil 3.5 Kavitasyon ile Ezme işleminin gösterimi[34].

3.7 Ultrasonik Destekli Yüzey İyileştirme

Ultrasonik Destekli Yüzey İyileştirme (Ultrasonic Impact treatment), yöntemi Statnikov'un icat ettiği ve daha sonrada 1970'lerde patentini aldığı, yüzey işleme yöntemleri arasında yeni sayılabilecek, kaynak sonrası yüzey işleme tekniğidir [44]. Ultrasonik Destekli Yüzey İyileştirme metodu, 27 kHz frekanslı ultrasonik işleme çakışan yaklaşık 200 Hz'deki mekanik dövme vasıtasıyla kaynak-malzeme birleşme noktasının deformasyonu işlemini kapsar. İşlemin temel amacı, yüzeyin plastik deformasyonu vasıtasıyla kaynak-malzeme birleşme noktasında yararlı bası artık gerilmeleri oluşturmak ve kaynak- malzeme birleşme noktası profilinin düzleştirilmesi vasıtasıyla gerilme konsantrasyonunu azaltmaktır [45]. Şekil 3.6'da Ultrasonik Destekli Yüzey İyileştirme işleminin gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.6 Ultrasonik Destekli Yüzey İyileştirme işleminin gösterimi[34].

Ultrasonik Destekli Yüzey İyileştirme işlemi, yüksek kalitede güven sağlayan gürültü değişimi ve düşük titreşimli yüksek frekanstan dolayı çok daha konforlu ve etkilidir. Diğer dayanım artırıcı ölçümlere kıyasla, bu yöntem kullanımında çok kolaydır; dakikalar içinde uygulanabilir, yüksek yerlerde uygulanması gibi özelliklere sahiptir. Bu gibi özelliklerden dolayı, bu yöntem mevcut yapıların servis ömürlerini geliştirmek için büyük potansiyel içerir [44].

4. BİLYELİ HADDELEME YÖNTEMİNİN TANIMLANMASI

4.1 Yüzeylerin Haddelenerek İşlenmesi

Makine elemanları imalat sektöründe şartlara bağlı olarak farklı özellikte malzemeler kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak kullanılan her malzemenin yüzey pürüzlülük değeri, sertliği, yorulma dayanımı, korozyon direnci ve aşınma direnci farklıdır. İmalat sektöründeki ihtiyaçların karşılanması için malzemeye en uygun imalat yöntemi belirlenip uygulanması gerekmektedir. Kullanılan bu imalat yöntemleri, istenilen özellikleri sağlamada bazen yetersiz kalmakta ve bunlara ek olarak ikincil operasyonlara başvurulmaktadır. Bu ikincil operasyonlar yüzey pürüzlük değeri, yüzey sertliği, aşınma direnci, yorulma dayanımı ve korozyon direnci gibi birçok mekanik özelliklerin iyileştirilmesi yani istenilen değerlere ulaşılmasına yardımcı olmaktadır.

İmalat sektöründe kullanılan talaşlı imalat yöntemleri (Tornalama, Frezeleme, vb.) üretilen malzeme yüzeylerinde sınırlı bir yüzey kalitesine erişilmektedir. Bazen, ulaşılan bu yüzey değerleri kullanım amacına uygun olmayabilir ve bunun iyileştirilmesi istenildiğinde taşlama, haddeme gibi işlemlere tabi tutulmalıdır. Bilyeli haddeme işlemi, imalat sektöründe, yüzey bitirme işlemleri olan honlama, taşlama, lepleme gibi klasik yöntemlerin yerine de kullanılmaktadır [46]. Şekil 4.1’de çelik bir milin haddelenmesi başarılı bir şekilde haddelendiği görülmekte ve işlemin öncesinde ve sonrasında malzeme yüzeyinde meydana gelen olumlu yöndeki değişim fark edilmektedir.



Şekil 4.1 Çelik bir milin haddelenmesi [47].

Şekil 4.2’de iç delik delinmiş bir iş parçasına bilyeli haddeleme yönteminin uygulanışı görülmektedir.

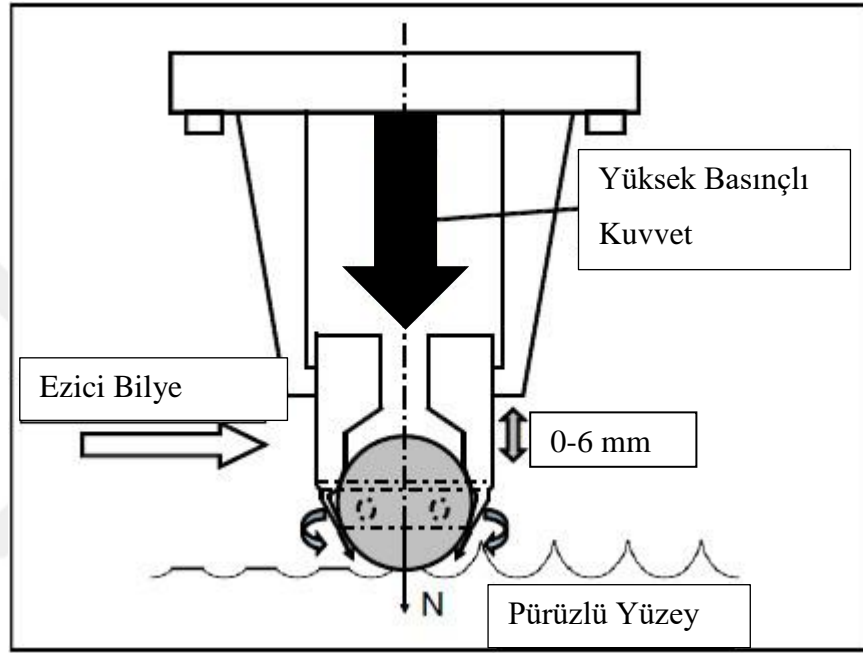


Şekil 4.2 İç delik haddeleme [48]

4.2 Bilyeli Haddeleme Yöntemi

Makine imalat sürecinde talaşlı üretim ile üretilen malzemelerde mekanik yüzey özellikleri bakımından belirli bir sınıra kadar erişilebilmektedir. Yüzey özellikleri taşlama, haddeleme gibi sonlandırma işlemleriyle iyileştirilmektedir. Bilyeli Haddeleme (Ball Burnishing); üretilen makine elemanlarında yüzeylerin, talaş kaldırılmadan, yüzeyin plastik deformasyona uğratılması ile süper ince işlenmesinde uygulanan, hassas bir yüzey işleme tekniği olarak tanımlanabilir. Haddeleme işlemi, metal parçaların prizmatik silindirik ve konik iç ve dış yüzeylerine uygulanır. Haddeleme işlemi genellikle tornalanmış ve taşlanmış iş parçalarının yüzeylerine uygulanır [49,50]. Bilyeli haddeleme yönteminde, Şekil 4.3’de şematik olarak gösterildiği gibi yüzeye belirli bir kuvvet ile bastırılan yuvarlanma elemanı yardımıyla yüzeylerden talaş kaldırılmadan, yüzeydeki mikro pürüz tepeleri küçük plastik deformasyonlara uğratarak düzleştirilir ve bir soğuk şekil verme işlemidir [51,52]. Gerekli olan yuvarlanma elemanın baskı kuvveti, yay baskısı, hidrolik baskı ya da manyetik baskı ile elde edilmektedir. İşlem neticesinde, malzemenin yüzey sertliği artarken, pürüzlülüğü ise önemli derecede azalmaktadır. Yüzeye uygulanan gerilme şiddetine bağlı olarak, yöntem düşük ve yüksek deformasyon olmak üzere iki farklı aralıkta tanımlanmaktadır. Yüksek deformasyonlarda yüzeye genellikle 30 MPa’dan daha yüksek basınçlar uygulandığından, yüzey altında oluşan artık çekme gerilmelerinin derinliği 1 mm’nin üzerine çıkmaktadır.

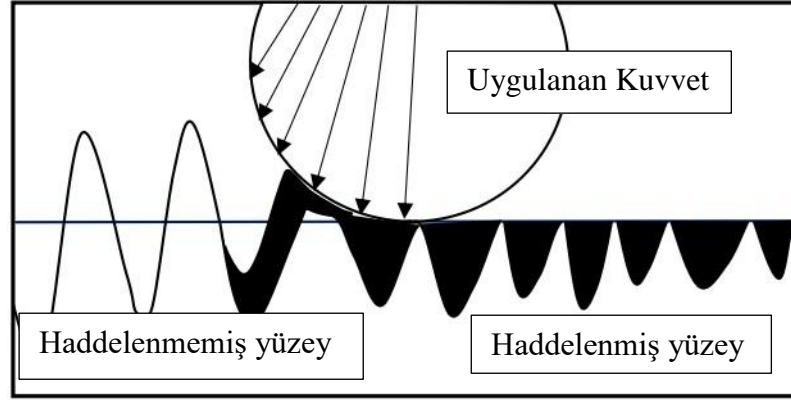
Düşük deformasyonla haddelme ise, genellikle kalıp yüzeyleri, miller, türbin kanatlarının bağlantı kısımları, araç süspansiyon sistemleri, kaynaklı bağlantılar ve yatak yüzeyleri gibi parçalara uygulamaktadır [53]. Bilyeli haddelme, geleneksel hassas tornalama, taşlama ve honlama yöntemlerine nazaran yaklaşık 15 kat daha ekonomiktir [54]. İşlem neticesinde ayrıca, yüzeydeki çekme gerilmeleri basma gerilmelerine dönüştüğünden, yorulma ömrü önemli derecede iyileşmektedir.



Şekil 4.3 Bilyeli haddelme işleminde takım ve numunenin hareket şekli [7].

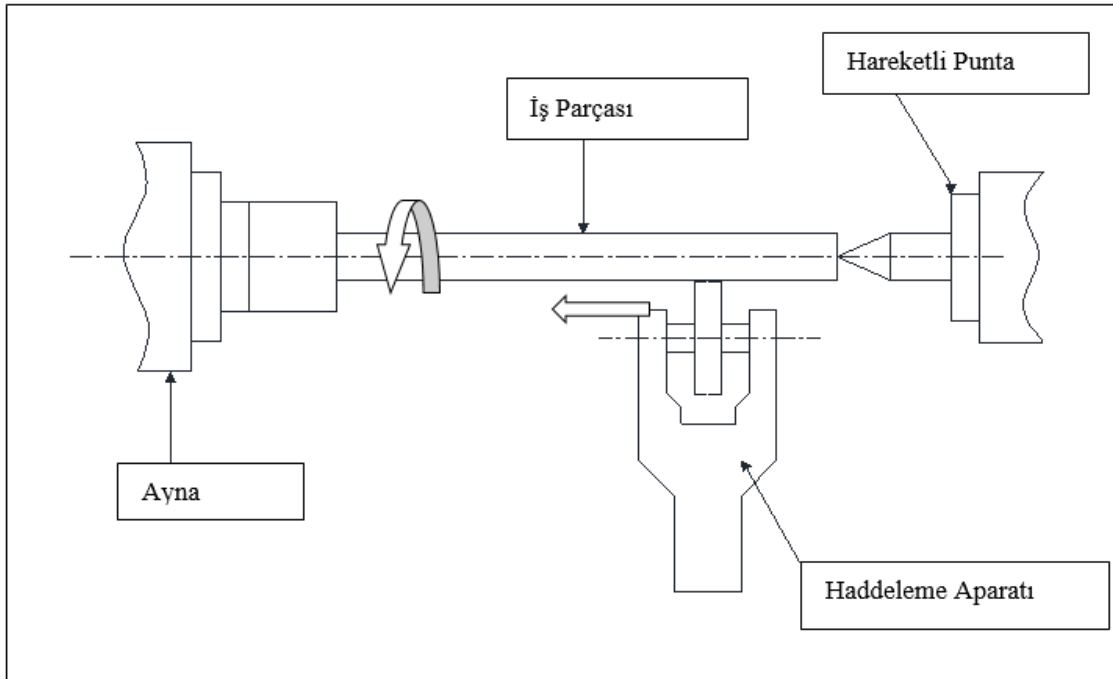
Yöntem başta havacılık olmak üzere, medikal, nükleer endüstri, otomotiv, paketlenme, kimya ve tıp gibi alanlarda kullanılan birçok farklı malzemenin haddelenmesinde kullanılmaktadır [49].

Bilyeli haddelme ve takımın hareketi; talaşlı üretim sonucu işlenmiş metal parçaların yüzeyleri profilometre ile incelendiğinde, Şekil 4.4 'teki gibi elde edilen yüzeylerin gerçekte düz olmadığı tam tersine yüzey girinti ve çıkıntılardan oluştuğu görülmektedir [50]. Haddelme işlemi malzemelerin plastik şekil değişiminden yararlanarak ortalama çizginin üzerindeki çıkıntıların, dönerek çalışan çelik bilyeli ya da malzemedan daha sert bir bilye ile ezilmek suretiyle yüzeydeki girinti bölgelere doldurulması esasına dayanmaktadır.



Şekil 4.4 Ezici bilye ile yüzeyde plastik deformasyon oluşumu [55].

Bilyeli haddeme işleminin şematik görünümü Şekil 4.5'te verilmektedir, mekanizma genel olarak şekilde görülen haddeme aparatı yardımıyla, eksenini etrafında dönmekte olan iş parçasından meydana gelmektedir. Sistemde kullanılan aparat yardımıyla malzemeye basınç uygulanır ve aparata hareket verilerek parça eksenini boyunca ilerleyerek yüzeyin tamamı ezerek şekillendirilir. İş parçasında deforme edilecek yüzey kalınlığı malzemenin özelliklerine göre değişmekte ve genelde tornalanmış yüzeylerde maksimum, 15-20 mikron; taşlanmış yüzeylerde ise bu değer maksimum 6-8 mikron olarak öngörülmektedir [50].



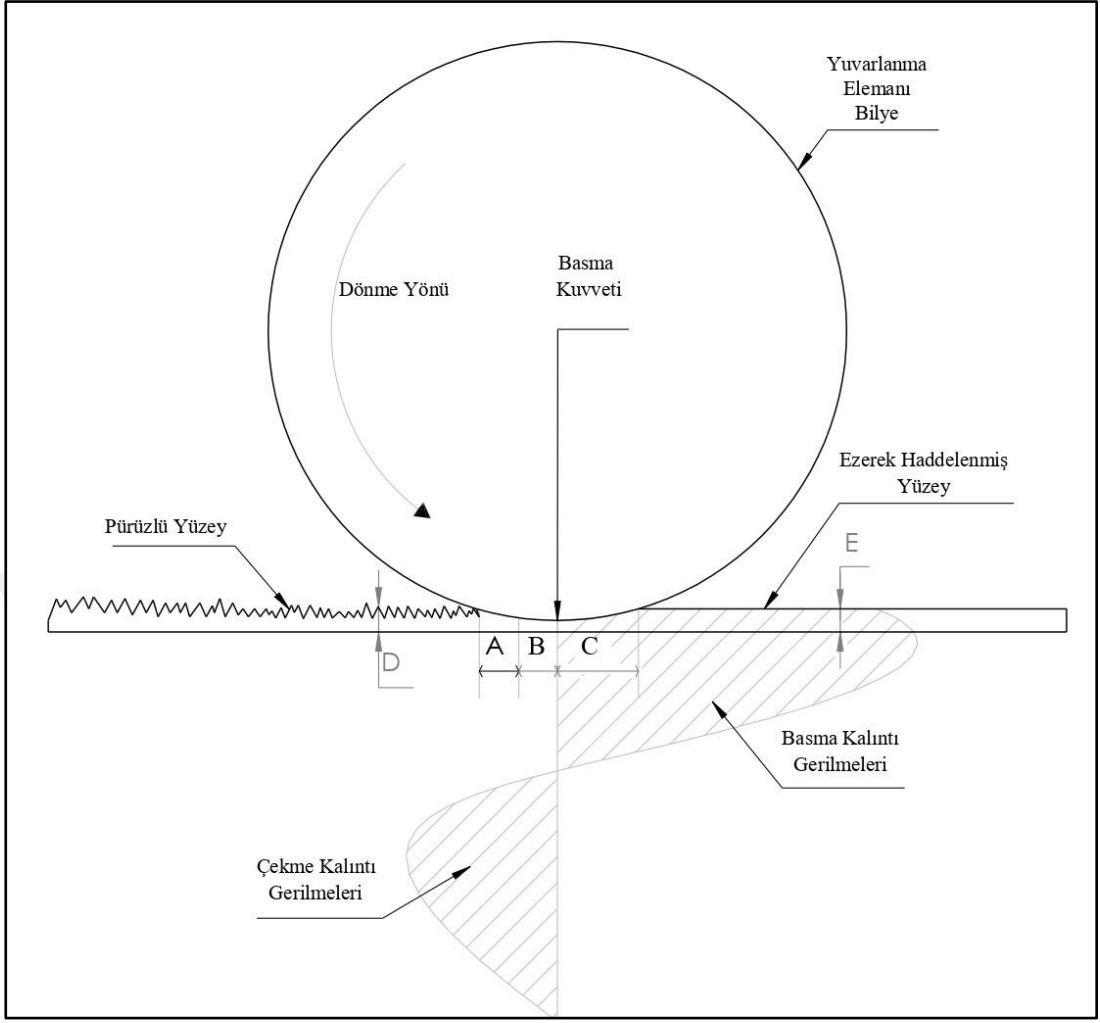
Şekil 4.5 Bilyeli Haddeme Yönteminin şematik olarak gösterilmesi[56].

Bilyeli Haddeme (Ball Burnishing) işlemi sayesinde karmaşık yüzeylerde iyi bir yüzey bırakarak onlara iyi şekil verir [57]. Bu yöntem ile malzeme yüzeyi düzleşmekte ve yüzey bitirme özelliklerini geliştirmektedir.

Bu yöntemin uygulanması basit, çünkü bir mekanizma sayesinde makine işlemi kendi kendine yapmaktadır. Bu mekanizmada parça sökülmesi yoktur. Sadece bir aparat kullanılmaktadır [58].

Bu yöntem ile frezeleme ya da tornalama işleminden sonra malzemede oluşan artık gerilme ya da yüzey pürüzlülüğünü değiştirmek ya da iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu işlem sonunda malzemenin yüzey sertliği artmaktadır. Başlıca uygulama alanları otomotiv krank şaftlarında, hidrolik sistem elemanlarında, rulman yüzeylerinde ve implant malzemesi yüzeylerinde kullanılmaktadır [59]. Bu işlem soğuk işleme prosesi olarak da düşünülebilir. Bu proseste sert ve yüksek polisleme özelliğine sahip bir topla malzeme yüzeyine uygulanarak sıkıştırılır. Haddeme yumuşak ve sünek malzemelere uygulanmanın yanında sert metallerde uygulanmaktadır. Haddeme aparatı ile malzeme yüzeyine sıkıştırma yapıldığı zaman malzeme yüzeyi boyunca ince plastik akışa neden olmaktadır ve malzeme yüzeyinden birkaç mikron dip kısmında görülmektedir. Lokal soğuk plastik deformasyondan dolayı artık bası gerilmeleri malzeme yüzeyinden atılacaktır. Bu proses yüzeyin korozyon direncini, yorulma dayanımı, aşınma direncini diğer yüzey işlemlerine göre daha iyi iyileştirilir [60].

Bilyeli haddeme işleminde bilyenin yüzeyi ezme işlemi ve kalıntı gerilme dağıtımının Şekil 4.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Ön işlemi gerçekleştirilmiş iş parçasının (tornalama, taşlama, delme, raybalama) yüzeyine ilk temas A bölgesinde, B bölgesinde, uygulanan kuvvet sebebiyle malzeme akma noktasına geçmektedir. Bu bölgede plastik deformasyonla D bölgesindeki mikro pürüz tepeleri ezilmektedir. C bölgesinde ise plastik deformasyon sonrasında malzemede bir miktar elastik dönüşüm gerçekleşmektedir. E bölgesinde ise bilye malzemeye son kez temas ederek, yüzeyin parlak, pürüzsüz ve istenilen ölçülere gelmesinin sağlar. Burada bilyeli haddeme sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen gerilme yüzeyden eksene doğru azalır. Meydana gelen gerilme haddemeye bağlı olarak iş parçasına 1 mm kadar nüfuz eder. Haddeme kuvveti kalktıktan sonra malzemede dislokasyon artışı ve pekleşme sebebiyle yüzey tabakasının altında gerilim yığılmasından dolayı kalıntı gerilmeleri oluşur [61].



Şekil 4.6 Bilyeli haddeme işlemi ve malzemede meydana gelen deformasyon [61].

Malzemenin yüzey pürüzlülüğünün artması, yüzeyde çentik etkisine sebebiyet verdiği için malzeme yüzeyinde çatlak oluşumuna neden olmaktadır. İş parçasında oluşan çekme gerilmelerinin etkisi nedeniyle çatlak ilerleme hızı artmaktadır. Bir başka oluşum ise yüzeyde oluşan basma artık gerilmeleri ile çatlak ilerleme hızında yavaşlama meydana gelir. Malzeme yüzeyinde meydana gelen bu iki etki malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Malzemede meydana gelen artık gerilmeler yüzeyde basma gerilmesi, iç bölgede ise çekme iç gerilmelerinin bulunması malzeme kesitinde denge hali meydana getirmekte ve herhangi bir eksene göre momentleri toplamı sıfır olur. Bilyeli haddeme yöntemi ile işlenmiş malzemelerde özellikle kalıntı gerilmeler yüzey doğruluğunu etkileyen en önemli parametredir [23].

Bilyeli haddeme yönteminde temel amaç belirli bir yolu takip eden yuvarlanma elemanının kendisine uygulanan kuvveti iş parçasının yüzeyine aktarmasıdır. Uygulanacak

kuvvetin şiddeti malzemeye göre farklılık göstermektedir. Bilyeli haddeleme yönteminde yüzeydeki mikro pürüz tepeleri plastik deformasyona uğratarak, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi malzeme yüzeyindeki çok küçük boşluklara doldurulmaktadır. Bunun için haddeleme aparatı iş parçası üzerinde belirli bir devir ve adımda hareket ettirilmesi gerekmektedir. Kontrollü olarak yapılan bu deformasyon etkisi sebebiyle yüzeydeki düzensizlikler giderilir, malzeme yüzeyinde sert bir katman oluşur, yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana gelir. Ayrıca yüzeyde oluşan bu sert katman sebebiyle aşınma direncinde pozitif bir iyileşme sağlanmaktadır.

4.3 Bilyeli Haddeleme Yönteminin Mekanikliği

Luo ve arkadaşlarına göre [62], bilyeli haddeleme işleminde, teğetsel kuvvet F_y , normal kuvvetten büyük olduğunda F_z ince talaşlar oluşacaktır ve bunun tersi de geçerlidir. Bu eşitlikte, Şekil 4.7'den, denklem kullanılarak en geniş penetrasyon derinliği (nüfus etme derinliği) elde edilebilir.

$$a_p = \rho - h = \rho(1 - \cos\psi) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de ρ haddeleme bilyesinin yarıçapı, $\psi = 45^\circ - \varphi = 45^\circ - \tan^{-1}(F_t/F_N)$ ve bilyeli haddelemede sürtünme açısı $\varphi = 6^\circ \sim 17^\circ$ arasındadır.

Yani,

$$a_{pmax} = (0.117 \sim 0.223)\rho \quad (4.2)$$

Gerekli olan bilyeli haddeleme kuvveti denklem 4.3'ten bulunabilir.

$$F = \sigma A \quad (4.3)$$

Bu denklemde σ , malzemenin akma gerilmesidir, A ise haddeleme bilyesinin yüzeye olan temas alanıdır,

$$A = \frac{1}{2}\pi\rho^2(1 - \cos\alpha) \quad (4.4)$$

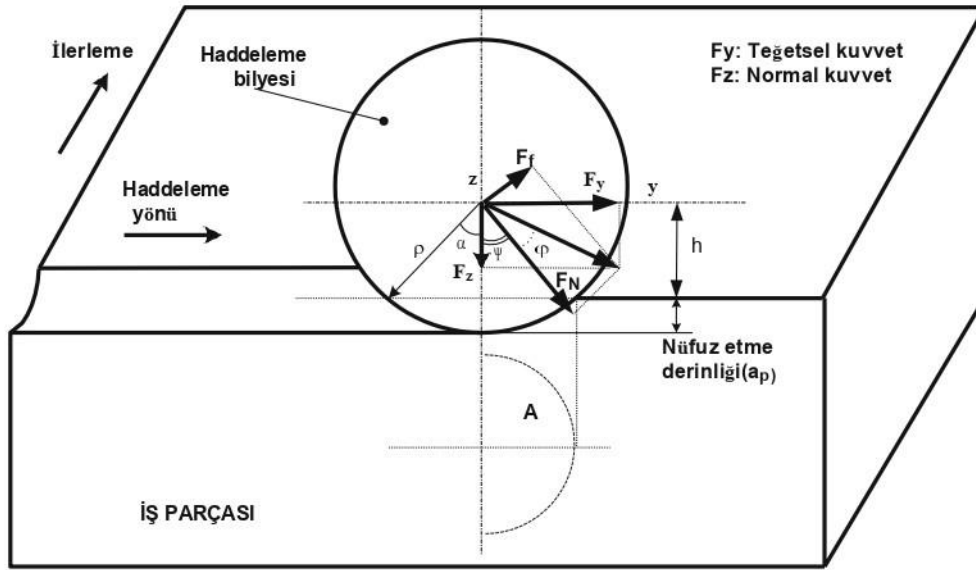
$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{\rho - a_p}{\rho}\right) \quad (4.5)$$

Denklem 4.2 ve denklem 4.5'ten maksimum haddeleme kuvveti,

$$F_{max} = 0.223\pi\sigma\rho^2 \quad (4.6)$$

olarak bulunur.

M. Korzynski [63]'e göre, bilyeli haddeleme işlemi, sertleştirme, boyutlandırma, düzleştirme ve aynı zamanda karışık olarak da sınıflandırılabilir. Takım ile iş parçası yüzeyi arasındaki temas Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere bilye ile malzeme arasındaki temas malzemenin pürüz tepeleri ile dairesel bilye arasındadır. Dolayısıyla, gerçek temas alanı genellikle görünür temas alanından çok daha az olacaktır. Bu nedenle, ihtiyaç duyulan parlatma kuvvetinin büyüklüğü, Denklem 4.6'da hesaplanan maksimum haddeleme kuvvetinden daha küçük olmalıdır.



Şekil 4.7 Bilyeli haddeleme yönteminde malzemeye etki eden kuvvetlerin gösterimi [63].

4.4 Bilyeli Haddelme Yönteminin Avantajları

Bilyeli haddelme yöntemi sahip olduğu avantajları nedeniyle yüzey iyileştirme yöntemleri arasında daha çok ön plana çıkmaktadır. Yöntemin sahip olduğu avantajlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yüksek kalitede yüzey elde edilir.
- Taşlama, honlama gibi malzemelere uygulanan ikincil operasyonlarda genellikle yüzey pürüzlülük değerinde iyileşme meydana gelirken bu yöntemde yüzey pürüzlülük değeri, aşınma direnci, korozyon direnci, yorulma dayanımı, yüzey sertliği gibi özelliklerde de iyileşme meydana gelmekte ve malzemenin çekme ve akma mukavemeti artmaktadır.
- Yüzey kalitesi iyidir ve ilave işleme gerek duyulmadan kullanılabilir. Çok iyi ölçü hassasiyeti sağlanır.
- Yüksek hassasiyet gerektiren parçaların imalatında son işlem olarak kullanılır.
- Yöntemde kullanılan aparatın tasarımı ve imalatı diğer yöntemlere göre daha kolay ve ekonomiktir ve birçok kez kullanılabilir.
- İşleme süresi, geleneksel yüzey işleme yöntemlerine nazaran çok kısadır.
- Malzemedan talaş kaldırılmaksızın yapılan bir üretim tekniğidir.
- Talaşlı üretime göre minimum fire ile üretim sağlanır.
- Malzeme liflerinin sürekliliği bozulmaz dolayısıyla üretilen parçaların dayanımına iyi yönde etkisi olur.
- Bilyeli haddelme işlemini uygulamak için özel bir tezgâha ihtiyaç yoktur, haddelme aparatını klasik tornalama tezgâhlarına bağlayarak işlem gerçekleştirebilir.
- Taşlama işlemine göre, seri üretimde kullanılabilirliği fazladır.
- Fazla ustalık gerektirmeden yapılabilen bir işlemdir.
- Bilyeli haddelme işlemi silindirik ve konik malzemelerin iç ve dış yüzeylerine ve prizmatik metal parçaların yüzeyine uygulanır.
- Bu işlem için kullanılan takımın tasarım süreci ve yapımı, diğer takımlara göre basit ve maliyeti azdır.
- Yüksek üretim hızına sahip bir yöntemdir. Kısa sürede istenen yüzey kalitesi elde edilir.
- Elektrik gücü ve toplam enerji gereksinimi diğer yüzey işleme proseslerine göre çok azdır. Üretim maliyeti düşüktür.

- Elde edilen yüzey kalitesi çok iyi olduğundan uygulandığı yüzeylerde sürtünmeyi azaltır, enerji tasarrufu sağlar.

Yukarıda bahsedilen özelliklerinden dolayı Bilyeli Haddelme Yöntemi ile yüzey işleme, geleneksel yüzey işleme yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir [57, 62, 63, 64].

4.5 Bilyeli Haddelme Yönteminin Dezavantajları

Bilyeli haddelme yönteminde bazı dezavantajlar mevcuttur. Bu dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yöntem, malzemenin ezilmesi prensibi ile yapılan bir işlem olduğu için malzemenin haddelme işlemine tepki vermesi ezilme kabiliyetine bağlı olup, yapısı sert malzemelerde olumlu etkisinin sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple işlemin olumlu etkisi ezilebilir yumuşak malzemelerde etkili sonuç vermektedir.

- İşlemden etkili olan parametrelerden baskı kuvveti ve paso sayısı gibi değişkenlerin uygun değerde verilmemesi durumunda yüzeyde olumsuz sonuçlar meydana gelmektedir.

- Deformasyon başlatmak ve sürdürmek için yüksek kuvvetler gerekir.

- Daha büyük ve güçlü tezgahlar gerektirir.

- Süneklik daha azdır.

- Yöntemin yeni olması ve yapılan çalışmaların yetersiz olması nedeniyle malzemeler için optimum değerlerin sınırlı olarak bilinmesi.

Yukarıda sıralanan nedenler Bilyeli Haddelme Yönteminin bilinen bazı sınırlılıklarıdır [64, 65, 66, 67].

4.6 Bilyeli Haddelme Yönteminin Temel Parametreleri

Bilyeli haddelme yöntemi gerçekleştirilirken sahip olduğu temel parametreler vardır. Bu parametreler ilerleme hızı, baskı kuvveti (hadde basıncı), paso sayısı gibi temel değişkenlerdir. Yönteme ait temel parametrelerin doğru seçilmesi önem arz etmektedir. Çünkü bu parametreler doğrudan malzemenin beklenen yüzey özelliklerini etkilemektedir.

4.6.1 İlerleme Hızı

İlerleme hızı, torna ve CNC tezgâhlarında kalemlığın malzeme üzerindeki hızını ifade etmektedir ve birimi ise mm/dk'dir. Bu parametre talaşlı imalatta her malzemenin işlenmesi için farklı değerlerdedir. Malzemeye uygun optimum ilerleme hızı yapılan deneysel çalışmalarla belirlenmiş ve katalog haline getirilmiştir.

Bilyeli Haddelme yönteminde, iyi sonuçlar elde etmek için ilerleme hızı önem arz etmektedir. Fakat yöntemin yeni oluşu ve deneysel çalışmaların yeterli düzeyde olmaması nedeniyle her malzeme için bu değer bilinmemektedir.

4.6.2 Baskı Kuvveti

Malzemede birim başına uygulanan yük olarak ifade edilir ve birimi Newton (N)'dur. Baskı kuvveti ile malzemede plastik şekil değişimini meydana getirdiği için bu değer seçimi doğrudan elde edilecek sonucu etkilemektedir. Baskı kuvvetinin yüksek seçilmesi malzemede istenmeyen şekil değişimi ve yüzeydeki deformasyonun fazla olmasına sebep verebilir.

Bilyeli haddelme yöntemi temelde yüzeydeki tepe noktalarını plastik şekil değişimine uğratarak çukur olan alanlara doldurmaktır. Böylece yüzeydeki tepe ve çukur noktaları birbirine yaklaştırılarak daha düzgün hale getirmektedir. Bu nedenlerle baskı kuvvetinin uygun seçilmesi Bilyeli Haddelme yönteminde oldukça önemlidir.

4.6.3 Paso Sayısı

Paso sayısı haddelme işleminin tekrar edilmesini ifade etmektedir. İstenilen özelliklere göre bu değer belirlenir ve haddelme işlemi tekrar edilir. Yüzey özelliklerini istenilen ölçülere getirmek için bilyeli haddelme işlemi, kademeli veya istenilen sayıda tekrar edilebilir.

4.7 İşleme Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri

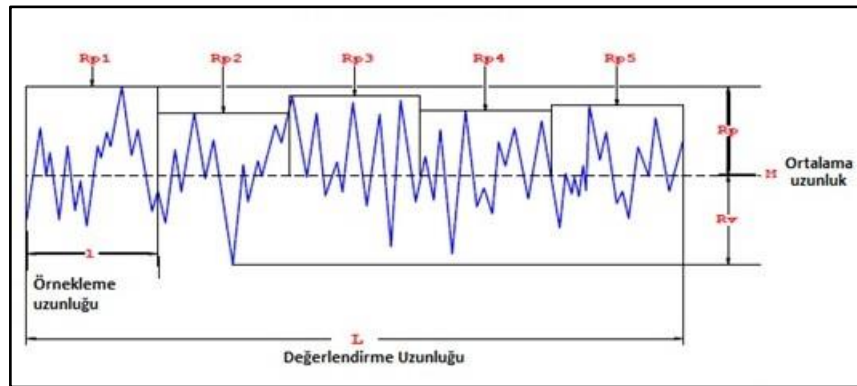
Yöntem uygulanması ile malzemenin birden fazla mekanik özelliğine doğrudan ya da dolaylı olarak etkisi vardır. İşlem neticesinde temel parametrelerin mekanik özelliklere etkisi aşağıda açıklanmıştır.

4.7.1 Yüzey Pürüzlülüğü

Tornalama işlemi sonrasında işlenen ürünün yüzeyinin düz olmaması durumu pürüzlülük olarak tanımlanır. Oluşan bu yüzey pürüzlülüğü, tornalama işleminden sonra istenmeyen bir durum olarak ortaya çıkmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için günümüze kadar pek çok ölçme tekniği geliştirilmiştir. Bu ölçme işlemi en ilkel olan dokunma yöntemi ile başlar, çeşitli cihazların ve teknolojinin yardımıyla çok hassas ölçümlere kadar varır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçme yöntemlerini iki temel başlık altında değerlendirebiliriz. Bunlar; uygulama şekline göre (tahribatlı, tahribatsız, temaslı, temassız); ölçme hassasiyetine göre (kaba, orta, hassas). Bu ölçme yöntemlerinde istenilen özellikler; pürüzlülüğü ölçülen yüzeye herhangi bir tahribatta ve temasta bulunulmaması ve hassas ölçüm yapılabilmesidir.

Yüzey pürüzlülüğü, ortalama pürüzlülük değeri R_a ile ifade edilir. R_a ortalama yüzey çizgisi üzerinde kalan çıkıntıların alanları ortalama yüzey çizgisinin altında kalan çukurların alanının toplamı ile işlenmiş boy uzunluğuna bölünmesi ile elde edilir ve Şekil 4.8'de görülmektedir. Birimi mikrometre (μm)'dir.



Şekil 4.8 Profilometreye göre bir yüzeyin kesiti

Talaşlı imalat sonunda elde edilen yüzey istenilen değerlerde olamayabilir, bunun için yüzey iyileştirme yöntemleri geliştirilmiş olup istenilen hassasiyetlere göre çeşitli şekillerde uygulanmıştır. Geleneksel olarak uygulanan yöntemler (honlama, lepleme, parlatma, taşlama) zaman ve maliyet açısından bazen yetersiz kalmaktadır. Son zamanlarda farklı yöntemler türetilmiş ve uygulanmıştır. Bu yöntemler arasında bilyeli haddeleme yöntemi sahip olduğu avantajlar ve yüzey kalitesi üzerinde etkili sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilir hale gelmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda bilyeli haddeleme yönteminin yüzey pürüzlülük değerini büyük oranda iyileştirdiği ispatlanmıştır.

4.7.2 Yüzey Sertliği

Sertlik izafi bir ölçü olup malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Sertlik ölçümü, mühendislik malzemelerine uygulanan çok genel bir testtir. Bir malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında bir ilişki kurulabilir. Örneğin çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik ile doğru orantılıdır.

Sertlik ile mekanik özellikler arasındaki ilişki, mühendislikte malzemenin bu değerinin bilinmesi daha önem arz etmiştir. Bu yüzden sertlik ölçme yöntemleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır.

Genellikle malzemelerin sertliği ile işlenebilme özelliği arasında ters bağıntı vardır. Bu durum talaşlı üretimde beraberinde olumsuzlukları meydana getirmiştir. Bu olumsuzluğu gidermek için malzeme işlendikten sonra ısıtma işlemi veya haddeleme gibi sertleştirme işlemleri yapılması işleme maliyeti ve zaman tasarrufu sağlamıştır.

Çalışma koşullarına göre malzemenin yüzey sertliği istenebilir, uygulanan yöntemler yetersiz kalmaktadır. Fakat Bilyeli Haddeleme yönteminin bu konuda etkili sonuçlar vermesi yapılan deneysel çalışmalarla kanıtlanmış ve bu yöntemin daha öne çıkmasını sağlamıştır.

4.7.3 Artık Gerilme

Malzeme herhangi bir yük etkisi altında olmadığı halde, malzemenin bünyesinde varlığını sürdürebilen gerilmelerdir. Bu, genelde malzeme homojen olmayan deformasyona uğradığında görülür. Eğme etkisi altına giren numunede, etki geçtikten sonra elastik deformasyona uğrayan bölgenin toparlanma çabaları plastik deformasyona uğrayan bölge

tarafından engellenir. Böylelikle elastik şekil değişimine uğramış bölgeler çekme gerilmesi etkisine, plastik şekil değişimine uğramış bölgeler de elastik basma gerilmesi etkisine girerler. Çekme gerilmesi altındaki alanda artık basma gerilmesi, basma gerilmesi altındaki alanda da artık çekme gerilmeleri oluşur.

Genel olarak, yapının yüzeyindeki basma artık gerilmesi malzemenin mukavemetine fayda sağlamaktadır. Yorulma mukavemetini ve yorulma ömrünü arttırıp, çatlak yayılma hızını azaltmakta ve çevresel etkilerle desteklenen gerilme korozyonu çatlama ve hidrojen kaynaklı çatlama gibi hasarlara karşı malzeme direncini arttırmaktadır. Malzeme yüzeyindeki çekme gerilmesi, malzemenin yorulma mukavemetini ve yorulma ömrünü düşürmekte, çatlak yayılım hızını arttırmakta ve çevresel etkilerin desteklediği çatlaklara karşı malzemenin direncini düşürmektedir. Bu sebeple yüzeydeki çekme gerilmesi genel olarak istenmemektedir.

Bilyeli Haddelme yönteminde yüzeyde oluşturan basma gerilmesi ile yorulma mukavemeti ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerde iyileşmeler sağlamaktadır.

4.7.4 Yorulma Dayanımı

Yorulma Dayanımı, dinamik yüke maruz kalan makine elemanlarında çok önemlidir. Çünkü malzeme sürekli değişken yüke maruz kaldığında, yüzeyde çatlak teşekkülü ile başlayıp ve değişken yükler neticesinde ilerleyip malzemede plastik şekil değişimi meydana getirir. Bu plastik şekilde değişimi sonucunda sistemde kalıcı sorunlar meydana getirmektedir. Bu olayın meydana gelmesi ne zaman olacağını kestirmek oldukça güçtür. Çünkü bu durumu tetikleyen, gerek imalat yöntemlerinde gerekse malzemedен kaynaklı birçok kusur vardır. Bu istenmeyen durumun önlenmesi gerekmektedir. Makine elemanlarında yorulma dayanımını arttırmak için uygulanan mevcut yöntemler vardır. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalarla bu yöntemlere ek olarak bilyeli haddelme yönteminin, yorulma dayanımı üzerinde olumlu etkileri oluşturur. Yorulma dayanımını üzerine olumlu etkileri olması sebebiyle Bilyeli Haddelme yöntemini öne çıkarmaktadır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Malzeme temini, deney öncesi hazırlıklar, haddeme aparatı seçimi ve deneylerin yapılması ve bu deneylerden elde edilen veriler bu bölümde paylaşılmıştır.

5.1 Deney Malzemesi

Deneyisel çalışmada, ticari olarak temin edilmiş AA7075-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Bu malzeme, genellikle askeri ve havacılık sanayinde, yüksek mukavemet gerektiren makine parçalarının imalatında, kauçuk ve plastik kalıpların yapımında kullanılmaktadır. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1 AA7075-T6 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

Tablo1. Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0,5	0,5	1,8	0,3	2,6	5,8	0,22	0,25	Kalan

Tablo 5.2 AA7075-T6 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri

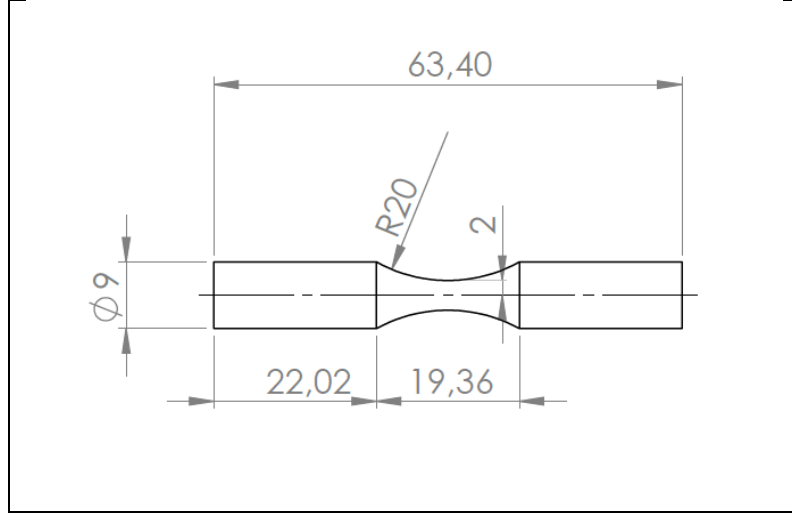
Akma mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
480	560	10	150

5.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Malzemeye ait mekanik özelliklerin ölçülmesi ve doğru sonuçlar elde edebilmek için uygun boyut ve ölçülerde numuneler hazırlanmıştır.

5.2.1 Yorulma Deney Numunelerinin Hazırlanması

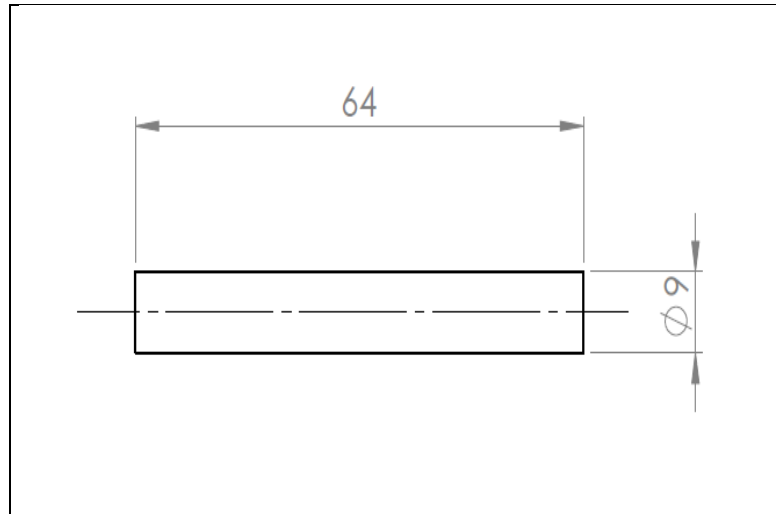
Yorulma deney numuneleri, Ø10 mm çapında olarak temin edilmiş olan malzemedan 64 mm uzunluğunda kesilerek, BSD tezgâhlarında, sabit işleme koşullarında ve karbür kesici takımlar kullanılarak, Şekil 5.1 deki ölçülere göre işlenerek haddeme işlemine hazır hale getirilmiştir. Bu ölçüler yorulma işleminin yapılacağı cihaza göre belirlenmiştir.



Şekil 5.1 Yorulma deney numune boyutları

5.2.2 Yüzey Pürüzlülüğü ve Mikro Sertlik Numunelerinin Hazırlanması

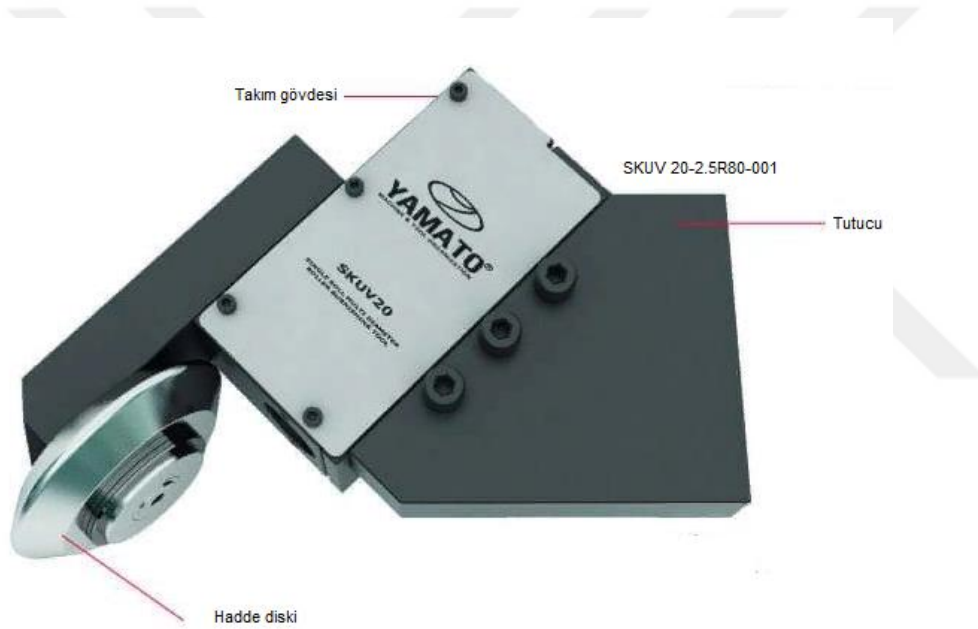
Yüzey pürüzlülüğü için deney numuneleri $\varnothing 10$ mm çapında olarak temin edilmiş olan malzemedan 64 mm uzunluğunda kesilerek, BSD tezgâhlarında, sabit işleme koşullarında ve karbür kesici takımlar kullanılarak, Şekil 5.2 deki ölçülere göre işlenerek $\varnothing 9$ mm çapa kadar işlenerek haddeleme işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.2 Pürüzlülük deney numunesi boyutları

5.3 Haddelme Aparatı

Deneylerde, Yamato SKUV 20-2,5R80 hadde aparatı kullanılmıştır (Şekil 5.3). Bu aparat, 2,5mm uç yarıçapında ve 80mm çapa sahip disk şeklinde bir dövücü başlığa sahiptir. Tutucu bölümü BSD torna tezgâhlarına bağlanabilmesi için farklı açılarda ayarlanabilmektedir. İçerisinde yer alan baskı yayının rijitlik katsayısı değerlerine bağlı olarak, hadde basıncı değerleri firma tarafından belirlenen tablolardan seçilmiştir.



Şekil 5.3 Yamato SKUV 20-2,5R80 hadde aparatı

5.4 Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Bilyeli haddelme yönteminde yüzey kalitesini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin malzemenin her bir mekanik özelliğine etkilerini aynı anda incelemek hem güç, hem de komplekstir. Literatürde yapılan çalışmalar irdelendiğinde bilyeli haddelme yönteminde, haddelme kuvveti (hadde basıncı) ve paso sayısının önemli olduğu tespit edilmiştir. Deneylerde, hadde basıncı ve paso sayısı faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve malzemenin yorulma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada zaman ve maliyetten tasarruf etmek adına tam faktöriyel yerine

Taguchi ortogonal deneysel tasarım yöntemi tercih edilmiştir. Bu faktörlere bağlı olarak, Taguchi L₉ deneysel tasarım kullanılmıştır. Tablo 5.3’de deney parametreleri ve faktör seviyeleri görülmektedir. İşleme parametreleri arasında olan ilerleme miktarı $f=0.1$ mm/dev ve devir sayısı $S=1000$ dev/dk sabit alınmıştır.

Tablo 5.3 Taguchi L9 ortogonal dizinde hadde parametreleri ve faktör seviyeleri

Deney no	Hadde basıncı (N)	Paso sayısı
1	80	1
2	80	3
3	80	5
4	121	1
5	121	3
6	121	5
7	242	1
8	242	3
9	242	5

5.5 Deneilerin Yapılması ve Ölçümler

Hazırlanan deney numunelerine bilyeli haddeleme yöntemi uygulanarak ölçümler yapılmıştır.

5.5.1 Yorulma Numunelerine Bilyeli Haddeleme İşleminin Uygulanması

Yorulma deney numuneleri Elazığ Gazi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi’nin mekanik atölyelerinde BSD torna tezgâhlarında, sabit işleme koşullarında ve karbür kesici takımlar kullanılarak, işlenmiş ve aynı tezgâhlara haddeleme aparatı bağlanarak Şekil 5.4’te görüldüğü gibi haddeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4 BSD torna tezgâhında haddeleme işleminin uygulanması

Deney programı Tablo 5.3'te ki gibi 9 adet deneyden oluşmaktadır. Her bir deneyin Wöhler grafiğini oluşturmak için, her deneyden 6 adet numune işlenmiştir. Toplamda 54 adet numune işlenmiş ve haddeleme işlemi uygulanmıştır.

5.5.2 Yorulma Deneylerinin Yapılması ve Sonuçları

TS ISO 1143 yorulma deneyleri standardına göre, toroit şekilli olarak hazırlanmış olduğumuz deney numunelerimizin, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Mekanik Laboratuvarlarında yorulma testleri yapılmıştır. Yorulma deneyleri, frekansı 100 Hz (5952 dev/dk) olan, HI-TECH SCIENTIFIC marka dönerek eğmeli yorulma test cihazında, oda sıcaklığı ve normal nem ortamında tamamlanmıştır. Gerilme oranı tam değişken yükleme ($R = -1$) şeklindedir. Yorulma numuneleri Şekil 5.5'te görüldüğü gibi test cihazına yerleştirilerek yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.



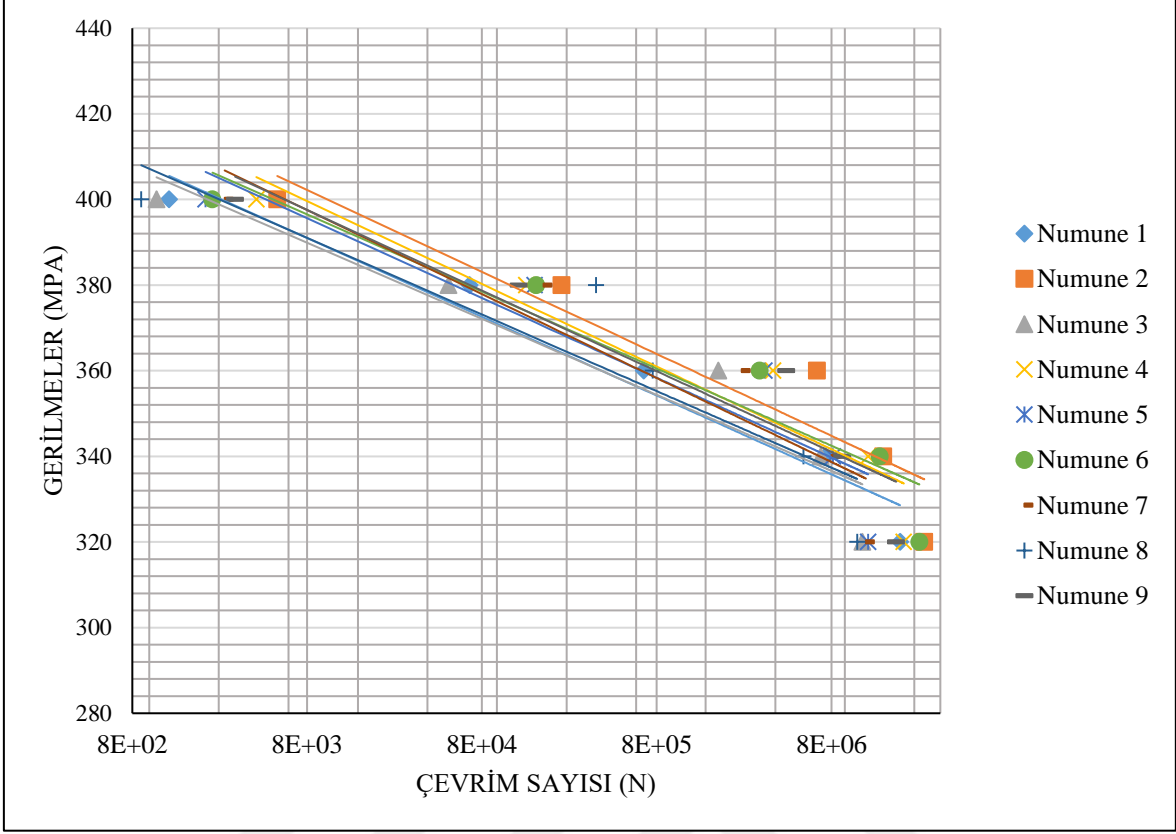
Şekil 5.5 Yorulma test cihazına yorulma numunesinin bağlanması

Deneyler sonucunda elde edilmiş veriler Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4 Yorulma deneyi test sonuçları

Deney No \ Gerilmeler (MPa)	320	340	360	380	400
1	1,97E+07	7,39E+06	6,74E+05	6,80E+04	1,30E+03
2	2,72E+07	1,58E+07	6,60E+06	2,28E+05	5,40E+03
3	1,20E+07	6,94E+06	1,80E+06	5,15E+04	1,10E+03
4	2,07E+07	1,30E+07	3,71E+06	1,44E+05	4,10E+03
5	1,30E+07	8,16E+06	3,31E+06	1,61E+05	2,10E+03
6	2,55E+07	1,51E+07	3,11E+06	1,64E+05	2,30E+03
7	1,26E+07	8,01E+06	2,45E+06	1,81E+05	2,70E+03
8	1,12E+07	5,55E+06	7,61E+05	3,60E+05	9,00E+02
9	1,88E+07	9,24E+06	4,41E+06	1,30E+05	3,10E+03

Deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak numunelere ait (S-N) diyagramları (Wöhler eğrileri), Şekil 5.6'da çizilmiştir.

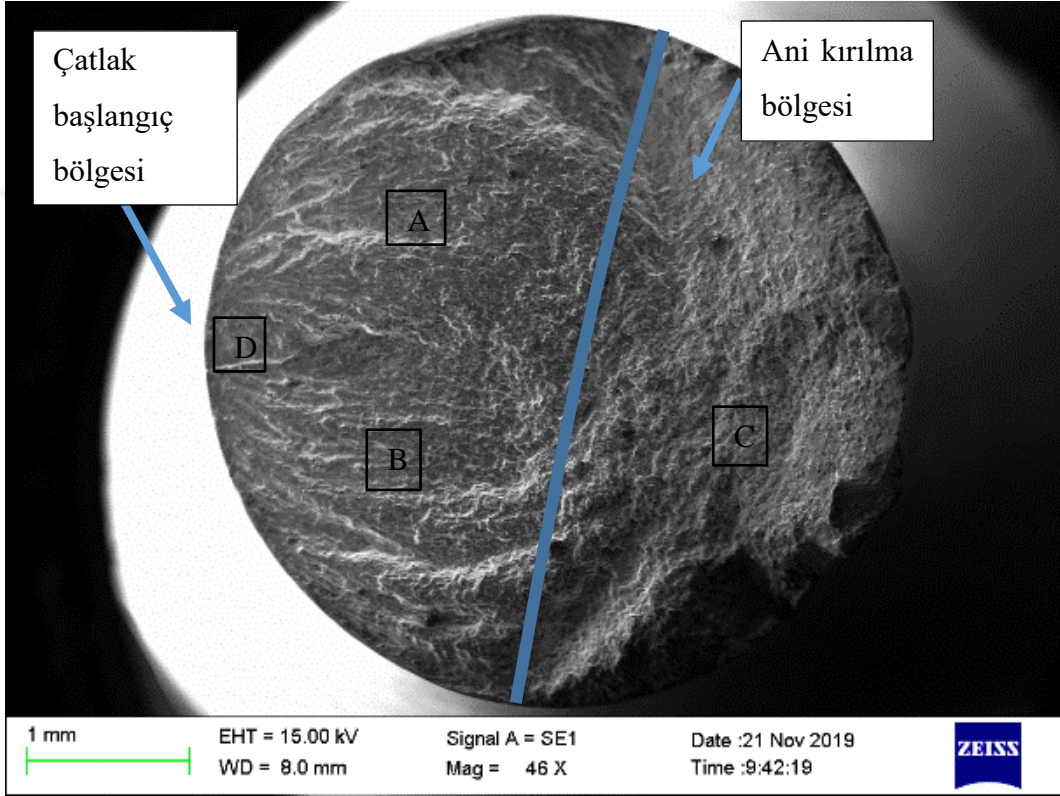


Şekil 5.6 Yorulma numunelerinin kuvvet-çevrim grafiği

5.5.3 Yorulma Numunelerinin Kırık Yüzeylerinin İncelenmesi

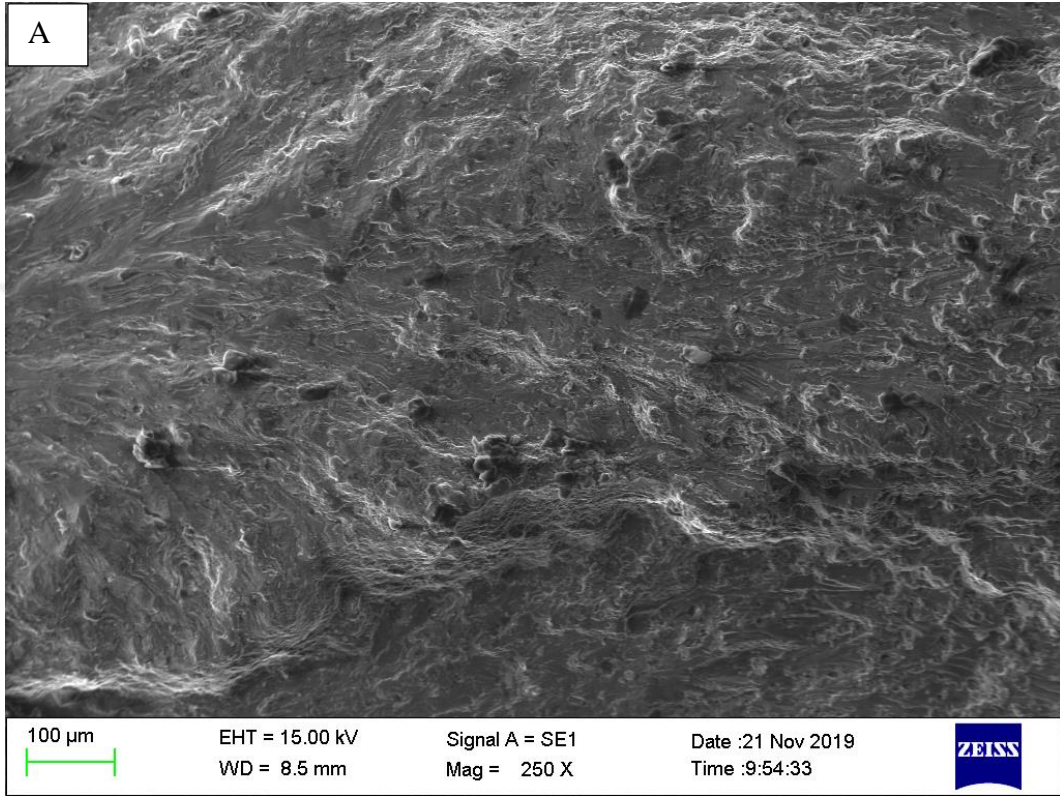
Yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri Fırat Üniversitesi Merkezi Laboratuvarlarında ZEISS MA 10 elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Elektron mikroskobu ile her numuneye ait farklı ölçekteki görüntüler incelenmiştir.

Deneylerde 400 MPa gerilme değeri ile yorulmaya tabi tutulan 1 numaralı deney numunesine ait kırık yüzeyin makro görüntüsü Şekil 5.7’de verilmektedir. Yorulma sonucu numunede meydana gelen hasar kesitin dar olduğu bölgede gerçekleşmiştir ve bu durum beklenen bir sonuçtur. Şekil 5.7’de çatlak başlangıç bölgesi ve ani kırılma bölgeleri gösterilmiştir, şekil üzerinde belirlenen A, B, C, D bölgelerinin SEM görüntüleri alınmıştır.



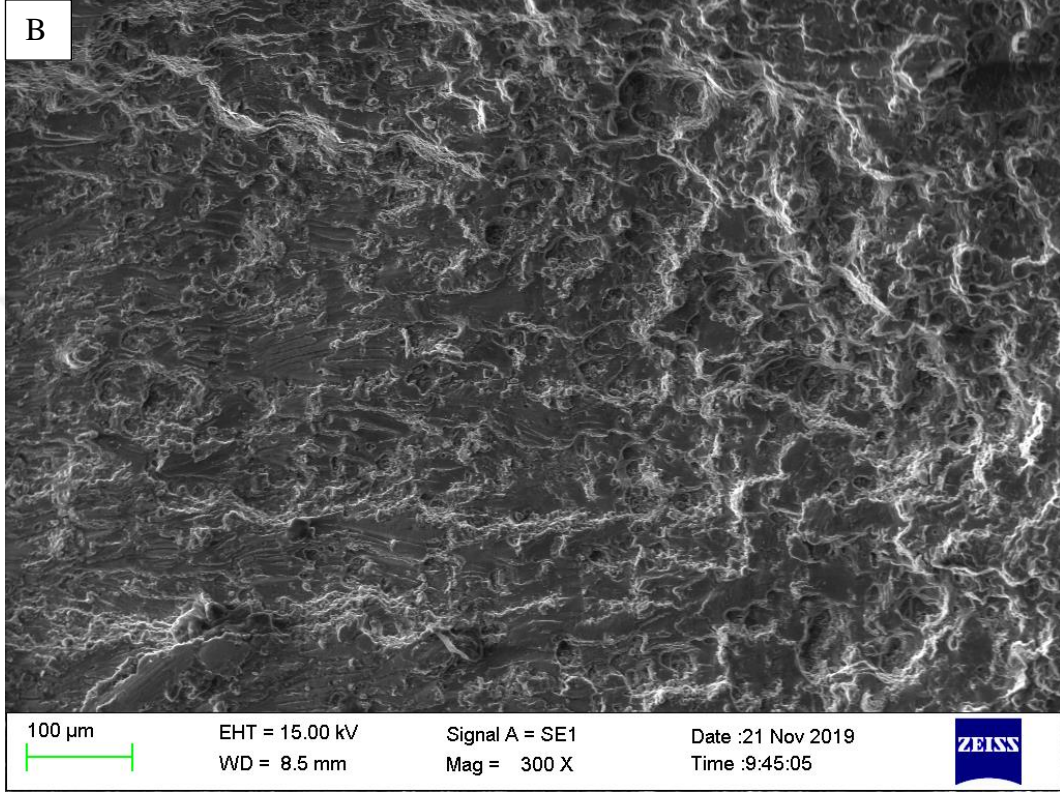
Şekil 5.7 1 Numaralı deney numunesinin kırık yüzeyine ait makro görüntü

Numuneye ait çatlak başlangıç bölgesinde, A ile belirtilen alanın taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yakınlaştırılmış görüntüsü Şekil 5.8’de görülmektedir. Çatlak başlangıç bölgesinde birbirine sürtünen yüzeyler nedeniyle görüntü daha pürüzsüz olmaktadır.



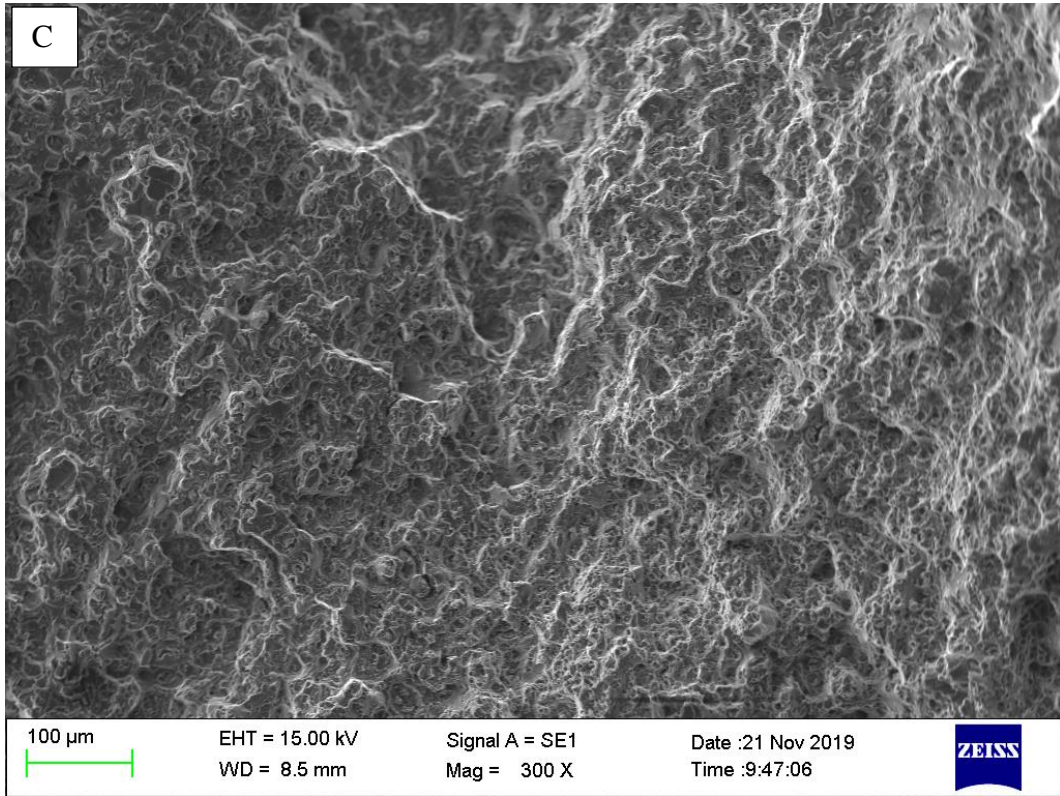
Şekil 5.8 A bölgesinin yakınlaştırılmış görüntüsü

Taramalı elektron mikroskopunda çatlak başlangıç bölgesine ait bir başka yakınlaştırılmış görüntü Şekil 5.9'da görülmektedir (B bölgesi). B bölgesindeki görüntü A bölgesindeki gibi kayma düzlemlerinden dolayı pürüzsüz bir yapıya sahiptir.



Şekil 5.9 B bölgesinin yakınlaştırılmış görüntüsü

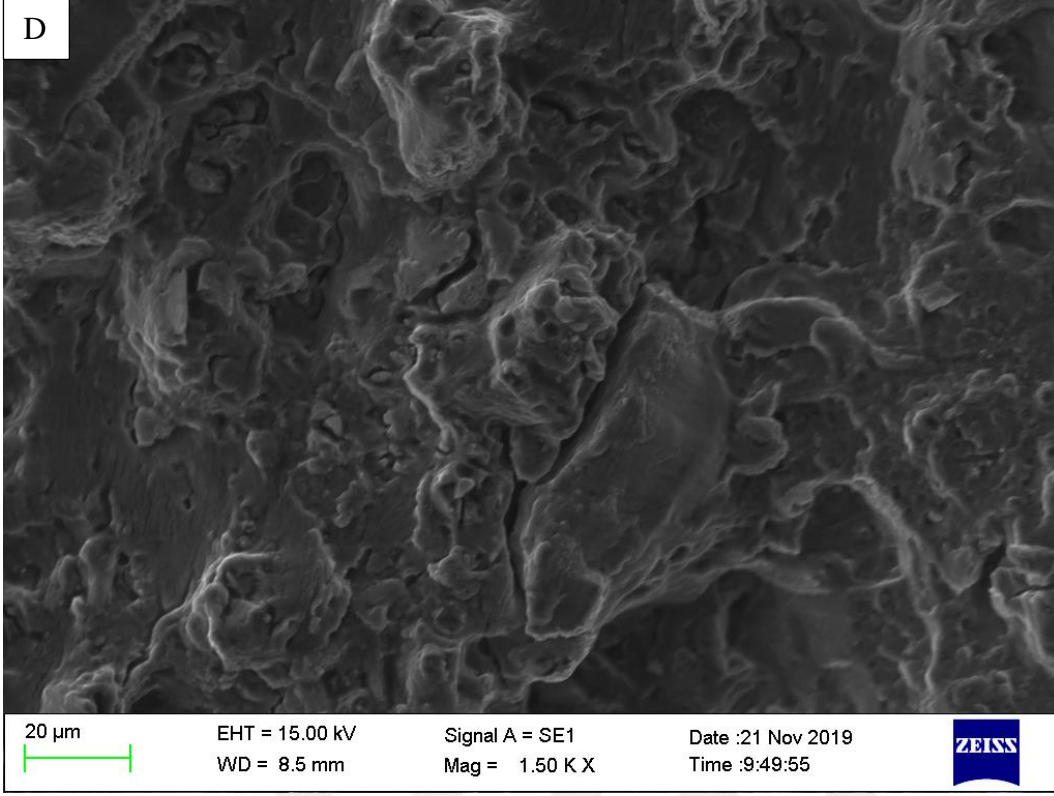
Taramalı elektron mikroskobu ile ani kırılma bölgesi de incelenmiştir. Çatlak ilerlemesi sonucu malzemenin kuvveti taşıyamayıp aniden kırılmanın gerçekleştiği bu bölge çatlak başlangıç bölgesinden daha farklı bir görünüme sahiptir. Şekil 5.10'da C ile gösterilen bölgenin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilmiş görüntü incelendiğinde bu bölge ağ şeklinde lifli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10 C bölgesinin yakınlaştırılmış görüntüsü

Malzemenin D bölgesinden meydana gelen mikro çatlaklar Şekil 5.11'de görülmektedir. Çatlağın ilerlemesi ile ve malzemenin üzerindeki değişken dinamik yüke dayanamayıp aniden kırılmasına sebebiyet verdiği bilinmekte ve elde edilen görüntülerde bu durum görülmektedir.

Benzer şekilde diğer numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiştir ve yukarıdaki benzer bulgular elde edilmiştir.



Şekil 5.11 D bölgesinin yakınlaştırılmış görüntüsü

5.5.4 Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Ölçülmesi ve Sonuçları

Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümü için 9 adet numune hazırlanmış olup, 2 adet numune de haddeme işlemi uygulanmadan ölçüm için hazırlanmıştır. Şekil 5.12’da hazırlanan numuneler görülmektedir. Çalışmada, numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri, Mitutoyo SurfTest SJ 201 ile ölçülmüştür. Ölçümler, hadde yönüne dik doğrultuda ve her bir ölçüm 3 kez tekrarlanarak ortalamaları alınmıştır.



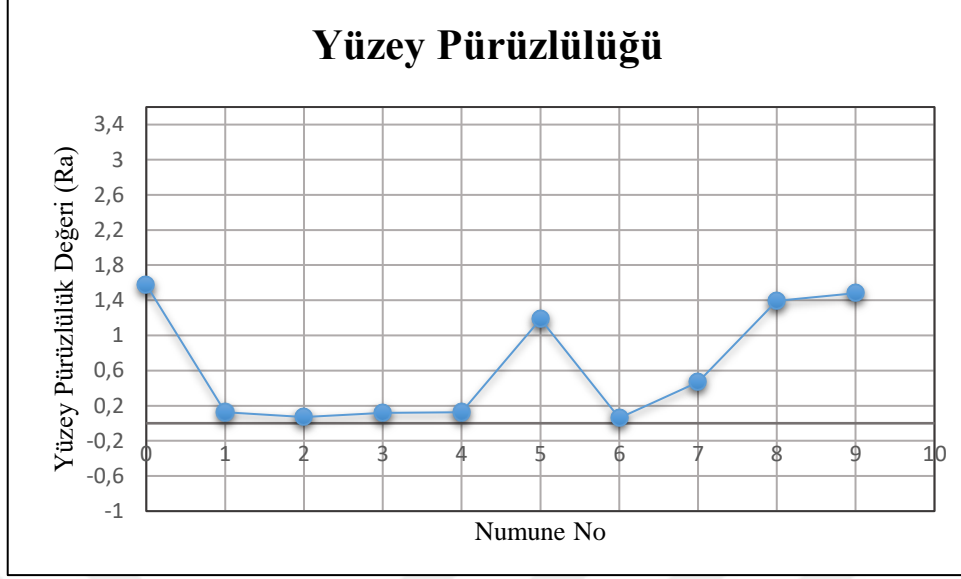
Şekil 5.12 Yüzey pürüzlülük numuneleri

Tablo 5.5'te numunelerden ölçülmüş değerler yer almaktadır. Numune numarası sıfır (0) olan bir adet değer tabloda görülmektedir, bu değer haddeme işlemi uygulanmamış numuneden ölçülmüştür. Başlangıçtaki yüzey pürüzlülük değerlerini ifade etmek için hazırlanmış numunelerdir.

Tablo 5.5 Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Numune No	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ra (μm)	1,577	0,127	0,070	0,120	0,127	1,187	0,060	0,467	1,393	1,482

Elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin grafiği Şekil 5.13'te verilmektedir. Grafikte görüldüğü gibi haddeme işlemi yapıldıktan sonra yüzey pürüzlülük değerinde iyileşme görülmektedir. 2 numaralı deney numunesi $Ra=0,070$ değeriyle yüzey pürüzlülük değeriyle yüzeyde en fazla iyileşme yapılan numunedir. 2 numaralı deney numunesine Tablo 5.3'te görüldüğü gibi 80 N kuvvet altında 3 paso ile bilyeli haddeme işlemi uygulanmıştır.

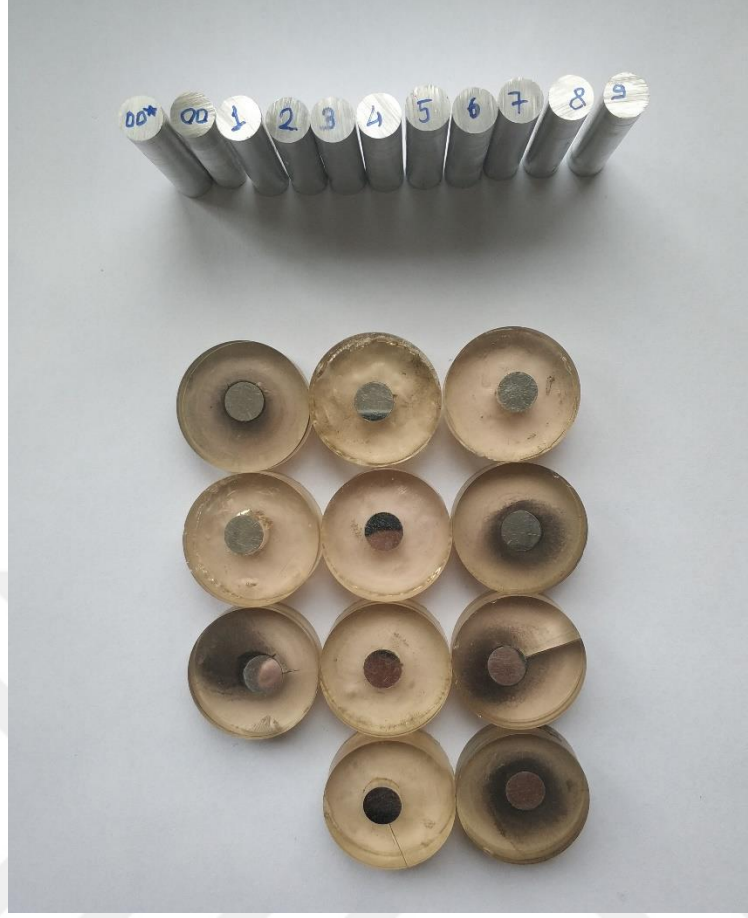


Şekil 5.13 Yüzey pürüzlük değerlerinin grafiği

Haddeleme işlemi uygulanan numuneler arasında en kötü yüzey pürüzlülük değeri ise 9 numaralı deney numunesinde görülmektedir. Bu deney numunesine 242 N kuvvet altında 5 paso ile bilyeli haddeleme işlemi uygulanmıştır.

5.5.5 Mikrosertlik Ölçümlerinin Alınması ve Sonuçlar

Yüzey pürüzlülük ölçümleri için hazırlanan (Şekil 5.12) numunelerden ölçümler alındıktan sonra numuneler mikrosertlik ölçümleri, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında yapılmıştır. Numunelerin yüzeyleri metalografik olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler Şekil 5.14'te görülmektedir.



Şekil 5.14 Mikrosertlik ölçümü için metalografik olarak hazırlanmış numuneler

Ölçümler numune eksenine dik bir hat üzerinde, başlangıçta haddelenmiş yüzeyden 0,05 mm uzaklıkta sonraki ölçümler ise 0,1 mm eşit aralıklarla ölçülmüştür. Numunelerin sertlik ölçümleri 136°kare tabanlı piramit uç ile numuneye 200 N yük, 5 sn etki süresi ile ölçülmüştür. Elde edilen değerler Şekil 6.3'te grafik olarak verilmiştir. Sertlik ölçümleri Vickers Sertlik ölçme yöntemine göre yapılmıştır.

5.5.6 Kalıntı Gerilme Ölçümleri ve Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde hadde parametrelerinden olan baskı kuvvetinin kalıntı gerilme üzerine etkileri incelenmiştir.

Kalıntı gerilme ölçümleri için 3 adet numune hazırlanmıştır. Numunelerde ilerleme hızı, devir sayısı ve paso sayısı sabit tutularak 80, 121, 242 N değişken kuvvetler uygulanarak artık gerilme ölçülmüştür. 24,5 mm çapa ve 25 mm uzunluğa sahip silindirik numuneler Şekil 5.15'te görülmektedir.



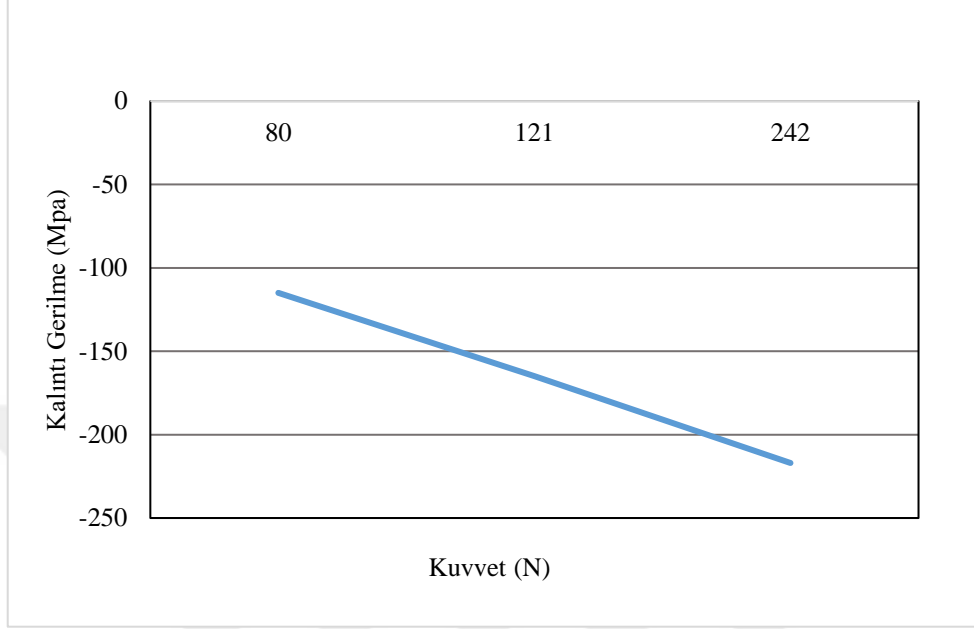
Şekil 5.15 Kalıntı gerilme ölçümü için hazırlanan numuneler

Deney numunelerindeki kalıntı gerilmelerin belirlenmesinde için X-ışını kırınım yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde gerilmeler tahribatsız olarak ve yüzeyden 50 μm derinliğe kadar ölçülebilmektedir.

Ölçümler taşınabilen StresstechXStress 3000 G2R XRD Gerilim Analiz cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler, numune eksenine paralel doğrultuda haddelenmiş yüzeyden alınmıştır. Ölçümlerde AA7075-T6 malzemesine ait Young Modülü 68,646 GPa ve Poisson oranı 0,3 olarak belirlenmiştir.

Elde edilen ölçümlerin grafiği Şekil 5.16'da verilmiştir. Bilyeli haddeme yönteminde baskı kuvvetinin artması ile artık gerilmenin arttığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda

hadde kuvvetinin artması sonucu malzeme yüzeyinin altında kalıntı gerilmenin arttığı tespit edilmiştir. Elif Malyer [68], yapmış olduğu çalışmada benzer sonuçlar elde etmiştir.



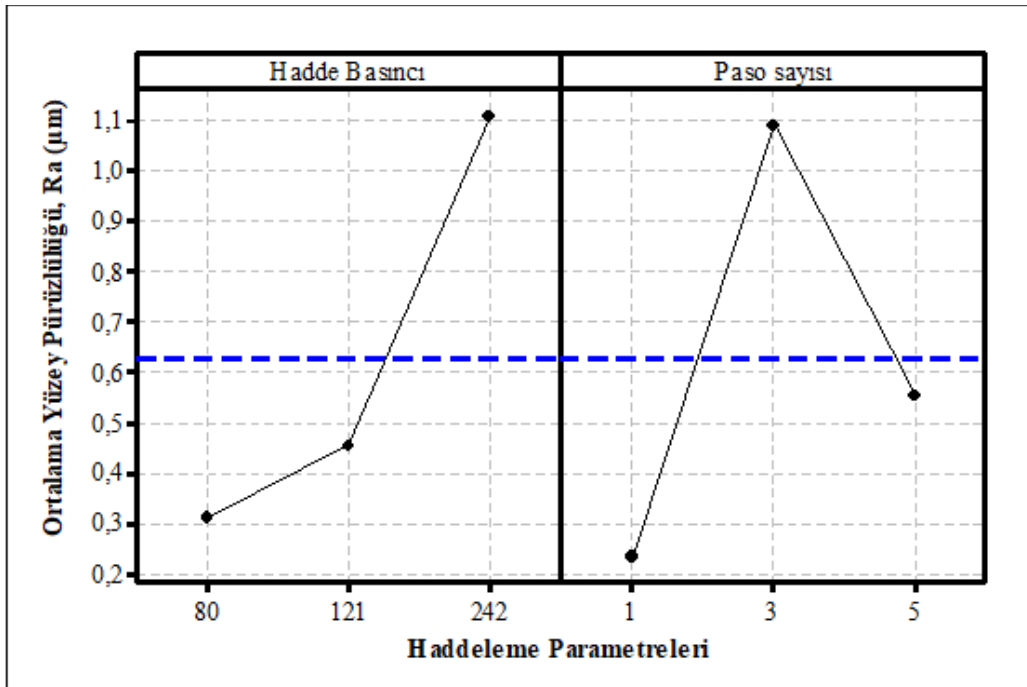
Şekil 5.16 Haddeleme kuvvetinin kalıntı gerilmeye etkisi

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneyel çalışmalarda elde edilen veriler detaylı olarak irdelenmiştir. Bilyeli haddeleme yönteminin temel işleme parametreleri olan hadde basıncı ve paso sayısının malzemenin yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve yorulma dayanımı üzerindeki etkileri tespit edilmiştir.

6.1 Bilyeli Haddeleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri

Bilyeli haddeleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Şekil 6.1’de görülmektedir. Şekilde görülen mavi kesikli çizgi, Taguchi deneysel tasarım içerisinde yer alan 9 deneye ait ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri, $0,62\mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Grafikteki hadde basıncı faktörünün 1. ve 2. seviyelerinde elde edilen Ra değerleri, sırasıyla $0,31$ ve $0,45\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Bu değerler, tüm deneylerin aritmetik ortalamasının altında kalmaktadır. Hadde basıncının 242 N (3. seviye) değerine ulaşmasıyla, Ra $1,11$ olmaktadır. Hadde basıncındaki artışla birlikte yüzey pürüzlülüğünün de kötüleştiği görülmektedir. Diğer yandan, paso sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, 1. Pasodan 3. Pasoya geçişte Ra değerlerinin kötüleştiği; 5. Pasoya çıkıldığında ise, Ra değerlerinin yeniden iyileştiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.1 Bilyeli haddeleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi

6.1.1 Varyans Analizi (Anova)

Çalışmanın bu bölümünde, bilyeli haddeleme yöntemindeki faktörlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki istatistiksel etkilerini belirlemek amacıyla ANOVA analizi yapılmıştır. Tablo 6.1’de yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu görülmektedir. Tablonun son sütununda yer alan P değeri, o faktörün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki oranını göstermektedir. Tablo değerlendirildiğinde, paso sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak (%41) hadde basıncından (%39.6) daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca, bundan sonra deney yapmadan, bilyeli haddeleme yönteminde yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için lineer regresyon analizi kullanılmış ve haddeleme faktörleri ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki matematiksel ilişki aşağıdaki denklemde verilmiştir:

$$\text{Yüzey Pürüzlülüğü} = - 0,358 + 0,00503 \text{ Hadde Basıncı} + 0,080 \text{ Paso sayısı} \quad (6.1)$$

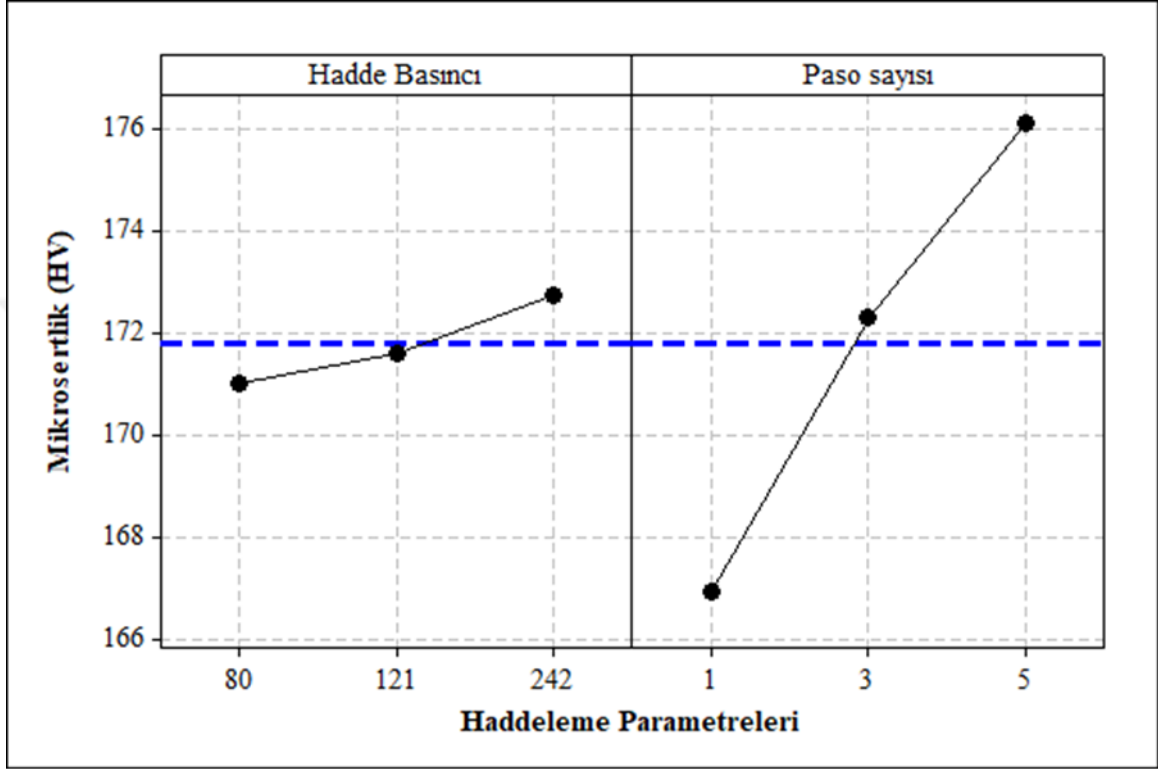
Tablo 6.1 Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu

Hadde Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	% katkı P
Hadde Basıncı	2	1.085	1.97	39.60
Paso Sayısı	2	1.124	2.09	41.01
Hata	6	1.656	-	19.39

6.2 Bilyeli Haddeleme Parametrelerinin Mikrosertlik Üzerine Etkileri

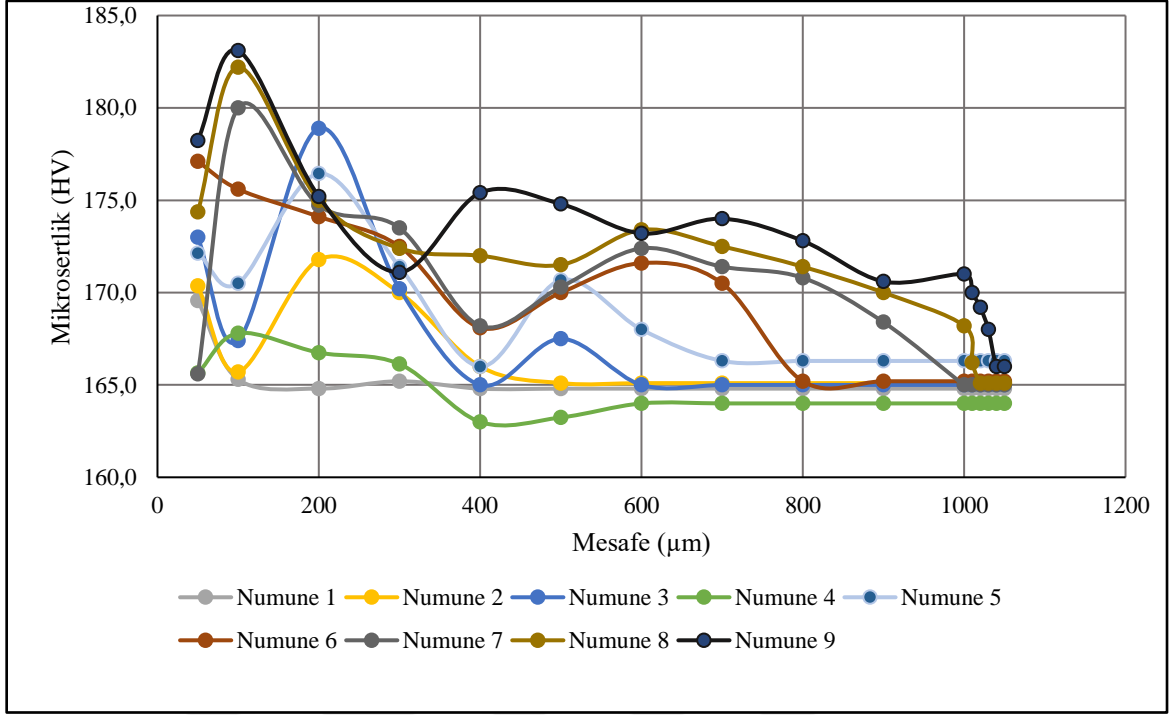
Haddeleme parametrelerinin numunelerin mikrosertlik değerleri üzerindeki etki grafiği Şekil 6.2’de görülmektedir. Mikrosertlik ölçümleri, yüzeyden itibaren, enine kesit boyunca 500 µm eşit aralıklarla alınmıştır. Şekilde yüzey sertlik değerleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, hadde basıncının artması ile yüzey sertlik değerleri de artma eğilimindedir. Bilindiği gibi, hadde basıncının artması, yüzeye uygulanan baskı kuvvetini de arttırmakta dolayısıyla deformasyon sertleşmesi oranı da buna bağlı olarak artmaktadır. Bu sonuçlar, literatür ile uyumludur. Axir ve arkadaşları [69] da benzer sonuçlar elde etmiştir. Hadde basıncının 242N olduğu deneylerde ortalama değerlerin üzerinde sertlik artışlarının meydana geldiği görülmektedir. Diğer yandan, paso sayısındaki artışla birlikte yüzey sertliğinin daha keskin bir şekilde arttığı görülmektedir. Aynı numune üzerinde hadde basıncının defaten ve tekrarlı olarak uygulanması, plastik deformasyon ve buna bağlı olarak

işlem anındaki pekleşme değerlerini de arttırmaktadır. Tek pasoda yüzeydeki sertlik artış miktarı esas malzeme sertliğine yakın iken, paso sayısının 3 ve 5 olduğu durumlarda yaklaşık 20 HV oranında sertlik artışı tespit edilmiştir. Mesa ve arkadaşları da [70] benzer sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 6.2 Haddelene parametrelerinin yüzey sertliği üzerindeki etkileri

Şekil 6.3'te ise enine kesit boyunca taranan sertlik değerlerinin mesafeye bağlı olarak değişimi görülmektedir. Grafik incelendiğinde, yüzeyden itibaren 400 μ m mesafeye kadar tüm numunelerde sertlik değerlerinin arttığı; bu mesafeden sonra kademeli olarak azaldığı ve esas malzeme sertlik değerine ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 6.3 Mikrosertlik değerlerinin grafiği

6.2.1 Varyans Analizi (Anova)

Bu bölümde bilyeli haddeleme yöntemindeki faktörlerin mikrosertlik üzerindeki istatistiksel etkilerini belirlemek amacıyla ANOVA analizi yapılmıştır. Tablo 6.2’de mikrosertlik için ANOVA tablosu görülmektedir. Tablonun son sütununda yer alan P değeri, o faktörün mikrosertlik üzerindeki etki oranını göstermektedir. Tablo değerlendirildiğinde, paso sayısının mikrosertlik üzerinde istatistiksel olarak (%79,01) hadde basıncından (%4,91) daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca, bundan sonra deney yapmadan, bilyeli haddeleme yönteminde mikrosertlik tahmin etmek için lineer regresyon analizi kullanılmış ve haddeleme faktörleri ile mikrosertlik arasındaki matematiksel ilişki aşağıdaki denklemde verilmiştir:

$$\text{Mikrosertlik} = 163 + 0,104\text{Hadde Basıncı} + 2,30\text{ Paso sayısı} \quad (6.2)$$

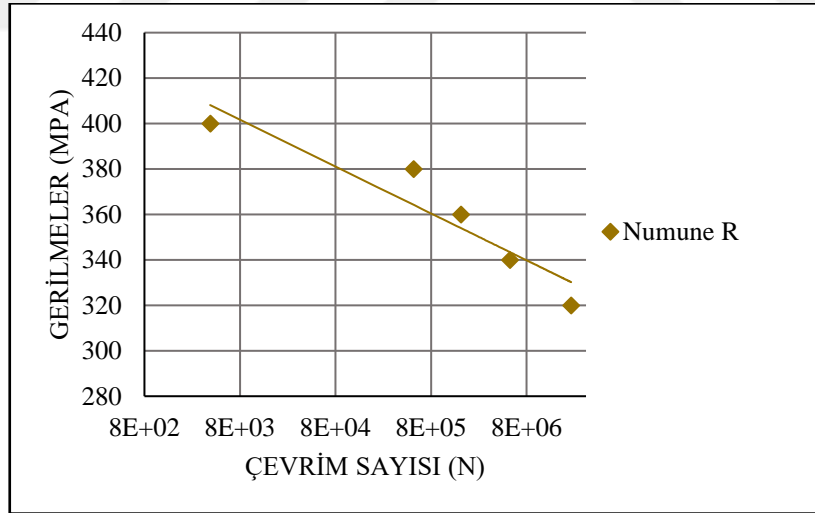
Tablo 6.2 Mikrosertlilik için ANOVA tablosu

Hadde Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	% katkı P
Hadde Basıncı	2	4.7	0.09	4.91
Paso Sayısı	2	127.57	11.29	79.01
Hata	6	33.89	-	16.08

6.3 Bilyeli Haddelme Parametrelerinin Yorulma Dayanımı Üzerine Etkileri

DeneySEL çalışmalar sonucunda numunelere ait yorulma verileri 5. bölümde Tablo 5.4'te ve numunelere ait gerilme – çevrim diyagramı (S-N) Şekil 5.6'da verilmiştir. S-N grafikleri yorulma sınır değerleri ve çevrim sayılarında, gerilme genliğine karşılık logaritmik çevrimler esas alınarak çizilmiştir.

İlk deneyler ana malzeme için yapılmış olup yorulma sınır değeri tespit edilmiştir. Ana malzemeye ait S-N grafiği Şekil 6.4'te verilmiştir. AA7075-T6 Malzemesine ait yorulma sınır değeri 330 MPa olarak bulunmuştur.

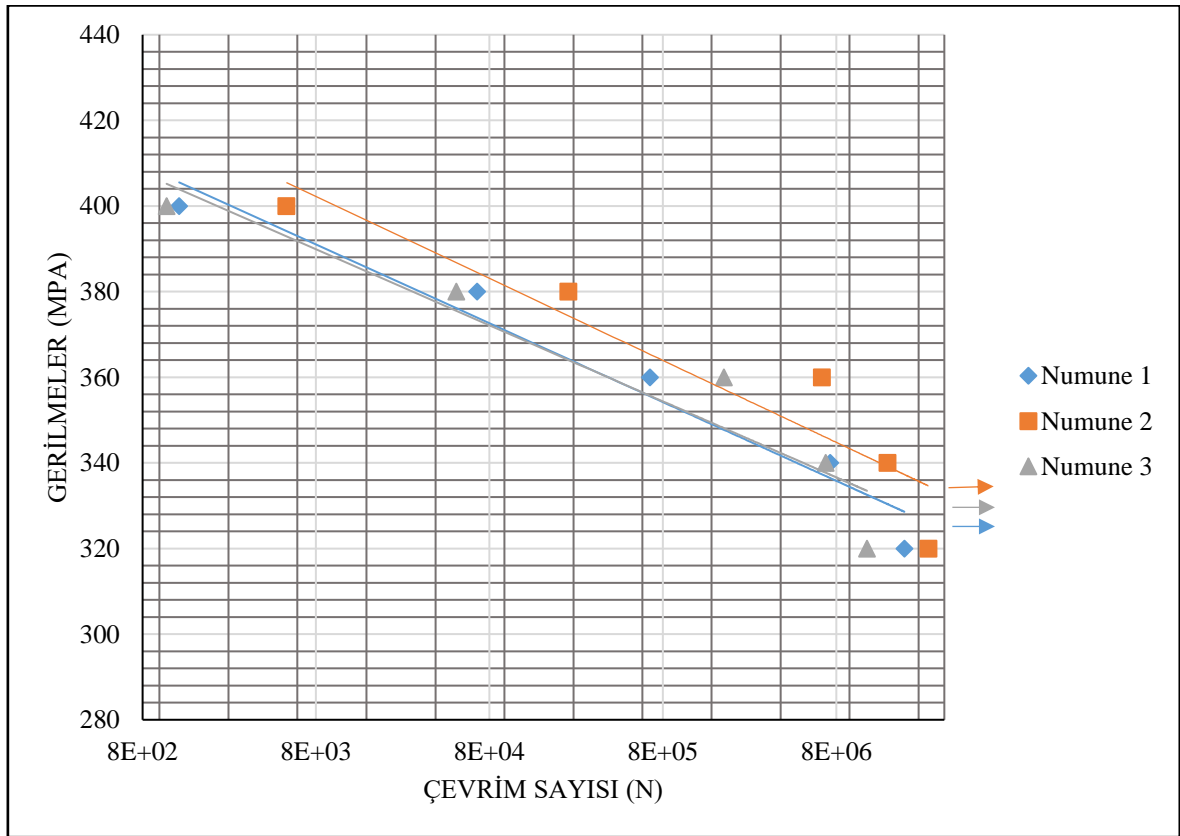


Şekil 6.4 AA7075-T6 ana malzemesine ait Wöhler diyagramı

Şekil 6.5'te 80 N sabit kuvvet ve değişken paso (1-3-5) sayısına sahip 1., 2., ve 3. numunelere ait Wöhler diyagramı görülmektedir. Diyagram incelendiğinde 1., 2., 3. numuneler arasında en yüksek yorulma sınır değeri 335 MPa'dır. Bu değer ana malzemenin yorulma sınır değerinden yüksektir. Yapılan haddelme işleminin malzeme yüzey

özelliklerini (yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve yüzey altı artık gerilme) iyileştirdiği ve malzemenin yorulma sınır dayanımını artırdığı söylenebilir.

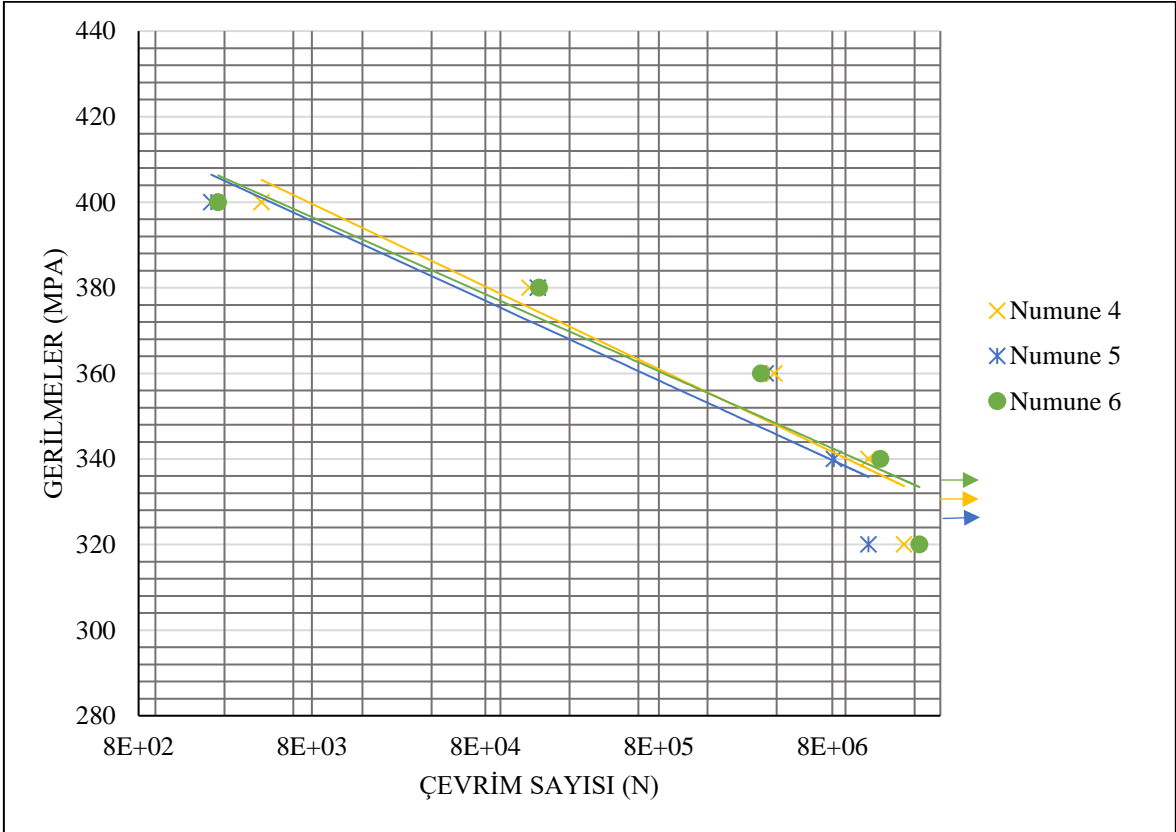
Şekil 6.5'te 2. numunenin yorulma dayanımı diğer iki numuneden daha yüksek olduğu görülmektedir. Düşük yüklerde 1. ve 3. numunenin yorulma dayanımı birbirine yakındır fakat artan yüklere karşı 1. numunenin yorulma mukavemetinin 3. Numuneden daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5 1., 2. ve 3. numunelere ait S-N diyagramı

Şekil 6.6'da 121 N sabit kuvvet ve değişken paso (1-3-5) sayısı ile bilyeli haddelenmiş 4., 5. ve 6. numunelere ait Wöhler diyagramı görülmektedir. Diyagram incelendiğinde numuneler arasında en yüksek yorulma sınır dayanımı 336 MPa'dır. Elde edilen bu değer ana malzemenin yorulma sınır değerinden yüksektir. Haddemele işleminin malzeme yüzey özelliklerini (yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve yüzey altı artık gerilme) iyileştirdiği ve malzemenin yorulma sınır dayanımını artırdığı söylenebilir.

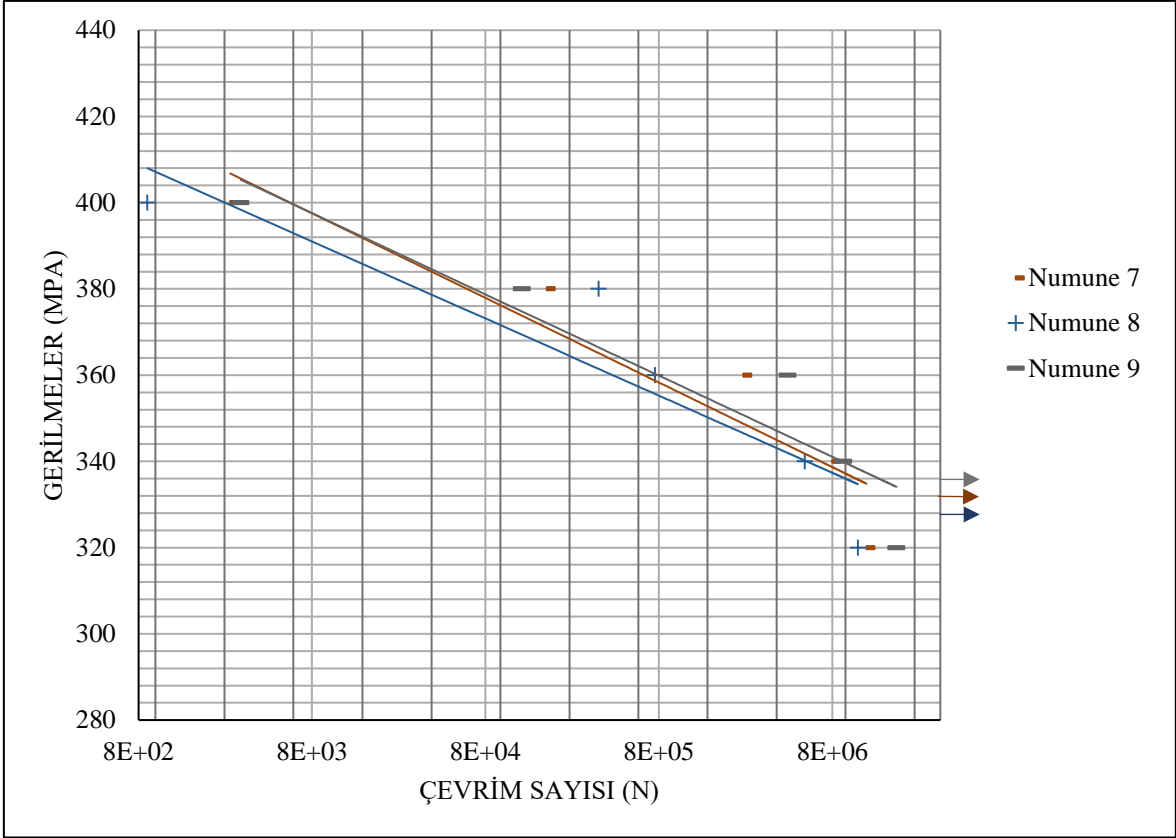
Şekil 6.6 incelendiğinde numunelerin yorulma dayanımları birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Düşük yüklerde 6. numunenin yorulma dayanımı diğer iki numuneden fazla iken artan yüklerde 4. numunenin yorulma dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6 4., 5. ve 6. numunelere ait S-N diyagramı

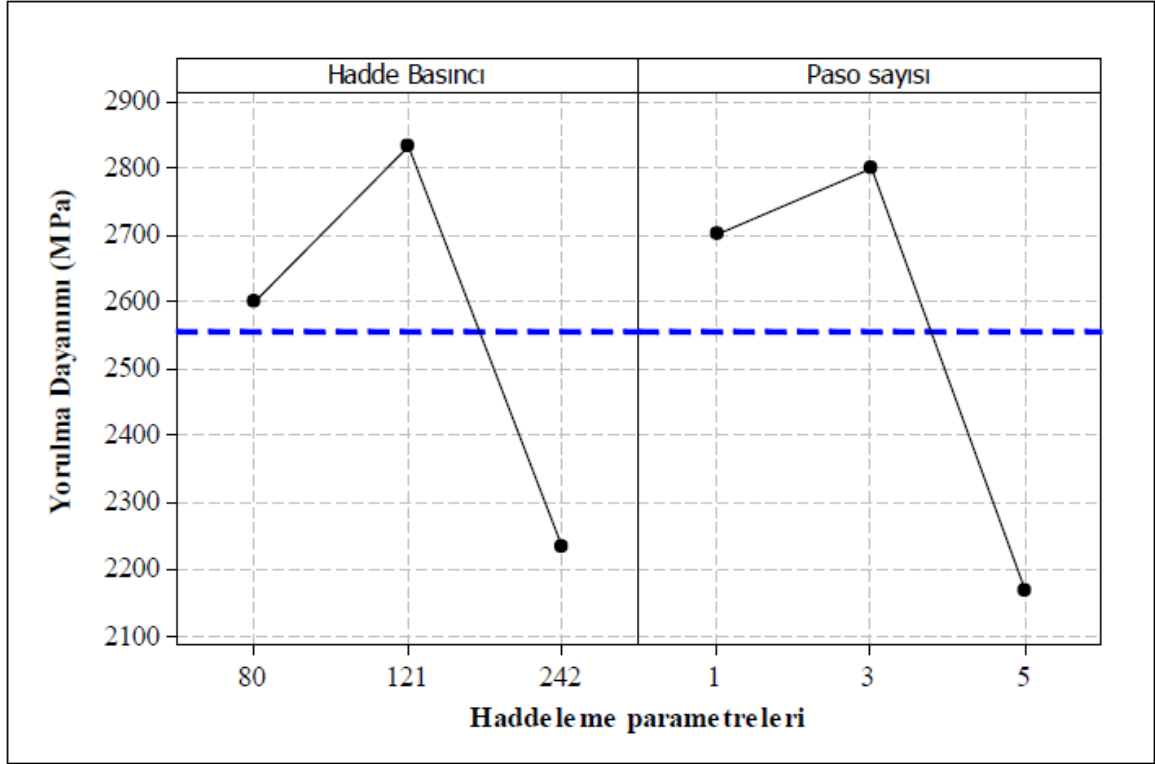
Şekil 6.7’de 242 N sabit kuvvet ve değişken paso (1,3,5) sayısı ile bilyeli haddelenmiş 7., 8. ve 9. numunelere ait Wöhler diyagramı görülmektedir. Diyagram incelendiğinde numuneler arasında en yüksek yorulma dayanımı 336 MPa olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu değer ana malzemenin yorulma sınır değerinden yüksektir. Bu yüksekliğin nedeni haddeleme işleminin malzeme yüzeyi üzerindeki olumlu etkileri sonucu meydana geldiği düşünülmektedir.

Şekil 6.7 incelendiğinde 9. numunenin yorulma dayanımı 7. ve 8. Numuneden daha yüksek olduğu görülmektedir. Artan yüklerle karşı 7. ve 9. numunenin yorulma dayanımını benzerlik göstermekte ve maksimum yükte ise aynı yorulma ömrüne sahip oldukları grafikten görülmektedir.



Şekil 6.7 7., 8. ve 9. numunelere ait S-N diyagramı

Şekil 6.8'de bilyeli haddemeleme parametrelerinin yorulma ömrü üzerindeki etkileri görülmektedir. Grafik, maksimum gerilme altındaki numunelerin yorulma ömürleri baz alınarak hazırlanmıştır. Haddemeleme kuvvetinin 121 N çıkmasıyla yorulma ömrünün arttığı fakat 242 N çıkmasıyla kötüleştiği görülmektedir. Benzer şekilde paso sayısının 3'e çıkmasıyla yorulma ömrünün arttığı ve 5 pasoya çıkmasıyla kötüleştiği görülmektedir.



Şekil 6.8 Haddeme parametrelerinin yorulma ömrü üzerindeki etkileri (Maksimum gerilme)

Sonuç olarak Şekil 5.6 incelendiğinde numunelerin yorulma ömrü bakımından en fazla dayanım 2 numaralı numune akabinde 6 numaralı numunelerde görülmektedir. Tablo 5.3 incelendiğinde 2. numune için işleme parametreleri 80 N kuvvet ve 3 paso ve 6. Numune için ise 121 N ve 5 paso olarak görülmektedir. Bu bilgiler Şekil 6.8’de elde edilen verilerle paralellik göstermektedir.

Bilyeli haddeme işleminin yorulma ömrünü artırdığı tespit edilmiştir. Aviles ve arkadaşları [7] da yapmış oldukları çalışmada bilyeli haddeme işleminin malzemenin yorulma ömrünü artırdığını belirtmişlerdir.

7. SONUÇLAR

Bilyeli haddeleme yönteminde amaç malzeme ait yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi ve malzemeden istenilen özelliklerin (yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, yorulma dayanımı, kalıntı gerilme) sağlanmasıdır. Yöntem uygulanırken malzemeye ait birden fazla özellikte iyileşme sağlanmaktadır.

Bu çalışmada da bilyeli haddeleme yönteminin işlem parametrelerinin (hadde basıncı ve paso sayısı) AA7075-T6 alüminyum alaşımının üzerindeki, yorulma dayanımı, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme, mikrosertlik bakımından etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır.

Bilyeli haddeleme yöntemi uygulanan numunelerde yüzey pürüzlülüğü önemli derecede iyileştiği tespit edilmiştir. Haddeleme kuvvetinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri irdelendiğinden hadde basıncının 1. ve 2. seviyelerinde yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği buna karşın hadde basıncının 3. (242 N) seviyeye ulaştığında ise kötüleştiği tespit edilmiştir. Paso sayısının pürüzlülük üzerindeki etkisi 1. pasodan 3. pasoya geçerken kötüleştiği ve 5. pasoya geçerken tekrardan iyileştiği tespit edilmiştir. Bu parametrelerin pürüzlülük üzerine istatistiksel etkilerini incelemek amacıyla yapılan ANOVA analizi sonucunda, paso sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak (%41) hadde basıncından (%39.6) daha etkili olduğu görülmüştür.

Numunelerin mikrosertliği incelediğinde hadde basıncının artması ile yüzey sertlik değerleri de artma eğilimindedir. Hadde basıncının 242N olduğu deneylerde ortalama değerlerin üzerinde sertlik artışlarının meydana geldiği görülmektedir. Tek pasoda yüzeydeki sertlik artış miktarı esas malzeme sertliğine yakın iken, paso sayısının 3 ve 5 olduğu durumlarda yaklaşık 20 HV oranında sertlik artışı tespit edilmiştir. Yüzeyden itibaren 400 µm mesafeye kadar tüm numunelerde sertlik değerlerinin arttığı; bu mesafeden sonra kademeli olarak azaldığı ve esas malzeme sertlik değerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Haddeleme parametrelerinin istatistiksel etkilerini incelemek amacıyla yapılan ANOVA analizi sonucunda, paso sayısının mikrosertlik üzerinde istatistiksel olarak (%79,01) hadde basıncından (%4,91) daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

X-ışını kırınım yöntemiyle yapılan kalıntı gerilme ölçümlerinde hadde kuvveti arttıkça malzeme yüzey altı kalıntı gerilmelerinde arttığı tespit edilmiştir.

Yapılan deneylerde bilyeli haddeleme yönteminin malzemenin yorulma ömrünü artırdığı tespit edilmiştir. Numunelerin maksimum gerilme altındaki yorulma ömürleri irdelendiğinde haddeleme kuvvetinin 121 N çıkmasıyla yorulma ömrünün arttığı fakat 242 N çıkmasıyla kötüleştiği görülmektedir. Benzer şekilde paso sayısının 1'den 3'e çıkmasıyla yorulma ömrünün arttığı ve 5 pasoya çıkmasıyla kötüleştiği tespit edilmiştir.



8. ÖNERİLER

Bu çalışmadaki numuneler daha detaylı kalıntı gerilme analizleri için kullanılabilir. Paso sayısının kalıntı gerilme üzerindeki etkileri araştırılabilir. Kalıntı gerilme analizi için farklı yöntemler (katma kaldırma yöntemi, kesit profil ölçme yöntemi, v.b) uygulanarak daha detaylı ölçümler yapılabilir.

Haddeleme parametrelerinden ilerleme miktarı, devir sayısı gibi parametrelerin AA7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılabilir.

Yöntem dairesel kesitli numunelere uygulanmıştır benzer şekilde kare kesitli ve dikdörtgen kesitli numunelere uygulanarak bu malzemeler üzerindeki etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **El-Tayeb, N. S. M., Low, K. O., & Brevern, P. V.,** 2009. On the surface and tribological characteristics of burnished cylindrical Al-6061. *Tribology International*, 42 (2), 320-326.
- [2] **Rodríguez A., López de Lacalle LN., Celaya A., Lamikiz A., Albizuri J.,** Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surf Coat Technol* 2012;206:2817–24.
- [3] **Liviu Luca,** Investigations into the Use of Ball-Burnishing of Hardened Steel Components as a Finishing Process, PhD dissertation 2002, University of Toledo.
- [4] **Tao Zhang,** 2013. The Effects of Ball Burnishing for Aerospace Blade Material 17-4 PH Steel, Master Thesis, The University of Toledo.
- [5] **Sagbas, Aysun,** 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.
- [6] **Chomienne, V., et al,** 2016. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 13: 90-96.
- [7] **Avilés, R., J. Albizuri, A. Rodríguez, 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.
- [8] **Revankar, Goutam D., Raviraj Shetty, Shrikantha S. Rao, and Vinayak N. Gaitonde,** 2014. Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy. *Measurement* 58: 256-268.
- [9] **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, no. 11: 2817-2824.
- [10] **Hiegemann, Lars, Christian Weddeling, and A. Erman Tekkaya,** 2016. Analytical contact pressure model for predicting roughness of ball burnished surfaces. *Journal of Materials Processing Technology* 232: 63-77.

- [11] **John, MR Stalin, A. Welsoon Wilson, A. Prasad Bhardwaj, Avinav Abraham, and B. K. Vinayagam**, 2016. An investigation of ball burnishing process on CNC lathe using finite element analysis." *Simulation Modelling Practice and Theory* 62: 88-101.
- [12] **Basak, H.**, 2007. The Design and Manufacture of Burnishing Equipment and Burnishing Process with AL 7075 T6 Material, *Journal of Mechanical Engineering*, 53:12.
- [13] **Hassan, A. M., Sulieman, Z.S.**, 1999. Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 96:73-80.
- [14] **Hassan, A. D., Maqableh, A. M.**, 2000. The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components, *Journal of Materials Processing Technology*, 102:115-121.
- [15] **Axir, M. H., Khabeery, M. M.**, 2003. Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 132:82–89.
- [16] **Klocke, F., Liermann, F.**, 1998. Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 38(5-6): 419-423.
- [17] **Zhang, P., Lindemann, P.**, 2005. Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80, *Scripta Materialia*, 130:81–89.
- [18] **Axir, M. H., Ibrahim, A. A.**, 2001. Some surface characteristics due to center rest ball burnishing, *Journal of Materials Processing Technology*, 167:47–53.
- [19] **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*, 41:1705–1719.
- [20] **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.
- [21] **János, K., József, D., András, S., György, F.**, 2005. Magnetic Aided Roller Burnishing Metal Parts, 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing, 253–256.

- [22] **Hongyun, L., Lijiang, W., Chuang, Z.,** 2001. Study on the aluminum alloy burnishing processing and the existence of the outstripping phenomenon, *Journal of Materials Processing Technology*, 116:88-90.
- [23] **El-Axir, M.H.,** 2000. An investigation into roller burnishing” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40:1603–1617.
- [24] **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*, 40:1775–1786.
- [25] **Hassan, A.M.,** 1997. An Investigation into the surface characteristics of burnished cast Al-Cu Alloys, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 37 (6):813-821.
- [26] **Black, A. J., Kopalinsky, E. M., Oxley, P. L. B.,** 1997. Analysis And Experimental Investigation Of A Simplified Burnishing Process, *Int. J. Mech. Sci.*, 39(6) 629-641.
- [27] **Hassan, A.M., Al-Jalil, H.F., Ebied, A.A.,** 1998. Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components, *Journal of Materials Processing Technology*, 83:176–179.
- [28] **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*, 39:459–469.
- [29] **Shiou, F-J., Chen, C-H.,** 2003. Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball burnishing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 140:248–254.
- [30] **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*, 72:385–391.
- [31] **Stodolnik, B.T.,** 1996. The influence of burnishing on the contact fatigue life of rings in Rolling bearings.”, *Tribologia*, XXVII, 6 (150):753-759.
- [32] **Basak, H., Goktas, H.,** 2009. Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic”, *Materials and Design*, 30 (4):1275-1281.
- [33] **Kloos et al. 1987, Schulze 2005 Tunali B.,** Oral İmplantoloji, 2000. Nobel Tıp Kitabevleri, İstanbul.

- [34] **Meletliođlu, E.**, 2014. Tİ-6Al-4V İmplant Malzemesinin Yorulma ve Fretting Yorulması Davranışı Üzerine Ball Burnishing Mekanik Yüzey İşleminin Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, T.C. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [35] **Majzoobi, G.H., Azadikhah, K., Nematı, J.**, 2009. The effects of deep rolling and shot peening on retting fatigue resistance of Aluminium-7075-T6., *Materials Science and Engineering A*, 516, 235-247.
- [36] **Has, E.**, 2007. Bilyeli Perdahlama İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [37] **Marcin, K., Alfred, O., Ing, L.W.**, 2006. Shot Peening and Roller Burnishing to Improve Fatigue Resistance of the ($\alpha+\beta$) Titanium Alloy Ti-6Al-4V Shot Peening, Wiley Interscience.
- [38] **Wohlfahrt, H., Krull, P.**, 2000. *Mechanichse Oberflächenbehandlung*. Weinheim. Wiley-VCH.
- [39] **Clauer, A. H., Walters, C. T., & Ford, S. C.**, 1983. The effects of laser shock processing on the fatigue properties of 2024-T3 aluminum. *Lasers in materials processing*, 7-22.
- [40] **Pyun, Y.S., Kim, H.S., Son, K.G., Song, G.H., Kim, M.K., Kang, J.H., Choi, B.U., Park, J., Cho, I.H., Park, J., Cho, I.H., Kim, C.S., Park, J.H., Kinney, J.**, 2005. Development of D2 Tool Steel Trimming Knives with Nanoscale Microstructure. *Proceedings of AIS Tech Conference*, 2 (2005), 465-474.
- [41] **Cherif, A., Pyoun, Y., Scholtes, B.**, 2008. Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) on Residual Stress State and Fatigue Strength of AISI 304. *Journals of Materials Engineering and Performance*, 19 (2010), 282-286.
- [42] **Soyama. H., Odhiambo. D., Saito. K.**, 2003. Cavitations Shoot less Peening for Improvement of Fatigue Strength. *Shoot Peening*, L.Wagner. WILEY-VCH GbmH & Co KgaA, Germany, 435-440.
- [43] **Bai, F., Saalbach, K. A., Wang, L., Wang, X., & Twiefel, J.**, 2018. Impact of time on ultrasonic cavitation peening via detection of surface plastic deformation. *Ultrasonics*, 84, 350-355.
- [44] **Statnikov E.** et al., *Ultrasound tool for strain strengthening and relaxation treatment*, Patent of the RF No. 472782, 1975.

- [45] **Günhter, H-P., Kuhlmann, U., Dürr, A.,** 2005. Rehabilitation of Welded Joints by Ultrasonic IMPact Treatment (UIT). Iabse Symposium, Lisbon.
- [46] **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.
- [47] <https://www.youtube.com/watch?v=wV6S8eIpdqk>, 2019.
- [48] <https://www.youtube.com/watch?v=1BWzWhyh038>, 23 Ocak 2013.
- [49] **Özkan, S.,** 2006. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Parçalarda Haddemele (Burnishing) ile Yüzeylerin İşlenmesi, Haddemenin Yüzey Pürüzlülüğüne ve Sertleşmeye Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [50] **Mendi, F.,** 1996. Takım Tezgâhları Teori ve Hesapları, ISBN:975-06008-0-3, Ankara.
- [51] **El-Axir, M. H.,** 2000. An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(11), 1603-1617.
- [52] **Basak, H., & Sönmez, F.,** 2015. Haddemele İşleminde Haddemele Aparat Tipinin (Bilyeli, Makaralı, Çift Makaralı) Yüzey Pürüzlülüğü ve Yüzey Sertliğine Etkilerinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 2015(18), 125-132.
- [53] **Rodríguez A, López de Lacalle LN, Celaya A, Lamikiz A, Albizuri J.,** Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surf Coat Technol* 2012;206:2817–24.
- [54] **Liviu Luca,** Investigations into the Use of Ball-Burnishing of Hardened Steel Components as a Finishing Process, PhD dissertation 2002, University of Toledo.
- [55] www.mechindia.com/BurnishingProcess.html /., 6 Mayıs 2009.
- [56] **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.
- [57] **Y.C. Yen, P. Sartkulvanich, T. Altan,** 2005. Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology Volume 54*, Issue 1237-240.
- [58] **Travieso Rodríguez, J.A., González Rojas, H., Schulz Pérez, R.,** 2009. The 13 th International Research/Expert Conference. Ball Burnishing Process to

Improve Surface Roughness TMT 2009, Hammamet, Tunisia, 16-21 October 2009.

- [59] **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 (2012) 2817–2824.
- [60] **Prafulla Chaudhari, GK Awari and SS Khandare,** 2011. Investigation On micro and Macro properties of ball burnished component, *VSRD-TNTJ*, Vol. 2 (3), PP 137-143.
- [61] **Akkurt, A., & Ovali, I.,** 2009. The Effects of Burnishing and Conventional Finishing Processes on Surface Roughness and Roundness of the Al 6061 Aluminum Parts. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 15(3), 371-382.
- [62] **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.
- [63] **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.
- [64] Alüminyum, www.aluminyumsanayi.com, 3 Mart 2018
- [65] **Özgün, S.,** 2010. Galetaj Yöntemiyle İşlemede Yüzey Kalitesinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- [66] **Öcalır, Ş.,** 2009. Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Yapılan Alüminyum Alaşımı Birleştirmelerde Optimum Parametrelerin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- [67] **Yurtoğlu, H.,** 2005. Yapay Sinir Ağları Metodolojisi İle Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler İçin Türkiye Örneği, *Uzmanlık Tezi*, DPT Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü.
- [68] **Malyer, E.,** 2018. Ezerek parlatma yapılan AA7075-T6 alüminyum alaşımında meydana gelen kalıntı gerilmelerin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 565-573.

- [69] **El-Axir, M. H., Othman, O. M., & Abodiena, A. M.,** 2008. Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process. *Journal of materials processing technology*, 196(1-3), 120-128.
- [70] **Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J. A., Gomez-Gras, G., & Lluma-Fuentes, J.,** 2018. Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 257, 203-212.



ÖZGEÇMİŞ

Mahmut AKYÜZ, 1990 yılında Bingöl'ün Kiğı ilçesinde doğdu. Orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladı. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümüne yerleşti. 2016 yılında mezun oldu, aynı yıl içerisinde Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne kabul edildi.

