T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM AL-6082 ALAŞIMININ ULTRASONİK EZEREK PARLATILMASI VE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ ANALİZİ

Murat YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Prof. Dr. Alper UYSAL

Kasım, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM AL-6082 ALAŞIMININ ULTRASONİK EZEREK PARLATILMASI VE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ ANALİZİ

Murat YILDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 21.11.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Alper UYSAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Alper UYSAL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Orhan ÇAKIR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Erkan BAHÇE, Üye
İnönü Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Alper UYSAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Alüminyum Al-6082 Alaşımının Ultrasonik Ezerek Parlatılması ve Yüzey Bütünlüğü Analizi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Murat YILDIZ

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FYL-2024-6400” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Annem merhume Fatma YILDIZ ve aileme…

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez fikrimin oluşturulmasında ve neticelendirilmesindeki tüm aşamalarda sabırla benden hiçbir desteğini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Alper Uysal'a, deneysel çalışmaların yapılmasında yardımcı olan sayın Arş. Gör. Yusuf Furkan Yapan'a, destekleri için sayın Öğr. Gör. Erkin Duman'a ve yaşam boyu bilime inanarak bana destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Murat YILDIZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 17

1.3 Hipotez 18

2 MATERYAL VE YÖNTEM 20

2.1 Deneysel Çalışma 20

2.1.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme 20

2.1.2 Deney Sisteminin Kurulması 21

2.1.3 Nanoakışkanın Hazırlanması 24

2.1.4 Deney Planı 26

2.2 Parlatma Kuvveti ve Enerji Ölçümü 29

2.3 Yüzey Bütünlüğünün İncelenmesi 29

2.3.1 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü 29

2.3.2 Metalografik Numune Hazırlama 30

2.3.3 Mikroyapı Analizi 32

2.3.4 Mikrosertlik Ölçümü 32

2.4 Çok Kriterli Optimizasyon ve Çok Kriterli Karar Verme 33

3 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 36

3.1 Parlatma Kuvveti Sonuçları 36

3.2 Harcanan Enerji Sonuçları 39

3.3 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları 40

3.4 Optimizasyon Sonuçları 42

3.5 Mikrosertlik Sonuçları 46

3.6 Mikroyapı Analiz Sonuçları 47

4 SONUÇ 52

KAYNAKÇA 57

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 65

SİMGE LİSTESİ

α-Al	Alfa Alüminyum Fazı
β"	Beta Fazı
cSt	Centistokes (m^2/s Cinsinden Kinematik Viskozite)
Ø	Çap
Fe	Demir
CO_2	Karbondioksit
Vw	Kesme Hızı
T_c	Kesme Kuvvetleri
Mg	Magnezyum
µm	Mikrometre
Ft	Newton Cinsinden Uygulanan Kuvvet
F_R	Radyal Kesme Kuvveti
°C	Santigrad Derece
Si	Silisyum
R^2	Tahmin Doğruluğu Belirlilik Katsayısı
CE_{total}	Toplam Karbon Emisyon Miktarı
C_{total}	Toplam Maliyet

KISALTMA LİSTESİ

AMS	Aerospace Material Standard (Havacılık ve Uzay Malzeme Standartları)
AL-6082	Alüminyum 6082 Alaşımı
AA7075	Alüminyum 7075 Alaşımı
AISI	American Iron And Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
bar	Barometrik Basınç
BN	Boron Nitrit
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
rpm	Dakika Başına Düşen Devir Sayısı
m/dak	Dakika Başına Düşen Metre Cinsinden Kesme Hızı
mm/dev	Devir Başına Milimetre Cinsinden İlerleme
EN AW	European Norms AW (Avrupa Normlarına Göre İşlenmiş Alüminyum Standartları)
GDSH	Geleneksel Derin Soğuk Haddeleme
GPa	Gigapascal (Young Modülü)
gf	Gram-Force (Gram Kuvvet)
HB	Hardness of Brinell (Brinell Sertliği)
HK	Hardness of Knoop (Knoop Sertliği)
HV	Hardness of Vickers (Vickers Sertliği)
HCF	High Cycle Fatigue (Yüksek Çevrimli Yorulma)
ISO	International Standardization For Organization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
psi	İnç Kare Başına Düşen Pound-Kuvvet
kHz	Kilohertz Frekans
kWh	Kilowatt Saat
LCF	Low Cycle Fatigue (Düşük Çevrimli Yorulma)
ml	Mililitre
mm	Milimetre
MMY	Minimum Miktarda Yağlama
MoS_2	Molibden Disülfür
MPa	Megapascal Basınç Birimi

MQL	Minimum Quantity Lubrication (Minimum Miktarda Yağlama)
MWCNT	Multi Walled Carbon Nanotube (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp)
N	Newton
NMMY	Nano Minimum Miktarda Yağlama
NMQL	Nano Minimum Quantity Lubrication (Nano Minimum Miktarda Yağlama)
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm 2 (Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması 2)
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
PD	Parlatma Derinliği
RHVT	Ranque-Hilsch Vortex Tube (Ranque-Hilsch Vorteks Tüp)
SDS	Sodyum Dodesil Sülfat
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPB	Single Pass Burnishing (Tek Paso Ezerek Parlatma)
L9	Taguchi Metoduna Göre Çok Parametreli 9 Farklı Deney Sırlaması
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği)
W/m.K	Termal İletkenlik
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
UDSH	Ultrasonik Derin Soğuk Haddeleme
ANOVA	Varyans Analizi
W	Watt (Güç)
WSa	Watt Saat (Harcanan Enerji)
g/cm^3	Yoğunluk
m^2/g	Yüzey Alanı
316L	316L Kalite Düşük Karbonlu Paslanmaz Çelik
6XXX	6000 Serisi Alüminyum Alaşımları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Farklı frekansta ve kuvvet değerlerine bağlı ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma uygulaması sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişim ve iyileşme durumları **5**

Şekil 1.2 Çeşitli serilerde konik yüzey parlatma operasyonlarının ultrasonik darbe işlemi ile yorulma testi sonuçlarının karşılaştırılması **7**

Şekil 1.3 Farklı soğutma/yağlama şartları altında boron nitrid (BN) ve molibden disülfür (MoS_2) katkılı Al-6082 hibrit metal matrisli kompozitlerin işlenmiş yüzey görünümleri **8**

Şekil 1.4 Farklı parlatma derinlikleri (PD) (0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm) ve soğutma koşulları için 17-4 PH paslanmaz çelik üzerinde (diamond burnishing) elmas parlatma yöntemi ile elde edilen mikrosertlik değerleri **8**

Şekil 1.5 Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde farklı paso ve soğutma/yağlama koşulları ile kriyojenik parlatma operasyonları sonucunda elde edilen mikrosertlik değerlerinin karşılaştırılması (SPB: Tek paso ezerek parlatma) **9**

Şekil 1.6 a) Çok duvarlı karbon nanotüp'ün üç boyutlu görünümü ve b) taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki görüntüsü **11**

Şekil 1.7 ASTM 2017 alüminyum alaşımı malzemenin eğimli ezerek parlatma operasyonları sonucunda oluşan yüzey pürüzlülük değerleri **12**

Şekil 1.8 Bilyeli ezerek parlatma operasyonu ardından AA7075 alaşımının optik mikroskop altında oluşan yüzey görünümü **16**

Şekil 1.9 Ezerek parlatma operasyonu ile dupleks ve 316L paslanmaz çelik malzemelerin farklı koşullar altında mikrosertlik karşılaştırmaları **16**

Şekil 2.1 Al-6082 alüminyum alaşımının testere ile kesilmiş hali **21**

Şekil 2.2 Goodway GA-230 CNC torna tezgahı içerisinde hazırlanmış olan deney düzeneği **22**

Şekil 2.3 Yamasa SX8 ezerek parlatma takımı **23**

Şekil 2.4 a) Entes ES3-80LS güç ölçer, b) Komsan Vek7.5 kompresör, c) Werte STN15 minimum miktarda yağlama sistemi **23**

Şekil 2.5 VimaxX-R30 model vorteks tüp soğuk hava aparatı **24**

Şekil 2.6 a) Termal G11420SD etüv, b) kurutulmuş MWCNT parçacıkları, c) Radwag marka PS 510.R1 model hassas terazide sırası ile MWCNT, SDS ve ticari bitkisel yağ tartılması **25**

Şekil 2.7 Nanoakışkan hazırlama işlem adımları **25**

Şekil 2.8 Deney düzeneği ve ezme bölgesinden yakın görünüm **27**

Şekil 2.9 Deney numunelerinin dilimlenme aşamaları **27**

Şekil 2.10 Ezerek parlatılmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi **30**

Şekil 2.11 Mikro akrilik sertleştirici ve mikro akrilik tozu **31**

Şekil 2.12 Bakalitten çıkarılmış deney numunelerinin zımparalama işlemi **31**

Şekil 2.13 Metkon DUROLINE-M Vickers mikrosertlik ölçme cihazı ile sertlik ölçme işlemi **33**

Şekil 2.14 NSGA-II ve TOPSIS kullanarak yapılan optimizasyonun akış şeması **34**

Şekil 3.1 Parlatma operasyonu esnasında iş parçası üzerinde oluşan temsili parlatma takımının uyguladığı basınç ve reaksiyon (tepki) kuvvetlerinin gösterimi **36**

Şekil 3.2 Geleneksel parlatma deneylerinde parlatma kuvveti (N) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması **37**

Şekil 3.3 Ultrasonik destekli parlatma deneylerinde parlatma kuvveti (N) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması **38**

Şekil 3.4 Geleneksel parlatma deneylerinde harcanan enerji ($kWh \times 10^{-3}$) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması **39**

Şekil 3.5 Ultrasonik destekli parlatma deneylerinde harcanan enerji ($kWh \times 10^{-3}$) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması **40**

Şekil 3.6 Geleneksel parlatma deneylerinde yüzey pürüzlülüğü (Ra) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması **41**

Şekil 3.7 Ultrasonik destekli parlatma deneylerinde yüzey pürüzlülüğü (Ra) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması **41**

Şekil 3.8 Pareto optimal çözümler grafiği **43**

Şekil 3.9 Tüm parlatma deneylerinin mikrosertlik (HV) – yüzeyden derinlik (µm) karşılaştırması **47**

Şekil 3.10 Geleneksel kuru (0,05 mm ezme derinliği) ve ultrasonik destekli N-MMY (0,15 mm ezme derinliği) şartları altında ezerek parlatma uygulanmış Al-6082 numunelerinin deformasyon bölgelerinin 50 µm düzeyinde mikroskop görüntüleri **48**

Şekil 3.11 Aynı şartlar için geleneksel ve ultrasonik destekli ezerek parlatma uygulanmış Al-6082 numunelerinin deformasyon bölgelerinin 50 µm düzeyinde mikroskop görüntüleri **49**

Şekil 3.12 Ezerek parlatma uygulanmış Al-6082 numunesine ait deformasyon bölgesinin 50 µm düzeyinde 100x yakınlaştırma ve 20 µm düzeyinde 200x yakınlaştırma ile elde edilmiş olan mikroskop görüntüleri **50**

Şekil 3.13 Ezerek parlatma uygulanmamış Al-6082 numunesine ait a)20 µm düzeyinde 200x yakınlaştırma ve b)10 µm düzeyinde 500x yakınlaştırma ile elde edilmiş olan iç yapı (α-Al fazları ve kristalleşmiş Mg_2Si bileşikleri) mikroskop görüntüleri **51**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Geleneksel derin soğuk haddeleme (GDSH) ve ultrasonik derin soğuk haddeleme (UDSH)'den sonra ezerek parlatma uygulanmamış ve uygulanmış yüzeylerin yüzey sertlikleri **6**

Tablo 1.2 Nikelli alüminyum bronz (Cupral 4M) malzeme ile yapılan deneylerde ezme işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü sonuçları **12**

Tablo 2.1 Al-6082-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (EN AW 6082 / EN AW Al SilMgMn) **20**

Tablo 2.2 MWCNT fiziksel ve termal özellikleri **26**

Tablo 2.3 Geleneksel ve ultrasonik destekli deneylerin koşullarına göre deney numaraları **28**

Tablo 2.4 Mikrosertlik ve mikroyapı analizi için seçilen numunelerin geleneksel ve ultrasonik destekli deneylere ait özellikleri **32**

Tablo 2.5 Bağımlı ve bağımsız değişkenler **35**

Tablo 2.6 Kukla değişkenleri **35**

Tablo 3.1 Sıralanan ve seçilen optimum sonuçlar **46**

ÖZET

Alüminyum Al-6082 Alaşımının Ultrasonik Ezerek Parlatılması ve Yüzey Bütünlüğü Analizi

Murat YILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Alper UYSAL

Alüminyum malzemeler genel olarak hafif, dayanıklı, kolay şekillendirilebilir, korozyona karşı dirençli olmaları yanı sıra yüksek ısı ve elektrik iletimi özellikleri ile bilinmektedir. Ayrıca manyetik olmamalarından ötürü günümüzde havacılık, uzay, otomotiv, elektronik ve savunma sanayi alanında teknolojik cihaz üretimi ve geliştirilmesi aşamasında tercih edilmektedir. 6000 serisi alüminyum alaşımlarının özellikleri alüminyum malzemelerin genel özellikleri ile örtüşmekte olup Al-6082-T6 alaşımı mekanik özellikleri, ekstrüzyon ve kaynaklanabilirlik gibi bazı üstün nitelikleri ile öne çıkmaktadır. Plastik şekil verme operasyonlarının bir alt işlemi olarak bilinen ezerek parlatma uygulaması geçmişten günümüze farklı koşullar ve teknolojik imkanlar doğrultusunda gelişmiş olup sürdürülebilirlik temelli çalışmalarda da araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Ezerek parlatma operasyonu diğer yüzey iyileştirme yöntemlerinde olduğu gibi malzeme üzerinden talaş kaldırarak gerçekleşmediğinden ötürü malzeme kütlesinin korunumu, daha iyi yüzey sonuçları ve daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmesi bakımından

avantajlı olduğu söylenebilir. Talaşlı imalatta operasyon bakımından bir son adım olarak değerlendirecek olursak soğutma ve yağlama şartları ile ezerek parlatma gibi çeşitli yüzey iyileştirme yöntem ve teknolojilerinin avantajlı yönlerinin bir arada uygulanması hibrit imalat için olumlu bir örnek teşkil etmektedir.

Bu çalışmada Al-6082 alüminyum alaşımının kuru, Ranque-Hilsch vorteks tüple (RHVT) soğuk hava uygulaması, ticari bitkisel kesme yağı kullanılan minimum miktarda yağlama (MMY) ve çok duvarlı karbon nanotüp katkılı ticari bitkisel kesme yağı kullanılan minimum miktarda yağlama (MWCNT-NMMY) koşulları altında geleneksel ve ultrasonik titreşim destekli yöntemler ile ezerek parlatma deneyleri yapılmıştır. Ezerek parlatma deneyleri sabit parlatma hızı (455 dev/dak), sabit ilerleme (0,05 mm/dev) ve üç farklı ezme derinliği (0,05 mm, 0,1 mm ve 0,15 mm) değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın özgün değeri literatürden farklı olarak, uluslararası düzeyde şu ana kadar araştırılmayan hibrit olarak ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma prosesinde MWCNT-NMMY ve RHVT ezerek parlatma koşullarının kullanılmasının, işleme performansı açısından parlatma kuvveti ve tüketilen enerjiye etkisi, yüzey bütünlüğü açısından ise yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve mikroyapıya etkisi incelenmiştir. İşleme performansı genetik algoritma yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda, aynı koşullar altında geleneksel ve ultrasonik titreşim uygulaması fark etmeksizin sırası ile kuru, RHVT, MMY ve MWCNT-NMMY koşulları altında yüzey pürüzlülük değerleri giderek iyileşme göstermiştir. Tüm koşul ve parametrelere ek olarak ezme derinliğinin artırılmasıyla parlatma kuvvetleri ve harcanan enerji miktarları artış göstermiş olup yüzey pürüzlülük değerleri daha da iyileşerek sonuç vermiştir. En yüksek enerji tüketimi geleneksel RHVT soğuk hava uygulaması sırasında elde edilmiştir. Hem geleneksel hem de ultrasonik destekli ezerek parlatma işlemlerinde en düşük enerji tüketimi NMMY uygulaması altında gözlenmiştir. Ezme miktarı artışı ile yüzey sertliğinin de yükseliş göstermesi kuvvetlerde de artışa sebebiyet vermiştir. Buna rağmen ultrasonik titreşim destekli ezme operasyonu esnasında MWCNT-NMMY uygulaması etkin soğutma yağlama özellikleri ile kuvvet artışını azaltmıştır. Yağlama koşulları dikkate alındığında en iyi sonuçlar MWCNT-NMMY kullanılan deneyler ile elde edilebilmiştir. Ardından sırası ile bitkisel yağ bazlı minimum miktarda yağlama (MMY), soğuk hava (RHVT) uygulaması ve kuru koşullar takip

etmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda en iyi şart ezme derinliği 0,15 mm iken MWCNT-NMMY koşulu altında ultrasonik titreşim destekli uygulama ile elde edilmiştir. Sonuç olarak, yüksek ezme derinliğinde MWCNT-NMMY nanoakışkan ile ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma uygulaması, en iyi yüzey pürüzlülüğü, en düşük parlatma kuvveti, en düşük enerji tüketimi, iyileştirilmiş malzeme yüzeyi ve olumlu sürdürülebilirlik verileri oluşturduğundan optimum yöntem konumuna gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultrasonik destekli ezerek parlatma, yüzey pürüzlülüğü, minimum miktarda yağlama, enerji tüketimi, sürdürülebilirlik

ABSTRACT

Ultrasonic Assisted Roller Burnishing of Aluminum Al-6082 Alloy and Surface Integrity Analysis

Murat YILDIZ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Alper UYSAL

Aluminum materials are generally known for their lightweight, durability, easy formability, corrosion resistance, and high thermal and electricity conductivity. Furthermore, due to their non-magnetic properties, they are currently preferred in the production and development of technological devices in aviation, aerospace, automotive, electronics, and defense industries. The properties of 6000 aluminum alloys overlap with the general properties of aluminum materials, and the Al-6082-T6 alloy stands out with some superior qualities such as mechanical properties, extrusion and weldability. The roller burnishing application, a sub-process of plastic forming operations, has evolved over time, driven by diverse conditions and technological opportunities, and continues to be a research issue in sustainability-based studies. Since the roller burnishing operation doesn't involve chip removal, unlike other surface improvement methods, it offers advantages in terms of preserving the material mass, achieving better surface finishes, and achieving better mechanical properties. If we consider it as a final step in machining operations, the combined application of the advantageous aspects of various surface improvement methods and technologies, such as cooling and lubrication conditions and roller burnishing, constitutes a positive example for hybrid manufacturing.

In this study, roller burnishing experiments were carried out on Al-6082 aluminum alloy using conventional and ultrasonic vibration assisted methods under dry, Ranque-Hilsch vortex tube (RHVT) cold air application, minimum quantity lubrication (MMY) using commercial vegetable cutting oil, and minimum quantity lubrication using commercial multi-walled carbon nanotube-added vegetable cutting oil (MWCNT-NMMY). Roller burnishing experiments were conducted with constant burnishing speed (455 rpm), constant feed (0.05 mm/rev), and three different roller depths (0.05 mm, 0.1 mm, and 0.15 mm). The novelty of this study, unlike the literature, is that it examines the effects of MWCNT-NMMY and RHVT roller burnishing conditions on burnishing force and energy consumption in terms of machining performance, and on surface roughness, microhardness, and microstructure in terms of surface integrity in a hybrid ultrasonic vibration-assisted roller burnishing process that has not yet been investigated at the international level. Additionally, burnishing performance was optimized using a genetic algorithm method.

Experimental studies revealed that, under the same conditions, surface roughness values showed gradual improvement under dry, RHVT, MMY, and MWCNT-NMMY conditions, respectively, regardless of whether the application of conventional or ultrasonic vibration was used. In addition to all conditions and parameters, increasing roller depth increased the burnishing forces and energy consumption, resulting in further improvements in surface roughness. The highest energy consumption was achieved during conventional RHVT cold air application. The lowest energy consumption was observed under NMMY application in both conventional and ultrasonic vibration-assisted roller burnishing processes. The increase in surface hardness with the increase in burnishing amount also led to an increase in forces. However, during the ultrasonic vibration-assisted burnishing, the application of MWCNT-NMMY reduced the force increase due to its effective cooling and lubrication properties. Considering the lubrication conditions, the best results were obtained in experiments using MWCNT-NMMY. This was followed by vegetable oil-based minimum quantity lubrication (MMY), cold air (RHVT), and dry conditions, respectively. As a result of the optimization, the best condition was achieved with ultrasonic vibration-assisted roller burnishing under the MWCNT-NMMY condition at a roller depth of 0.15 mm. As a result, ultrasonic

vibration-assisted roller burnishing with MWCNT-NMMY nanofluid at high roller depth has become the optimum method as it produces the best surface roughness, lowest burnishing force, lowest energy consumption, improved material surface, and positive sustainability data.

Keywords: Ultrasonic assisted roller burnishing, surface roughness, minimum quantity lubricant, energy consumption, sustainability

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

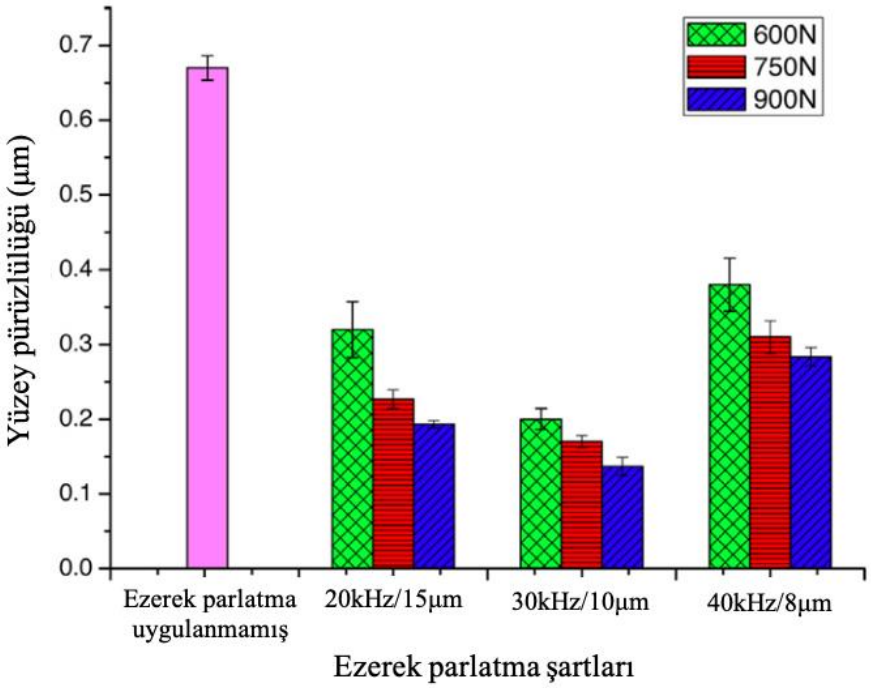
Alüminyumun yüksek mukavemet, iyi şekillendirilebilirlik, iyi korozyon direnci, geri dönüşüm potansiyeli vb. karakteristik özellikleri, onu otomotiv endüstrisindeki ağırlık azaltma talebine yanıt vermek için otomobildeki çelik veya bakır gibi daha ağır malzemelerin yerini almak üzere ideal adaylardan biri haline getirmiştir. Yapısal sac malzemeleri için mukavemet belirli alanlarda sınırlayıcı bir faktör olabilir, darbe enerjisi emilimi ve iyi derin çekme davranışı genellikle beklenen en önemli özelliklerdir. Bu beklentilere yanıt verebilen ve mekanik özellikleri değiştirilebilen 6000 alaşımları otomotivde dış panel uygulamaları için tercih edilmektedir [1]. Yapılan araştırmalarda ortalama araç boyutunun bir kısmını veya tamamını azaltmak için birden fazla potansiyel teknik yol olduğu belirtilmektedir. Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar dahil hibritleşmenin, hafifletmenin, elektriklendirmenin ve motor boyutunun küçültülmesi ile daha hafif araç üreterek enerji ve emisyonlardaki öngörülen artışların azaltılabileceği analiz edilmiştir. Dolayısı ile çelik gibi bazı malzemeler çıkarılabilir ya da yerine alüminyum gibi daha hafif malzemeler tercih edilmesi önerileri kabul görmektedir [2]. 1950'li yıllar itibarı ile günümüze kadar havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının gelişimi zaman içerisinde malzeme kompozisyonu bakımından Demir (Fe) ve Silisyum (Si) içeriği azalarak gerçekleşmiştir. Geçmişe nazaran iyi kaynaklanabilir, ultra yüksek mukavemetli, iyi korozyon direncine sahip, tokluğu, sertleştirilebilirliği ve anizotropisi iyileştirilmiş alüminyum alaşımları uçaklar için birçok noktada tercih edilmektedir [3]. Bu bağlamda literatürde yapılan çalışmalar arasında Al-6082 alüminyum alaşımına ısıl işlem uygulanması halinde malzemeye optimum genel korozyon ve çukurlaşma direnci kazandırdığı bilinmektedir [4].

Ezerek parlatma, esas olarak yüzey kalitesini düzenlemek için yaygın olarak kullanılan bir mühendislik tekniğidir. Bir soğuk şekillendirme operasyonu olan ezerek parlatmada, yüzeydeki kalıntı ilerleme izlerini plastik olarak deforme edecek şekilde malzeme yüzeyine bilye veya merdane yoluyla büyük miktarda basınç uygulanır [5]. Ezerek parlatma işlemine ait öncü uygulamaların 1900'lü yılların başlarında gerçekleştiği, 1916'da Scibner tarafından ilk parlatma aletinin patentinin alındığı ve sonrasında literatürde ilk bilimsel araştırmaların ise 1970'li yıllarda başladığı bilinmektedir [6]. Ezerek parlatma işlemi, silindirik bilyelerin istenilen yüzey pürüzlülüğüne göre belirlenen kuvvet, ilerleme ve dönme parametrelerine bağlı olarak iş parçası yüzeyine basınç uygulanarak yüzeydeki tepeciklerin ortadan kaldırılması ve yüzey altındaki boşlukların doldurulması işlemidir. Ezerek parlatma işlemi, özellikle yüzey kalitesini arttırması ve basma artık gerilmeleri oluşturması nedeniyle literatürde geleneksel yöntemlerle üretilen havacılık malzemelerine uygulanan bir yöntemdir [7]. Ezerek parlatma işlemi, genellikle mekanik parçaların yüzey bütünlüğünü iyileştirmek için talaş kaldırmadan gerçekleştirilen ve ön üretimden geçmiş iş parçalarını pürüzsüz ve sert hale getiren, yorulma dayanımını, aşınma direncini ve korozyon direncini arttıran yüzey iyileştirme metodolojilerinden biridir [8]. Ezerek parlatma bir yüzey mühendisliği uygulaması olup aşınma direncini artırmak, iş parçasının yüzey bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini iyileştirilebilmeyi amaçlamaktadır. Yüzey pürüzlülük değerleri düşürülerek daha parlak, daha pürüzsüz ve daha sert bir yüzey elde edilebilmektedir. Taşlama ve alevle sertleştirme gibi geleneksel yöntemler hem daha yavaş uygulanabilir hem de yüzeyde bozulma ve mikro çatlaklara sebep olabilmektedir. Ezerek parlatma işleminde ise yüzeyde veya yüzeye yakın bölgelerde bulunan kılcal çatlakların ilerlemelerini sınırlandırıp korozyona karşı dayanıklılık elde edilebilmektedir. Ezerek parlatma uygulaması kullanılan takıma, işleme yöntemine, soğutma ve yağlama şartlarına ve parametrelere bağlı olarak farklı amaçlar ile gerçekleştirilebilmektedir. Silindirik ezerek parlatma, metal alaşımlı malzemelerin yorulma performansını iyileştirmek için bilyalı dövmeye bir alternatif olarak önerilmiştir. Bu işlem, dönen rulo veya küresel silindirlerin hareketiyle metalik yüzeylerin soğuk işlenmesine dayanan mekanik bir yüzey işlemi olarak tanımlanabilir [9-3A]. Ezerek parlatma operasyonları içinde çokça tercih edilen silindirik veya rulo olarak tanımlanan tipte ezerek parlatma takımları ile gerçekleştirilen bir plastik deformasyon yöntemidir. İş parçası eksenine paralel

ve yüzey üzerinde hareket etmekte olan ezerek parlatma takımına ait yüksek sertlikteki silindirin temasına bağlı olarak ezme ve parlatma operasyonları gerçekleştirilmektedir. Bu işlem literatürde Hertz kontakt teorisine dayanan mekanik temeller ile açıklanabilecek şekilde malzeme üzerinde etki oluşturmaktadır. Hertz temas teorisi, elastik deformasyon koşulları altında küresel bir girinti ile düz bir yüzey arasındaki normal teması değerlendirmek için sağlam bir analitik çerçeve sağlar. Bu modele göre, temas yarıçapı, basınç dağılımı ve ortaya çıkan deformasyon, uygulanan kuvvetin, kürenin yarıçapının ve temas eden cisimlerin etkin elastik modülünün fonksiyonlarıdır [10-4A]. Ezerek parlatma takımı, işlenmiş yüzeyde birkaç mikron derinliğe kadar basınç kalıntı gerilmeleri oluşturur. Bu etkinin, parlatılmış yüzeylerin yorulma özelliklerini güçlendirmesi beklenmektedir [9-3A]. Ezerek parlatma operasyonu süresince ezme derinliği son derece önemli olup silindirik yapıdaki ve yüksek sertlikteki ezme takımının rulosu iş parçası yüzeyine belirlenen derinlikte ezmeye başlar. Ezme işlemi esnasında toplam temas miktarının iş parçası yüzeyi ve ezme takımının silindirik uc çapına bağlı bir şekilde temas yüzeyi oluşmaktadır. Temas yüzeyinin ezme miktarına bağlı olarak artacağı veya azalacağı bilinmektedir. Temas yüzeyi artışı ile sürtünmeler ve bun bağlı olarak ısı ve çeşitli tepki kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Burada ısıtılmış malzemenin işlenmesi ile ezme operasyonu esnasında oluşan ısınmayı aynı şekilde değerlendirmek mümkün değildir. Çünkü ısıtılmış iş parçası daha kolay plastik deformasyona uğrayacağından ısıtılmamış iş parçasına göre ezme işlemi için mekanik bakımdan iyi bir sonuç olan daha fazla deformasyon elde edilebilmektedir. İşlemeden kaynaklanın ısınma etkisi sonucunda ise malzeme hasarı oluşabileceği gibi tüm bu etkiler ile artan kuvvetlerin daha yüksek enerji tüketimine sebep olacağı tahmin edilmektedir. Bununla başa çıkabilmek için ezerek parlatma operasyonlarını soğutma ve yağlama şartları altında gerçekleştirmek daha sağlıklı sonuçlandığı bilinmektedir. Ayrıca araştırmalarda istatistiksel teknikler kullanılarak deneysel tahmin modelleri ve analiz uygulamaları ile ezerek parlatma gibi çok parametreli uygulamalarda optimum etki elde edebilmek için kullanıldığı bilinmektedir [11-5A]. Tavlanmış Ti–6Al–4V alaşım numunesinin yüzeyini düşük bir sıcaklıkta tutmak için 20 dakika boyunca sıvı nitrojene (-196°C) daldırılarak derin kriyojenik işlem ve yüzey parlatma prosesi ile birlikte bilyeli ezerek parlatma uygulamasına tabii tutulan bir çalışmada, numunenin yüzey pürüzlülüğü 0,662 μm'den 0,117 μm'ye düşürülebilirken aynı zamanda, kriyojenik parlatma işlemi, malzeme

yüzeyindeki güçlendirilmiş tabakanın derinliği yaklaşık 300 μm'ye çıkarılmıştır [12]. Talaşlı imalatta tüm bu iyileştirmeler eğer sürdürülebilirlik çatısı altında gerçekleşecek olursa, mevcut ve gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılamak ve yaşam kalitesini iyileştirmek için bir işleme sisteminin çevresel ve sosyal etkilerinin olumsuzluklarının azaltılması ve ortadan kaldırılması anlamına gelir [13]. Talaşlı imalat temel bir üretim süreci olup önemli bir malzeme ve enerji tüketicisidir. Sürdürülebilirlik açısından olumsuz çevresel etkilerini en aza indirmek veya ortadan kaldırmak için kaynak tüketimini ve bunlarla ilişkili sera gazı emisyonlarını azaltma ihtiyacı vardır. Makine, kesici takımlar, soğutucu/yağlayıcılar ve işlenmiş ürün dahil olmak üzere malzemelerin ömrünü uzatmak için çalışmalarda daima yenilik yapmak, parametre ve etkileri optimize etmek, yeniden düşünmek ve yeniden tasarlamak gerekir [13]. Bu sebeple benzer amaçlar ile Al-6082 alüminyum alaşımı ile gerçekleştirilmiş bir çalışmada mekanik özelliklerini iyileştirmek için asimetrik haddeleme deformasyonu ile ortalama tane boyutu azaltılarak yüksek yoğunluklu dislokasyonlar oluşturulmuştur. Böylece silisyum ve pirinç dokusunun artması nedeniyle ortalama Taylor faktörü artırılarak oluşan dislokasyonlar, ince β" çökeltilerinin oluşumu üzerinde iyi bir etkiye neden olmuş ve bu sayede oluşan mikro yapının, mekanik özelliklerin iyileştirilmesini sağlayabildiği kanıtlanmıştır [14]. Diğer bir çalışmada ise Al-6082 alüminyum alaşımı üzerinde çok eksenli dövme çevrimlerinin sayısı arttıkça dislokasyon yoğunluğundaki artışlara bağlı olarak güç ve sertliğin de arttığı tespit edilmiştir [15]. Genellikle, malzeme yüzeyine yakın artık gerilimler veya sertlik gibi özellikler mekanik olarak yüklenen parçaların yorulma ömrünü etkilemektedir [16, 17]. Mekanik aletler için, yuvarlanan eleman üzerindeki yuvarlanma kuvveti yaylar kullanılarak mekanik olarak uygulanırken, hidrolik aletler için yuvarlanma kuvveti hidrolik basınç tarafından oluşturulur. Silindirler bir destek silindiri veya rulmanlar üzerinde yuvarlanmaktadır. Bu durumda silindir geometrisi oldukça esnektir. Hidrostatik aletler için silindir her zaman hidrolik basınç uygulanarak yüzeye bastırılan bir top şeklindedir [16, 17]. Parlatma işlemi sırasında, parlatma takımının iş parçasının pürüzlü yüzeyine sürekli baskısı plastik deformasyona neden olur ve bu da daha sonra parlatılmış malzemelerde dış katman sertliğini artırır [18]. Parlatma işleminde iş parçasının sertliğinin, iş parçasına uygulanan kuvvet ve işlem sırasındaki paso sayısı ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir [18]. Çoğu durumda bu işlem herhangi bir yağlayıcı madde kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Parlatma

işlemindeki farklı parametreler, örneğin parlatma işleminin türü, takım geometrisi tasarımı, paso sayısı, parlatma hızı, parlatma derinliği ve parlatma stratejisi örneğin kuru veya ıslak parlatma gibi birçok araştırma türü gelişmiştir [18]. Hassan ve Al-Dhifi [19] saf alüminyum ve pirinçten yapılmış numunelerde bilyeli parlatma üzerine araştırma yürütmüştür. Elde edilen bulgulara göre metal iş parçalarına soğuk işlemle parlatma işleminin mukavemet ve nihai gerilim değerlerini arttırdığı ve iş parçasının son yüzey kalitesinin iyileştirildiği kanıtlanmıştır. Ayrıca parlatma işleminin kuvvet uygulanarak yapılması, parlatılmış yüzeylerdeki kusurları azaltır ve numunelerin yorulma döngüsünde çekirdeklenmeyi ve çatlak ilerlemesini geciktirir [19].



Şekil 1.1 Farklı frekans ve kuvvet değerlerine bağlı ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma uygulaması sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişim ve iyileşme durumları [20]

Ultrasonik parlatma, temeli ultrasonik titreşim olmayan geleneksel parlatma uygulamasından gelmektedir. Ultrasonik parlatma işleminde, yalnızca statik yükün etkidiği geleneksel parlatma işlemine göre işlem etkisini önemli ölçüde artırmak için statik yük üzerine ultrasonik frekansta mekanik bir titreşim uygulanır. Ultrasonik parlatma metal bir malzemeyi aynı anda parlatabilir ve güçlendirebilir. Ayrıca, parlatma ucu ile işlenen malzeme arasındaki darbe mukavemeti ve

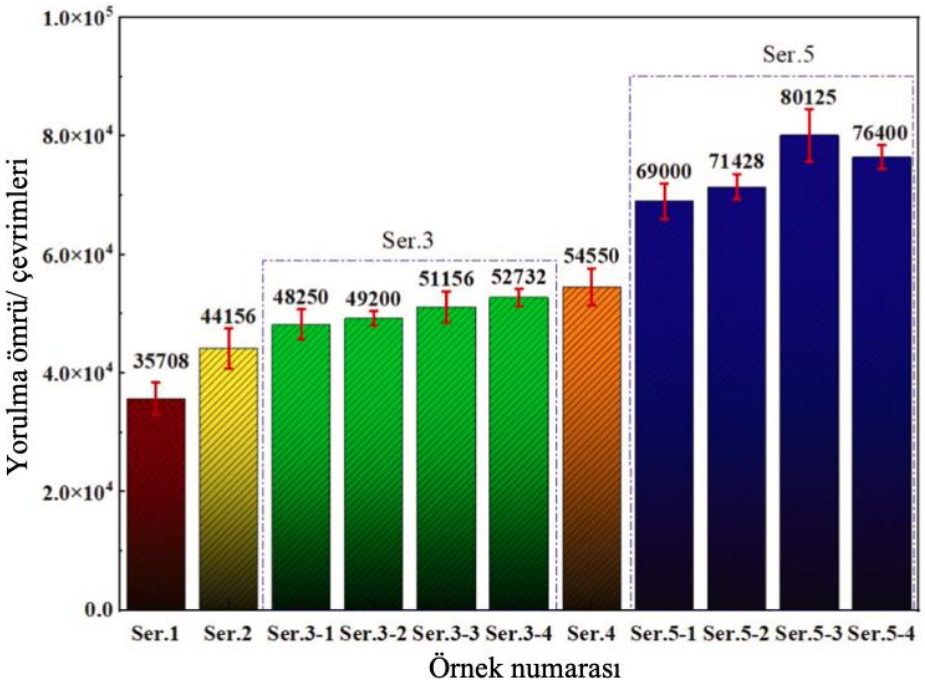
yoğunluğunun doğru kontrolü daha kolaydır; bu, diğer mekanik yüzey modifikasyon teknikleriyle karşılaştırıldığında ultrasonik parlatma işleminin daha iyi tekrarlanabilirliğini kanıtlamaktadır. Şekil 1.1'de görülebileceği üzere ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma uygulamasında ezme kuvveti arttıkça malzeme yüzeyindeki ortalama pürüzlülük değerleri düşerek iyileşme göstermektedir. Bununla birlikte, ultrasonik parlatmanın proses etkisi işlenecek malzemeye de bağlıdır [20]. Ultrasonik haddeleme, geleneksel haddeleme teknolojisi temelinde geliştirilen bir tür deformasyon güçlendirme teknolojisidir [21, 22]. Parçaların yorulma ömrünü etkili bir şekilde iyileştirmek için yüzey topografyasını ve yüzey katmanının fiziksel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilir [23, 24].

Tablo 1.1 Geleneksel derin soğuk haddeleme (GDSH) ve ultrasonik derin soğuk haddeleme (UDSH)'den sonra ezerek parlatma uygulanmamış ve uygulanmış yüzeylerin yüzey sertlikleri [25]

Ezerek Parlatma Uygulanma Durumu	**Yüzey mikro-sertliği (HK0,3)**
Ezerek parlatma uygulanmamış yüzey	388,25
GDSH ile işlenmiş (600 bar ≈ 1494 N)	412,40
UDSH ile işlenmiş (400 psi ≈ 350 N)	488,00

Tablo 1.1'de görüldüğü üzere Bozdana ve ark. [25], ultrasonik haddelemenin Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde gerçekleştirdikleri araştırmada küçük basınçla iş parçası yüzeyinde daha büyük plastik deformasyon üretebildiğini, bu arada yüzey artık basınç geriliminin ve mikro sertliğin büyük ölçüde iyileştirildiğini bulmuşlardır [25]. Buna karşılık iki boyutlu ultrasonik haddeleme, iş parçası yüzeyine aynı anda iki yönde etki ederek sürecin kalitesini ve verimliliğini daha da artırabilir [26, 27]. Gavrilova [28], radyal ve boyuna ultrasonik titreşim uygulama veya ultrasonik titreşimin uygulanmadığı haller ile karşılaştırıldığında, burulmalı ultrasonik titreşim uygulanarak sürtünme kuvvetlerinin azaldığını kanıtladı [28]. Havacılık ve uzay endüstrisinde, çevrimsel yükleme altında temel bileşenlerin yorulma davranışı ve hizmet ömrü büyük önem taşır. Deliklerin kenarlarında ve pah yüzeylerinde çatlak başlangıcı genellikle imalat sonrasında oluşan düzensiz kalıntı gerilmeler ve

yüzey düzensizlikleri nedeniyle oluşur. Delik giriş pahının yorulma performansını iyileştirmek için yeni bir ultrasonik darbe işlemi yaklaşımı ve bunun konik yüzey parlatma tekniğiyle kombinasyonu kullanılarak 7050-T7451 alüminyum alaşımı üzerinde ultrasonik darbe ve konik yüzey parlatma işlemlerinin kombinasyonu ile en iyi pah yüzey bütünlüğü sağlanırken yorulma çatlağı yayılma oranında önemli bir azalmaya ve buna bağlı olarak Şekil 1.2'de görüldüğü gibi yorulma ömründe dikkate değer bir artışa yol açtığı tespit edilmiştir [29].

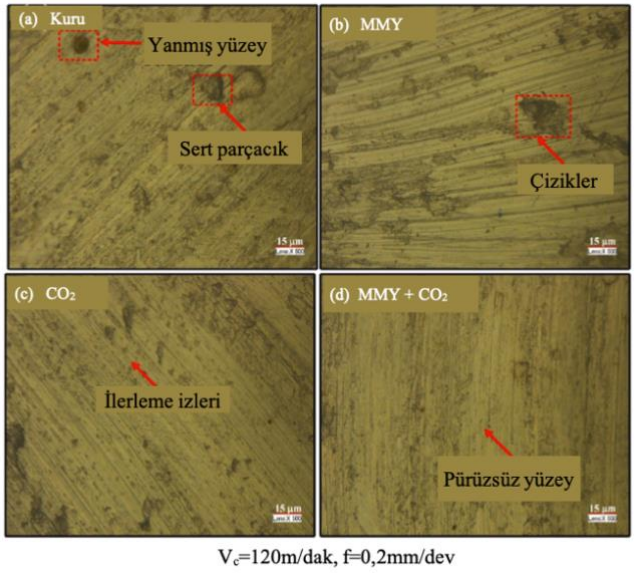


Şekil 1.2 Çeşitli serilerde konik yüzey parlatma operasyonlarının ultrasonik darbe işlemi ile yorulma testi sonuçlarının karşılaştırılması [29]

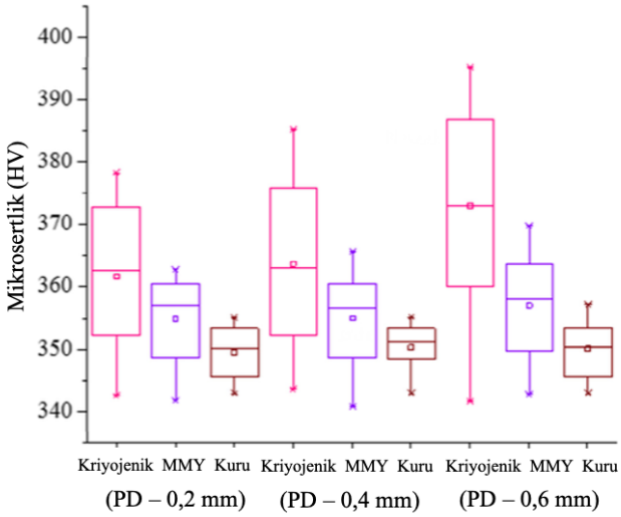
Diğer yandan sürdürülebilirlik temelli bakış açısı ile soğutucu ve yağlayıcı sarfiyatını düşürerek bazı diğer olumsuz çevresel faktörleri minimuma indirebilmek için yapılan çalışmalardan birinde Şekil 1.3'te görüldüğü üzere MMY+CO_2 koşulunun diğer soğutma koşullarından daha iyi sonuçlar ürettiği, kesici takım ömrünü ve yüzey kalitesini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca sürdürülebilirlik açısından CO_2 gazı, kesme sıcaklığından dolayı oluşan yağlayıcı buharlaşmasını azaltabilmektedir [30].

Başka bir çalışmada, kriyojenik soğuk ortamda elmas ile ezerek parlatma prosesinin, 17-4 PH paslanmaz çelik için MMY ve kuru ortamda gerçekleşen işlemlere göre malzeme yüzeyinde daha yüksek iyileşme sağladığı görülmüştür.

Aynı şartlar altında malzemenin mikrosertlik durumları karşılaştırıldığında ise kriyojenik, MMY ve kuru ortamda sırasıyla maksimum 395 HV, 369 HV ve 357 HV'lik mikro sertlikler gözlemlenmiş ve buradan da anlaşılacağı üzere soğuk şartlarda daha iyi yüzey ve yüksek mikrosertlik elde edildiği Şekil 1.4'te gösterilmektedir [31].

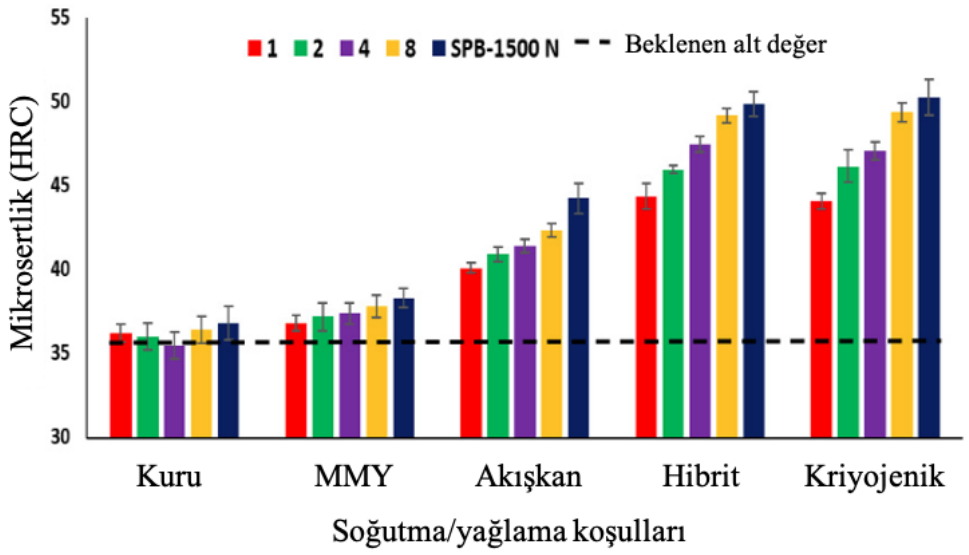


Şekil 1.3 Farklı soğutma/yağlama şartları altında boron nitrid (BN) ve molibden disülfür (MoS_2) katkılı Al-6082 hibrit metal matrisli kompozitlerin işlenmiş yüzey görüntüleri [30]



Şekil 1.4 Farklı parlatma derinlikleri (PD) (0,2 mm, 0,4 mm ve 0,6 mm) ve soğutma koşulları için 17-4 PH paslanmaz çelik üzerinde elmas parlatma yöntemi (diamond burnishing) ile elde edilen mikrosertlik değerleri [31]

Ezerek parlatma, yüzeydeki pürüzlerin şiddetli plastik deformasyon yoluyla azaltılması ve yüzey bütünlüğünün sağlanması için talaşlı işleme sonrası çokça uygulanan bir son operasyon yöntemidir. Bu işleme tekniği, yüzey bütünlüğü bakımından gaz türbini motorları ve kompresör tertibatlarındaki kanatlar gibi ince duvarlı kritik havacılık bileşenlerinin işlevsel ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Havacılık şirketlerinin işletme maliyetlerinin yaklaşık %20'si doğrudan bileşen bakımına bağlıdır. Geleceğe yönelik öngörüler içinde nanoyapılı bileşenleri tasarlama, üretme yeteneği ve işlevsel performansı yüksek yüzey katmanlarına sahip yeni ürünlerin yaratılması yer almaktadır. Havacılık bileşenlerinin ömürlerinin uzatılması için özellikle komponent işlemede yabancı cisim hasarına karşı direnci en üst düzeye çıkarmak, hem yüksek çevrim (HCF) hem de düşük çevrim yorulma (LCF) rejimlerinde döngüsel yorulma ömürlerini artırmak gerekmektedir [32].



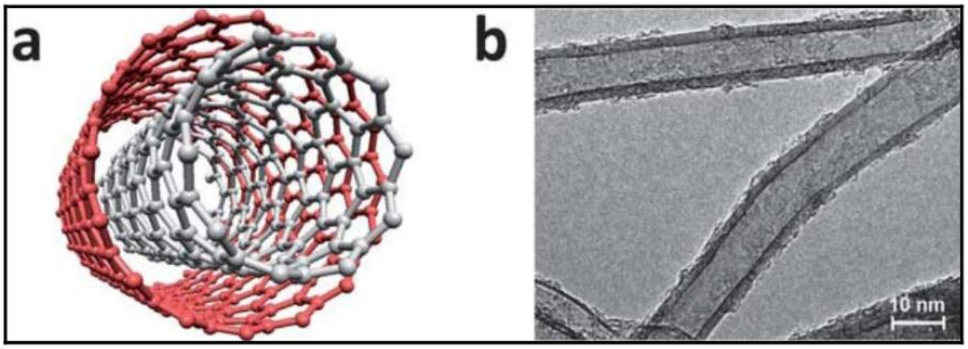
Şekil 1.5 Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde farklı paso ve soğutma/yağlama koşulları ile kriyojenik parlatma operasyonları sonucunda elde edilen mikrosertlik değerlerinin karşılaştırılması (SPB: Tek paso ezerek parlatma) [32]

Sıkı işleme toleranslarına sahip ince havacılık bileşenlerinin işlenmesini kolaylaştırmak için, parça bozulma olasılığını en aza indiren daha düşük yükleme kuvvetleri kullanmak uygundur. Çoklu paso ile ezerek parlatma uygulaması üstün yüzey bütünlüğü iyileştirmesine imkân sağlar ve bu sayede türbin kanatları gibi ince

bileşenlerin işlevselliğini iyileştirmek için Ti-6Al-4V alaşımı gibi malzemelerde ideal bir işleme seçeneği haline geldiği tespit edilmiştir [32]. Roket motorlarındaki rotor kanat pürüzlülüğünün türbin performansına olan etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada aşındırıcı içeren bileşiğin yüksek basınç altında bıçak kanat profilleri üzerinde hareket ettirilerek gerçekleşen ve aşındırıcı akışkan ile işleme prosesi olarak adlandırılan uygulama ile parlatılarak yüzey iyileştirmesi yapılan türbin kanatlarının pürüzlülük değerlerinin 10,16 μm'den 0,76 μm'ye düşürülmesi sonucunda anma güç seviyesi koşullarında türbin verimliliği %2,1 oranında artırılabildiği belirtilmektedir [33]. Bilyeli ezerek parlatma uygulanarak gerçekleşen bir araştırma neticesinde Ti-6Al-4V alaşımından üretilmiş ortopedik implant malzemesinin parlatma operasyonları ardından yüzey pürüzlülüğü azalırken, yüzey sertliğinin ve yorulma ömrünün artış gösterdiği belirlenmiştir [34].

Kafes yapısı yüzey merkezli kübik olan AA7075 alüminyum alaşımlarında -196°C gibi düşük sıcaklıklarda yeterli kayma sistemleri bulunduğundan ötürü artan işlenebilirlik ile kırılmadaki toplam uzama, oda sıcaklığındaki gerilim-şekil değiştirme davranışıyla karşılaştırıldığında iki katına çıkmaktadır [35]. Kuru parlatma için parlatma hızı arttıkça hem radyal hem de teğetsel kuvvetlerde azalan bir eğilim gözlemlenmiştir. Yüksek parlatma hızı nedeniyle sıcaklık arttığında, malzeme daha yumuşak hale gelir ve termal yumuşama etkisi daha baskın hale gelir ve bu durum, Al 7050-T7451 alaşımının daha yüksek sıcaklıktaki akma geriliminin azalmasına yol açmaktadır [36]. Talaşlı işleme esnasında S235JR çelik malzeme üzerinde MMY yönteminin uygulanması sonucunda yüzey pürüzlülüğü %36'ya kadar azalmıştır. Ayrıca MMY + ultrasonik titreşim destekli işlemenin birlikte uygulandığı hibrit yöntem ile daha pürüzsüz yüzey elde edilmiştir. Ultrasonik titreşim, takımın ilerleme yönüne dik olarak uygulanması halinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [37]. Dökme demirin işlenmesinde kuru kesme koşuluna karşılık çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli nanoakışkan destekli minimum miktarda yağlama kesme koşulunun kullanılması, kesme kuvvetlerini (T_c, F_R), yüzey pürüzlülüğünü (Ra) ve toplam karbon emisyon miktarlarını (CE_{total}) azaltmıştır [38]. Yağlayıcı kullanılmadan kuru kesmenin en çevre dostu tornalama yöntemi olduğu bilgisi bir yanılgıdır. Çünkü yağlayıcı kullanılmasa bile işleme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar hem ürün kalitesini bozacak hem de kesici takımın ömrünü kısaltacaktır. Bu etkiler hem

karbon emisyon değerlerini hem de toplam işleme maliyetlerini artıracağından sürdürülebilirlik açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır [39]. S235JR çelik malzeme üzerinde yapılan ortogonal tornalama işlemleri sonucunda, en düşük kesme sıcaklığı, %0,2 MWCNT destekli MMY kesme koşulu altında kesme hızının 175 m/dak ve ilerlemenin 0,1 mm/dev olduğu durumda elde edilmiştir [40]. AISI 420 paslanmaz çeliğin MMY yöntemi ile frezelenmesinde takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü azalırken nano MoS_2 parçacık katkılı MMY kesme sıvısı kullanıldığında ise MoS_2 parçacıklarının yağlama etkisinden ötürü takım aşınmasının ve yüzey pürüzlülüğünün yüksek oranda azaltılabildiği bilinmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere talaşlı imalatta MMY eğer uygun nano parçacık katkılı halde kullanılırsa soğutma ve yağlama görevini daha iyi yerine getirebildiği gibi iş parçası yüzey yapısı üzerinde de olumlu etki göstermektedir [41]. Termal iletkenliğinin 3500 W/mK olarak bilindiği çok duvarlı karbon nano tüplerin (MWCNTs), Al-6082 alaşımının iyi kaynaklanabilirlik özelliğinden yararlanılarak mikro ark oksidasyonunun incelendiği bir araştırma içerisinde MWCNT'ün üç boyutlu ve taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü Şekil 1.6'da verilmektedir [42].



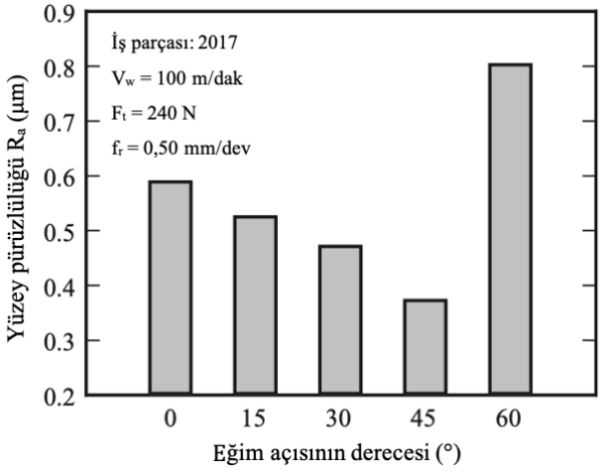
Şekil 1.6 a) Çok duvarlı karbon nanotüp'ün üç boyutlu görünümü ve b) taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki görüntüsü [42]

Nikelli alüminyum bronz (Cupral 4M) malzeme ile yapılan bir çalışmada ezme işlemi sonucunda yüzey özellikleri incelendiğinde Taguchi metodu ile L9 sıralaması verilerine göre Tablo 1.2'de de görüleceği üzere ilerleme hızının 0,4 mm/dev olduğu, devir sayısının 710 dev/dak ve ezme derinliğinin 0,04 mm olduğu koşulda daha iyi yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir [43].

Tablo 1.2 Nikelli alüminyum bronz (Cupral 4M) malzeme ile yapılan deneylerde ezme işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü sonuçları [43]

Taguchi Metodu L9 Sıralaması						
İlerleme Hızı (mm/devir)	Devir Sayısı (dev/dk)	Ezme Derinliği (mm)	Deney Sonrası Ölçülen Yüzey Pürüzlülüğü, Ra (µm)			
			Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ortalama
0,11	350	0,04	0,45	0,35	0,38	0,39
0,11	710	0,08	0,37	0,44	0,43	0,41
0,11	1000	0,12	0,33	0,25	0,29	0,29
0,24	350	0,04	0,54	0,43	0,5	0,49
0,24	710	0,08	0,25	0,28	0,22	0,25
0,24	1000	0,12	0,07	0,06	0,06	0,06
0,4	350	0,04	0,3	0,27	0,29	0,29
0,4	710	0,08	0,11	0,18	0,13	0,14
0,4	1000	0,12	0,42	0,37	0,37	0,39

ASTM 2017 alüminyum alaşımı malzeme üzerinde yapılan bir çalışmada geleneksel yönteme göre eğimli ve istikrarlı dönme gerçekleşen deneylerde yüzey pürüzlülüğü daha iyi sonuçlar vermiştir. Eğim açısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde Şekil 1.7'de gösterildiği üzere 45°'lik eğim açısı ile en iyi yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılmış olup, 60°'lik eğim açısı ile gerçekleşen bir diğer deneyde ise parlatma silindirinin istikrarlı dönememesi ve sadece kayma etkisi yaratmasından ötürü yüzey pürüzlülüğünü bozduğu tespit edilmiştir [44].



Şekil 1.7 ASTM 2017 alüminyum alaşımı malzemenin eğimli ezerek parlatma operasyonları sonucunda oluşan yüzey pürüzlülük değerleri [44]

Pürüzlülük giderme bakımından ezerek parlatma işleminde, paso sayısı arttıkça ilk duruma nazaran pürüzlülük azalmaya başlamaktadır. Fakat uygulanan parlatma kuvveti belirli bir sınırı aştığında metalik yüzey katmanlarında gelişen yüksek sertleşmeden ötürü pullanma şeklinde yüzeyde bozulmalar oluşturarak pürüzlülükte artışa neden olur [45]. AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ile yapılan bir çalışmada, makaralı parlatma işleminde 450 N kuvvete kadar ortalama yüzey pürüzlülüğünün olumlu etkilendiği, 600 N kuvvetten sonra ise yüzey pürüzlülüğünün kötü etkilendiği tespit edilmiştir. Diğer yandan kuvvetin ve pasonun artması halinde mukavemetin arttığı ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür [46]. Malzeme yapısından kaynaklanan farklılıklar oluşabileceği öngörüsü ile yapılan bir başka çalışmada ise yüzey pürüzlülüğünün düşük değerde olması hedefi ile gerçekleşen ezerek parlatma işlemleri ve yapılan değerlendirmeler sonucunda optimum ezme paso sayıları AISI 8620 malzemede 2, küresel grafitli dökme demir malzemede 3, AISI 304 malzemede 2 ve AISI 1050 malzemede 4 paso olarak tespit edilmiştir [47]. Bilyeli ezerek parlatma deneyleri yapılan bir çalışmada 80 N kuvvet altında 5 paso ezme işlemi gören AA7075-T6 alüminyum numunede 0,120 μm yüzey pürüzlülük değeri elde edilirken 242 N kuvvet altında 5 paso ezme işlemi uygulanan bir başka deney numunesi incelendiğinde 1,482 μm yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Bu çalışmadan da anlaşılacağı üzere uygulanan kuvvet artışlarının kimi zaman yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz etki ettiği tespit edilmiştir [48]. Aynı çalışmada 121 N kuvvet altında ilk ezme pasosundan 3. pasoya geçerken yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği ve 5. pasoya geçerken tekrardan iyileştiği belirlenmiştir. Ayrıca ANOVA analizi sonucunda, %39,6 etkisi olan hadde basıncına nazaran %41 ile paso sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır [48]. Alüminyum metalinin diğer metallere nazaran daha yumuşak olmasına ek olarak demirden yaklaşık üç kat daha hafif olmasından ve alaşımlandırıldığı zaman bir miktar yoğunluk artışına karşılık yüksek mekanik dayanım artışı sunabilmesinden dolayı mühendislik uygulamalarında çokça yer bulmaktadır. Düşük özgül ağırlığı sayesinde dayanımdan ödün verilmeden tasarımda hafifliğin öne çıktığı otomotiv, havacılık, gemicilik gibi endüstrilerde alüminyumun önemi ve yeri gün geçtikçe artmaktadır [49]. Çoğunlukla dövme yöntemi ile üretilmesi planlanan parçalar için tercih edilen 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Dövmeye ve ısıl işleme en uygun

alüminyum alaşımı olarak bilinen Al-6082 alaşımı kendi grubundaki en yüksek dayanım ve korozyon direncine sahip olması yanında işlenebilirlik, biçimlendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik bakımından da öne çıkmaktadır [49]. Al-6082 alaşımının mukavemeti, işlenebilirliği, tane boyutu ve kafes yapısı üzerinde değişiklik sağlanabilmektedir. Örneğin korozyon direncini düşürmeden az oranlarda çinko veya bakır ilavesi mukavemeti artırabilir. İşlenebilirliği arttırmak için kurşun veya bizmut ilavesi mümkünken tane boyutunu kontrol etmek de zirkonyum veya titanyum ilavesi ile mümkün olabilmektedir. Alaşımda bakır, krom, çinko, mangan, titanyum, demir, bor gibi empürite elementler çok az oranlarda bulunduklarından kafes parametresi üzerinde fark edilebilir etkileri yoktur. Kafes parametresi magnezyum ve silisyum oranları üzerinden kontrol edilmektedir. Alaşımların çoğunda Mg ve Si dışındaki elementler toplam %1'den azdır [49].

Literatürde yer alan çalışmalardan anlaşılacağı üzere, ezerek parlatma işleminin sadece paso sayısı değişimiyle bile farklılık gösterebileceği anlaşılmaktadır. Malzemeden beklenen performans, kullanım yerine göre, montajlanıp birlikte çalışacağı makine parçaları ile uyumluluğuna, kabul edilebilir yüzey morfolojisine, son hal mekanik özellikleri gibi etkene bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple genel olarak kabul edilebilecek nadir ortak parametreler haricinde her bir çalışmayı bulgular ve bunlara bağlı tavsiyeler kapsamında ayrı ayrı değerlendirmek gerekir. Genel kabul edilebilir aralıklar bize fikir verebilir fakat tüm bu işlemlerin ardından iş parçasının bir makine parçasına dönüştüğü noktada kullanım esnasındaki performansına yönelik beklenen nitelikleri belirlemeye başladıkça parametrelerin her bir detayı önem kazanmaktadır.

Tam da bu noktada yoğunluk fonksiyonel teorisi kapsamında 6000 serisi alüminyum alaşımlı malzeme üzerinde Si/Mg oranı değişikliklerinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini konu alan bir çalışmada Si/Mg oranının Al-Mg-Si alaşımlarının mekanik özelliklere etkisinin önemi doğrulanmıştır. Çoğu mekanik özellik için en iyi Si/Mg oranının 4,5 olduğu bulunmuştur. Sertliğin Si/Mg oranı arttıkça yükseldiği ve Si/Mg oranı değeri 4,5 olduğunda zirveye ulaştığı bulunmuştur. Optimum Si/Mg oranına sahip alaşımlar, düşük yoğunlukları ve yüksek sertlikleri nedeniyle, özellikle uçak gövdelerinde, uçak parçalarının üretiminde, uçak kaplamaları ve madencilik ekipmanları gibi endüstriyel

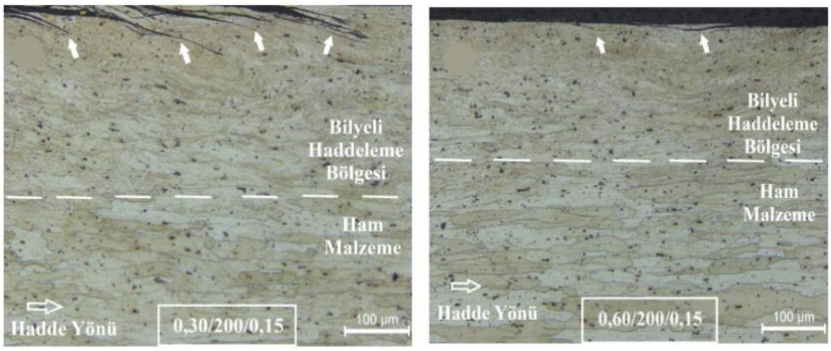
uygulamalarda kullanılabileceği önerilmektedir. Bununla birlikte mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve olası gelişmeler için, ısıl işlem, soğuk işleme ve gerinim sertleştirmesi gibi daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir [50].

Havacılık endüstrisinde polimer lifler şeklinde yapı takviyelerinde kullanılan alüminyum alaşımı cam fiber bileşimi kompozit malzemeler üzerine yürütülen bir araştırmada, bu tür malzemelerin titreşim sönümleme, hafiflik veya dış etkenlere dayanıklılık açısından malzeme mukavemeti konularıyla ilgili olan araştırma geliştirme faaliyetlerinin sürdürülmesinin öneminden söz edilmektedir. Havacılık uygulamaları alanında yeni malzemeler ve teknolojiler geliştirmek için yoğun araştırmalar sürdürüldüğü ve uçak tasarımının iyileştirilmesine altyapı hazırlandığı belirtilmiştir [48]. Bu bağlamda Al-6082 alüminyum alaşımı üzerine yapılan bu ezerek parlatma araştırmasının olası literatür ihtiyaçlarına gelecekte farklı noktalarda kılavuz, çözüm veya kaynak olabileceği düşünülmektedir.

Günümüz itibariyle, uçak yapısal malzemeleri tüm kütlenin yaklaşık %48'ini kapsarken, %15'ini oluşturan motorlar incelendiğinde geri dönüşümde büyük yoğunluğu alüminyum, nikel ve titanyum süper alaşımlarının yer aldığı bilinmektedir [52]. Bu bağlamda alüminyum malzemeler geri dönüştürülebilirliği sayesinde sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde de olumlu bir katma değer sunmaktadır.

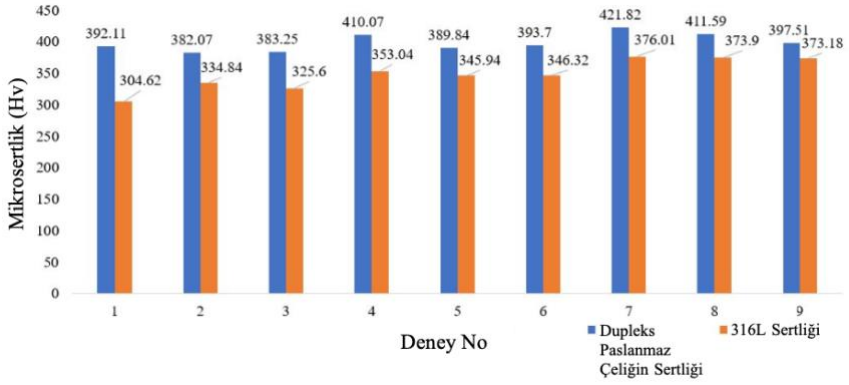
Yaklaşık son on yıldır kompozit malzemelerin kullanımı artsa da yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları uçak gövdesi yapımında hala önemli konumdadır. Isıl işlem görebilen ve yüksek gerilim seviyelerine olumlu yanıt verebilen alüminyum, düşük maliyetli, hafif bir metaldir ve yüksek performanslı malzemelerin en kolay üretilenlerinden biridir, bu sayede daha düşük üretim ve bakım maliyetleri ile karşılaşılmaktadır. Modern kompozit malzemelerle etkili bir şekilde rekabet edebilen alüminyum uçak alaşımlarında son zamanlarda önemli ilerlemeler olmuştur [53]. Yüksek mukavemetli Al-Zn ve Al-Li alaşımlarındaki, hasara dayanıklı Al-Cu ve Al-Li alaşımlarındaki son gelişmeler, kimyasal bileşimin tasarımı ve kontrolü ve/veya daha etkili ısıl işlemlerin geliştirilmesi yoluyla statik mukavemeti, kırılma tokluğunu, yorulma ve korozyon direncini iyileştirmede başarılı olmuştur. Bu incelemeden, havacılık alüminyum alaşımlarındaki büyük iyileştirmelerin, daha iyi özellik dengesi elde etmek için optimize edilmiş çözünen madde içeriği ve çözünen madde oranlarından kaynaklandığı görülmüştür [53].

Bilyeli haddeleme uygulanarak AA7075 alaşımı üzerinde yapılan bir çalışmada parametre artışları ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda yüzey pürüzlülüğünün bozulduğu ve bunun sebebinin bazen fazla bazen düşük plastik deformasyon etkisi ile gerçekleştiği belirlenmiştir. Şekil 1.8'de optik mikroskop altında yüzeye yakın farklı bölgelerdeki bozulmaların özellikle hadde yönüne ve malzeme iç bölgelerine doğru ilerlediği görülebilmektedir [54].



Şekil 1.8 Bilyeli ezerek parlatma işlemi ardından AA7075 alaşımının optik mikroskop altında oluşan yüzey görünümü [54]

Dupleks ve 316L paslanmaz çelik malzemeler üzerinde yapılan bir araştırmada Şekil 1.9'da aktarıldığı gibi dupleks malzeme için %18 oranında, 316L malzeme için ise %47 oranında sertlik artışı tespit edilmiştir. Dokuz farklı parametre için elde edilen mikro sertlik sonuçlarına göre en yüksek sertlik değerleri 1500 N kuvvet altında, ilerlemenin 0,1 mm/dev olduğu, hızın 1200 dev/dak olarak belirlendiği ve 2 paso ezerek parlatma uygulanan deneyde elde edilmiştir [55].



Şekil 1.9 Ezerek parlatma operasyonu ile dupleks ve 316L paslanmaz çelik malzemelerin farklı koşullar altında mikro sertlik karşılaştırmaları [55]

Eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel 718 parçalarının ezerek parlatılması ve yüzey iyileştirme sürecinin modellendiği bir çalışmada işlem öncesi yüzey pürüzlülük değerleri 15 μm ve mikrosertliği 365 HV olarak ölçülen malzemenin AMS 5663 standardı kapsamında ısıl işlem adımları akabinde gerçekleşen ezerek parlatma uygulamasından sonra yüzey pürüzlülük değerlerinin 0,5 μm'a kadar düşürülebildiği ve en yüksek mikrosertlik değerinin ise 440 HV olarak ölçüldüğü belirtilmiştir [56]. AISI 4340 çelik malzeme üzerinde makaralı parlatma uygulanarak yapılan bir çalışmada deney sonrası yüzey pürüzlülüğünde iyileşme elde edilemediği belirtilirken bunun sebebi ise işlem parametrelerinin yüksek plastik deformasyona yol açacak düzeyde etki etmesine bağlanmıştır. İlgili optimizasyonlar yapılması halinde yüzey pürüzlülüğü bakımından daha olumlu sonuçlar alınabileceği öngörüsü sunulmuştur [57]. AISI 1050 karbon çeliği ile yapılan bir araştırmada delme sonrası iç yüzeyinde ezme uygulanarak tamamlanan deliklerde X ışını ile yapılan ölçümde kalıntı gerilim değeri -88,6 MPa bulunmuştur. Ezme uygulaması ile aşınma ve yorulmaya karşı daha dirençli yüzeyler elde edilebilmektedir. Bu gibi yüzey dayanımına olumlu etkiyen operasyonların aynı zamanda iş parçasının dinamik yükler altında da yorulma davranışını yüksek değerlere taşımakta etkisi görülmektedir [58].

1.2 Tezin Amacı

Bu projenin başlıca amacı, geleneksel ezerek parlatma ve ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma proseslerinde farklı ezme derinlikleri kullanılarak kuru, minimum miktarda yağlama (MMY), çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katkılı minimum miktarda yağlama (MWCNT-NMMY) ve Ranque-Hilsch vorteks tüple soğuk hava (RHVT) uygulanmasının parlatma kuvveti, tüketilen enerji ve yüzey pürüzlüğü ile ilgili sonuçlarını elde ettikten sonra iş parçasında mikrosertlik ve mikroyapı gibi yüzey/yüzeyaltı değişimlere etkilerini araştırmaktır.

Bu amaçla;

• Ezerek parlatma yöntemleri, ezme derinlikleri ve ezme koşulları arasındaki kolerasyonun belirlenmesi,

• Kuru, MMY, MWCNT-NMMY ve RHVT koşullarında geleneksel ezerek parlatma prosesine kıyasla ultrasonik destekli ezerek parlatma prosesinin işleme cevaplarına ve yüzey/yüzeyaltı değişimlere etkisinin ortaya koyulması,

• Tüm ezme koşullarında ultrasonik destekli ezerek parlatma prosesinin kullanılmasıyla geleneksel yönteme göre daha düşük parlatma kuvveti, enerji tüketimi ve yüzey pürüzlüğü sağlanması,

• Geleneksel yönteme göre ultrasonik destekli ezerek parlatma prosesinin kullanılması yüzey/yüzeyaltı mikrosertliği arttırması, tane deformasyonunu arttırması ve tane boyutlarının küçülmesini sağlaması,

• Hem geleneksel hemde ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma prosesinde kuru ezme şartlarına kıyasla MMY, MWCNT-NMMY ve RHVT koşullarının işleme cevaplarına ve yüzey/yüzeyaltı değişimlere etkisinin ortaya koyulması hedeflenmektedir.

1.3 Hipotez

Bu tez kapsamında öne sürülen temel hipotez, Al-6082-T6 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerinin, ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma yöntemi altında, çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katkılı minimum miktarda yağlama (NMMY) koşullarında işlenmesi durumunda; geleneksel yöntemlere, kuru, soğuk hava (RHVT) ve bitkisel yağ bazlı minimum miktarda yağlama (MMY) koşullarına kıyasla daha üstün yüzey bütünlüğü, daha düşük parlatma kuvveti, daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek yüzey sertliği değerleri elde edileceği yönündedir.

Bu bağlamda, ultrasonik titreşim desteğinin, plastik deformasyon sürecinde malzeme yüzeyinde meydana gelen sürtünme ve temas basınçlarını azaltarak daha homojen bir malzeme akışı sağlayacağı öngörülmüştür. Buna ek olarak MWCNT katkılı nanoakışkanın gelişmiş soğutma ve yağlama özellikleri sayesinde ısıl etkileri minimize edeceği, yüzey pürüzlülüğünü düşüreceği ve yüzey sertliğini artıracağı değerlendirilmiştir.

Ayrıca, ezme derinliği parametresinin artmasıyla birlikte, malzeme yüzeyinde daha belirgin bir plastik deformasyon oluşacağı, bunun sonucu olarak mikrosertlik değerlerinin yükselmesine ve yüzey pürüzlülük değerlerinin azalmasına neden

olacağı, ancak aynı zamanda parlatma kuvveti ve enerji tüketiminin artacağı varsayılmıştır.

Sonuç olarak bu tezde, ultrasonik titreşim destekli, MWCNT katkılı minimum miktarda yağlama (NMMY) koşulu altında gerçekleştirilen ezerek parlatma işleminin, Al-6082 alüminyum alaşımında hem enerji verimliliği hem de yüzey kalitesi bakımından en uygun işlem koşullarını sağladığı ve sürdürülebilir üretim açısından avantajlı bir yüzey iyileştirme yöntemi oluşturduğu hipotez olarak öne sürülmektedir.

2
MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Deneysel Çalışma

Ezerek parlatma prosesi kapsamında deneyler aşamasında kullanılan iş parçası malzemesi, takım tezgahı, takım, aparat gibi ekipmanlar ile nanoakışkanların hazırlanması ve deney parametreleri bu bölümde aktarılmaktadır.

2.1.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme

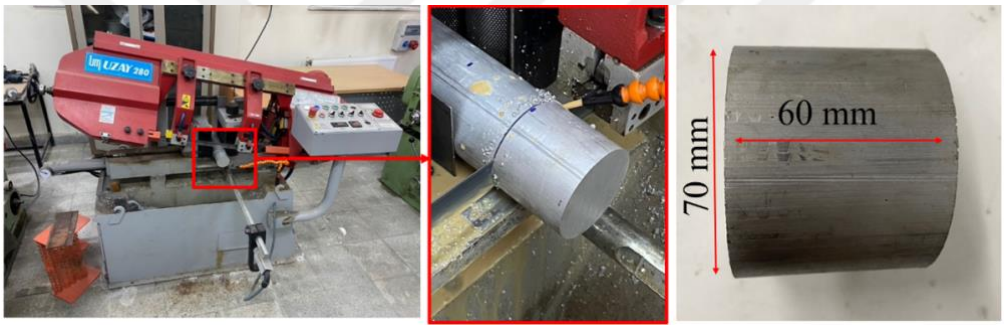
Araştırma kapsamında tüm deneysel çalışmalarda kimyasal bileşimi Tablo 2.1'de gösterilmiş olan Al-6082-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Malzemeye ait Brinell sertlik değeri (HB10) 90 olarak bilinmektedir.

Tablo 2.1 Al-6082-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (EN AW 6082 / EN AW Al Si1MgMn)

Alaşım	**Al**	**Si**	**Mg**	**Mn**	**Fe**	**Zn**	**Cu**
%	97,59	1,085	0,679	0,5020	0,114	0,004	0,0005
Alaşım	**Cr**	**Ni**	**Ti**	**Ga**	**V**	**Zr**	
%	0,0005	0,0005	0,0023	0,0098	0,0096	0,0023	

Al-6082 alüminyum alaşımı silindirik malzeme hammadde stok hali ile Ø70x60 mm boyutlarında testerede kesilerek hazırlanmış olup Şekil 2.1'de deney öncesi durumları görülmektedir. Akabinde tüm deney numuneleri CNC torna tezgahında temizlik pasosu amacı ile kesme hızı 100 m/dak, ilerleme 0,1 mm/dev ve kesme derinliği 1 mm olacak şekilde tornalanarak dış yüzeylerinden talaş kaldırılmıştır. Tüm numuneler temizlik pasosu ardından yüzey pürüzlülükleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Geleneksel ezerek parlatma deneyleri için kuru gerçekleşen deneylerde herhangi bir soğutma/yağlama koşulu oluşturmaksızın YAMASA SX8 tek bilyeli ezerek parlatma takımı ile sabit (0,05 mm) ilerleme, sabit parlatma hızı

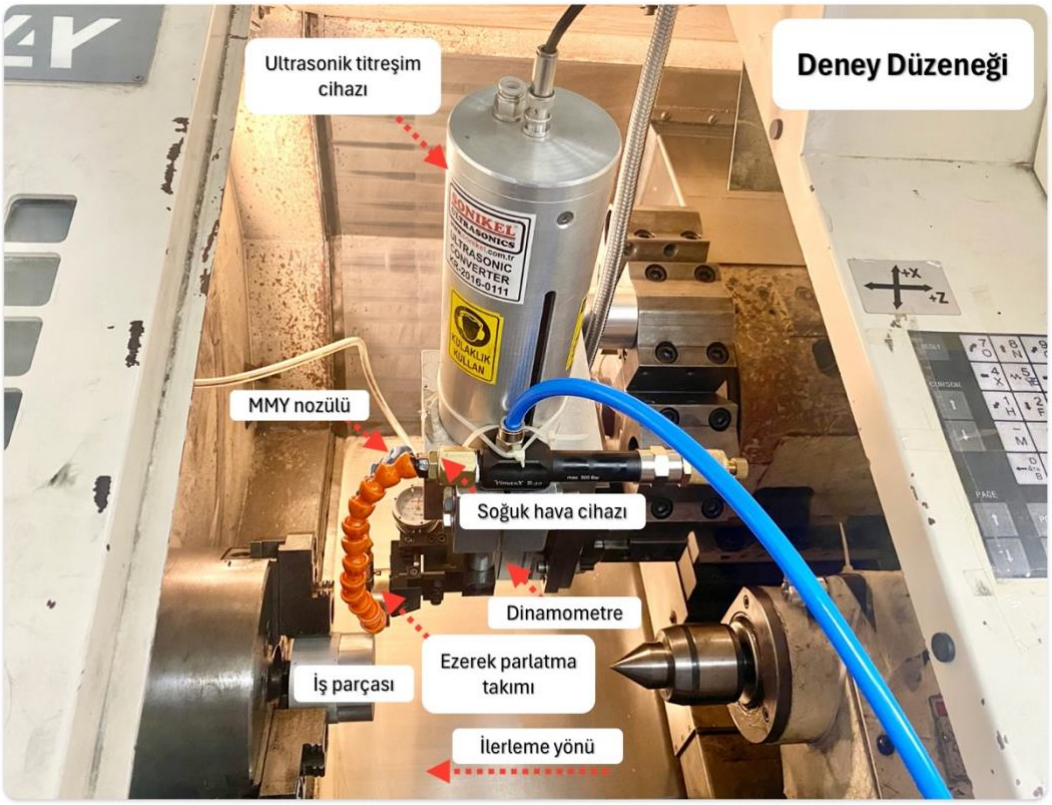
(455 dev/dak) ve 3 farklı ezme derinliği (0,05 mm, 0,1 mm ve 0,15 mm) parametreleri uygulanarak toplamda 3 deney gerçekleştirilmiştir. Aynı parametreler geçerli olacak şekilde Ranque-Hilsch vorteks tüple soğuk hava (RHVT) uygulaması ile oluşturulan soğuk hava şartları altında 3 deney, ticari bitkisel yağ (KT-2000) katkılı minimum miktarda yağlama (MMY) koşulu altında 3 deney, çok duvarlı karbon nano tüp parçacık katkılı minimum miktarda yağlama (MWCNT-NMMY) koşulu altında 3 deney olacak şekilde toplamda 12 geleneksel ezerek parlatma deneyi yapılmıştır. Tüm bu deneylerin üzerine ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma deneyleri aynı şartlar ve parametreler ile birleştirilerek 12 deney daha yapılmıştır. Bu bağlamda tüm araştırma çalışmaları boyunca 24 deney yapılmıştır.



Şekil 2.1 Al-6082 alüminyum alaşımının testere ile kesilmiş hali

2.1.2 Deney Sisteminin Kurulması

Deneyler Şekil 2.2'de görülen Goodway marka GA-230 model CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Goodway GA-230 CNC torna tezgâhı maksimum 4200 dev/dak iş mili devrine sahiptir. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) işlemi Şekil 2.4'te gösterilen Werte marka STN 15 model mikro yağlama sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nano parçacıkların MMY cihazı içerisinde topaklanarak cihaz borularını tıkamaması ve sağlıklı nanoakışkanın kesme bölgesine ulaştırılması amacıyla MMY cihazı içerisinde elektrik motoruyla tahrik edilen ve hızı ayarlanabilen bir pervane sistemi kullanılmıştır.



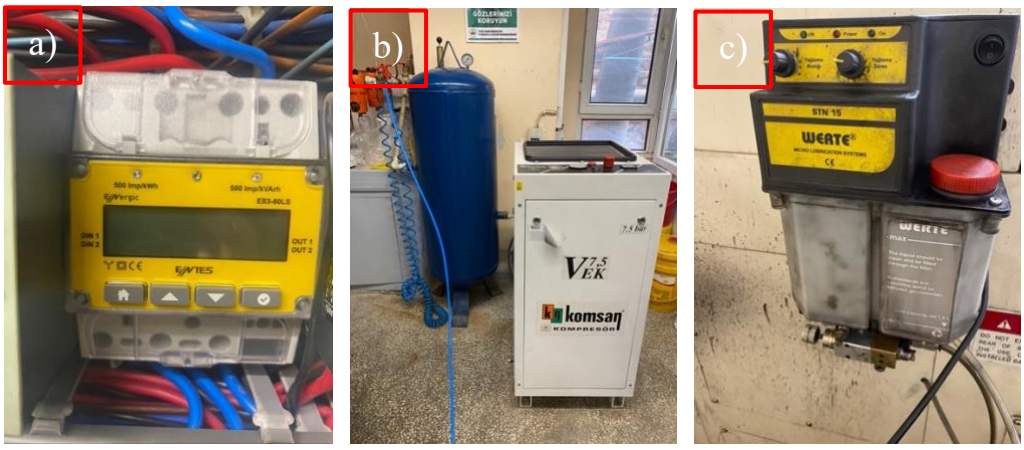
Şekil 2.2 Goodway GA-230 CNC torna tezgâhı içerisinde hazırlanmış olan deney düzeneği

Ezerek parlatma takımının efektif bir şekilde kullanılabilmesi için takım üreticisinin önerisi doğrultusunda iş parçalarının yüzeylerine silindirik tornalama işlemi uygulanarak temizlenmesi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin 5-20 µm değer aralığına düşürülmesi gerekmektedir. CNC torna tezgahının taretine Kistler 9257BA model dinamometre monte edilmiştir. Şekil 2.3'de görülen Yamasa SX8 ezerek parlatma takımı, dinamometrenin takım tutucu kısmına bağlanmıştır. Sonrasında ultrasonik destekli ezerek parlatma deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için ultrasonik titreşim cihazının kurulumu yapılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.3 Yamasa SX8 ezerek parlatma takımı

Ultrasonik titreşim cihazının hornu ezerek parlatma takımının üzerine yerleştirilmiş ve horn tutucu aparat tezgahın taretine sabitlenmiştir. Ezerek parlatma deneyleri süresince tüketilen enerji değerlerinin ölçülebilmesi için tezgâhın elektrik panosuna Entes ES3-80LS güç ölçer yerleştirilmiştir. Son olarak deneylerde kullanılması planlanan ezme koşullarının gerçekleştirilebilmesi için Werte STN15 minimum miktarda yağlama sistemi ve tez çalışması kapsamında temin edilen VimaxX-R30 model vorteks tüp soğuk hava aparatı maksimum 10 bar çalışma basıncına sahip Komsan Vek7.5 kompresöre bağlanmıştır. RHVT uygulaması için kullanılan vorteks tüp cihazı uygulama esnasında ilgili bölgeye -10°C'de soğuk hava sağlamıştır.



Şekil 2.4 a) Entes ES3-80LS güç ölçer, b) Komsan Vek7.5 kompresör, c) Werte STN15 minimum miktarda yağlama sistemi

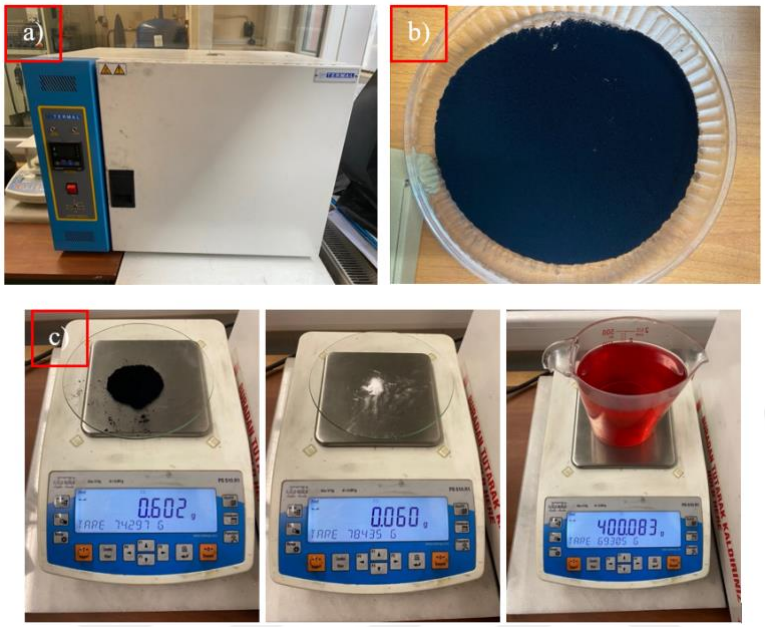


Şekil 2.5 VimaxX-R30 model vorteks tüp soğuk hava aparatı

2.1.3 Nanoakışkanların Hazırlanması

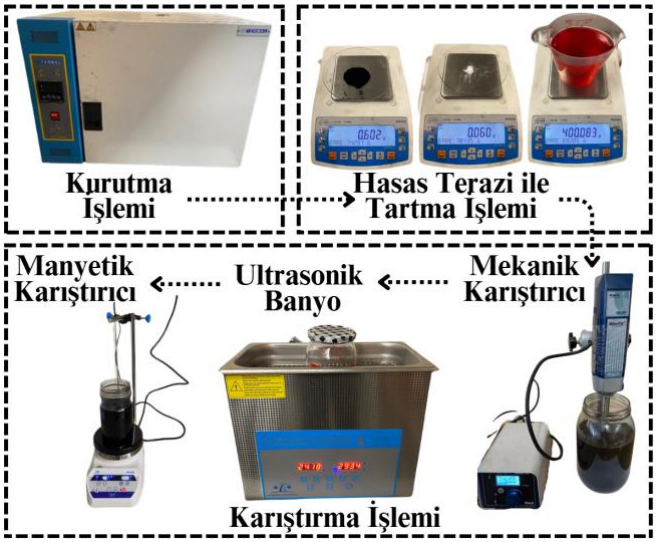
Kırmızı renkli, 20°C'deki yoğunluğu 0.85 g/cm^3 ve viskozitesi 11 cSt olan bitkisel kesme sıvısı ile nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan nano parçacıkların tartılmasında Şekil 2.6c'de görülen 1 mg hassasiyetli maksimum 510 g tartma kapasiteli, Radwag marka PS 510.R1 model hassas terazi kullanılmıştır. MWCNT parçacıkları, Şekil 2.6a'da görülen Termal marka G11420SD model etüv aracılığıyla kurutulmuşlardır. Kullanılacak MWCNT parçacıkları, nemlerinin alınması amacıyla etüvde 120°C sıcaklıkta 1 saat ısıya dayanıklı cam kaba serilerek kurutulmuştur. Kurutulan nano parçacıkların oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi fırında bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, kurutulan nano parçacıklar, ağırlıkça %0,15 oranında ticari bitkisel kesme sıvısına katılmıştır. Karışımların homojenliğini artırmak ve çökelme süresini uzatmak amacıyla, MWCNT katkılı nanoakışkanlara nano parçacık ağırlığının %0,1 oranında SDS (Sodyum Dodesil Sülfat) yüzey etkin madde olarak eklenmiştir. Malzemelerin belirtilen oranlarda hazırlanması hassas terazi ve ölçekli kaplar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan karışımlar Daihan WiseTis HG-15D marka mekanik karıştırıcı kullanılarak 5000 dev/dak devirde 1 saat karıştırılmış ve homojen bir karışım elde edilmiştir. Daha sonra nanoakışkanın stabilitesini arttırmak için Weightlab marka WF-Ud6 model ultrasonik banyo ile 20 kHz frekans ve 200 W güçte 1 saat homojenize etme işlemi uygulanmıştır. Son olarak hazırlanan karışım, nanoparçacıkların homojen dağılımını sağlamak için Wieghtlab WN-H320

manyetik karıştırıcı yardımıyla 1500 dev/dak'da 60 dakika bir kez daha karıştırılmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 a) Termal G11420SD etüv b) kurutulmuş MWCNT parçacıkları, c) Radwag marka PS 510.R1 model hassas terazide sırası ile MWCNT, SDS ve ticari bitkisel yağ tartılması

Şekil 2.7'de nanoakışkanın nasıl hazırlanacağı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Nanoakışkan hazırlama işlem adımları

Kullanılacak olan MWCNT parçacıklarının fiziksel ve termal özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 MWCNT fiziksel ve termal özellikleri

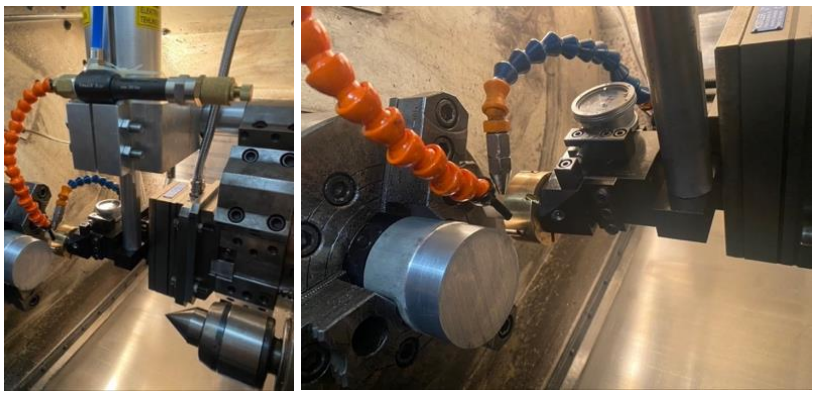
Özellik	MWCNT
Renk	**Siyah**
Saflık (%)	**99**
Termal iletkenlik (W/mK)	**3000-5000**
Yüzey alanı (m^2/g)	**275**
Young modülü (GPa)	**910**
Yoğunluk (g/cm^3)	**2.1**
Çap (nm)	**9.5**
Uzunluk (µm)	**1.5**

2.1.4 Deney Planı

Araştırma kapsamında Al-6082 alüminyum alaşımının geleneksel ve ultrasonik ezerek parlatılması ve elde edilen sonuçların analizi ve değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda iş akışı sırası şu şekildedir:

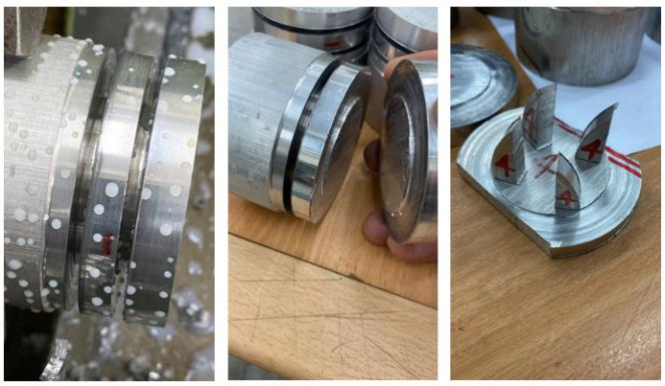
1) Stok hammadde halinde temin edilmiş olan silindir Al-6082 alüminyum alaşımı 70 mm çapında ve 60 mm uzunluğunda olacak şekilde mekanik testere ile 24 adet kesilerek hazırlanmıştır.
2) CNC torna tezgâhı kullanılarak her bir numune üzerinden ince talaş kaldırılmış ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.
3) Aynı numune üzerinde geleneksel veya ultrasonik ezerek parlatma yöntemlerinden birisi ile deney şartlarına bağlı olarak kuru, -10°C'de soğuk hava uygulaması, MMY ve N-MMY soğutma/yağlama şartları ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler esnasında ayrı ayrı yüzey pürüzlülük

değerleri, güç tüketim miktarları ve kuvvet ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Deney düzeneği ve ezme bölgesinden yakın görünüm

4) Konvansiyonel torna tezgâhı ve el testeresi kullanılarak önceden belirlenmiş 10 adet deney numunesi mümkün olduğunca parlatma bölgesinin orta kısımlarına tekabül edecek alanlardan disk şeklinde kesilerek gövdeden ayrılmıştır. Her bir disk şeklindeki numunenin üzerinden çeyrek ay görünümünde olacak biçimde el testeresi ile parçalar kesilmiştir. Kesilen bu son parçalar da her biri 15-20 mm aralığında olacak şekilde ortadan dilimlenmiştir. Hepsi kullanılmayacak olsa da olası aksilikler göz önünde bulundurularak her bir deney numunesine ait 4 parça olmak üzere toplamda 40 parça şekil 2.9'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Gerçekleşen bu çok adımlı kesme işlemleri esnasında ısı değişimini kontrol altında tutmak ve aşırı ısınma gerçekleşmemesi için ticari bitkisel soğutma sıvısı kullanılmıştır.



Şekil 2.9 Deney numunelerinin dilimlenme aşamaları

5) Zımpara ile parlatma için epoksi reçine kullanılarak önceden belirlenen numuneler ufak kalıplara alınıp kuruyup sertleşmesi beklenmiştir. Ardından

metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazında sırası ile 600, 800, 1200 ve 2500'lük zımpara kağıtları ile 6 mikron ve sonra da 3 mikron olacak şekilde iki farklı elmas solüsyon ile bir süre ince parlatma yapılmıştır. Tüm numuneler insan gözü ile pürüz kalmayacak şekilde ayna berraklığında parlatılmış ve saf su ile temizlenmiştir.

6) Mikroyapı ve mikrosertlik analizleri için numuneler yukarıda anlatılan şekilde hazırlanmış olup ardından sertlik deneyleri yapılmıştır. Mikrosertlik ile ilgili veriler doğrultusunda ilgili yorumlar yapılıp mikroyapı ve tane sınırı görüntüleme işlemine geçilmiştir. Mikroyapı ve tane sınırı görüntülemek için belirli bir yönteme ait dağlama çözeltisi hazırlanmıştır. Her bir numune ayrı ayrı belli sürelerde bu çözelti içerisinde bekletildikten sonra saf su ve alkol ile temizlenip mikroskop altında mikroyapı ve tane sınırı görüntüleri elde edilmiştir.

Tablo 2.3 Geleneksel ve ultrasonik destekli deneylerin koşullarına göre deney numaraları

Deney No	Geleneksel	Deney No	Ultrasonik Destekli
1	Kuru + Ezme Derinliği	**13**	Kuru + Ezme Derinliği
2	Kuru + Ezme Derinliği	**14**	Kuru + Ezme Derinliği
3	Kuru + Ezme Derinliği	**15**	Kuru + Ezme Derinliği
4	Soğuk Hava + Ezme	**16**	Soğuk Hava + Ezme
5	Soğuk Hava + Ezme	**17**	Soğuk Hava + Ezme
6	Soğuk Hava + Ezme	**18**	Soğuk Hava + Ezme
7	MMY + Ezme Derinliği	**19**	MMY + Ezme Derinliği
8	MMY + Ezme Derinliği	**20**	MMY + Ezme Derinliği
9	MMY + Ezme Derinliği	**21**	MMY + Ezme Derinliği
10	N-MMY + Ezme	**22**	N-MMY + Ezme
11	N-MMY + Ezme	**23**	N-MMY + Ezme
12	N-MMY + Ezme	**24**	N-MMY + Ezme

2.2 Parlatma Kuvveti ve Enerji Ölçümü

Ezerek parlatma operasyonları esnasında iş parçası Al-6082 alüminyum alaşımına uygulanan ezme basıncına karşılık vermiş olduğu kuvvetlerin oluşturduğu parlatma kuvveti her bir deney numunesi üzerinde bilgisayara bağlı dinamometre aracılığı ile kayıt altına alınmıştır.

Diğer yandan her bir adımda CNC laboratuvarı içerisinde yer alan elektrik panosuna bağlı enerji ölçüm cihazı ile anlık enerji ölçümleri gerçekleştirilerek kayıt altına alınmıştır.

2.3 Yüzey Bütünlüğü İncelemesi

Al-6082 alüminyum alaşımının ezerek parlatma operasyonları öncesi ve sonrası ile ilgili yüzeye ait pürüzlülük değerleri adım adım takip edilmiştir. Devamında deney numunelerinin mikroyapı incelemesi için metalografik hazırlıklar ve işlem adımları ile mikrosertlik ölçüm işleminin yapılışına dair detaylara değinilmektedir.

2.3.1 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Yüzey pürüzlülüğündeki (Ra) değişim ölçümleri Mitutoyo Surftest SJ 210 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak her bir deney öncesi ve sonrası yüzeyden belirli sayıda alınan ölçümlerin ortalaması ile belirlenmiştir. Her bir ölçüm için ölçüm probu ile ölçüm/tarama uzunluğu ISO 4288:1996 standardında belirtilen 0,08 mm değeri olarak seçilmiştir. İş parçaları üzerinden temizleme mahiyetinde birer defa tornalama yapılarak kaba yüzey düzensizliği ortadan kaldırıldıktan sonra Şekil 2.10'da görüldüğü gibi ilgili her bir ezme deneyi ardından yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır.



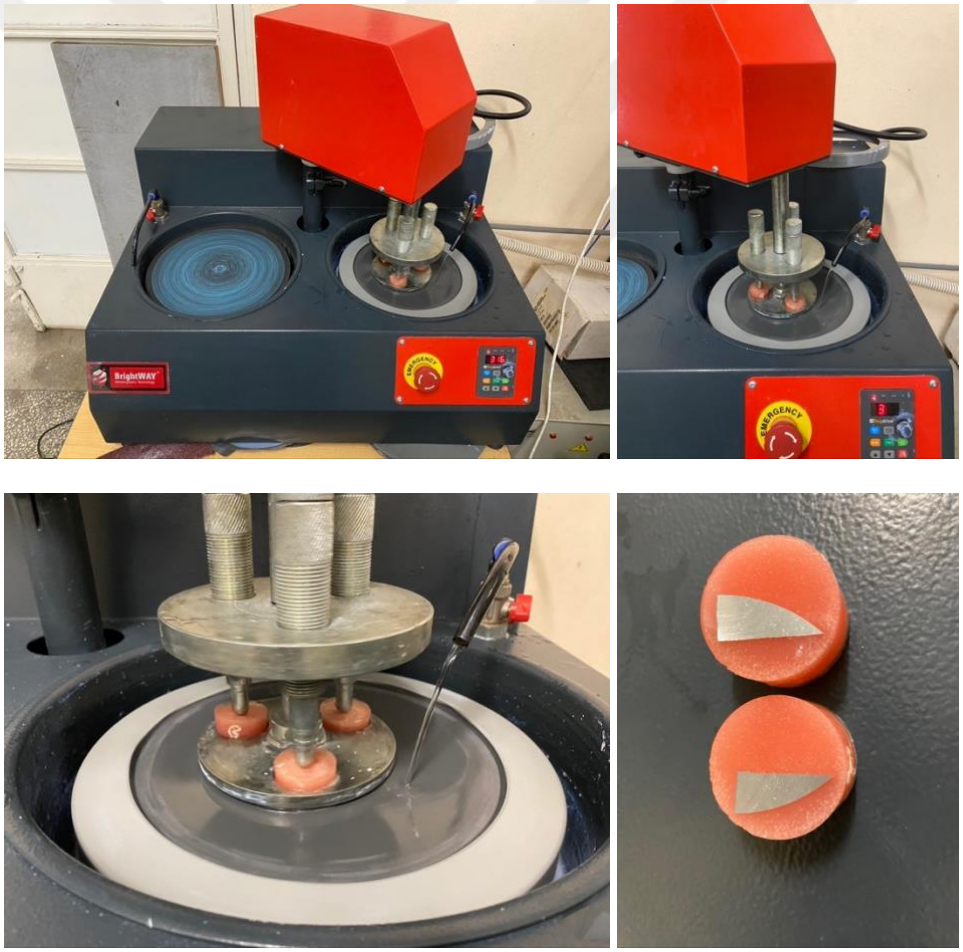
Şekil 2.10 Ezerek parlatılmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi

2.3.2 Metalografik Numune Hazırlama

Yüzey ve yüzeyaltı değişimlerinin belirlenmesi ve sonuçların değerlendirilebilmesi için hazırlanmış olan 10 adet numune, Şekil 2.11'de görülen mikro akrilik soğuk bakalit kiti, epoksi reçine, 2 ölçek akrilik toz ve 1 ölçek sertleştirici sıvı ile karıştırılarak bakalit kalıplarına dökülmüştür. 30 dakika kürleme ve katılaşma işlemi sonrası kalıptan çıkarılmıştır. Kalıplardan çıkarılan numunelere BrightWAY MT-O2 otomatik zımparalama ve parlatma cihazında sırası ile 600, 800, 1200 ve 2500'lük zımpara kağıtları kullanılarak zımparalama operasyonlarına başlanmıştır. Bu aşamada dikkat edilen detay ise her bir zımpara aşamasındaki işlemler bir önceki zımpara aşamasına dik olacak ve önceki zımpara izlerini yok edecek şekilde gerçekleşmiştir. Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra parlatma aşamasına geçilmiştir. Parlatma işleminde öncelikle Akasel markasına ait Moran-U model çuha ve DiaDoublo Poly 3 µm elmas solüsyon kullanılarak bir parlatma işlemi ve ardından Akasel markasına ait Chemal model çuha ve Fumed Silica 0.2 µm Alkaline solüsyon kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Bu esnada 6 mikron elmas solüsyon ile bir süre kaba parlatma işlemi uygulandıktan sonra 3 mikron elmas solüsyon ile ince parlatma operasyonu gerçekleştirilerek daha parlak ve ayna görüntüsüne sahip yüzeyler elde edilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.11 Mikro akrilik serleştirici ve mikro akrilik tozu



Şekil 2.12 Deney numunelerinin zımparalama işlemi

2.3.3 Mikroyapı Analizi

Malzemenin ezerek parlatılma süreci, ezme esnasında tanelerde meydana gelen plastik deformasyon nedeniyle nihai ürünün mikroyapısında değişim ve dönüşümlere yol açabilmektedir [59]. Ayrıca, tanelerdeki deformasyonun malzemenin mekanik özelliklerini etkilediği bilinmektedir [60]. Bu nedenle işlenmiş parçaların tane deformasyonu, tane büyümesini/küçülmesini içeren mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Bu amaçla, metalografik olarak hazırlanan numunelerin tane sınırlarının ortaya çıkartılması için dağlama işlemi uygulanmıştır. Tane sınırlarının belirginleştirilmesi ve mikroyapı incelemelerinin gerçekleştirilebilmesi için her bir numune 95 ml saf su, 2,5 ml HNO3, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF karışımından oluşan Keller reaktif çözeltisi [61] içerisinde oda sıcaklığında ortalama 30 saniye bekletilerek dağlama işlemi tamamlandıktan sonra saf su ile yüzey temizlemesi yapılarak numuneler analize hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri Olympus BX53M model optik (ışık) mikroskop ve PRECiV yazılımı kullanılarak 200x ve 500x büyütmelerde gerçekleştirilmiştir.

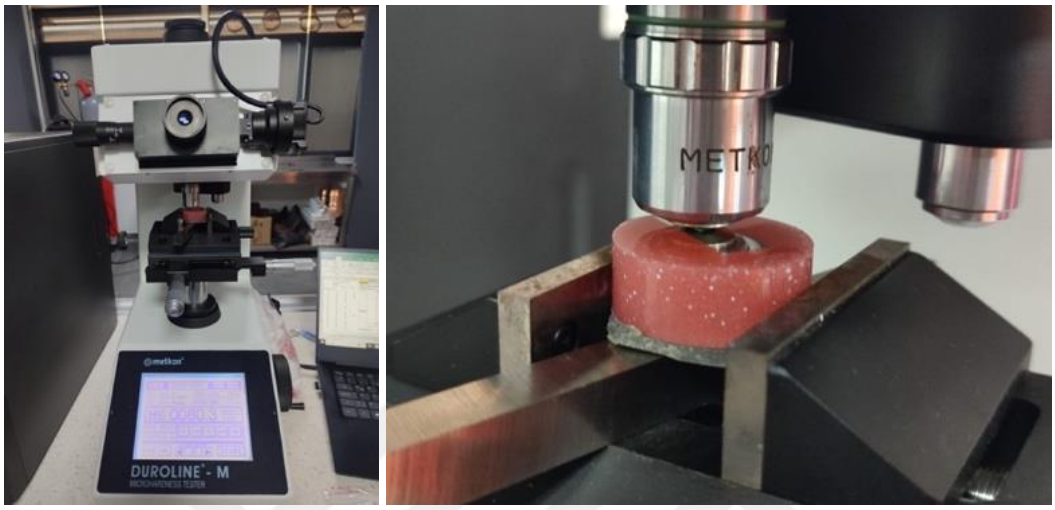
2.3.4 Mikrosertlik Ölçümü

Tablo 2.4'te mikrosertlik ve mikroyapı analizi için hazırlanana numunelere ait ezerek parlatma parametreleri verilmektedir.

Tablo 2.4 Mikrosertlik ve mikroyapı analizi için seçilen numuneler

Deney No	Parlatma Tipi	Parlatma Koşulu	Parlatma Hızı (dev)	İlerleme (mm/dev)	Ezme Derinliği (mm)
1	Geleneksel	Kuru	455	0.05	0.05
3	Geleneksel	Kuru	455	0.05	0.15
4	Geleneksel	Soğuk Hava	455	0.05	0.05
7	Geleneksel	MMY	455	0.05	0.05
10	Geleneksel	N-MMY	455	0.05	0.05
15	Ultrasonik	Kuru	455	0.05	0.15
16	Ultrasonik	Soğuk Hava	455	0.05	0.05
19	Ultrasonik	MMY	455	0.05	0.05
22	Ultrasonik	N-MMY	455	0.05	0.05
24	Ultrasonik	N-MMY	455	0.05	0.15

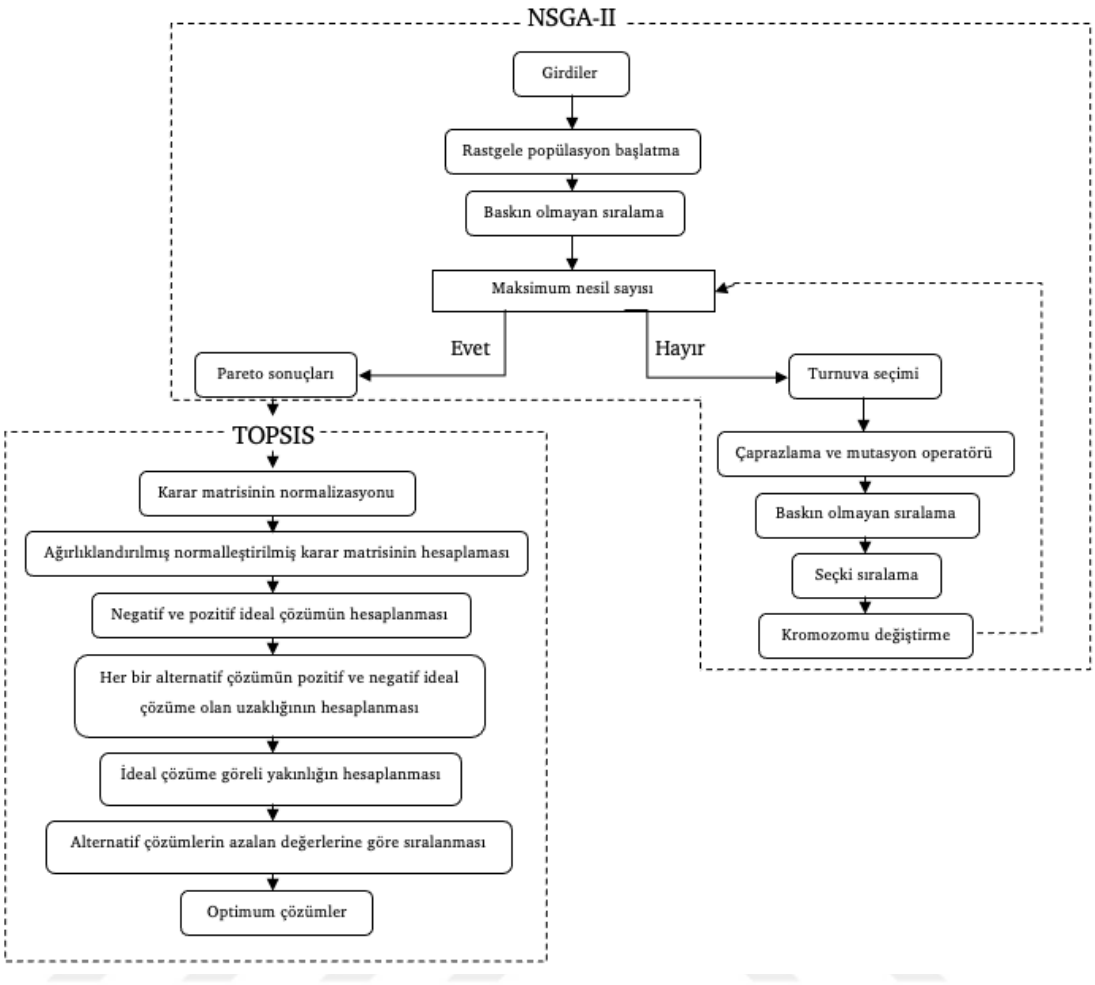
Mikrosetlik ölçümleri Metkon DUROLINE-M Vickers mikrosetlik ölçüm cihazı kullanılarak 10 gram kuvvet yükün 15 saniye tatbik edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde numunenin yüzeyinden 300 μm derinliğe kadar Vickers mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikrosertlik ölçüm cihazı ile indentasyon izleri oluşturma aşaması Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Metkon DUROLINE-M Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı ile sertlik ölçme işlemi

2.4 Çok Kriterli Optimizasyon ve Çok Kriterli Karar Verme

Bu tez çalışmasında optimum proses parametrelerinin belirlenebilmesinde baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma-II yöntemi olarak bilinen NSGA-II genetik algoritma yöntemi ve çoklu karar verme yöntemi olarak bilinen TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği) yöntemi kullanılmıştır [62]. NSGA-II yöntemi, tüm sonuç kümelerinin önce birbiri ile, sonra birbirine karşı kıyaslanmasını ve üstün olanların seçilerek kıyaslamaya devam edilmesini sağlayan genetik algoritma çözüm yöntemidir [63]. TOPSIS yöntemi ise en iyi ve en kötü çözümü değerlendirip, en iyiye en yakın, en kötüyeyse en uzak mesafedeki çözümün belirlenmesinde yardımcı olan bir karar verme yöntemidir. Ayrıca, en iyi ve en kötü arasındaki mesafeyi belirleyip, ideal olan ve olmayan sonuçların da elde edilmesinde kullanılabilen bir yöntemdir [64]. NSGA-II ve TOPSIS kullanarak yapılan optimizasyonunun akış şeması Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.14 NSGA-II ve TOPSIS kullanarak yapılan optimizasyonunun akış şeması

NSGA-II algoritmasının uygulanabilmesi için parlatma kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve harcanan enerji bağımlı değişkenlerinin matematiksel olarak bağımsız değişkenler ile modellenerek amaç fonksiyonu şeklinde NSGA-II'ye girdi olarak verilmesi gerekmektedir. Çalışmada kullanılan bağımsız ve bağımlı değişkenler Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5 Bağımlı ve bağımsız değişkenler

Bağımsız Değişkenler	Parlatma tipi (Geleneksel ve ultrasonik) Parlatma koşulu (Kuru, Soğuk hava, MMY ve N-MMY) Ezme derinliği (0.05, 0.1 ve 0.15 mm)
Bağımlı Değişkenler	Parlatma kuvveti Yüzey pürüzlülüğü Harcanan enerji

Parlatma tipi ve parlatma koşulu gibi sözel bağımsız değişkenlerin matematiksel olarak modele entegre edilebilmesi için kukla değişkenleri (Dummy variables) metodu kullanılmıştır. Tablo 2.6'da kullanılan kukla değişkenleri gösterilmiştir. Parlatma tipi için C1 kukla değişkeni kullanılmış olup geleneksel ezerek parlatma için "0", ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma için ise "1" sayısal ifadesi kullanılmıştır. Parlatma koşulları için ise 1 ve 0'lardan oluşan kukla değişkeni matrisi kullanılmıştır. C2, C3 ve C4 kukla değişkenleri kuru parlatma için [1 0 0], soğuk hava için [0 1 0], MMY için [0 0 1] ve N-MMY için [0 0 0]'dir.

Tablo 2.6 Kukla değişkenleri

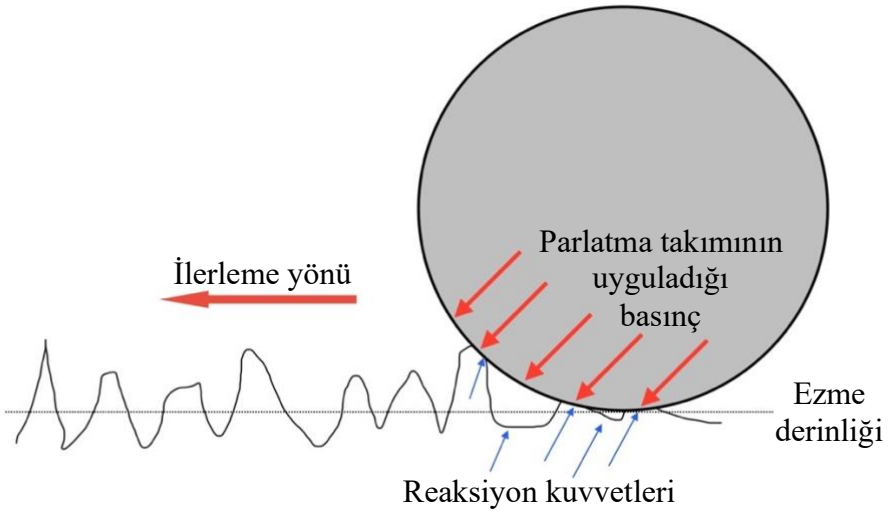
Parlatma Tipi	C1	Parlama Koşulu	C2	C3	C4
Geleneksel	0	Kuru	1	0	0
		Soğuk hava	0	1	0
Ultrasonik	1	MMY	0	0	1
		N-MMY	0	0	0

Çok kriterli optimizasyon ve çok kriterli karar verme hazırlıkları bu adımda tamamlandıktan sonra ilgili tüm sonuçlar optimizasyon sonuçları kısmında sunulmuştur.

3
ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1 Parlatma Kuvveti Sonuçları

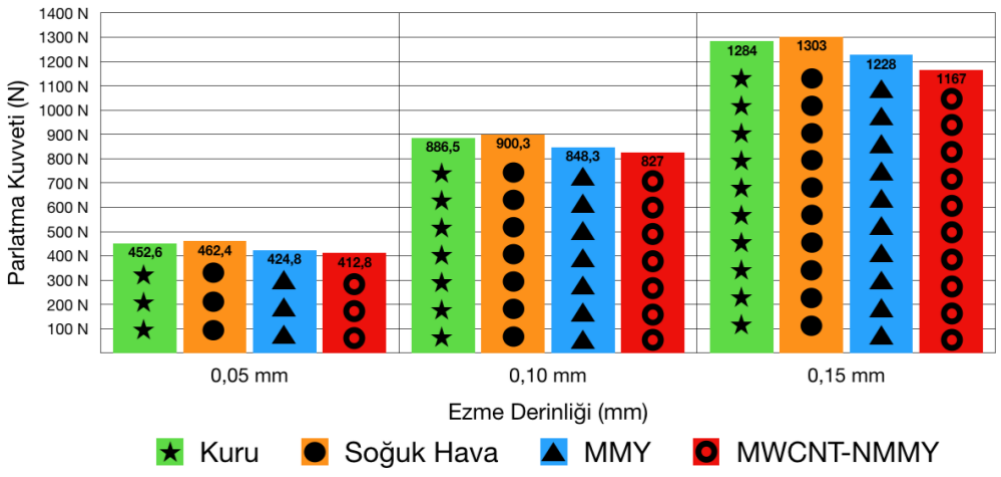
Sabit parlatma hızı ve ilerleme uygulanarak geleneksel ve ultrasonik tipte gerçekleşen tüm deneylerin soğutma/yağlama kondisyonları fark etmeksizin her bir korelasyonunda parametre bakımından ezme derinliği artışı ile parlatma işleminde oluşan kuvvetlerin de arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.1 Parlatma operasyonu esnasında iş parçası üzerinde oluşan temsili parlatma takımının uyguladığı basınç ve reaksiyon (tepki) kuvvetlerinin gösterimi

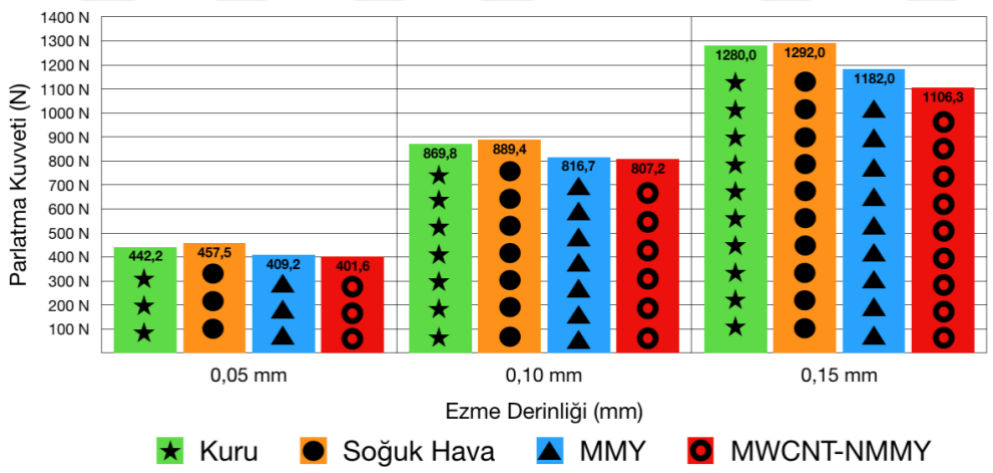
Operasyon kriterlerine göre her bir adımda değişiklik gösterse de oluşan kuvvetlerin temelinde ana etken olarak Şekil 3.1'de de görüleceği üzere parlatma takımının iş parçası üzerine uyguladığı ezme basıncı ile buna karşılık olarak iş parçasının gövdesi üzerinden tepkiyen reaksiyon kuvvetleri yer almaktadır. İlerleme, devir sayısı ve soğutma/yağlama kriter ve değişkenlerine bağlı olarak oluşan toplam kuvvet değişiklik göstermektedir. Geleneksel tipte ezerek parlatma deneylerinde en yüksek kuvvetin 1303 N ile soğuk hava ve 0,15 mm ezme derinliği

uygulanarak gerçekleşen deneyde ortaya çıktığı görülmüştür (Şekil 3.2). Ezme derinliği 0,05 mm'den 0,1 mm'ye artırıldığında geleneksel yöntemde kuvvetlerin %94,7-%99,7 arasında arttığı belirlenmiştir. Ezme derinliğinin 0,1 mm'den 0,15 mm'ye yükseltildiği deneylerde ise %44,72-%44,85 aralığında kuvvet artışı tespit edilmiştir. Oluşan parlatma kuvvetleri bakımından 1303 N aynı zamanda tüm deneyler arasındaki en yüksek değer olarak göze çarpmaktadır. Geleneksel yöntem ile gerçekleşen en düşük parlatma kuvveti ise 412,8 N ile MWCNT-NMMY ve 0,05 mm ezme derinliği uygulanan deney ile elde edilmiştir. Kuvvet düşüşünde çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) parçacıklarının soğutma/yağlama görevini nano minimum miktarda yağlama yöntemi sayesinde diğer şartlara göre daha iyi yerine getirebildiğini anlamaktayız. Burada MWCNT parçacıklarının iş parçası üzerinde yuvarlanarak mikro düzeydeki çukurcukları doldurması ve parlatma takımının makarası ile iş parçası yüzeyi arasında yuvarlanması sayesinde oluşturduğu daha iyi ıslatma ve daha iyi yağlama etkisi uygulanan kuvvetin azalmasına sebep olmuştur. Geleneksel tipte ezerek parlatma deneyleri içerisinde tüm ezme derinlikleri için en düşük ezme kuvveti hep MWCNT-NMMY uygulanan deneylerde görülmektedir ve bunu düşükten yükseğe doğru sırası ile MMY, kuru ve soğuk hava uygulamaları izlemektedir. Burada tespit ettiğimiz bir diğer husus ise soğuk hava uygulamasının kuru gerçekleşen deneylerden bile daha yüksek kuvvetler ortaya çıkarmış olması, iş parçası yüzeyinin normal şartlar altında olması haline göre daha soğuk bir halde iken plastik deformasyonu zorlaştırdığı ve bu sebeple kuvvetlerin de arttığı net bir şekilde anlaşılmaktadır.



Şekil 3.2 Geleneksel parlatma deneylerinde parlatma kuvveti (N) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması

Ultrasonik yöntem ile ezerek parlatma deneyleri tüm parlatma koşulları ve parametreleri fark etmeksizin geleneksel yöntem ile yapılan deneylerle karşılaştırıldığında her bir deneyde daha düşük kuvvetler elde edildiği görülmektedir (Şekil 3.3). Ezme derinliği 0,05 mm'den 0,1 mm'ye artırıldığında ultrasonik yöntemde parlatma kuvvetlerinin %94,4-%101 arasında arttığı belirlenmiştir. Ezme derinliğinin 0,1 mm'den 0,15 mm'ye yükseltildiği deneylerde ise %37,05-%45,26 aralığında parlatma kuvveti artışı tespit edilmiştir. Ultrasonik destekli ezerek parlatma işlemleri arasında en yüksek parlatma kuvvet 1292 N ile soğuk hava koşulu altında ve 0,15 mm ezme derinliği uygulaması esnasında elde edilmiştir. En düşük kuvvet ise MWCNT-NMMY koşulu ve 0,05 mm ezme derinliği uygulanan deneyde 401,6 N ile elde edilmiş olup aynı zamanda tüm deneyler arasındaki en düşük ezme kuvveti olarak göze çarpmaktadır. Bu sonuçlar ultrasonik titreşimlerin neden olduğu akustoplastik etki ile malzemenin daha kolay deforme olmasını sağlayarak geleneksel ve diğer uygulamalara göre aynı yüzey iyileştirmesini daha düşük parlatma kuvvetleri ile elde etmeye olanak tanımaktadır [65, 66].



Şekil 3.3 Ultrasonik destekli parlatma deneylerinde parlatma kuvveti (N) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması

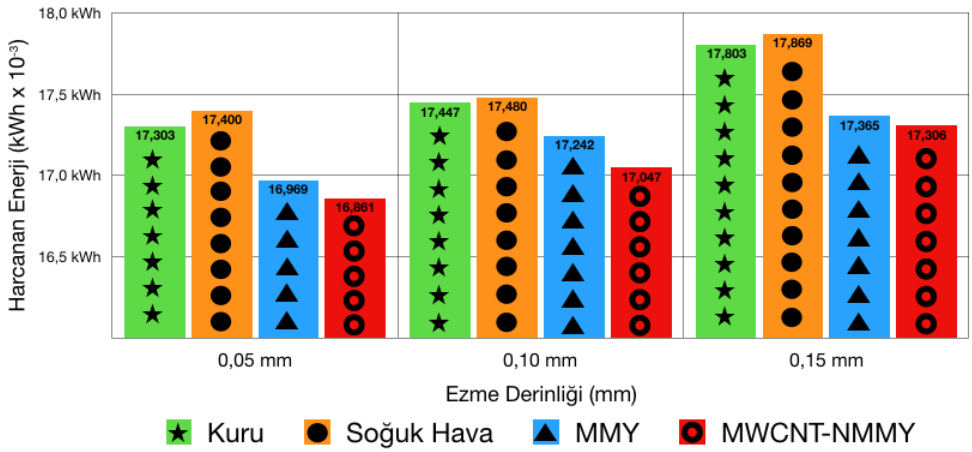
Ezerek parlatma işlemi esnasında statik yük ve ultrasonik titreşim etkisi ile oluşan dinamik yük birleşerek mikroyapının modifikasyonuna katkıda bulunmaktadır ve yüzeyin elastik geri kazanımını sınırlamaktadır ve azalan gerilim sayesinde

malzemenin kalıcı olmayacak şekilde bölgesel yumuşayabildiği [67, 68, 69, 70] ve bu sayede plastik deformasyonun daha düşük kuvvetlerle gerçekleşmesine olanak tanıyabildiği [71] bilinmektedir.

3.2 Harcanan Enerji Sonuçları

Parlatma operasyonlarında daha önceden tespit etmiş olduğumuz sebep-sonuç ilişkilerinden ezme derinliği arttıkça ortaya çıkan parlatma kuvveti değerlerinin de artıyor olmasına benzer şekilde tüm bu alt etkenlerin bir başka sonucu olarak enerji tüketim miktarlarının da arttığı tespit edilmiştir.

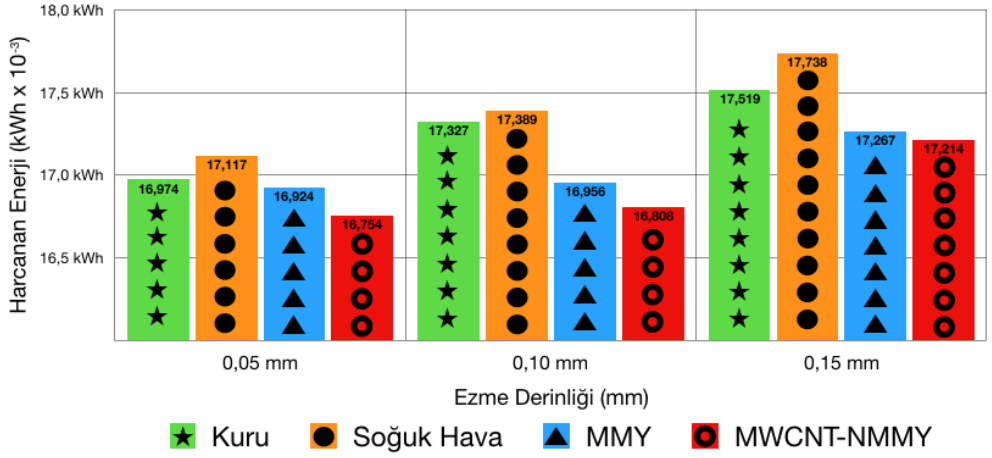
Geleneksel yöntem ile gerçekleşen parlatma deneyleri arasında en düşük enerji tüketimi 0,016861 kWh ile 0,05 mm ezme derinliği uygulanan MWCNT-NMMY koşulu altındaki deneyde elde edilmiştir. Bu sayede nano parçacık katkılı akışkan ile minimum miktarda yağlama yöntemi en verimli geleneksel parlatma yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Diğer yandan harcanan enerjinin en yüksek noktaya ulaştığı soğuk hava şartları ve ezme derinliği 0,15 mm olarak gerçekleşen deney ise 0,017869 kWh ile en verimsiz ya da en çok enerji tüketimi ile sonuçlanan operasyon olarak belirlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Geleneksel parlatma deneylerinde harcanan enerji (kWh × 10^{-3}) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması

Ultrasonik yöntem ile gerçekleşen deneyler ile elde edilen veriler incelendiğinde ise malzemenin genel mekanik davranışı ezme miktarının artışı ile kuvvetlerin arttığı ve bunun bir başka sonucu olarak da enerji tüketimlerinin artışı burada da

görülmektedir. Fakat geleneksel yönteme göre daha düşük enerji tüketimleri elde edilen ultrasonik deneyler sonucunda geleneksel yöntem ile gerçekleşen deneyler ile birlikte tüm deneyler arasında 0,016754 kWh ile 0,05 mm ezme derinliği ve MWCNT-NMMY soğutma/yağlama şartı altında gerçekleşen deney en düşük enerji tüketen yöntem olarak bulunmuştur (Şekil 3.5).



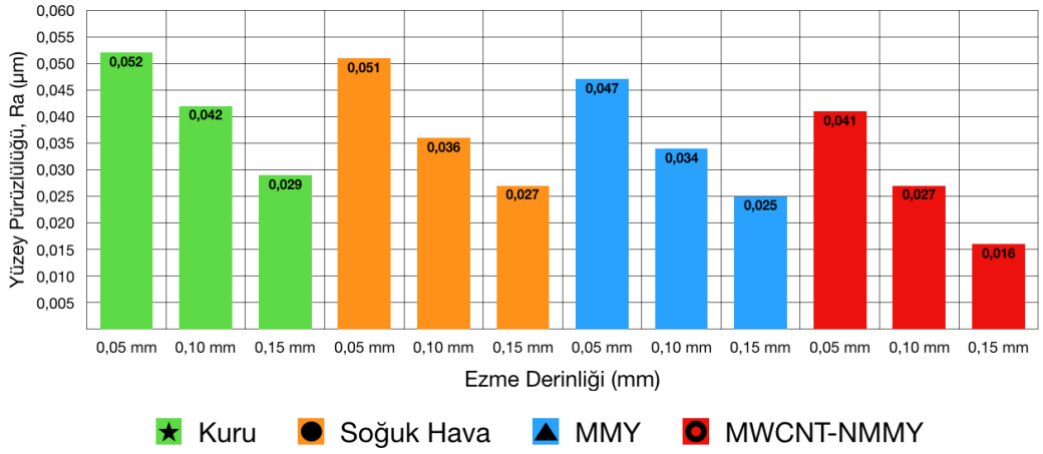
Şekil 3.5 Ultrasonik destekli parlatma deneylerinde harcanan enerji (kWh × 10^{-3}) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması

Özellikle ultrasonik titreşim destekli operasyonlar ile elde edilen yüksek deformasyon miktarı akustik yumuşamanın bir etkisi olarak sonuçlanması ve bu sayede de enerji tüketimindeki azalmaya etki ettiğini anlamaktayız [65, 72, 73, 74, 75, 76]. Diğer yandan RHVT uygulamalarının -10 °C'de soğuk hava etkisi ile malzeme iç yapısındaki termal yumuşamaya izin vermemesi [36] sonucu deformasyonu zorlaştırarak enerji harcamalarının artışına etki ettiği anlaşılmaktadır. Ayrıca ezme miktarındaki artışlar ezme aparatının iş parçası ile arasındaki temas basıncı ve temas alanındaki artışa bağlı olarak daha zorlayıcı bir hal almasından ötürü enerji tüketimini de artırmıştır [77].

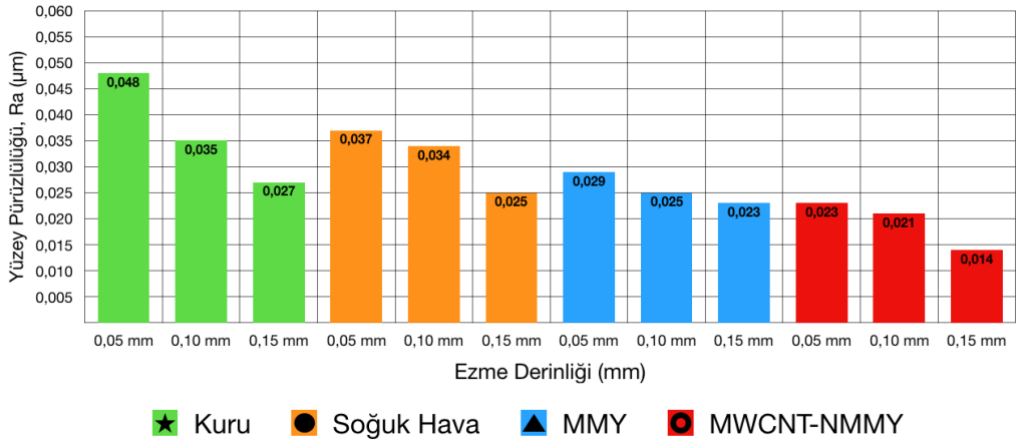
3.3 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Her bir deney numunesine ait yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarına göre tüm deneyler arasında en iyi yüzey pürüzlülüğü 0,014 µm ile ultrasonik yöntemde MWCNT-NMMY soğutma/yağlama koşulu altında iken 0,15 mm ezme derinliği uygulanan deneyde elde edilirken en kötü yüzey pürüzlülüğü ise 0,052 µm ile

geleneksel yöntemde kuru şartlar altında iken 0,05 mm ezme derinliği uygulanan deneyde elde edilmiştir (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7).



Şekil 3.6 Geleneksel parlatma deneylerinde yüzey pürüzlülüğü (Ra) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması



Şekil 3.7 Ultrasonik destekli parlatma deneylerinde yüzey pürüzlülüğü (Ra) – ezme derinliği (mm) karşılaştırması

Geleneksel uygulamalara nazaran ultrasonik destekli ezerek parlatma operasyonları sonucunda yüzey pürüzlülüğü bakımından daha iyi sonuçlar alınabileceği [37], diğer yandan nano parçacık içeren soğutma sıvısı kullanımı ile kesme kuvvetlerinin de azalması ile kolay işleme gerçekleşebileceği [38] bilinmektedir. Farklı çalışmalardan elde edilen bulgular da bu sonuçları desteklenir niteliktedir [76, 78, 79]. Yüzey pürüzlülüğünü optimum düzeye getirebilmek için oldukça fazla kriter ile denge kurabilmek, kimi değişkenlerin etkisini azaltıp kimi değişkenlerin etkisini ise artırmak gerekmektedir. Burada elde ettiğimiz bariz sonuçlardan ultrasonik

titreşim desteği, yüksek ezme miktarı ve nanoakışkan kullanımının birlikte uygulanması sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün daha fazla iyileştirildiği belirlenmiştir. Farklı çalışmalar incelendiğinde yüksek ezme miktarı malzemenin bazı mekanik özelliklerine olumlu etki ederken [18, 32] birden fazla ezme pasosu tekrarında ise yüzey hasarlarına yol açabileceği [45] de bilinmektedir. İşte bu sebeptendir ki tüm çalışmalar kendi içerisindeki değişkenlerin optimum deney kriterleri ile harmanlanmasını gerektirmektedir [46, 47, 48].

3.4 Optimizasyon Sonuçları

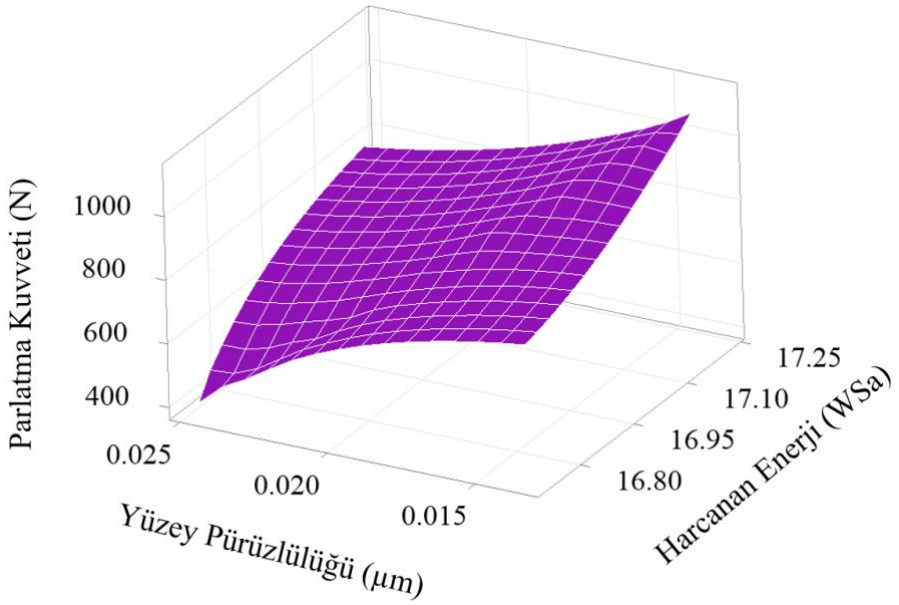
Bağımlı ve bağımsız değişkenler kullanılarak Minitab yazılımı içerisinde yer alan cevap yüzey metodu (response surface methodology) modülü yardımıyla tam ikinci dereceden regresyon denklemleri türetilmiştir. Denklem 3.1 ile 3.3 aralığında Minitab yazılımından elde edilen regresyon denklemleri sunulmuştur. Çıkarımsal yöntemler arasında yer alan regresyon analizi, değişkenler arasındaki bağıntıyı temsil eden matematiksel modeli belirlemeye ve modelin yeterlilik düzeyini irdelemeye yönelik, etkin ve değişik bilim alanlarında yaygın şekilde kullanılan bir yöntemdir.

$$\begin{aligned}\text{Parlatma Kuvveti (N)} = {} & -65.9 + 9.8\ C1 + 42.2\ C2 + 36.9\ C3 \\ & + 10524\ \text{Ezme Derinliği (mm)} - 9625\ \text{Ezme Derinliği (mm)} \\ & \times \text{Ezme Derinliği (mm)} + 1.0\ C1{\times}C2 - 21.2\ C1{\times}C3 \\ & - 199\ C1{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)} - 46.1\ C2{\times}C3 \\ & - 278\ C2{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)} - 773\ C3{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)}\end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}\text{Yüzey Pürüzlülüğü (}\mu\text{m)} = {} & 0.06825 - 0.01623\ C1 - 0.00437\ C2 \\ & - 0.01073\ C3 - 0.2834\ \text{Ezme Derinliği (mm)} \\ & + 0.114\ \text{Ezme Derinliği (mm)} \times \text{Ezme Derinliği (mm)} - 0.00053\ C1{\times}C2 \\ & - 0.00401\ C1{\times}C3 + 0.1139\ C1{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)} - 0.00313\ C2{\times}C3 \\ & + 0.0074\ C2{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)} + 0.0447\ C3{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)}\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\text{Harcanan Enerji (Wh)} = 17.227 - 0.2652\ C1 + 0.0322\ C2 - 0.1834\ C3 \quad (3.3)$$
$$- 0.09\ \text{Ezme Derinliği (mm)} + 24.8\ \text{Ezme Derinliği (mm)} \times$$
$$\text{Ezme Derinliği (mm)} + 0.0364\ C1{\times}C2 + 0.0621\ C1{\times}C3$$
$$+ 0.403\ C1{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)} - 0.2252\ C2{\times}C3$$
$$+ 0.528\ C2{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)} - 1.228\ C3{\times}\text{Ezme Derinliği (mm)}$$

Denklemlerin güvenilirliği yani tahmin doğruluğu belirlilik katsayısı (R^2) kullanılarak belirlenmiştir. R^2, veri setinde yer almayan örneklerin model tarafından ne kadar iyi tahmin edileceğinin bir ölçütüdür ve aynı zamanda R^2, verilerin yerleştirilmiş regresyon hattına ne kadar yakın olduğunun istatistiksel bir ifadesidir. 0 ile 1 arasında bir değer aralığını sahiptir. 1'e ne kadar yakınsa modelin tahmin yeteneğinin iyi olduğundan söz edilebilir [80]. Parlatma kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve harcanan enerjinin regresyon denklemleri için R^2 değerleri sırasıyla %99.95, %97.7 ve %97.59 olarak başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Regresyon denklemleri NSGA-II genetik algoritmasında amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış ve parlatma kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve harcanan enerjiyi minimize etmek amacıyla Şekil 2.14'te verilen algoritma kurulmuştur. NSGA-II'nin popülasyon büyüklüğü 50 olarak belirlenmiş, 50 sonuç çıktısı istenmiş ve maksimum nesil sayısı ise 20000 olarak seçilmiştir. Şekil 3.8'de çalıştırılan modelin Pareto optimal çözümleri verilmiştir.



Şekil 3.8 Pareto optimal çözümler grafiği

Pareto optimal çözümlerinden nihai çözüm ya da çözümlerin seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Şekil 3.8'de verilen Pareto çözümleri içerisinden optimum sonuçların seçilmesi için çok kriterli bir karar verme yöntemi olan TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği) yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS yönteminde sonuçların ideal sonuca yakınlıklarını belirlemeden önce etkinliklerinin ağırlıkça etkinlik dağılımları hesaplanmalıdır. Etkinlik dağılımları tüm sonuçlar için eşit verilebileceği veya araştırmacı tarafından tecrübeye dayalı belirlenebileceği gibi entropi yöntemi kullanılarak da belirlenebilir. Bu çalışmada, entropi yöntemi kullanılmış olup sonuçların ağırlıkça etkinlik dağılımları aşağıda verilen eşitliklerden hesaplanmıştır.

1. Adım: Karar matrisinin standartlaştırılması,

$$r_{ij} = \frac{\min_j (x_{ij})}{x_{ij}} \tag{3.4}$$

Burada r_{ij} değeri *j.* kriter için x_{ij} değerinin standartlaştırılmasını ifade eder.

2. Adım: Karar matrisinin standartlaştırılmış değerlerinin normalizasyonu,

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}} \tag{3.5}$$

3. Adım: Her sonuç için etkinlik dağılımlarının hesaplanması,

$$H_j = -\frac{\sum_{i=1}^{m} t_{ij} \times \ln(t_{ij})}{\ln(m)} \tag{3.6}$$

4. Adım: Sonuçların ağırlıkça etkinlik dağılımlarının hesaplanması,

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^{n} (1 - H_j)} \tag{3.7}$$

Sonuçların ağırlıkça etkinlik dağılımları parlatma kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve harcanan enerji için sırasıyla 0.331, 0.334 ve 0.335 olarak hesaplandıktan sonra TOPSIS yöntemi uygulanmış olup yönteminin işleyişi şu şekildedir:

1. Adım: Karar matrisinin normalizasyonu,

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m} x_{kj}^2}} \qquad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{3.8}$$

Burada r_{ij} değeri *j.* kriter için x_{ij} değerinin normalleştirilmesini ifade eder.

2. adım: Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinin hesaplanması,

$$v_{ij} = w_j * r_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{3.9}$$

Burada w_j, j. kriterin ağırlığıdır.

3. adım: Negatif ve pozitif ideal çözümün hesaplanması,

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} \tag{3.10}$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} \tag{3.11}$$

Burada A^+ pozitif ideal çözümü, A^- ise negative ideal çözümü sembolize eder. Burada faydalı j kriterinin alacağı değerler: $v_j^+ = maks(v_{ij},\ i = 1,2, \dots, n)$ ve $v_j^- = min(v_{ij},\ i = 1,2, \dots, n)$'dir. Hesap kriteri olan j'nin alacağı değerler ise $v_j^+ = min(v_{ij},\ i = 1,2, \dots, n)$ ve $v_j^- = maks(v_{ij},\ i = 1,2, \dots, n)$'dir.

4. adım: Her alternatif çözümün pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklığının hesaplanması,

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{m=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^+\right)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{3.12}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{m=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^-\right)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{3.13}$$

Burada D_i^+ pozitif alternatif çözümün ideal çözüme olan mesafesini ve D_i^- negative alternatif çözümün ideal çözüme olan mesafesini sembolize eder.

5. adım: İdeal çözüme olan göreceli yakınlığın hesaplanması,

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ - D_i^-} \tag{3.14}$$

6. adım: Azalan C_i değerlerine göre alternatif çözümlerin sıralanması.

Parlatma kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve harcanan enerji için NSGA-II genetik algoritma kullanılarak minimize edilmesi ve elde edilen optimum ezerek parlatma parametrelerinin TOPSIS yöntemine göre sıralanarak seçilmesi sonucu elde edilen en iyi beş sonuç sırasıyla Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Sıralanan ve seçilen optimum sonuçlar

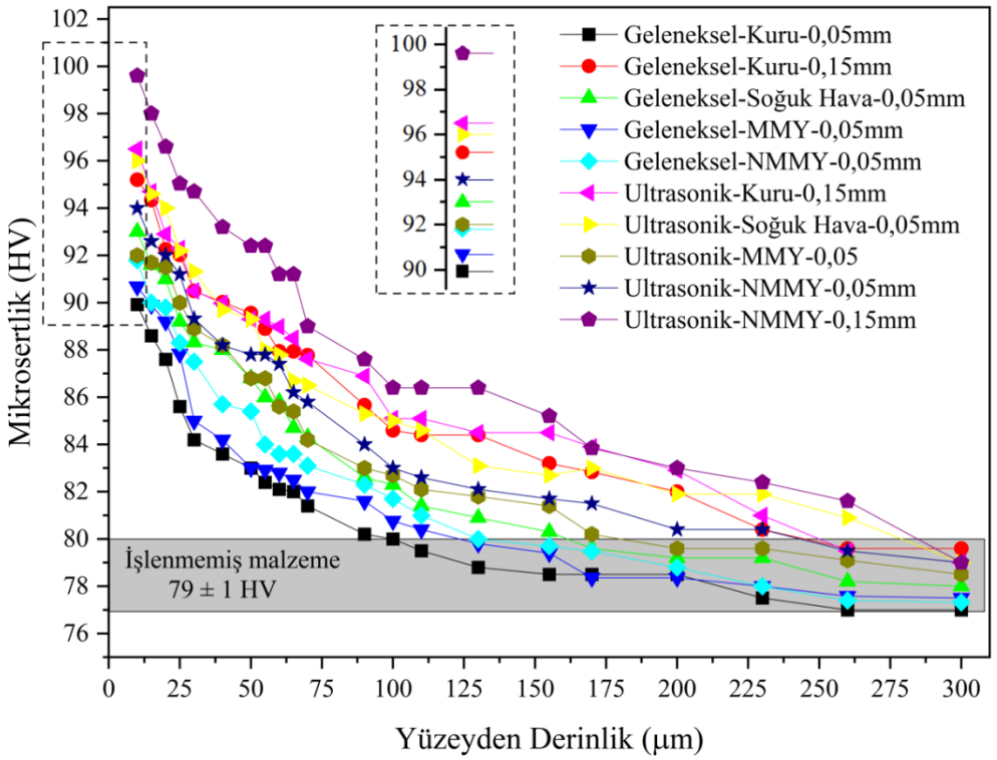
Sıra	Partlatma Tipi	Parlatma Koşulu	Ezme Derinliği (mm)	Parlatma Kuvveti (N)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Harcanan Enerji (Wh)
1	Ultrasonik	N-MMY	0.050	403.9	0.025	16.710
2	Ultrasonik	N-MMY	0.053	425.3	0.024	16.716
3	Ultrasonik	N-MMY	0.057	457.2	0.024	16.726
4	Ultrasonik	N-MMY	0.058	468.2	0.024	16.730
5	Ultrasonik	N-MMY	0.060	488.4	0.023	16.736

Farklı çalışmalarda da elde edilen sonuçlar incelendiğinde TOPSIS ile NSGA-II optimizasyon yöntemlerinin birlikte kullanıldığı, yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi amacı ile çoklu kriterlerin aynı anda optimum bir parametre kümesi bulmak için kullanıldığı ve bu bakımdan verimli olduğu bilinmektedir [81].

3.5 Mikrosertlik Sonuçları

Deney numunesi hammaddesi olan Al-6082 alüminyum alaşımının işlenmemiş sertlik değeri 79 HV olarak bilinmektedir. Genel olarak literatürde de ezme operasyonlarından sonra benzer alaşımların malzeme davranışı olarak sertleşmenin ve buna bağlı olarak da pekleşmenin ortaya çıktığı bilinmektedir [15, 18, 31, 56].

Seçilen 10 farklı numune için; sertleşmenin yüzeye yakın kısımlardan malzemenin iç kısımlarına doğru azaldığı Şekil 3.9'da yer alan grafikte her 25 mikron aralıkta aldığı değerlerden görülebilmektedir. Malzeme yüzeyinin 300 mikron derininden yüzeye kadar olan aralıktaki mikro sertlik durumları incelendiğinde 99,6 HV ile en yüksek sertlik değerinin ultrasonik yöntemde 0,15 mm ezme derinliği uygulanan MWCNT-NMMY soğutma/yağlama şartı altında elde edilen deney numunesinde tespit edilirken, aynı numune ezme işleminin bir diğer sonucu olarak pekleşmenin de %26,08 ile en yüksek noktada sonuçlandığı deney numunesi olmuştur. Mikro sertlik bakımından ikinci en sert deney numunesi ise ultrasonik yöntemde kuru parlatma ve 0,15 mm ezme derinliği uygulanan durumda elde edilmiştir.



Şekil 3.9 Tüm parlatma deneylerinin mikrosertlik (HV) – yüzeyden derinlik (µm) karşılaştırması

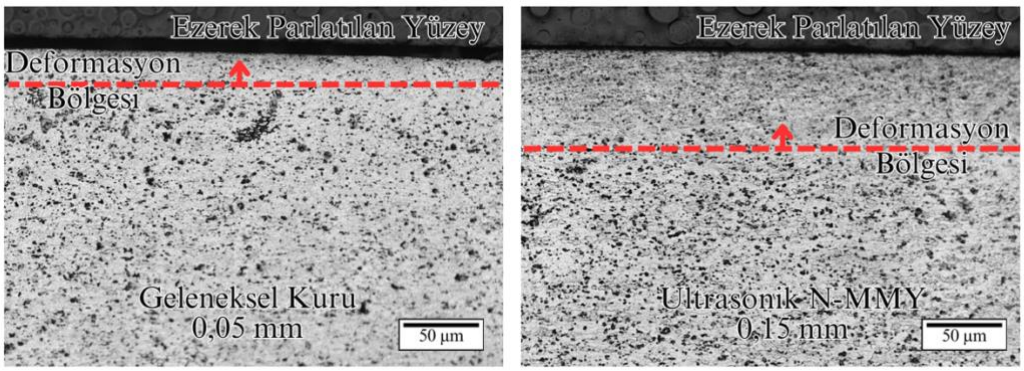
Seçilen numuneler arasında 89,92 HV ile sertleşmenin en düşük mikro sertlik değerini alan numune, geleneksel yöntemde kuru parlatma ve 0,05 mm ezme derinliği uygulanan deney ile elde edilmiştir. Doğru orantılı olarak pekleşmenin de %13,82 olarak en düşük değeri aldığı bu deney numunesi üzerinde bulunmuştur.

Diğer yandan soğuk hava uygulanarak ultrasonik yöntemde ve 0,05 mm ezme derinliği uygulanarak gerçekleşen deney numunesi incelendiğinde en yüksek üçüncü mikro sertliğe sahip deney numunesi olarak göze çarpmaktadır.

3.6 Mikroyapı Analiz Sonuçları

Ezerek parlatma sonucu deformasyon bölgesi yani malzemenin yüzeye yakın olan kısımlarının daha küçük ve sık hal almış olduğu görülmektedir. Plastik deformasyonun olağan davranışı olarak birbirine yakın taneler ve daha yayvan uzun tanecikler elde edilebilmektedir. Bu şekilde pekleşmenin, sertliğin ve tokluğun arttığı bilinmektedir. Alüminyum gibi kolay şekil alabilen metal malzemelerde önemli olan yüzeye yakın iç yapıyı sertleştirilir ve pekleştirilirken iç kısımlara doğru herhangi bir mikro hasarın ortaya çıkmamasının sağlanmasıdır. Ultrasonik

titreşimler, yüzeyde mikroyapısal değişikliklere neden olarak, malzemenin akışını ve plastik deformasyonunu kolaylaştırır [79, 82, 83]. Bu süreç, yüzeydeki tepe noktalarını vadilere doğru iterek veya süpürerek yüzey pürüzlülüğünü azaltır ve daha düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlar [84]. Aynı zamanda, tane incelmesi ve kristal kafes bozulması gibi mikroyapısal iyileşmeler de gözlemlenir [83]. Literatürde yer alan çalışmaları doğrular nitelikte, ezerek parlatma operasyonları sonucunda geleneksel yönteme göre ultrasonik destekli yöntem ile daha yüksek deformasyon elde edildiği Şekil 3.10'da görülebilmektedir.

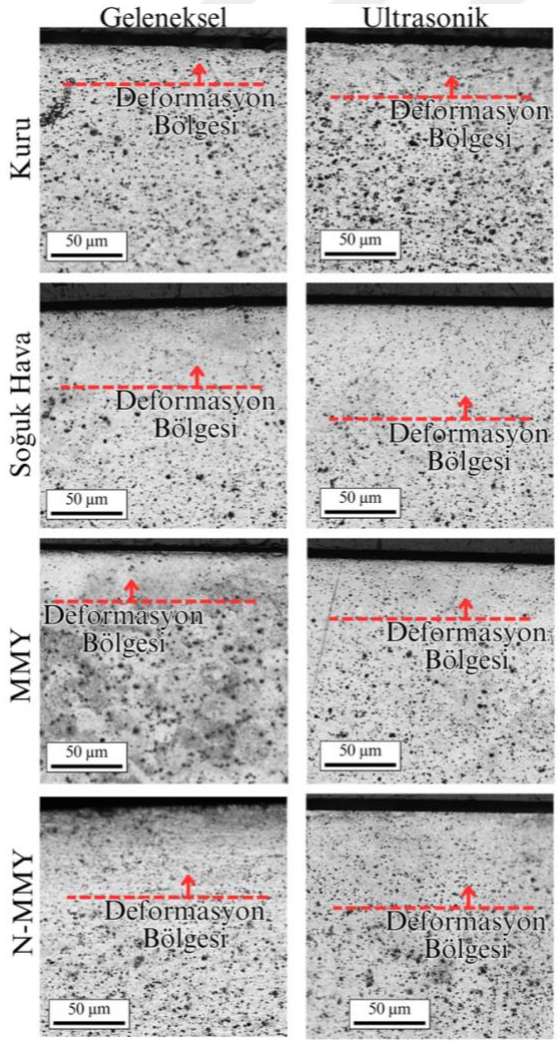


Şekil 3.10 Geleneksel kuru (0,05 mm ezme derinliği) ve ultrasonik destekli N-MMY (0,15 mm ezme derinliği) şartları altında ezerek parlatma uygulanmış Al-6082 numunelerinin deformasyon bölgelerinin 50 µm düzeyinde mikroskop görüntüleri

Diğer yandan geleneksel yöntemde kuru şartlarda 0,05 mm ezme derinliği uygulanan numunede en düşük deformasyon gözlenirken ultrasonik yöntemde N-MMY şartları ve 0,15 mm ezme derinliği uygulanan numunede ise en yüksek deformasyon miktarına ulaşılmış olup artan parlatma derinliği ile birlikte, ultrasonik destekli parlatma, yüzey tabakalarında şiddetli plastik deformasyona neden olacağı [67, 68, 82] ve bu durumun, tane incelmesine de yol açacağı [85, 86] çeşitli çalışmalarda da kanıtlanmıştır. Ayrıca, bu süreç yüzeyin pekleşmesini [72, 87] ve basma artık gerilmelerinin derinliğini artırır [88, 89]. Bu mikroyapısal değişiklikler, yüzeyin mekanik özelliklerini iyileştirirken genellikle daha düşük pürüzlülükle sonuçlanır [86, 90]. Özellikle, ultrasonik titreşimler, yüzeyin mikroyapısının ve elastik geri kazanımının modifikasyonuna katkıda bulunur [69].

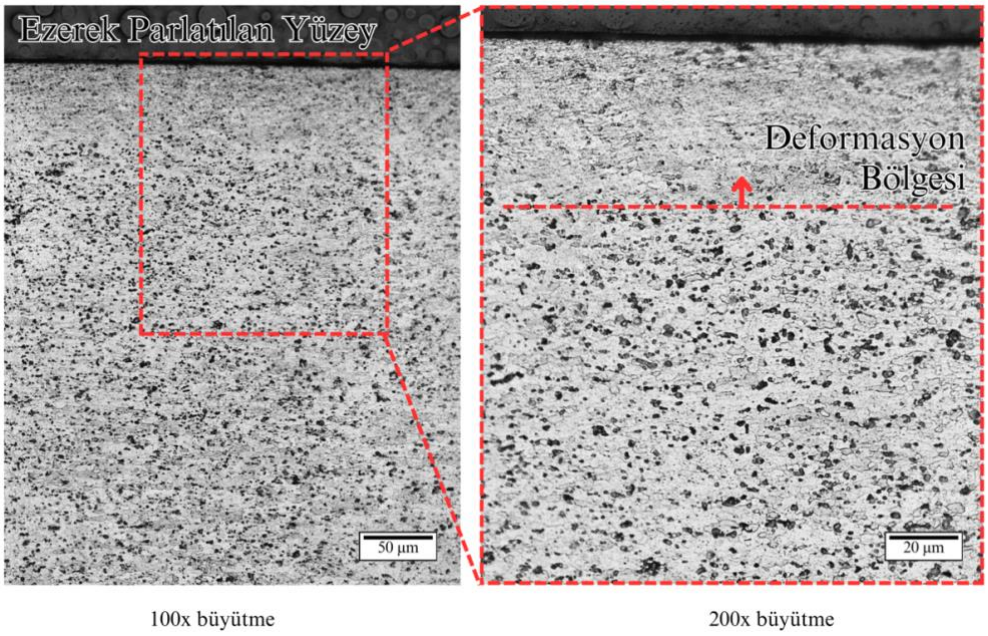
Ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma uygulamasının fiziksel temeli, akustoplastisite veya Blaha etkisi olarak bilinen olgudur. Bu etki, bir malzemenin deformasyonu sırasında içine yayılan akustik ve ultrasonik dalgaların, belirli bir gerinim seviyesine ulaşmak için gereken yarı-statik gerilimi azaltması prensibine dayanır. Bu geçici "metal yumuşaması" etkisi, malzemenin daha kolay plastik olarak deforme olmasını sağlar ve ardından kalıcı bir sertleşme etkisi yaratır [65]. Bu durum, ultrasonik titreşimlerin malzemenin derin katmanlarına etkilerinin daha fazla nüfuz etmesine olanak tanıdığından ötürü Al-6082 numunesinin daha fazla deformasyona uğramasını sağlamıştır.

Geleneksel ve ultrasonik destekli tüm deneylerin aynı şartlar için karşılaştırmaları Şekil 3.11'de görülmektedir.



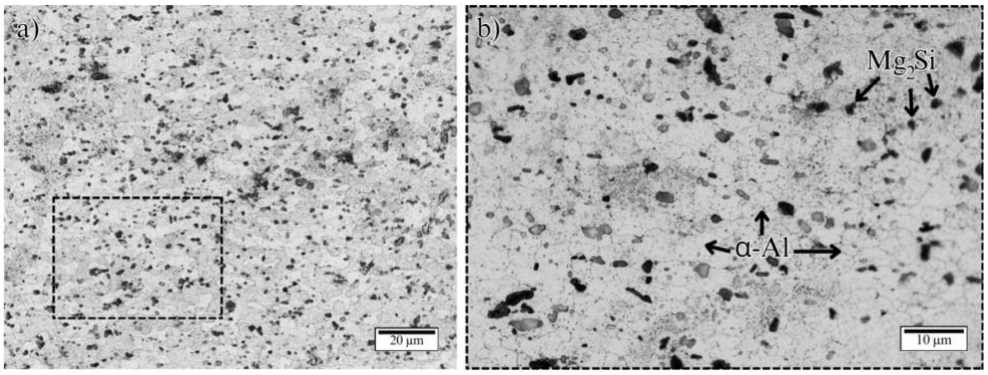
Şekil 3.11 Aynı şartlar için geleneksel ve ultrasonik destekli ezerek parlatma uygulanmış Al-6082 numunelerinin deformasyon bölgelerinin 50 µm düzeyinde mikroskop görüntüleri

Ezerek parlatma gibi plastik deformasyon uygulamalarında deformasyon bölgesinin malzeme yüzeyinden malzeme iç bölgelerine doğru oluşan genişliği ve bu bölge içerisindeki tane değişimleri mikroskop ile incelemeler sonucunda bariz bir şekilde görülebilmektedir. Şekil 3.12'de, Al-6082 numunesinin 100x yaklaştırma ve 200x yaklaştırma ile mikroskop altında oluşan görüntülerde yüzeye yakın bölgelerde deformasyon belirgin halde görülebilmektedir.



Şekil 3.12 Ezerek parlatma uygulanmış Al-6082 numunesine ait deformasyon bölgesinin 50 µm düzeyinde 100x yakınlaştırma ve 20 µm düzeyinde 200x yakınlaştırma ile elde edilmiş olan mikroskop görüntüleri

Plastik deformasyona uğramamış Al-6082 numunesi üzerinde içyapı incelemesi sonucunda alaşımın tüm bileşenleri büyük tanecikler halinde heterojen halde bulunmaktadır. Mikroskopta 500x yaklaştırma ile yer yer α-Al fazları ve koyu renkli Mg_2Si bileşikleri kristalleşmiş halde Şekil 3.13'de görülebilmektedir.



Şekil 3.13 Ezerek parlatma uygulanmamış Al-6082 numunesine ait a) 20 µm düzeyinde 200x yakınlaştırma ve b) 10 µm düzeyinde 500x yakınlaştırma ile elde edilmiş olan iç yapı (α-Al fazları ve kristalleşmiş Mg_2Si bileşikleri) mikroskop görüntüleri

4
SONUÇ

Üretimde bir son işlem olarak, ezerek parlatma uygulaması yüzey bütünlüğü ve mekanik özellikler açısından en verimli operasyonlardan birisi olup ultrasonik destekli ezerek parlatma işlemi ile soğuk hava, MMY gibi soğutucu/yağlayıcı ortamlar uygulandığında, geleneksel parlatma işlemine göre daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu deneysel çalışmada, Al-6082 alüminyum alaşımı üzerinde geleneksel ve ultrasonik destekli ezerek parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde oluşan etkiler ile yüzey pürüzlülüğü, parlatma kuvveti, enerji tüketimi, mikro sertlik ve mikro yapı açısından sonuçlar karşılaştırılmıştır.

- Tüm deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında parlatma kuvveti olarak ölçülen en yüksek kuvvet 1303 N ile geleneksel yöntemde RHVT soğuk hava şartlarında 0,15 mm ezme derinliği uygulanan deney ile elde edilmiş olup buna karşılık en düşük kuvvet ise ultrasonik destekli yöntemde MWCNT-NMMY şartlarında 0,05 mm ezme derinliği uygulanan deneyde 401,6 N kuvvet olarak tespit edilmiştir. En yüksek kuvvet elde edilen deney ile en düşük kuvvet elde edilen deney arasındaki parlatma kuvvetindeki iyileşme oranı %69,2 olduğu belirlenmiştir. Buradan ultrasonik titreşimlerin neden olduğu akustoplastik etkinin malzemenin daha kolay deforme olmasını sağlayarak geleneksel uygulamalara göre aynı yüzey iyileştirmesini daha düşük parlatma kuvvetleri ile elde edebildiği anlaşılmaktadır [65, 66]. Bu sonuçlar deformasyon esnasında yayılan ultrasonik dalgaların, yarı-statik gerilimi azaltarak malzemenin geçici olarak yumuşamasına [65, 70] ve plastik deformasyonun daha düşük kuvvetlerle gerçekleşmesine olanak tanıyabildiği [71] literatürde yer alan çalışmaları destekler niteliktedir. Ayrıca, geleneksel parlatma yalnızca statik yüke dayanırken ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma işlemi hem statik ön yüklemeyi hem de

ultrasonik titreşimlerden kaynaklanan dinamik yükü birleştirdiği bilinmektedir [67, 68]. Bu dinamik yük, mikroyapının modifikasyonuna katkıda bulunmakta ve yüzeyin elastik geri kazanımını sınırlamaktadır [69].

- Diğer yandan ezme derinliği artışı ile parlatma kuvvetleri de artmakta olup ezme derinliğinin 0,05 mm'den 0,15 mm'ye arttırılması parlatma kuvvetinde %64,8 oranında artışa neden olmuştur. Parlatma işleminde parlatma derinliğinin artmasıyla birlikte parlatma kuvvetinin de artması, temel olarak temas basıncı ve temas alanındaki artışla ilişkilidir. Derinlik arttıkça, parlatma topunun iş parçasına daha fazla nüfuz etmesi sonucu temas yüzeyinde oluşan maksimum temas basıncı yükselmekte ve bu durum, malzeme üzerinde daha fazla yerel deformasyona neden olmaktadır. Aynı zamanda, artan derinlik takım ile iş parçası arasındaki temas alanını genişleterek daha büyük bir yüzey etkileşimi yaratmaktadır. Parlatma kuvveti ise bu iki parametrenin, yani temas basıncı ile temas alanının çarpımına bağlı olarak belirlenmektedir [77].

- Ezme derinliği artışının kuvvet artışına etkileri benzer şekilde enerji harcamalarında da görülmüştür. Bu durumun sebebi parlatma kuvvetlerinde olduğu gibi temas basıncı ve temas alanındaki artışla ilişkilidir [77]. En yüksek enerji harcaması 0,017869 kWh ile geleneksel yöntemde RHVT soğuk hava şartlarında 0,15 mm ezme derinliği uygulanan deneyde elde edilmiş olup en düşük enerji harcaması ise ultrasonik yöntemde MWCNT-NMMY şartlarında 0,05 mm ezme derinliği uygulanan deneyde 0,016754 kWh ile elde edilmiştir. En iyi koşul en kötü koşula kıyasla %6,2 oranında iyileşme sağlamıştır. Enerji tüketimindeki azalmaya ultrasonik destekli uygulamanın malzemede akustik yumuşama etkisi [91] oluşturarak elde edilen daha etkin deformasyon kapasitesi sayesinde gerçekleştiği söylenebilir [65, 73, 72, 74, 75, 76]. Burada soğuk hava uygulamalarının hem parlatma kuvvetlerinin artışına hem de enerji harcamalarının artışına etki ettiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise RHVT uygulaması esnasında malzeme yüzeyine -10°C'de soğuk hava tatbik edilmesi sonucunda yüzey sıcaklığının oda şartlarından daha düşük sıcaklıkta olması nedeni ile termal

yumuşamanın azalması [36] ve bu sebeple daha zor plastik deformasyona uğramasından kaynaklanmaktadır.

- Ayrıca plastik deformasyon esnasında ultrasonik destekli uygulamalarda sürtünme kuvvetlerinin ve oluşan ısının azalması [28, 40, 41] ve MWCNT gibi nano parçacık katkılı NMMY soğutma/yağlama şartları altındaki uygulamalarda nano parçacıkların yuvarlanarak parlatıcı yüzey onarımı etkisi [78] sebepleriyle hem sürdürülebilirlik hem de uygulama sonrası beklenilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları açısından geleneksel uygulamalara nazaran daha verimli [37, 38] olduğu belirlenmiştir.

- Yüzey pürüzlülüğü sonuçları değerlendirildiğinde en düşük yüzey pürüzlüğü ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma prosesinde 0,15 mm ezme derinliği ve MWCNT-MMY parlatma koşulu kullanıldığında elde edilirken (0,014 μm) en yüksek yüzey pürüzlülüğü geleneksel ezerek parlatma prosesinde kuru ezme koşulu ve 0,05 mm ezme derinliği kullandığında elde edilmiştir (0,052 μm). En iyi ve en kötü koşul arasında %73,4 oranında fark bulunmaktadır. Geleneksel ve ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma koşulları kıyaslandığında ultrasonik titreşim kullanılması yüzey pürüzlülüğünü %20,1 oranında iyileştirmiştir. Benzer şekilde literatürdeki çalışmalar, ultrasonik destekli ezerek parlatmanın, geleneksel ezerek parlatmaya kıyasla yüzey pürüzlülüğünde önemli azalmalar sağladığını göstermektedir [72, 69]. Ultrasonik titreşim destekli ezerek parlatma prosesinde geleneksel ezerek parlatma prosesine göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmesinin temel sebepleri, statik ve dinamik yüklemelerin birleşimi, mikroyapı modifikasyonu ve yüzeyin elastik geri kazanımının sınırlanmasıdır.

- Mikrosertlik sonuçları değerlendirmelerine göre malzeme yüzeyinin 300 mikron derininden yüzeye kadar olan aralıktaki mikro sertlik 99,6 HV ile en yüksek sertlik değerinin ultrasonik yöntemde 0,15 mm ezme derinliği uygulanan MWCNT-NMMY soğutma/yağlama şartı altında tespit edilmiştir. Bu koşullarda, pekleşmenin %26,08 ile en yüksek noktada sonuçlandığı deney numunesi elde edilmiştir. En düşük sertleşme ise

geleneksel yöntemde kuru şartlarda 0,05 mm ezme derinliği uygulanan deney numunesinde 89,92 HV mikro sertlik değeri ile elde edilirken en düşük pekleşme %13,82 olarak bu deney numunesi üzerinde bulunmuştur. Parlatma derinliğinin artması ve paso sayısının artması [18, 32] ile mikrosertlik değerlerinin arttığı bilinmektedir. Ancak bazı çalışmalarda elde edilmiş olan sonuçlara göre paso sayısı artışının malzeme yüzeyinde pullanarak bozulmalara sebep olduğu [45] bu sebeple malzeme türü ve diğer parametrelerin [46, 47, 48] de etkileri her zaman göz önüne alınarak optimum kriterler ile operasyonların gerçekleştirilmesi gerektiği göz ardı edilmemelidir. Ayrıca dinamik yüklerin, mikroyapının modifikasyonuna katkıda bulunduğu ve yüzeyin elastik geri kazanımını sınırlayarak [69] mikrosertliğin de artışına etki ettiği bilinmektedir.

- Mikroyapı analizi sonuçları doğrultusunda en düşük deformasyon geleneksel yöntemde kuru şartlarda 0,05 mm ezme derinliği uygulanan numunede gözlenirken en yüksek deformasyona ise ultrasonik yöntemde N-MMY ve 0,15 mm ezme derinliği uygulanan numunede ulaşılmıştır. Artan parlatma derinliği ile birlikte, ultrasonik destekli parlatmanın yüzey tabakalarında şiddetli plastik deformasyona neden olduğu ve bu durumun tane incelmesine de yol açtığı çeşitli çalışmalarda kanıtlanmıştır [80, 84, 85]. Ayrıca, bu süreç yüzey iş sertleşmesini [72, 86] ve basma artık gerilmelerinin derinliğini de artırmaktadır [72, 86-88]. Ultrasonik titreşimler, yüzeyde mikroyapısal değişikliklere neden olarak, malzemenin akışını ve plastik deformasyonunu kolaylaştırmaktadır [80-82]. Aynı zamanda, tane incelmesi ve kristal kafes bozulması gibi mikroyapısal iyileşmeler de gözlemlenmektedir [82].

Plastik deformasyonun bir alt uygulaması olarak ezerek parlatma operasyonları alüminyum gibi kolay şekil alabilen malzemeler üzerinde pürüzlülük, mikro yapı, mikrosertlik, sürdürülebilirlik, enerji tüketimi ve oluşan kuvvetlerin araştırılabilmesi için oldukça uyumlu bir uygulamadır. Yapılan veya yapılacak yüzey iyileştirme çalışmaları için ezme derinliği, parlatma hızı, ilerleme hızı, soğutucu ve yağlayıcı kullanımı, yağlayıcının nano parçacık içermesi, paso

sayısı, ezme yönü, malzeme tavlama veya ön ısıtma çalışmaları ile ezerek parlatma operasyonlarını teknolojik anlamda farklı parametreler, yöntemler ve şartlar ile çeşitlendirerek araştırmalar genişletilebilir. Günümüzde birçok sektörde ve çözüm bekleyen alanda özellikle malzeme mekanik yapısını iyileştirecek, istenilen mikroyapı ve mikrosertlik değerlerine cevap verebilecek, malzeme yüzey pürüzlülüğünü azaltarak yorulma, korozyon, mikro çatlak, artık gerilmeler, yüksek veya düşük çevrim uyumluluğu ile kullanım aşamasında uzun ömür sunabilecek, hafif ve düşük hacimli malzemeler üzerinde yenilikçi çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, ezerek parlatma araştırmalarına, tüm malzeme türleri için farklı yaklaşımlar uygulanmak üzere ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, J. Wittebrood, P. D. Smet, A. Haszler, A. Vieregge, “Recent development in aluminium alloys for the automotive industry,” Mater. Sci. Eng. A 280, 37–49 (2000).

[2] D. Gohlke, J. Kelly, T. Stephens, X. Wu, Y. Zhou, “Mitigation of emissions and energy consumption due to light-duty vehicle size increases,” Transportation research part D 114 (2023) 103543, https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103543

[3] Y. Chen, Z. He, H. Li, D. Lu, Y. Song, L. Zhan, S. Pan, W. Liu, “Corrosion fatigue mechanisms and control technologies in aviation aluminum alloys: A critical review,” Chinese journal of aeronautics (2025), https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103496

[4] N. Kumar, S. Goel, R. Jayaganthan, H. -G. Brokmeier, “Effect of solution treatment on mechanical and corrosion behaviors of 6082-T6 Al alloy,” Metallography microstructure and analysis (2015) 411–422.

[5] N. S. M. El-Tayeb, K. O. Low, P. V. Brevern, “Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of aluminium 6061,” J. Mater. Process. Technol. 186 (1-3) (2007) 272–278.

[6] I. O. Tugay, “Effects of roller burnishing on the surface integrity and mechanical properties of duplex and 316L stainless steels,” Master of science thesis, Özyeğin University (2021).

[7] A. Sequera, C. Fu, Y. Guo et al., “Surface integrity of inconel 718 by ball burnishing,” Journal of materials engineering and performance, vol. 23, no. 9, pp. 3347-3353, (2014).

[8] A. Raza, S. Kumar, “A critical rewiev of tool design in burnishing process,” Tribology international 174 (2022) 107717, https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107717

[9] R. A. Antunes , M. C. L. de Oliveira, (2015), “Effect of surface treatments on the fatigue life of magnesium and its alloys for biomedical applications,” Surface modification of magnesium and its alloys for biomedical applications. http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-077-4.00009-7

[10] A. Travieso-Disotuar, R. Jerez-Mesa, M. Vilaseca, J. A. Travieso-Rodriguez “Surface integrity enhancement through vibration-assisted ball burnishing of maraging steel produced by selective laser melting,” Journal of Materials Research and Technology 39 (2025) 493–505

[11] Kato, Hirotaka & Ueki, Hiroto & Yamamoto, Keitaro & Yasunaga, Kazufumi. (2018). “Wear resistance improvement by nanostructured surface layer produced by burnishing,” Materials science forum. 917. 231-235. 10.4028/www.scientific.net/MSF.917.231.

[12]W. Hou, N. Lou, Z. Piao, H. Wang, Z. Cai, Z. Xing, Z. Piao, “Research on the microstructure and corrosion-wear resistance mechanism of Ti–6Al–4V alloy under cryogenic burnishing,” Journal of materials research and technology 35 (2025) 5854–5871, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.02.189

[13] A. Shokrani, P. J. Arrazola, D. Biermann, P. Mativenga, I. S. Jawahir, “Sustainable machining: Recent technological advances,” CIRP annals - manufacturing technology 73 (2024) 483-508, https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.06.001

[14] X. Xu, W. Zhu, X. Guo, C. Liang, Y. Deng, “Effect of ageing treatment process on the microstructure development and mechanical properties of 6082 Al alloy,” Journal of alloys and compounds 935 (2023) 167892, https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167892

[15] N. Kumar, R. Jayaganthan, G. M. Owolabi, “Grain refinement mechanism in 6082 Al alloy fabricated by cryo-multiaxial forging,” Materials science & engineering A 833 (2022) 142518, https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142518

[16] F. Pape, O. Maiss, B. Denkena, G. Poll, “Enhancement of roller bearing fatigue life by innovative production processes,” Industrial lubrication and tribology, vol. 71/8, (2019), p. 1003-1006.

[17] A. Rodríguez, L.N. López de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, J. Albizuri, “Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique,” Surface and coatings technology, vol. 206/11-12, (2021), p. 2817-2824.

[18] R. L. Murthy, B. Kotiveerachari, “Burnishing of metallic surfaces a review,” Precis. Eng. (1981);3:172–9. https://doi.org/10.1016/01416359(81)90010-6.

[19] A. M. Hassan, S. Z. Al-Dhifi, “Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process,” J Mater Process Tech (1999);96:73–80. https://doi. org/10.1016/S0924-0136(99)00254-X.

[20] G. Li, S. G. Qu, Y. X. Pan, X. Q. Li, “Effects of the different frequencies and loads of ultrasonic surface rolling on surface mechanical properties and fretting wear resistance of HIP Ti–6Al–4V alloy,” Appl Surf Sci (2016);389:324–34, http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.120.

[21] M. G. Yin, Z. B. Cai, W. Yue, Z. X. Zhang. “In: Effect of Ultrasonic Surface Rolling Process on Impact-sliding Wear Behavior of the 690 Alloy,” 147. Elsevier. Inc.; (2020).p. 105600. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.008.

[22] F. Jiao, S. L. Lan, B. Zhao, Y. Wang. “Theoretical calculation and experiment of the surface residual stress in the plane ultrasonic rolling,” J Manuf Process (2020);50: 573–80. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.058.

[23] D. Liu, D. X. Liu, M. Guaglian, X. C. Xu, K. Fan, S. Bagherifard. “Contribution of ultrasonic surface rolling process to the fatigue properties of TB8 alloy with body-centered cubic structure,” J Mater Sci Technol (2021);61:63–74. https://doi.org/ 10.1016/j.jmst.2020.05.047.

[24] Y. L. Zhang, F. Q. Lai, S. G. Qu, H. P. Liu, D. S. Jia, S. F. Du. “Effectofultrasonicsurfacerolling on microstructure and rolling contact fatigue behavior of 17Cr2Ni2MoVNb steel,” Surf Coat Technol (2019);366:321–30. https://doi.org/10.1016/j. surfcoat.2019.03.061.

[25] A.T. Bozdana, N. N. Z. Gindy, H. Li, “Deep cold rolling with ultrasonic vibrations—a new mechanical surface enhancement technique,” Int J Mach Tool Manuf (2005);45(6): 713–8. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.09.017.

[26] J. Zheng, H. Liu, Y. Ren, L. Zhu, “Effectoftwo-dimensionalultrasonicrollingon grain size and micro-hardness of 7075 aluminum alloy,” Int J Adv Manuf Technol (2020);106:503–10. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04640-y.

[27] Z. Zhou, Q. Zheng, C. Ding, et al. “Investigation of two-dimensional ultrasonic surface burnishing process on 7075–T6 aluminum,” Chin J Mech Eng (2021);34:19. https:// doi.org/10.1186/s10033-021-00540-z.

[28] T. M. Gavrilova, “Contact friction in the deformation zone during ultrasonic surface plastic deformation,” Russ Eng Res (2008);28(8):764–8. https://doi.org/10.3103/ S1068798X08080078.

[29] M. Keymanesh, M. Tang, K. Huang, H. Ji, Z. Chen, P. Fenga, J. Zhang, “Ultrasonic combined enhancement on hole entrance chamfers,” Tribology International 209 (2025) 110669, https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110669

[30] V. Sivalingam, Q. Zhou, N. S. Ross, S. Tiwari, B. Selvam, J. Sun, M. K. Gupta, “Identification of tool wear and surface morphology measurements in sustainable milling of Al 6082 hybrid metal matrix composite,” Journal of materials research and technology 27 (2023) 7570–7581, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.109

[31] B. Sachin, S. Narendranath, D. Chakradhar, “Effect of cryogenic diamond burnishing on residual stress and microhardness of 17-4 PH stainless steel,” Materials today: Proceedings 5 (2018) 18393–18399

[32] J. Caudilla, J. Schoopa, I. S. Jawahir, “Producing sustainable nanostructures in Ti-6Al-4V alloys for improved surface integrity and increased functional life in aerospace applications by cryogenic burnishing,” 26th CIRP life cycle engineering (LCE) conference: Procedia CIRP 80 (2019) 120–125, 10.1016/j.procir.2018.12.022

[33] J. L. Boynton, S. T. Hudson, R. Tabibzadeh, “Investigation of rotor blade roughness effects on turbine performance,” Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery 115 (3)(1993) 614–620.

[34] E. Meletlioğlu, “Ti-6Al-4V implant malzemesinin yorulma ve fretting yorulması davranışı üzerine ball burnishing mekanik yüzey işleminin etkisi,” Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, (2014)

[35] S. Fritsch, M. Scholze, M. F. -X. Wagner, “Cryogenic forming of AA7075 by aqual-channel angular pressing,” Mat.-wiss. u. werkstofftech. (2012), 43, No. 7, https://doi.org/10.1002/mawe.201200001

[36] B. Huang, Y. Kaynak, Y. Sun, I. S. Jawahir, “Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model,” 15th CIRP Conference on modelling of machining operations: Procedia CIRP 31 (2015) 1 – 6, doi:10.1016/j.procir.2015.03.097

[37] E. Duman, Y. F. Yapan, H. Salvi, M. A. Sofuoglu, N. Khanna, A. Uysal, "Investigation of ultrasonic vibration assisted orthogonal turning under dry and minimum quantity lubrication conditions and performing sustainability analyses," Journal of cleaner production 434 (2024) 140187, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140187

[38] U. Demir, Y. F. Yapan, M. U. Uysal, A. Uysal, "Sustainability assessment and optimization for milling of compacted graphite iron using hybrid nanofluid assisted minimum quantity lubrication method," Sustainable materials and technologies 38 (2023) e00756, https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00756

[39] E. Saatçi, Y. F. Yapan, M. U. Uysal, A. Uysal, "Orthogonal turning of AISI 310S austenitic stainless steel under hybrid nanofluid-assisted MQL and a sustainability optimization using NSGA-II and TOPSIS," Sustainable materials and technologies 36 (2023) e00628, https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00628

[40] E. Usluer, U. Emiroğlu, Y. F. Yapan, G. Kshitij, N. Khanna, M. Sarıkaya, A. Uysal, "Investigation on the effect of hybrid nanofluid in MQL condition in orthogonal turning and a sustainability assessment," Sustainable Materials and Technologies 36 (2023) e00618, https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00618

[41] A. Uysal, F. Demiren, E. Altan "Applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano MoS2 reinforced vegetable cutting fluid," Procedia - social and behavioral sciences 195 (2015) 2742 – 2747, doi:10.1016/j.sbspro.2015.06.384

[42] Y. Yürektürk, "Al-6082 alaşımının mikro ark oksidasyonunda elektrolit katkısı olarak karbon nanotüp etkileri," Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (2013)

[43] E. Alazcıoğlu, "Ezme işleminin nikelli alüminyum bronz (cupral 4m) yatak malzemesinin yüzey özelliklerine etkisi," Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, (2024)

[44] M. Okada, S. Suenobu, K. Watanabe, Y. Yamashita, N. Asakawa, "Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects," Mechatronics 29 (2015) 110–118, http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2014.11.002

[45] T. A. El-Taweel, M. H. El-Axir, "Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique," Int J Adv Manuf Technol (2009) 41:301–310, DOI 10.1007/s00170-008-1485-6

[46] H. B. Albar, "Ezerek parlatma parametrelerinin östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi," Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, (2023)

[47] E. C. Ulaş, "Çoklu dış yüzey ezme işleminin malzeme özelliklerine ve yüzey kalitesine etkisinin modellenmesi," Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, (2023)

[48] M. Akyüz, "Bilyeli haddeleme yönteminde işlem parametrelerinin AA7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması," Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, (2020)

[49] F. Emanetci, “Otomobillerde kullanılan ön süspansiyon sistemlerinden AL(6082) salıncak tasarımı, analizi ve ısıl işlem uygulaması,” Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, (2019)

[50] K. K. Pius, N. O. Ongwen, M. Mageto, V. Odari, F. M. Gaitho, “Mechanical Properties of Al–Mg–Si Alloys (6xxx Series): A DFT-Based Study,” Alloys (2023), 2, 213–226. https://doi.org/10.3390/ alloys2030015

[51] L. Setlak, R. Kowalik, T. Lusiak, “Practical use of composite materials used in military aircraft,” Materials (2021), 14, 4812. https:// doi.org/10.3390/ma14174812

[52] J. Woidasky, C. Klinke, S. Jeanvré, “Materials stock of the civilian aircraft fleet,” Recycling (2017), 2, 21; doi:10.3390/recycling2040021

[53] T. Dursun, C. Soutis, “Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys,” Materials and design 56 (2014) 862–871. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002

[54] B. Ömürlü, “AA7075 Alaşımının mikroyapı ve darbe tokluk özelliklerine yüzey haddeleme işlemi etkilerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, (2023)

[55] İ. O. Tugay, “Effects of roller burnishing on the surface integrity and mechanical properties of duplex and 316L stainless steels,” Master of science thesis, Özyeğin University Graduate School of Sciences and Engineering, İstanbul, Türkiye, (2021)

[56] M. Kaya, “Eklemeli imalat ile üretilen inconel 718 parçalarının ezerek parlatma yöntemiyle yüzey iyileştirme sürecinin modellenmesi ve deneysel doğrulanması,” Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (2021)

[57] S. Aşık, “Farklı parametrelerde perdahlama işleminin alaşımlı çeliklerin yüzey özelliklerine etkisi,” Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (2020)

[58] B. B. Aydoğan, “Ezme ile tamamlanan deliklerde ezme payının yüzey kalitesine etkisi,” Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, (2019)

[59] A. Sova, C. Courbon, F. Valiorgue, J. Rech, P. Bertrand, (2017). “Effect of turning and ball burnishing on the microstructure and residual stress distribution in stainless steel cold spray deposits,” Journal of thermal spray technology, 26 (8), 1922-1934.

[60] C. N. Tomé, C. T. Necker, R. A. Lebensohn, (2002), “Mechanical anisotropy and grain interaction in recrystallized aluminum,” Metall Mater Trans A 33, 2635–2648.

[61] R. X. Lia, R. D. Lia, Y. H. Zhaob, L. Z. Hec, C. X. Lia, H. R. Guanc, Z. Q. Hu, (2004). “Age-hardening behavior of cast Al–Si base alloy,” Materials letters, 58, 2096-2101.

[62] E. Saatçi, Y. F. Yapan, M. Uslu Uysal, A. Uysal, (2023)."Orthogonal turning of AISI 310S austenitic stainless steel under hybrid nanofluid-assisted MQL and a sustainability optimization using NSGA-II and TOPSIS," Sustainable materials and technologies,36, e00628.

[63] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation", 6(2), 182-197.

[64] S. Chakraborty, (2022). "TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis," Decision analytics journal, 2, 100021

[65] R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez, G. Gomez-Gras, J. Lluma-Fuentes, (2018). "Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool," Journal of materials processing technology, 257, 203–212.

[66] F. Li, W. Xia, Z. Zhou, (2010). "Kinematic analysis of the roller ultrasonic vibration burnishing," IEEE ICCA 2010, Xiamen, China, 2010, pp. 568-572

[67] R. Teimouri, S. Skoczypiec, (2022a). "Simulation of gradient grain size and hardness in ultrasonic burnishing process through multi-physics of contact mechanic and microstructure evolution," Mechanics of materials, 174, 104463.

[68] R. Teimouri, S. Skoczypiec, (2022b). "Theoretical study including physic-based material model to identify underlying effect of vibration amplitude on residual stress distribution of ultrasonic burnishing process," Journal of manufacturing processes, 80, 116–131.

[69] S. Amini, A. Bagheri, R. Teimouri, (2018). "Ultrasonic-assisted ball burnishing of aluminum 6061 and AISI 1045 steel," Materials and manufacturing processes, 33(11), 1250–1259.

[70] Tsuchida, T., Huang, W., & Yan, J. (2024). Surface conditioning of zirconia ceramic by enhanced ultrasonic vibration-assisted burnishing. Production Engineering, 18(2), 353–366.

[71] R. Jerez-Mesa, J. Llumà, J. A. Travieso-Rodríguez, (2021). "Vibration-assisted ball burnishing," Encyclopedia, 1(2), 460–471.

[72] D. Sayadi, M. Bagheri, M. R. Khosrojerdi, M. Khajehzadeh, M. R. Razfar, (2024a). "2D Ultrasonic-Assisted burnishing to control surface integrity and electrochemical behavior of AA7075-T6 aluminum alloys," Journal of materials engineering and performance, 33(12), 5823–5835.

[73] M. S. Koçak, (2024). "Texture optimization of stainless steel alloys surfaces through vibration-assisted ball burnishing," Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain, (2024)

[74] X. Shen, X. Gong, B. Wang, J. He, C. Xu, G. Su, (2021). "Surface properties enhancement of Inconel 718 alloy by ultrasonic roller burnishing coupled with heat treatment," Archives of civil and mechanical engineering, 21(3).

[75] Z. Zhen-yu, G. Yu, Q. Zheng, G. Ma, S. Ye, C. Ding, Z. Piao, (2020). "Wear behavior of 7075-aluminum after ultrasonic-assisted surface burnishing," Journal of manufacturing processes, 51, 1–9.

[76] Z. Zhen-Yu, Z. Qiu-Yang, D. Cong, Y. Ju-Yu, P. Guang-Jian, P. Zhong-Yu, (2021). "Research on the promotion mechanism of surface burnishing process by two-dimensional ultrasonic vibration," Journal of materials research and technology, 13, 1068–1082. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.038

[77] R. Teimouri, S. Amini, (2019a). “Analytical modeling of ultrasonic burnishing process: Evaluation of active forces,” Measurement, 131, 654–663.

[78] O. Öndin, T. Kıvak, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım, (2020). “Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel,” Tribol Int 148, 106323.

[79] X. Shen, C. Zhang, H. Peng, C. Liu, Y. Zhang, (2022). “Achieving high surface integrity of Fe-based laser cladding coating by optimized temperature field-assisted ultrasonic burnishing,” Journal of manufacturing processes, 83, 270–280.

[80] S. Haoues, M. A. Yallese, S. Belhadi, et al. (2023). “Modeling and optimization in turning of PA66-GF30% and PA66 using multi-criteria decision-making (PSI, MABAC, and MAIRCA) methods: a comparative study,” Int. J. Adv. Manuf. Technol. 124, 2401–2421.

[81] Q. Liang, Y. Xu, P. Li, B. Xu, “Multi-objective Optimization and decision-making method for laser polishing process parameters of D2 die steel based on NSGA-II and TOPSIS-EWM,” J. Mater. Eng. Perform. 34 (12) (Jun. 2025) 11162–11176, https://doi.org/10.1007/s11665-024-09941-2.

[82] X. Shen, S. Ma, Z. Wang, Z. Yu, J. Zhang, X. Ma, F. Wei, (2024). “Multiscale mechanical performance evaluation of L-DED Ti6Al4V by novel ultrasonic burnishing (UB),” Journal of manufacturing processes, 124, 708–719.

[83] W. Huang, T. Tsuchida, J. Yan, (2024). “Surface morphology formation and subsurface microstructure evolution of zirconia in ultrasonic vibration-assisted burnishing,” Journal of materials processing technology, 333, 118586.

[84] C. Ma, M. T. Andani, H. Qin, N. S. Moghaddam, H. Ibrahim, A. Jahadakbar, C. Ye, (2017). “Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification,” Journal of materials processing technology, 249, 433–440.

[85] E. Velázquez-Corral, V. Wagner, R. Jerez-Mesa, J. Lluma, J. A. Travieso-Rodriguez, G. Dessein, (2023). “Analysis of Ultrasonic Vibration-Assisted Ball Burnishing Process on the tribological behavior of AISI 316L cylindrical specimens,” Materials, 16(16), 5595.

[86] Z. Wang, G. Chen, J. Wang, L. Jin, Z. Wu, F. Zhu, (2025). “Variable direction shear deformation induced strengthening mechanism of Ti-6Al-4V alloy treated by a novel ultrasonic milling-burnishing process,” Journal of manufacturing processes, 144, 294–310.

[87] Z. Liu, M. Yang, J. Deng, M. Zhang, Q. Dai, (2020). “A predictive approach to investigating effects of ultrasonic-assisted burnishing process on surface performances of shaft targets,” The international journal of advanced manufacturing technology, 106(9–10), 4203–4219.

[88] R. Teimouri, S. Amini, A. B. Bami, (2018). “Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6,” Measurement, 116, 129–139.

[89] R. Teimouri, S. Amini, (2019b). “A comprehensive optimization of ultrasonic burnishing process regarding energy efficiency and workpiece quality,” Surface and coatings technology, 375, 229–242.

[90] J. Zhao, Z. Liu, G. Liang, M. Lv, Y. Huang, D. Liu, X. Hao, (2021). "Characterization of microstructure and mechanical properties for Ti-6Al-4 V processed by rotary ultrasonic roller burnishing. Materials Characterization," 178, 111288.

[91] R. Jerez-Mesa, J. Travieso-Rodríguez, Y. Landon, G. Dessein, J. Lluma-Fuentes, V. Wagner, V. (2019). "Comprehensive analysis of surface integrity modification of ball-end milled Ti-6Al-4V surfaces through vibration-assisted ball burnishing," Journal of materials processing technology, 267, 230–240.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M. Yıldız, Y. F. Yapan, A. Uysal (2024). "Experimental Investigation of Traditional and Ultrasonic-Assisted Roller Burnishing Under Various Environments," 7th International conference on advances in mechanical engineering (ICAME 2024), 709-715, İstanbul, Türkiye

Projeler

1. M. Yıldız, Y. F. Yapan, A. Uysal, (2024). "Al 6082 Alaşımının Ultrasonik Ezerek Parlatılması ve Yüzey Bütünlüğü Analizi," Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye