



T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer ERDAŞ

HARDOX 500 ÇELİĞİNİN
FREZELENMESİNDE FARKLI KESME
KOŞULLARININ CRITIC-GRİ İLİŞKİSEL
ANALİZİ YÖNTEMİYLE ÇOK YANITLI
OPTİMİZASYONU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANİYE – 2025

T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARDOX 500 ÇELİĞİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI
KESME KOŞULLARININ CRITIC-GRİ İLİŞKİSEL
ANALİZİ YÖNTEMİYLE ÇOK YANITLI
OPTİMİZASYONU

Ömer ERDAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

OSMANIYE
OCAK - 2025

TEZ ONAYI

HARDOX 500 ÇELİĞİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI KESME KOŞULLARININ CRITIC-GRİ İLİŞKİSEL ANALİZİ YÖNTEMİYLE ÇOK YANITLI OPTİMİZASYONU

Ömer ERDAŞ tarafından Doç. Dr. Yusuf FEDAI ve Arş. Gör. Dr. Gökhan BAŞAR danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği/çokluğu ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Yusuf FEDAI
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şeref ÖCALIR
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, TÜ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ersin ÜNAL
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Eyyup TEL
Enstitü Müdürü, **Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

Bu tez çalışması, OKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: OKÜBAP-2023-PT2-010

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Ömer ERDAŞ



ÖZET

HARDOX 500 ÇELİĞİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI KESME KOŞULLARININ CRITIC-GRİ İLİŞKİSEL ANALİZİ YÖNTEMİYLE ÇOK YANITLI OPTİMİZASYONU

Ömer ERDAŞ

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yusuf FEDAI

Arş. Gör. Dr. Gökhan BAŞAR

Ocak 2025, 95 sayfa

Bu çalışmada, Hardox 500 çeliğinin kuru, Minimum Miktar Yağlama (MMY) ve Nano-MMY koşullarında frezelenmesinde elde edilen çıktılarının analizi yapılmış, çok kriterli karar verme yöntemleriyle optimizasyon süreci ele alınmıştır. Çalışmada üç farklı kesme hızı ve ilerleme miktarı kombinasyonu ile toplamda 27 deney gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, kuru kesme ortamında kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğüne belirgin etkileri olduğu; artan kesme hızının belirli bir seviyeye kadar yüzey pürüzlülüğünü azalttığı görülmüştür. MMY ve Nano-MMY uygulamaları, sürtünmeyi azaltarak daha düşük yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve ses seviyeleri sağlamıştır. Özellikle Nano-MMY, en düşük yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerlerini elde etmiş, böylece daha iyi yüzey kalitesi sunmuştur. ANOVA ve Regresyon analizleri, yüzey pürüzlülüğü, titreşim, sıcaklık ve enerji tüketimi üzerinde kesme parametrelerinin anlamlı etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle ilerleme hızı, yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerinde en yüksek katkıyı sağlamıştır. Enerji tüketimi analizlerinde, MMY ve Nano-MMY'nin kuru işleme kıyasla daha az güç ve enerji gereksinimi duyduğu belirlenmiştir. Ses deneylerinde, Nano-MMY'nin en düşük ses seviyelerini sağlayarak iş güvenliği ve operatör konforunu artırdığı gözlemlenmiştir. CRITIC yöntemiyle yapılan analizlerde yüzey pürüzlülüğü en önemli kriter olarak öne çıkarken, Gri İlişkisel Analizi (GİA) sonucunda en iyi performans Deney No 19'da ve 80 m/dk kesme hızı ve 0,1 mm/diş ilerleme miktarı koşullarında elde edilmiştir. Bu bulgular, Nano-MMY'nin Hardox 500 gibi sert malzemelerin işlenmesinde sürdürülebilir ve yüksek kaliteli bir çözümü sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: CNC Frezeleme, Hardox 500, Minimum Miktar Yağlama, Optimizasyon, Çok kriterli karar verme

ABSTRACT

MULTI-RESPONSE OPTIMIZATION OF DIFFERENT CUTTING CONDITIONS IN MILLING OF HARDOX 500 STEEL BY CRITIC-GREY RELATIONAL ANALYSIS METHOD

Ömer ERDAŞ

M.Sc., Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Yusuf FEDAI

Arş. Gör. Dr. Gökhan BAŞAR

January 2025, 95 pages

In this study, the outputs obtained from milling Hardox 500 steel under dry, Minimum Quantity Lubrication (MQL), and Nano-MQL conditions were analyzed, and the optimization process was conducted using multi-criteria decision-making methods. A total of 27 experiments were carried out with three different combinations of cutting speed and feed rate. The results indicated that cutting speed and feed rate significantly influenced surface roughness in dry cutting conditions; increasing cutting speed reduced surface roughness up to a certain level. MQL and Nano-MQL applications reduced friction, resulting in lower surface roughness, vibration, and noise levels. Notably, Nano-MQL achieved the lowest surface roughness and vibration values, thereby providing better surface quality. ANOVA and regression analyses revealed the significant effects of cutting parameters on surface roughness, vibration, temperature, and energy consumption. Among these, feed rate had the highest contribution to surface roughness and vibration. Energy consumption analyses showed that MQL and Nano-MQL required less power and energy compared to dry machining. In noise experiments, Nano-MQL demonstrated the lowest noise levels, enhancing occupational safety and operator comfort. In the analysis conducted using the CRITIC method, surface roughness emerged as the most critical criterion. The Grey Relational Analysis (GRA) determined that the best performance was achieved in Experiment No. 19, under the conditions of 80 m/min cutting speed and 0.1 mm/tooth feed rate. These findings demonstrate that Nano-MQL provides a sustainable and high-quality solution for machining hard materials such as Hardox 500.

Key Words: CNC Milling, Hardox 500 steel, Minimum Quantity Lubrication, Optimization, Multi criteria decision making



Çok kıymetli aileme...

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütölmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen danışman hocalarım Doç. Dr. Yusuf FEDAI ve Arş. Gör. Dr. Gökhan BAŞAR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, deneysel çalışmalarda emeklerini hiçbir şekilde esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Emre ÖZER hocama da teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma finansal olarak Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından desteklenmiştir. Çalışmalarımı tamamlayabilmem için laboratuvarında bana imkân sağlayan Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi'ne de çok teşekkür ederim.

Akademik hayatımın her aşamasında bana her konuda destek olan, bana inandığını sonuna kadar hissettiren, her zaman iyi ki varsın ve hayatımdasın dediğim sevgili eşim Tuğra ERDAŞ'a ve dünyaya gözlerini açmaları ile hayatımı anlamlandıran oğullarım Mehmet Türker ve Enes Miraç ERDAŞ'a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İTHAF SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. TALAŞLI İMALAT.....	7
2.1 Frezeleme.....	9
2.1.1 Frezelemede Kesme Koşulları.....	11
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	14
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	20
4.1 İş Parçası Malzemesi.....	20
4.2 CNC Tezgahı.....	21
4.3 Kesici Takım ve Takım Tutucu.....	21
4.4 Kuru, Minimum Miktarda Yağlama (MMY) ve Nano-MMY Koşullarında Frezeleme.....	23
4.5 Deney Tasarımı ve Kullanılan Kesme Parametreleri.....	27
4.6 Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi.....	30
4.7 Titreşimin Ölçülmesi.....	31
4.8 Sesin Ölçülmesi.....	32
4.9 Sıcaklığın Ölçülmesi.....	32
4.10 Güç ve Enerjinin Ölçülmesi.....	33
4.11 ANOVA (Varyans) Analizi.....	34
4.12 Regresyon Analizi.....	35
4.13 Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri.....	36
4.13.1 CRITIC Yöntemi.....	37
4.13.2 Gri İlişkisel Analizi (GİA) Yöntemi.....	38
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	41
5.1 Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi.....	41
5.2 Titreşimin Değerlendirilmesi.....	45

5.3	Sesin Değerlendirilmesi	49
5.4	Sıcaklığın Değerlendirilmesi	54
5.5	Güç ve Enerji Tüketiminin Değerlendirilmesi	59
5.6	Optimizasyon	65
5.6.1	ANOVA (Varyans) Analizi Sonuçları.....	66
5.6.2	Regresyon Analizi Sonuçları.....	69
5.6.3	CRITIC Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi	70
5.6.4	Gri İlişkisel Analizi Optimizasyon Sonuçları.....	74
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
	KAYNAKLAR	86
	ÖZGEÇMİŞ	95



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Deneyde kullanılan Hardox 500 çeliğinin kimyasal bileşimi	20
Çizelge 4.2. Deneyde kullanılan Hardox 500 çeliğinin mekanik özellikleri	20
Çizelge 4.3. Werte marka Mikro STN 15 model MMY cihazının teknik özellikleri	24
Çizelge 4.4. Karışım malzemesi yoğunlukları	26
Çizelge 4.5. Kesme parametreleri ve seviyeleri	27
Çizelge 4.6. Deney koşulları	28
Çizelge 4.7. Hesaplanan parametrelerin değerleri	30
Çizelge 4.8. Dailyaid marka DR100 model yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri.....	31
Çizelge 5.1. Deney sonrası ölçülen değerler ve ortalamaları.....	42
Çizelge 5.2. Deneyde ölçülen minimum, maximum ve ortalama titreşim değerleri... 48	
Çizelge 5.3. Deneylerde ölçülen minimum, maximum ve ortalama ses değerleri..... 51	
Çizelge 5.4. Frezeleme işleminde ısıdan etkilenen bölgelerin en yüksek sıcaklık değerleri.....	56
Çizelge 5.5. Deneylerde ölçülen güç ve enerji değerleri	60
Çizelge 5.6. Deneylerde hesaplanan talaş kaldırma hızı, işleme süresi, enerji tüketimi ve özgül enerji tüketimi değerleri	63
Çizelge 5.7. Yüzey pürüzlülüğü, Titreşim ve Ses için ANOVA sonuçları.....	66
Çizelge 5.8. Sıcaklık ve Güç için ANOVA sonuçları	67
Çizelge 5.9. Tüm çıktılar için Regresyon denklemleri ve belirtme katsayıları.....	69
Çizelge 5.10. Karar matrisi	71
Çizelge 5.11. İlişki katsayısı matrisi	72
Çizelge 5.12. ρ_{jk} matrisi	72
Çizelge 5.13. C_j, σ_j, w_j değerleri	73
Çizelge 5.14. Karar matrisi	74
Çizelge 5.15. Normalize edilmiş karar matrisi	75
Çizelge 5.16. Uzaklık matrisi.....	76
Çizelge 5.17. Gri ilişkisel katsayıları, GİD ve Sıralama değerleri.....	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Temel Tornalama Prensibi (Groover, 2010).....	7
Şekil 2.2. Delik Delme İşlemi.....	8
Şekil 2.3. Temel Frezeleme Prensibi a) Çevresel frezeleme ve b) Yüzey frezeleme (Groover, 2010).....	9
Şekil 2.4. Ünlversal Freze Tezgahları a) Yatay ve b) Dikey tip (Groover, 2010).....	10
Şekil 2.5. CNC Freze Tezgahı (Akkurt, 2012)	11
Şekil 2.6. Çevresel frezelemede yaklaşma mesafesi (Groover, 2010).....	12
Şekil 2.7. Alın frezelemede yaklaşma ve uzaklaşma mesefeleri (Groover, 2010)	13
Şekil 4.1. 200x100x25 mm boyutlarında Hardox 500 çeliği plaka.....	20
Şekil 4.2. Dik işlem tezgâhı	21
Şekil 4.3. Kesici takımın 3 boyutlu görünümü ve ölçüleri (TaeguTec Katalog).....	22
Şekil 4.4. TaeguTec marka APKT 1604 -RRE TT9080 kesici takım.....	22
Şekil 4.5. Üç kesici takım bağlanabilen kesici takım tutucusu	22
Şekil 4.6. Werte marka Mikro STN 15 model MMY yağlama cihazı	23
Şekil 4.7. Mikro yağlama cihazı lülesinin kesici takıma göre yerleştirilmesi	24
Şekil 4.8. OilO marka yer fıstığı yağı	25
Şekil 4.9. 5 nm kalınlığında 7 µm çapında grafen	25
Şekil 4.10. Hassas Terazi ve Mekanik Karıştırıcı	26
Şekil 4.11. Dailyaid marka DR100 model yüzey pürüzlülük cihazı ve ölçümü	31
Şekil 4.12. PCE marka VT 1300 model titreşim ölçme cihazı ve ölçümü.....	32
Şekil 4.13. PCE marka 322A ses seviye ölçme cihazı.....	32
Şekil 4.14. Testo marka 881 model termal kamera ve ölçümü.....	33
Şekil 4.15. HIOKI marka 3390 model güç analiz cihazı ve ölçümü	33
Şekil 5.1. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) grafiği	43
Şekil 5.2. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) grafiği.....	44
Şekil 5.3. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) grafiği	45
Şekil 5.4. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında ölçülen ortalama titreşim grafiği	46

Şekil 5.5. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında ölçülen ortalama titreşim grafiği	47
Şekil 5.6. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında ölçülen ortalama titreşim grafiği	47
Şekil 5.7. Deney 9’da cihaz yazılımından alınan grafik	49
Şekil 5.8. Deney 18’de cihaz yazılımından alınan grafik	50
Şekil 5.9. Deney 27’de cihaz yazılımından alınan grafik	50
Şekil 5.10. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında ölçülen ortalama ses grafiği	52
Şekil 5.11. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında ölçülen ortalama ses grafiği	53
Şekil 5.12. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında ölçülen ortalama ses grafiği	53
Şekil 5.13. Deney 9 koşulunda ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı.....	55
Şekil 5.14. Deney 18 koşulunda ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı.....	55
Şekil 5.15. Deney 27 koşulunda ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı.....	55
Şekil 5.16. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru ortamda iş parçasında oluşan en yüksek sıcaklık.....	57
Şekil 5.17. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY ortamda iş parçasında oluşan en yüksek sıcaklık.....	58
Şekil 5.18. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY ortamda iş parçasında oluşan en yüksek sıcaklık.....	59
Şekil 5.19. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında ölçülen güç ve enerji grafiği	61
Şekil 5.20. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında ölçülen güç ve enerji grafiği	61
Şekil 5.21. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında ölçülen güç ve enerji grafiği	62
Şekil 5.22. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında hesaplanan özgül enerji tüketimi grafiği.....	64
Şekil 5.23. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında hesaplanan özgül enerji tüketimi grafiği.....	64

Şekil 5.24. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında hesaplanan özgül enerji tüketimi grafiği.....	65
Şekil 5.25. Kontrol faktörlerinin tüm çıktılar üzerindeki % katkı oranları.....	68
Şekil 5.26. Deney numarasına göre GİD oranı grafiği.....	78



SİMGELER ve KISALTMALAR

<i>A</i>	Yaklaşma mesafesi	(mm)
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit	(-)
AlTiN	Alüminyum-titanyum-nitrür	(-)
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü	(-)
ANOVA	Varyans analizi	(-)
ÇKKV	Çok kriterli karar verme yöntemleri	(-)
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol	(-)
CRITIC	Criteria Importance Through Intercriteria Correlation	(-)
<i>D</i>	Freze çakısı çapı	(mm)
<i>d</i>	Kesme derinliği	(mm)
<i>E</i>	Enerji	(J)
<i>f</i>	İlerleme	(mm/diş)
<i>f_r</i>	İlerleme hızı	(mm/dk)
GİD	Gri İlişkisel Derece	(-)
GİA	Gri İlişkisel Analizi	(-)
<i>L</i>	Parça uzunluğu	(mm)
LN ₂	Sıvı azot	(-)
MCDM	Multi criteria decision making	(-)
MoS ₂	Molibden disülfür	(-)
MQCL	Minimum miktarda soğutma ve yağlama	(-)
MMY	Minimum miktarda yağlama	(-)
<i>N</i>	Dönme hızı	(dev/dak)
<i>n_t</i>	Freze çakısındaki diş sayısı	(-)
<i>P</i>	Güç	(W)
<i>R_a</i>	Yüzey pürüzlülüğü	(µm)
<i>R_{MR}</i>	Talaş kaldırma hızı	$\left(\frac{mm^3}{s}\right)$
<i>SE</i>	Özgül enerji	$\left(\frac{J}{mm^3}\right)$
<i>T_m</i>	İşleme süresi	(dk)
TOPSIS	Technique for order preference by similarity to ideal solution	(-)
<i>V</i>	Kesme hızı	(mm/dk)
<i>w</i>	Frezeleme genişliği	(mm)

1. GİRİŞ

Günümüzde Hardox 500 çeliği, çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. İnşaat sektöründe damperli kamyonlar, buldozerler ve ekskavatörler gibi ağır makinaların üretiminde kullanılır. Madencilik sektöründe ise patlatma fırınları, kırıcılar ve konveyör bantları gibi ekipmanlarda kullanılır. Geri dönüşüm endüstrisinde de parçalayıcılar ve balyalama makinelerinde yaygın şekilde görülür (Kamlesh Metal ve Alloy, 2024). Hardox 500 çeliği, alaşımlı bir çeliktir. Nikel, krom, mangan ve molibden gibi elementlerden oluşur. Bu elementler çeliğin sertlik, mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini artırmaya yarar. Ayrıca, bu çelik türü mükemmel kaynaklanabilirlik ve bükülebilirlik özelliklerine sahiptir, bu da imalat işlemlerini kolaylaştırır (Duc, vd., 2021). Hardox 500 çeliği, yüksek sertlik ve tokluk özelliklerini bir arada bulunduran, aşınmaya karşı son derece dirençli bir malzemedir. Ağır darbelere maruz kaldığında kalıcı deformasyon veya çatlama olmaksızın dayanım gösterir. Bu çeliğin çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanımı giderek artmaktadır. Ancak, Hardox 500 çeliği, zor işlenebilir malzemeler sınıfında yer almakta ve özellikle kuru kesme koşulları altında geleneksel kesici takımlar için ciddi bir zorluk teşkil etmektedir. Bu durum, düşük verimlilik ve yüksek işleme maliyetleri ile sonuçlanmaktadır (Minh, vd., 2017; Kang, vd., 2008).

Minimum miktarda yağlama (MMY), çevre dostu bir yağlama yöntemidir. Geleneksel yağlama yöntemlerinden farklı olarak, MMY'de kesme bölgesine çok az miktarda yağlama sıvısı püskürtülerek yağlama ve soğutma sağlanır. Bu yöntem, yağ tüketimini ve atık oluşumunu en aza indirirken, kesici takımın ömrünü uzatır ve işleme kalitesini artırmaya yardımcı olur (Cönger, vd., 2019; Singh, vd., 2023). MMY yöntemi, kesme sıvısı kullanımını minimize ederek çevre kirliliğini azaltarak aynı zamanda operatör üzerindeki olumsuz sağlık durumlarını en aza indirir (Dilipak, vd., 2021; Çağan, vd., 2018). MMY yöntemi, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini önemli oranda iyileştirir. AISI O2 çeliği üzerinde yapılan çalışmalarda, MMY kullanımı ile en yüksek takım ömrüne ve daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılmıştır (Cönger, vd., 2019; Kurşuncu, vd., 2017). MMY yönteminin farklı malzemeler üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Alüminyum 6061 alaşımı üzerinde yapılan çalışmalarda, MMY yönteminin nano MoS₂ katkılı kesme sıvısı ile kullanıldığında kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünde önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir (Cönger, vd.,

2019). Yine literatür incelendiğinde; Minimum miktarda yağlama, kuru ve yoğun kesme sıvısı kullanılan işlemler için alternatif bir çözüm olarak dikkat çekmekte ve yağ sisinin kesme bölgesine doğrudan püskürtülmesi yoluyla etkili bir yağlama sağlamaktadır. Bu yöntem, işleme performansını artırmada önemli bir rol oynamaktadır (Joshi, 2018). Ancak MMY tekniğinin en önemli sınırlamalarından biri, yetersiz soğutma etkisidir. Bu durum, işlem sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle zor işlenebilen malzemeler üzerinde kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır (Duc ve Ngoc, 2020).

Yeşil imalat, 1990'lı yıllarda ortaya çıkan ve sürdürülebilirlik odaklı bir üretim anlayışını ifade eden bir kavramdır. Bu yaklaşım, ekonomik hedeflerle yönlendirilen sistematik ve entegre bir model olarak tanımlanmaktadır. Yeşil imalat, tasarım aşamasından başlayarak üretim, kullanım ve nihai ürünlerin elden çıkarılmasına kadar tüm süreçlerde atıkların azaltılmasını ve ortadan kaldırılmasını hedefler. Bu kapsamda, çevresel etkilerin en aza indirilmesi için kaynakların etkin kullanımı ve atık yönetimi büyük önem taşır (Handfield, vd., 1997). Günlük yaşamda yeşil kavramı belirsizlik diye tanımlanır (Elsayed, 2006). Diğer bir ifadeyle Yeşil üretim, olumsuz çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlayan, yeni ürün stratejileri geliştirme ve üretim sistemleri için gerekli olan üretim ve tasarım süreçlerinde uygulanması gereken etkili bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla, üretim süreçlerinin tüm aşamalarında kaynakların etkin kullanımı ve atıkların azaltılması hedeflerini benimser. Ayrıca, tasarım aşamasında ürünlerin çevresel etkilerinin dikkate alınması, sürdürülebilir malzeme seçimleri ve enerji verimliliği gibi unsurlar, yeşil üretimin temel bileşenleri arasında yer almaktadır (Orji ve Wei, 2016). Yeşil imalat, ürün ve süreç tasarımıyla çevresel atık ve kirliliği azaltan bir üretim şeklinden oluşmaktadır. Yeşil imalatın temel hedefi sürdürülebilir olmasıdır (Maruthi ve Rashmi, 2015). İşletmeler, geçmişte yeşil üretimi genellikle devlet düzenlemelerinin zorlayıcı bir etkisi olarak değerlendirmişken, günümüzde bu yaklaşımı rekabet avantajı sağlamak amacıyla benimsemeye başlamışlardır. Daha derinlemesine bir analiz yapıldığında, yeşil üretimi benimsemeye yönelten başlıca faktörler arasında devlet düzenlemeleri, firma politikaları, yeşil teknolojilerin artan kullanılabilirliği, vergi teşvikleri ve rekabet avantajı gibi unsurlar sıralanmaktadır (Sangwan ve Choudhary, 2018). Minimum miktarda yağlama (MMY), modern imalat

süreçlerinde kullanılan, kesme ve işleme işlemlerinde soğutma ve yağlama sağlamak için düşük miktarda sıvı kullanarak yüksek verimlilik ve çevresel avantajlar sunan bir yöntemdir. MMY yöntemi, geleneksel soğutma ve yağlama yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiş olup, "yeşil imalat" olarak da adlandırılan çevre dostu üretim tekniklerinin bir parçasıdır. Literatürde MMY ve yeşil üretim üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kuru işleme, minimum miktarda yağlama (MMY) ve Nano-MMY işleme dahil olmak üzere yeşil üretime yönelik en son trendler ele alınmıştır. Gelişmiş yeşil üretimin önemini vurgulamak için bitkisel bazlı kesme sıvılarını kullanan iki MMY tabanlı işleme vaka çalışması sunulmuştur (Debnath, vd., 2019). Anandan, vd. (2020), çalışmalarında MMY çalışmasında optimum koşullar altında yüzey pürüzlülüğü %89 oranında azaldığını, sıcaklık %44 oranında azaldığını ve takımındaki aşınmanın da azaldığını tespit ederek yeşil üretimin etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Frezeleme, kesici takımlar kullanarak malzemenin yüzeyinden talaş kaldırma işlemidir. Hardox 500 gibi sert malzemelerin işlenmesi, kesici takımın çabuk aşınmasına ve kesme kuvvetlerinin artmasına neden olabilmektedir. Bu durum, işleme parametrelerinin dikkatlice seçilmesini gerektirir. Frezeleme işlemi sırasında minimum miktarda yağlama (MMY) kullanımı, çevresel ve ekonomik avantajlar sağlarken, kesici takım ömrünü de artırabilir (Bruce Engineering, 2024). Sert malzemelerin işlenmesi sırasında, frezeleme işlemi kesici takımlar üzerinde aşırı bir yüke neden olabilir. Bu da takım ömrünün kısılmasına yol açar. Literatürde, MMY kullanımının takım aşınmasını azalttığı ve yüzey kalitesini iyileştirdiği belirtilmiştir (Duc, vd., 2019). Son yıllarda, frezeleme işlemlerinde MMY sıvılarına nanopartikül eklenmesi üzerine yapılan çalışmalar, bu yöntemle elde edilen verimliliği daha da artırmıştır. Nanopartiküller, yağlayıcı sıvının soğutma kapasitesini artırarak kesme sırasında daha etkili bir performans sergilemektedir (Kumar, vd., 2023). Frezeleme işleminde en önemli kriterlerden biri, işlenen yüzeyin kalitesidir. MMY, işlenen yüzeyde pürüzlülüğü azaltarak daha kaliteli bir sonuç elde edilmesine olanak sağlar. Bu avantaj, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda büyük önem taşır. Frezeleme işlemi sırasında kesme kuvvetlerinin yüksek olması, işleme sıcaklığını artırarak takımın hızlı aşınmasına neden olur. MMY, hem kesme kuvvetlerini hem de sıcaklığı düşürerek işlem sırasında stabil bir ortam yaratır (Duc, vd., 2019).

Hardox 500 çeliğinin frezelenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek kesme kuvveti ve sıcaklıklar, takım aşınmasını hızlandırarak yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, MMY yöntemi ile yağlama yapılarak bu olumsuz etkiler minimize edilme şansı vardır. Ancak, MMY yönteminin etkin olması için doğru parametrelerin seçilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, frezeleme parametrelerinin optimizasyonu, çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir.

Çok kriterli karar verme yöntemleri (MCDM), birden fazla kriterin dikkate alınarak en iyi kararın verilmesini sağlayan bir yöntemler bütünüdür. Hardox 500 çeliğinin MMY ile frezelenmesinde, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, takım aşınması ve işleme süresi vb. kriterler göz önünde bulundurularak en uygun işleme parametreleri belirlenir. Yaygın olarak kullanılan MCDM yöntemleri arasında Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), TOPSIS, GRA ve VIKOR bulunmaktadır. Bu yöntemler, çeşitli kriterler arasındaki öncelik ve ağırlıkları belirleyerek, en uygun çözümün seçilmesini sağlar (Çağan, vd., 2018; Singh, vd., 2023). ÇKKV, birden fazla kriterin aynı anda dikkate alınması gerektiği durumlarda karar vericilere büyük avantaj sağlar (Hwang ve Yoon, 1981). Mühendislik, ekonomi, işletme ve birçok alanda karar alma süreçlerinde geniş bir uygulama alanına sahiptir (Triantaphyllou, 2000). TOPSIS metodu, alternatiflerin en iyi ve en kötü çözümlerle olan uzaklıklarını dikkate alarak sıralama yapmaktadır (Hwang ve Yoon, 1981). VIKOR yöntemi, uzlaşma çözümleri bulmayı amaçlayan bir MCDM yöntemidir ve alternatifler arasındaki dengeyi sağlama yeteneği ile bilinir (Opricovic ve Tzeng, 2004). Gri İlişkisel Analizi (GİA) ise, özellikle belirsizliklerin ve eksik verilerin bulunduğu karar problemlerinde etkili bir yöntem olarak ön planda bulunmaktadır (Julong, 1989).

Nanoteknolojinin özü, moleküler seviyede atomik kontrol sağlayarak tamamen yeni bir moleküler organizasyona sahip büyük yapılar yaratabilme yeteneğidir. Yaklaşık 1 nm (10^{-9} m) boyutundaki izole moleküller ya da yığın halindeki malzemelerle karşılaştırıldığında, 10^{-9} ila 10^{-7} m arasında değişen boyutlara sahip yapısal özellikler, önemli davranış değişiklikleri göstermektedir. Nanoteknoloji, nano ölçekteki boyutlarından dolayı fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde önemli iyileşmeler gösteren malzeme ve sistemleri konu alır. Hedef, bu özellikleri kullanarak atomik, moleküler ve süpramoleküler seviyelerde yapı ve cihazların etkin şekilde kontrol edilmesi, üretilmesi ve kullanılmasını sağlamaktır. Arayüzlerin stabilitesinin

korunması ve nanoyapıların mikron ve makroskopik ölçeklerde entegrasyonu da bu başarının anahtarıdır (National Nanotechnology Initiative, 2000). Boyut aralıkları 1-100 nm aralığında tozlar veya parçacıklar olarak ifade edilen nano parçacıklar, nano teknolojinin ve aynı zamanda nano boyutlu malzemelerin temelini oluşturur (Ateş, 2015). Nano malzemeler, malzeme biliminde çok ince boyutlarda (1 ila 100 nanometre) partiküller içeren malzemeler olarak bilinir. Bu malzemeler, küçük boyutları sayesinde geniş yüzey alanına sahip oldukları için hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri önemli ölçüde değişebilir ve bu özellikler onları çeşitli endüstriyel uygulamalarda cazip hale getirir. Özellikle nano yağlayıcılar ve soğutucu sıvılar gibi uygulamalarda, nano partiküllerin yağlama performansını artırarak sürtünme ve aşınmayı azalttığı, bu sayede yüzey kalitesini ve takım ömrünü iyileştirdiği görülmüştür (Duc, vd., 2021). Diğer alanlar olarak; biyomedikal ve sağlık alanlarında altın, gümüş ve demir oksit gibi metal ve metal oksit nanoparçacıkları, benzersiz optik, manyetik ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır. Demir oksit nanoparçacıkları, manyetik özellikleri sayesinde tıbbi görüntüleme (MRI) ve ilaç taşıma sistemlerinde dikkat çekicidir; bu özellikleri sayesinde vücut içinde dış manyetik alanlarla belirli bölgelere yönlendirilebilirler (Baig, vd., 2021; Harish, vd., 2022). Gümüş ve bakır nanoparçacıkları ise biyosidal etkileri nedeniyle tıbbi cihazlar ve sağlık ürünleri için antimikrobiyal kaplamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Salem, vd., 2022).

AISI 4340 malzemenin MMY ve Nano-MMY tornalanması üzerine yapılan çalışmada, ilerleme hızının daha düşük yüzey pürüzlülüğü üretimde kesme derinliğini takip eden önemli bir rol oynadığı, kesme hızının ise nano soğutma sıvısı kullanılarak MMY altında daha düşük yüzey pürüzlülüğü üretimde en az öneme sahip olduğu ve Nano-MMY'nın geleneksel taşma sistemine kıyasla en düşük yüzey pürüzlülüğünü gösterdiği gözlemlenmiştir (Patole ve Kulkarni, 2018). Nano-grafenle güçlendirilmiş bitkisel yağ bazlı kesme sıvısı kullanılarak AISI 321 paslanmaz çelik üzerinde yapılan delme işleminin deneysel olarak incelenmesi sonucunda Nano-MMY delmede yeterli miktarda grafen nanopartikülleri yağlama performansını artırabilir ve yağlama filminin kararlılığını artırabilir, bu da delme özelliklerini iyileştirir (Pal, vd., 2020). Inconel 718'in yüzey frezelenmesinin imalat ilerlemesi incelendiğinde, minimum miktarda yağlama (MMY) ve Nano-MMY'e dayalı yağlama sonucu; kesme

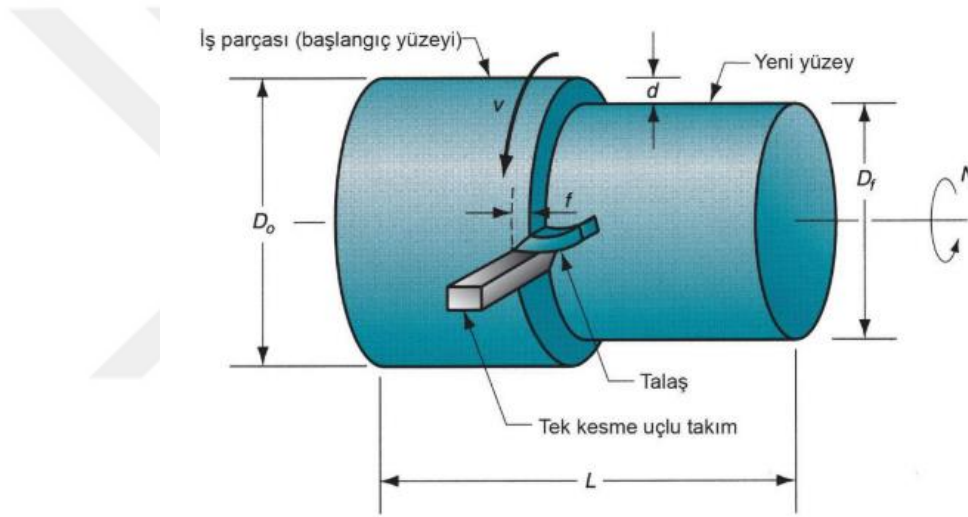
derinliğinin her iki yağlama ortamı için de en önemli işlem parametresi olduğunu ortaya koydu. Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık ve güç için sırasıyla %20,1, %14,7 ve %13,3 oranında azalma sağlayan Nano-MMY'nin daha iyi alternatif olduğunu gösterdi. Ayrıca, sonuçlar Nano-MMY'nin MMY'e (%70,1) kıyasla daha iyi arzu edirlilik başarısı (%71,3) ile sonuçlandığını ortaya koydu (ul Haq, vd., 2021). Ferritik paslanmaz çelik üzerine yapılan çalışmada, Nano grafen takviyeli kesme sıvısı ile yapılan MMY frezelemenin, kuru frezeleme ve saf kesme sıvısı ile yapılan MMY frezelemeye göre ilk flanş aşınması açısından avantajlara sahip olduğu görülmüştür (Uysal, 2016).

Bu çalışmanın amacı, Hardox 500 çeliğinin Kuru, MMY ve Nano-MMY yöntemi ile frezelenmesi sırasında ortaya çıkan verilerin, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak optimizasyonunu sağlamaktır. Bu optimizasyon süreci, hem üretim maliyetlerini mümkün olduğu kadar düşürmek hem de ürün kalitesini artırmak için önemli bir adım teşkil etmektedir. Çalışmada deneyler tam faktöriyel deney tasarımına göre yapılmıştır. Deney bulguları olarak yüzey pürüzlülüğü, titreşim, ses, sıcaklık ve enerji tüketimi verileri analiz edilmiştir. Deney parametreleri olarak 3 adet kesme hızı ve ilerleme miktarı baz alınarak, aynı zamanda frezelemenin MMY kısmında soğutucu yağ olarak %100 saf yer fıstığı yağı ve Nano-MMY kısmında ise grafen takviyesi ile 27 adet deney tamamlanmıştır. Hardox 500 çeliğinin frezelenmesinde her bir yanıtın deney sonuçları değerlendirilmiştir. Ardından ANOVA ve regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çok yanıtlı optimizasyon işlemi için ise bütünleşik CRITIC-GİA yöntemi uygulanmıştır. CRITIC yöntemi ile kriter ağırlıkları hesaplanmış ve ardından çok yanıtlı optimizasyon için GİA yöntemi kullanılmıştır. Kalite karakteristikleri üç boyutlu grafikler vasıtası ile yorumlanmıştır. Kalite karakteristiklerinin ağırlıkları; CRITIC metodu ile belirlenmiştir. Araştırma, hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar için değerli bilgiler literatüre katarak, sürdürülebilir ve verimli üretim süreçlerine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2. TALAŞLI İMALAT

Talaşlı imalat, ürünlere son geometrisini vermek için yaygın şekilde kullanılan imalat süreçlerinden biridir (Altıntaş, 2000). İstenen şekli elde etmek amacıyla malzemeyi kesmek için kesici bir takımın kullanıldığı geleneksel işlemdir. Talaşlı imalatta kullanılan en yaygın üç ana proses tornalama, frezeleme ve delme işlemidir (Groover, 2010).

Tornalama, Şekil 2.1'de gibi silindirik bir şekil oluşturmak suretiyle dönen bir iş parçasından malzemeyi atma işlemidir. Bunun için tek kesici kenarlı takım kullanılır (Groover, 2010).



Şekil 2.1. Temel Tornalama Prensibi (Groover, 2010)

Kendi ekseninde dönen sağlam bağlı iş parçasından, biçimlendirilmiş kesici takım yardımıyla talaş kaldıran tezgahlara torna tezgahı denir. Torna tezgahında genellikle silindirik, konik, alın tornalama ile birlikte vida, rayba, klavuz ve pafta çekme işlemleri yapılır (Bulut ve Özcan, 1991).

Özel aparat bağlanarak frezeleme, taşlama, profil ve konik tornalama, yay sarma gibi işlemler yapmak mümkündür. Farklı işler için farklı biçim ve boyutta birden fazla özel torna tezgahı geliştirilmiştir. Tesviye atelyelerinde genellikle universal torna tezgahı adı verilen tezgah kullanılır (Bulut ve Özcan, 1991).

Üniversal torna tezgahları muhtemelen bilinen en eski torna tezgahı tipleridir. Endüstride yaygın kullanılmasının sebebi hem maliyet hem de birçok iş parçasının talaşlı imalatını kolayca yapabilmeleridir.

Teknolojinin gelişmesiyle piyasaya çıkan CNC torna tezgahları, imalatın seri ve kolay şekilde yapılma kabiliyetini artıran tezgahlardır. Bu tezgahlarda her eksen için ayrı bir servo motor bulunur. Bu motorlar hareket yönleri itibari ile X,Y,Z olarak adlandırılırlar. Bilgisayarda üretilen kod sistemi kontrol ünitesi yardımıyla eksen hareketlerinin davranışlarına hükmeder (Akkurt, 2012).

Endüstride parçalardan talaş kaldırarak dairesel delikler oluşturma işlemine delme denir. Kolay işleme açısından parçalardan boşaltma yaparak fayda sağlamanın yanı sıra, parçaları birbirine kolay bağlantı olması için delme işlemi önemli yer arz etmektedir (Bulut ve Özcan, 1991). Delme işleminde dairesel ve eksenel hareketle Şekil 2.2'deki gibi kesici takımın parça üzerinde delik oluşturması esas alınır (Talaşlı İmalat İşlemleri ve Makineleri Tesviyecilik, 2006).



Şekil 2.2. Delik Delme İşlemi

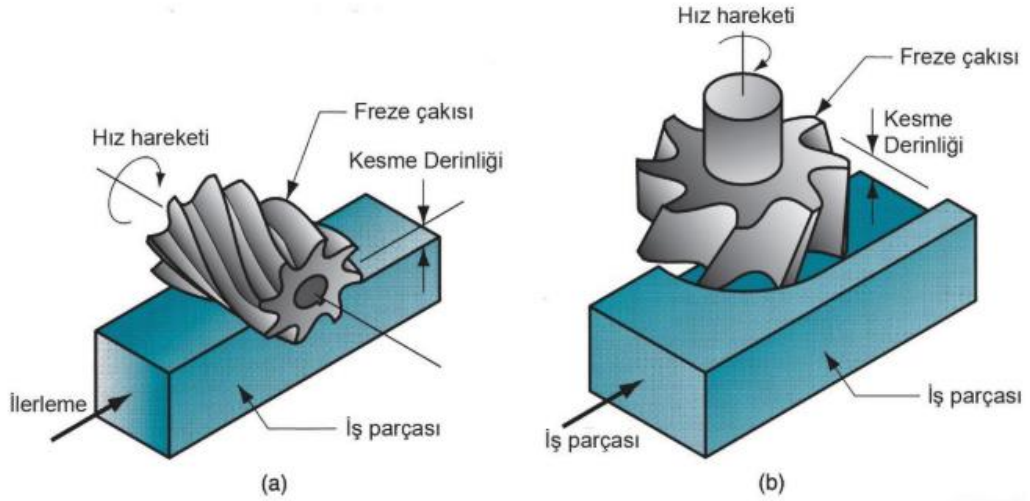
Tornalama, delik delme ve frezeleme işlemleri talaşlı imalatın en çok kullanılan yöntemlerindedir. Delik delme işleminin payı bu uygulamaların içerisinde %33 olarak belirlenmiştir (Tönshoff, vd., 1994).

2.1 Frezeleme

Frezeleme ile tornalama arasındaki en büyük fark, frezelemede kesici takım döner iş parçası sabit kalır, tornalamada ise iş parçası döner kesici takım üzerinden talaş kaldırır.

Çevresinde birden çok sayıda kesici ağız bulunduran silindirik bir aletin, dönme hareketiyle sabit iş parçası üzerinden talaş atma işlemine frezeleme denir (Bulut ve Özcan,1991).

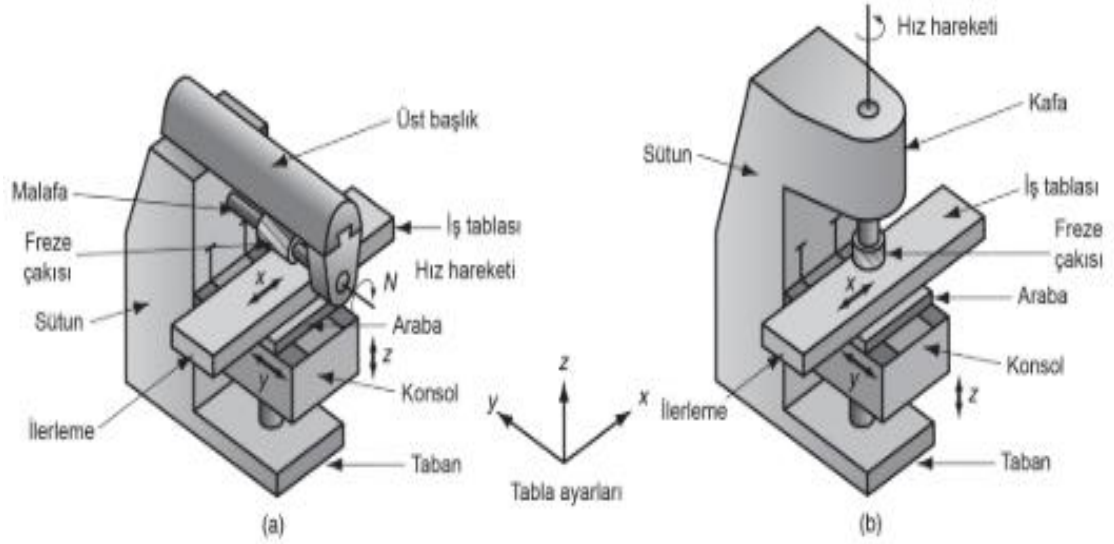
Frezelemede, birden fazla kesici kenarlı dönen bir takım ile bir düzlem veya düz yüzey oluşturmak için malzeme üzerinde ilerleme kaydedilir. İlerleme hareketinin yönü, kesici takımın dönme eksenine dik bir şekildedir. Hız hareketi, dönen freze kesici takımı tarafından sağlanmaktadır. Frezelemenin iki temel biçimi, Şekil 2.3(a) ve (b)'de gösterildiği gibi çevresel ve yüzey frezelemedir(Groover, 2010).



Şekil 2.3. Temel Frezeleme Prensipleri a) Çevresel frezeleme ve b) Yüzey frezeleme (Groover, 2010)

Torna tezgahlarında olduğu gibi freze tezgahları da universal ve CNC olarak iki gruba ayrılırlar.

Üniversal freze tezgahları yatay ve dikey olarak tip olarak ikiye ayrılırlar. Şekil 2.4'te yatay ve dikey universal freze tezgahı verilmiştir.

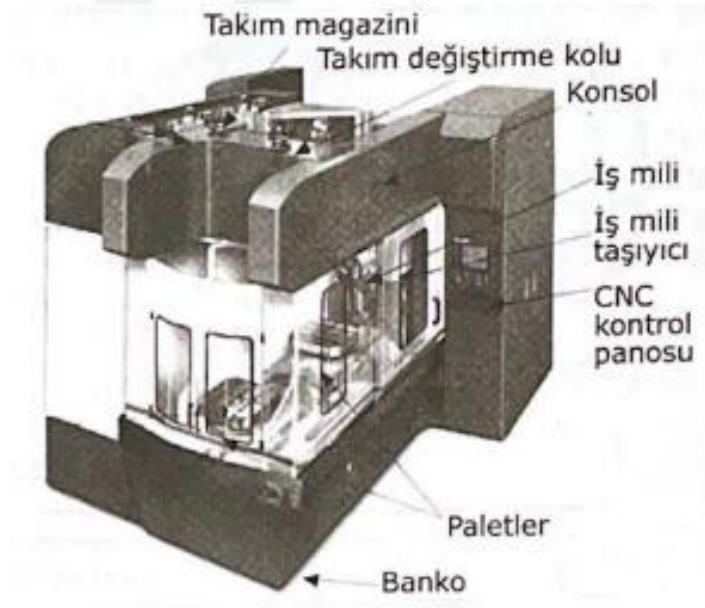


Şekil 2.4. Üniversal Freze Tezgahları a) Yatay ve b) Dikey tip (Groover, 2010)

Freze tezgahlarında çok fazla çeşitte işler yapılmaktadır. Örnek verecek olursak; düzlem yüzeyler, kam ve kavis gibi değişik eğrilerdeki yüzeyler, profil kanallar, faturalı yüzeyler, dişli çarklar, düzgün olmayan yüzeyler, silindirik iç ve dış yüzeyler v.b. işlemler, mümkün olan hassasiyetle ve seri bir şekilde yapılabilir (Bulut ve Özcan, 1991).

Gelişen teknoloji ile tıpkı torna tezgahlarında olduğu gibi üniversal freze tezgahının yerini giderek CNC freze tezgahları almıştır.

Şekil 2.5'de CNC tezgahı, minimum insan çabası ile tek bir kurulumda bilgisayar sayısal kontrolü ile birden fazla talaş kaldırma işlemini gerçekleştirebilen otomatikleştirilmiş bir takım tezgahıdır (Groover, 2010).



Şekil 2.5. CNC Freze Tezgahı (Akkurt, 2012)

2.1.1 Frezelemede Kesme Koşulları

Kesme hızı, bir freze kesicisinin dış çapında belirlenir. Bu hız, öğrenilmesi gereken bir formül kullanılarak iş mili dönme hızına dönüştürülebilir:

$$N = \frac{V}{\pi \cdot D} \quad (2.1)$$

Frezelemede ilerleme genellikle kesici diş başına ilerleme olarak verilir; talaş yükü olarak sayılan bu değer, her bir kesici kenar tarafından oluşturulan talaşın boyutunu temsil etmektedir. Bu, fener mili hızı ve kesici üzerindeki diş sayısı dikkate alınarak ilerleme hızına dönüştürülebilir: (Groover, 2010)

$$fr = N \cdot n_t \cdot f \quad (2.2)$$

burada fr = ilerleme hızı, mm/dk (inç/dak); N = devir, devir/dak; n_t = çakıdaki diş sayısı; ve f = talaş yükü, mm/diş (inç/diş) (Groover, 2010).

İlerleme hızının kesme alanıyla çarpımı sonucu birim zamanda kaldırılan talaşın hacmini (R_{MR}) çıkarır. Buna göre birim zamandaki talaş hacmi:

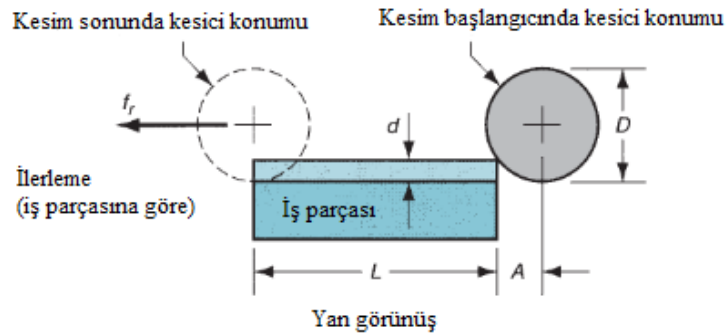
$$R_{MR} = w \cdot d \cdot f_r \quad (2.3)$$

R_{MR} : $\frac{mm^3}{dak}$, w: kesme genişliği (mm), d: kesme derinliği (mm)

Şekil 2.6’da gösterildiği gibi buradaki eşitlik freze çakısının mevcut iş parçasına yaklaşma mesafesini (A mesafesi) ihmal eder. Frezeleme için gerekli işleme süresi hesaplanırken bu mesafeyi dikkate almak gerekir. Şekil 2.6’daki geometriden çevresel frezeleme için çıkan formül ise:

$$A = \sqrt{d(D - d)} \quad (2.4)$$

$$\text{Frezeleme süresi } (T_m): \frac{L+A}{f_r} \quad (2.5)$$



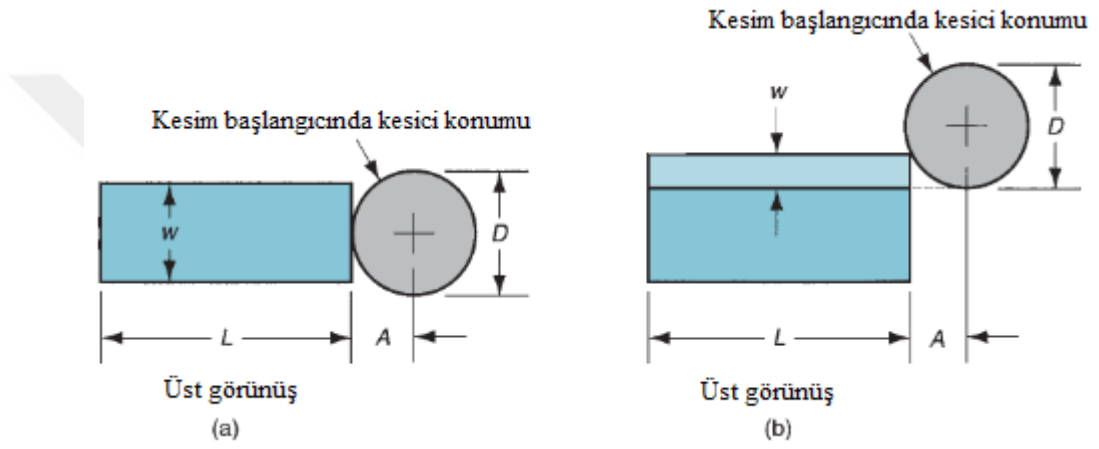
Şekil 2.6. Çevresel frezelemede yaklaşma mesafesi (Groover, 2010)

Bu durum alın frezelemede ise hem yaklaşma hem uzaklaşma mesafeleri göz önünde blundurulmalıdır. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi alın frezelemede iki farklı durum meydana gelebilir. Mevcut her iki pozisyonda da bu mesafeler eşittir ($A=0$). İlk durumda freze çakısının merkezi parça yüzeyinin ortasıyla çakışıktır ve her iki mesafe

durumuda freze çakısının yarıçapına eř değerdir. İkinci durumdaysa akı tam çap değilde belli bir w genişliğinde talaş kaldırır (Groover, 2010). Bu durumda:

$$A = 0 = \sqrt{w(D - w)} \quad (2.6)$$

$$T_m = \frac{L+2A}{f_r} \quad (2.7)$$



Şekil 2.7. Alın frezelemede yaklaşma ve uzaklaşma mesefeleri (Groover, 2010)

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışması ile ilgili literatürde daha önce yapılan çalışmalar ele alınıp incelenerek kısa değerlendirmeler yapılmıştır.

Duc, vd. (2021), çalışmalarında, çok küçük miktarda kesme yağı kullanan minimum miktar soğutma ve yağlama (MQCL) tekniğinin, Hardox 500 çeliğinin sert frezeleme sürecine uygulanmasını teşvik etmişlerdir. Ayrıca, doğal biyolojik olarak çözünebilen bir yağ olan pirinç kepeği yağı, Al₂O₃/MoS₂ hibrit nanofluid'in temel sıvısı olarak kullanmışlardır. ANOVA analizi, nanoparçacık konsantrasyonu, kesme hızı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemek için kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, iyi bir yüzey kalitesi sağlandığını ve kesme hızının, MQCL sistemi ve Al₂O₃/MoS₂ hibrit nanofluid'in daha iyi soğutma ve yağlama etkileri nedeniyle 140 m/dk'ya (önerilen değerlerin yaklaşık 2.55–2.80 katı) önemli ölçüde artırıldığını göstermişlerdir. Ayrıca, işlenmiş yüzeyin mikroyapısı, Al₂O₃/MoS₂ hibrit nanofluid kullanılarak MoS₂ tribo filmi oluşumunu kanıtlamakta ve bu da hibrit nanofluid içindeki her tür nanoparçacığın etkinliğinin artırıldığını göstermişlerdir. Ayrıca, Hardox 500 çeliğinin işlenmesi için önemli teknik kılavuzlar sağlanmaktadır.

Uysal (2016), araştırmasında AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzeme, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir talaşlı imalat kapsamında nano MoS₂ parçacık takviyeli bitkisel kesme sıvısı kullanılan MMY yöntemi uygulanarak kaplamasız ve TiN kaplamalı WC kesici takımlarla frezelenmesini incelemiştir. Nano parçacık katkı oranı ve MMY akış hızının, frezelenmiş ferritik paslanmaz çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğüne etkileri araştırmıştır. Deneyler, karşılaştırma yapabilmek için kuru şartlarda ve saf ticari bitkisel kesme sıvısı kullanılan MMY yöntemi uygulanarak da tekrarlanmıştır. Nano akışkan MMY yönteminin kullanılmasıyla ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, nano parçacık miktarının arttırılmasıyla da yüzey pürüzlülük değerleri azaldığını tespit etmiştir. MMY akış hızı arttıkça ortama gönderilen kesme sıvısı/basınçlı hava karışım miktarının artmasından dolayı yüzey pürüzlülüğü azalmış ve yüzey kalitesinde iyileşme gözlemlenmiştir. MMY yöntemi kullanılarak TiN kaplamalı WC kesici takımlar ile frezeleme işlemi

sonucunda yüzey pürüzlülüklerinde TiN kaplamanın yüksek sertlik, aşınma direnci ve yağlayıcılık özelliklerinden dolayı azalma gözlemlenmiştir.

Rotella, vd. (2013), Ti6Al4V alaşımının kaplamalı kuru, MMY ve kriyojenik koşullarda kaplama uygulanmış kesici takımlar kullanarak çeşitli kesme ve ilerleme hızlarında ortaya çıkan sonuçlar üzerine odaklanmışlardır. Soğutma ortamlarının yüzey kalitesi ve ürün performansına etkisi, işlenmiş ürünün yüzey pürüzlülüğü, metalürjik özellikler, mikro yapısal durum, sertlik, tane inceltme ve faz dönüşümleri üzerinde çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda soğutma şartlarının yüzey kalitesini etkilediği, aşırı derecede soğutmanın genel olarak ürünün performansını artırma ve geliştirmedeki yararlarını belirtmişlerdir.

Tampu, vd. (2015), yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada frezeleme operasyonu yapılan bir yüzeyin kalitesinin farklı konsantrasyon ve farklı sıcaklıklarda kullanılan soğutma sıvısının etkisini analiz etmişlerdir. Bu analizi yapmak için MMY soğutma yöntemi kullanılmış, soğutucu akışkanın konsantrasyonunu değiştirmek için 3 farklı hacimsel oran (% 25 su % 75 emülsiyon, % 50 su ile % 50 emülsiyon, % 75 su ile % 25 emülsiyon) ve 3 farklı sıcaklık kullanılmışlardır. Elde edilen sonuçlarda; yüzey pürüzlülüğü soğutucu sıvının sıcaklık değişimleriyle ilişkilendirilebilir iken yüzey düzgünlüğü soğutma sıvısı sıcaklığı ve konsantrasyonunun her ikisi ile ilişkilendirildiği sonucuna varmışlardır.

Çakır ve Emiroğlu (2015), yapmış oldukları çalışmada iki farklı paslanmaz çelik (304 ve 430) FeCl₃ kimyasal aşındırıcısı ile kimyasal olarak işlenmişlerdir. Bu çalışma için iki farklı sıcaklıkta üç farklı derişik değeri seçmişlerdir. İşleme derinliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri deneysel bulgu olarak almışlardır. Sunuç olarak; 304 paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesi, işleme derinliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri dikkate alındığında 430 paslanmaz çeliğe göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Qin, vd. (2012), yapmış oldukları çalışmada bir Titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V malzemesinin yüksek hızlı frezelenmesinde MMY (minimum miktar yağlama)'nın etkileri ile kuru ve ıslak şartlardaki etkilerini karşılaştırmışlar. Tek faktörlü deneyde kesme kuvveti, delik pürüzlülüğü, takım ömrü ve kesme parametreleri arasındaki ilişki çeşitli soğutucu- yağlayıcı koşullarında incelenmiş, tüm soğutma-yağlama şartlarında yüzey aşınması, mikro ve termal çatlaklar ile baskın kesici takım aşınmaları olarak

ortaya çıktığını sonucuna varmışlardır. Kuru işleme sonucu elde edilen parametreler işlenebilirlik açısından en kötü sonuçları verdiği, MMY'nin frezeleme işlemlerinde kirliliği ve maliyeti azaltmasının sonucu olarak, sürekli akışla yapılan işlemin yerini alabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Kuntoğlu (2022), yapmış olduğu çalışmada, frezeleme işlemi sırasında çeşitli soğutma ve yağlama ortamlarının tribolojik etkisini sorgulayarak Hardox 500 çeliğinin işlenebilirlik indeksini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Bu doğrultuda, kuru, saf-MMY, geleneksel taşma ve LN₂ bazlı kriyojenik ortamlar, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve topografyası, kesme sıcaklığı ve talaş morfolojisi gözlenirken test etmiştir. Gözlemler ışığında şu çıkarımlara varmıştır. Görünüşe göre, kriyojenik ortam, diğer rejimlerle karşılaştırıldığında takım aşınma direncini, parçanın yüzey kalitesini ve talaş morfolojisini iyileştirerek kesme sırasında termal etkileri bastırmaktadır. Kuru rejime göre kriyojenik soğutma kullanılarak, flanş aşınmasında (%114), kesme sıcaklığında (%319) ve yüzey pürüzlülüğünde (%152) üstün bir iyileştirme elde edilmiştir. Elde edilen bulgular sürdürülebilir yağlama soğutma rejimlerinin tribolojik performansı çerçevesinde tartışılmıştır.

Majerik ve Danisova (2010), çalışmalarında Hardox 500 çeliğinin Pramet 8230 karbür takımları kullanarak yüzey frezelenmesinde deneysel test yöntemleri kullanmışlardır. Pramet 8230 ve 8240 ile yapılan bu deneysel sert yüzey frezeleme işlemi, 8230 karbür uçlarının kesme dayanıklılığının T = 223 dakika olduğunu, 8240'ın ise sadece T = 132 dakika olduğunu gözlemlemişlerdir; bu da 8240'a göre %68 daha fazladır. Her iki kaplamalı sert metal uç türü de, 46÷50 Rockwell sertliğine sahip Hardox 500'ün sert işleme teknolojisi uygulamaları için uygun olduğunu tespit etmişlerdir. 8240 da tercih edilir, ancak daha düşük kesme koşulları altında. Yüzey frezeleme işlemi, 8230 ve 8240 ile soğutucu olmadan da uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Bensaid, vd. (2021), yaptıkları çalışmada, Hardox 500'ün taşlanması için kullanılan soğutma modlarının malzeme işlenebilirliği, taşlanmış yüzey bütünlüğü ve çoklu geçişli mikro-kazıma aşınma direnci üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Üç mod deney edilmiştir: kuru taşlama, çözünür yağ ve kriyojenik soğutma modları. Sonuçlar, kriyojenik soğutmanın yüksek seviyelerde iş sertleşmesi ve basınçlı kalıntı gerilmeleri sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca, kriyojenik soğutmanın, Hardox 500'ün çoklu

geçişli mikro-kazıma aşınma direncini, polisajlı durum ve kuru veya çözünür yağ koşullarındaki taşlanmış yüzeylerle karşılaştırıldığında artırdığını bulmuşlardır. Kriyojenik soğutma ile üretilen aşınma hacimlerinin iyileşme oranları, sırasıyla 10 N ve 20 N yük uygulandığında polisajlı durum için üretilen hacimlerin %46 ve %63'ünü temsil etmektedir. Bu iyileşmeler, kazınmış yüzeylerin ve alt yüzeylerin bütünlükleri temelinde tartışılmışlardır.

Sultana ve Dhar (2022), çalışmalarında, MMY'nin temel fikirleri ve işlevleri ile tanıtımını yapmışlardır. Devamında, MMY'nin çeşitli işleme tekniklerinde özellikle sertleştirilmiş çelikler için uygulanmasını ele almışlardır. MMY'nin çeşitli modlarının tam bir değerlendirmesi sunulmuş, avantajları ve dezavantajlarıyla birlikte açıklamışlardır. Araştırmalara göre, Ana odak, sertleştirilmiş çelik işleme alanındaki mevcut MMY yenilikleri üzerindedir. Sonuç olarak, sert işleme sırasında, kesme bölgesindeki sıcaklık kritik öneme sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. MMY sırasında ince jet damlacıklarının uygun şekilde penetrasyonu, kesme bölgesi sıcaklığını azaltır ve işlenebilirliği (pürüzlülük, takım aşınması ve kesme kuvveti) artırır sonucuna ulaşmışlardır. Modern MMY yöntemleri, yüksek sıcaklıklarda MMY'nin soğutma performansını geliştirebilir: katı yağlayıcılar ile MMY, NanoMMY, MQCL (iyonik sıvılar ile), çift jet MMY, Cryo-MMY ve ultrasonik titreşim yardımcı MMY. NanoMMY, benzersiz özellikleri nedeniyle araştırmacıları etkilediği kanaatine varmışlardır.

Aslan, vd. (2022), yaptıkları çalışmada, Strenx 900 çeliğinin işlenmesi sırasında MMY teknolojisinin kuru koşullara karşı işleme kalitesindeki etkinliğini sürdürülebilirlik endeksi çerçevesinde incelemişlerdir. Yüksek dayanım ve sertlik özellikleri, bu çeliği zor işlenen bir malzeme haline getirerek kuru ve MMY ortamlarının performanslarını test etme fırsatı sunduğu kanısına varmışlardır. Deneysel verilerin sonuçları, MMY'nin önemli işleme özelliklerinin kalitesini artırmada üstün olduğu sonucunu gözlemlemişlerdir: yüzey pürüzlülüğü (%35'e kadar), flank aşınması (%94'e kadar), aşınma mekanizmaları, kesme enerjisi (%28'e kadar) ve kesme sıcaklıkları (%14'e kadar). Ayrıca, sürdürülebilirlik göstergelerinin ana başlıklarını analiz ettikten sonra, MMY kuru ortam ile aynı istenilirlik değerini sağladığını belirtmişlerdir.

Çelik (2018), çalışmasında talaşlı imalat operasyonları içerisinde önemli yer tutan frezeleme operasyonlarında minimum miktarda yağlama (MMY) şartlarının işlenebilirlik üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu kapsamda, MMY içine nano boyutlu katı yağlayıcı MoS₂ karıştırmış ve GGG-70 küresel grafitli dökme demir frezelemiştir. Yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş geometrilerini incelemiş ve özellikle nano-MoS₂'nin etkilerini araştırmıştır. Frezeleme deneyleri 300 m/dk kesme hızı, 0,2 mm/devir ilerleme ve 4 mm kesme derinliğinde yapmıştır. Kuru kesme, geleneksel soğutma, MMY ve 3 farklı oranda nano-MoS₂ katkılı MMY şartlarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz) değerleri, kesici takım aşınmaları ve talaş oluşumları incelemiştir. MMY sisteminde 3 farklı basınç ve 2 farklı debi değişken olarak belirlenmiştir. MMY sisteminde akışkan içerisine yağlama ve soğutma özelliklerini iyileştirmek için katılan nano- MoS₂'den olumlu sonuçlar almıştır. En düşük Ra değerinin 5 bar basınç, 160 ml/dak akış hızı ve MMY +% 0,5 MoS₂ püskürtme şartlarında 0,47 µm olarak ölçmüştür. Bu şartlarda % 45 civarında bir iyileşme elde edildiği sonucuna varmıştır. Katılan nano- MoS₂'yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını iyileştirici rol oynadığı kanaatine varmıştır.

Eksilmez (2021), yaptığı çalışmada, Hardox 500 çeliğinin farklı kesme geometrilerinde lazerle kesilmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt kerf genişliğine etkisi incelemiştir. Lazer kesme işlemi için deney tasarımı, Taguchi'nin L9 ortogonal dizisine göre yapmıştır. Deneylerde kesme parametreleri olarak; üç farklı odak noktası, üç farklı gaz basıncı ve üç farklı kesme seçmiştir. Ayrıca kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt kerf genişliği üzerine etkilerinin belirlenmesi için varyans (ANOVA) analizi yapmıştır. Hardox 500 çeliğinin lazerle kesilmesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü düz kesimde -0,5 mm odak noktasında, 0,9 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında 2,099 µm ölçmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülüğü yay kesimde 0,5 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında 4,795 µm ölçmüştür. ANOVA analiz sonucu, yüzey pürüzlülüğü üzerine düz kesimde en etkin kesme parametresi %53,33 ile odak noktası iken, yay ve V kesim için en etkin parametre sırası ile %66,01 ve %58,33 ile gaz basıncı sonucuna varmıştır. Lazerle düz, V ve yay kesimde sırası ile en düşük üst kerf genişliği sırası ile 5,06 mm, 5.12 mm ve 5.21 mm ölçmüştür. Bu değerler için lazer kesme parametresi olarak -0,5 mm odak noktası, 850 mm/sn kesme hızı ve 0,7

bar gaz basıncı olarak belirlemiştir. Üst kerf genişliği için ANOVA analizi sonucu, düz, V ve yay kesim için en etkin kesme parametresi sırası ile %50,21, %49,23 ve %49,21 odak noktası olarak belirlemiştir. Düz, V ve yay kesim kesim geometrilerinde en düşük alt kerf genişlikleri sırası 5,02 mm, 5,07mm ve 5.13 mm ölçmüştür. Alt kerf genişliği için ANOVA analizi sonucu, düz, V ve yay kesim için en etkin kesme parametresi sırası ile %51,18, %52,84 ve %50,80 odak noktası olduğu sonucuna varmıştır.

İynen, vd. (2020), yapmış oldukları deneysel çalışmada, AISI 4140 çeliğinin tornalanması sırasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne (Ra ve Rz) etkisi Taguchi yöntemi kullanılarak analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, Taguchi L9 3 farklı kesme hızında (100, 140 ve 180 m min⁻¹), 3 farklı ilerleme hızında (0,08, 0,12 ve 0,16 mm rev⁻¹) ve 3 farklı kesme derinliğinde (0,5, 0,9 ve 1,3 mm) tasarlamışlardır. Deneysel verilerin analizinde, S/N (sinyal/gürültü) oranları ve varyans analizi, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerine olan etkisini analiz etmek için kullanılmışlardır. S/N oranlarına göre Ra üzerindeki etki dereceleri sırasıyla büyükten küçüğe doğru ilerleme hızı (f), kesme hızı (V) ve kesme derinliğidir (a). Rz'de, kesme parametrelerinin etkilerinin sırasıyla f, a ve V olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra ve Rz) üzerindeki f'nin sırasıyla %99,34 ve %98,47'lik bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Srikant, vd. (2015), çalışmalarında, AISI 1040 çeliği işleyip ve kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklıklar vb. gibi farklı parametreler kaydetmişlerdir. Veriler, matematiksel regresyon ve Yapay Sinir Ağları (YSA) olmak üzere iki model oluşturmak için kullanılmışlardır. Modeller, etkinliklerini tahmin etmek için test etmişlerdir. YSA modelinin takım aşınmasını %8'den daha az hatayla tahmin edebildiğini bulunmuştur.

Yıldız ve Nalbant (2008), çalışmalarında kriyojenik bir soğutucu olarak sıvı nitrojen, malzeme çıkarma işlemlerinde uygulama yöntemleri ve kesici takım ve iş parçası malzeme özellikleri, kesme sıcaklığı, takım aşınması/ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal sapma, sürtünme ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri açısından ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, kriyojenik soğutma, kesme bölgesinde işleme sıcaklığının istenen şekilde kontrol edilmesiyle takım aşınmasının azaltılması yoluyla

takım ömründe ve yüzey kalitesinde önemli iyileştirme sağlayabilmesi nedeniyle malzeme kesme işlemleri için en uygun yöntemlerden biri olarak belirlemiştir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1 İş Parçası Malzemesi

Deneyle Şekil 4.1’de gösterilen iş parçası malzemesi olarak Hardox 500 çeliği plaka kullanılmıştır. Hardox 500 çeliği, geleneksel freze tezgâhlarında işlenerek 200x100x25 mm ebatlarına getirilmiştir.



Şekil 4.1. 200x100x25 mm boyutlarında Hardox 500 çeliği plaka

Alaşımli bir çelik olan Hardox 500 çeliği, içeriğinde nikel, krom, mangan ve molibden vb. elementleri bulundurur (Duc, vd., 2021). Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de Hardox 500 çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneyde kullanılan Hardox 500 çeliğinin kimyasal bileşimi

Karbon	Silisyum	Mangan	Fosfor	Kükürt	Krom	Nikel	Molibden	Bor
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%B
0,27	0,15	0,55	0,005	0,001	1,29	1	0,15	0,001

Çizelge 4.2. Deneyde kullanılan Hardox 500 çeliğinin mekanik özellikleri

Çekme mukavemeti (MPa)	1550
------------------------	------

Akma mukavemeti (MPa)	1300
Sertlik (HB)	420-540

4.2 CNC Tezgahı

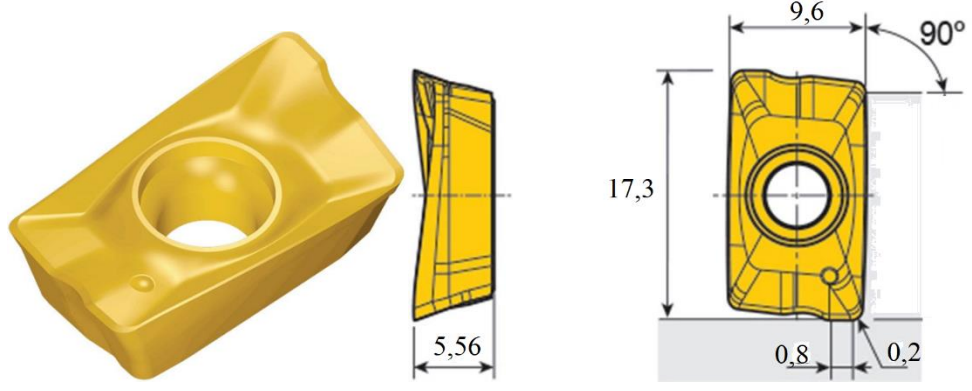
Deneyler, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü İmalat Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Spinner MVC100 marka sanayi tipi CNC 3 eksenli freze tezgahı kullanılmıştır. Tezgahın gücü 15 kW, en yüksek devir sayısı 10000 dev/dak ve işletim sistemi Fanuc'tur. Kullanılan dik işlem tezgahı Şekil 4.2'da gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Dik işlem tezgâhı

4.3 Kesici Takım ve Takım Tutucu

Kesici takım tungsten karbür malzeme ve alüminyum-titanyum-nitrür (AlTiN) kaplama yapılarak imalat edilmiştir. Bu yapısı ona sertleştirilmiş çeliklerin frezelenmesinde yüksek aşınma direncine sahip olmasını sağlamaktadır (TaeguTec Katalog). Hardox 500 çeliğinin frezeleme deneyleri esnasında 90° iki helisel kesme kenarına sahip TaeguTec marka APKT 1604-RRE TT9080 numaralı kesici takım kullanılmıştır. Kullanılan kesici takımın 3 boyutlu görünümü ile ölçüleri sırasıyla Şekil 4.3 ve 4.4'te gösterilmiştir (TaeguTec Katalog). Deneyde üç kesici takım bağlanabilen kesici takım tutucusu kullanılmıştır. Şekil 4.5'te gösterilen kesici takım tutucusuna her deneyde farklı kesici uç kenarı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3. Kesici takımın 3 boyutlu görünümü ve ölçüleri (TaeguTec Katalog)



Şekil 4.4. TaeguTec marka APKT 1604 -RRE TT9080 kesici takım



Şekil 4.5. Üç kesici takım bağlanabilen kesici takım tutucusu

4.4 Kuru, Minimum Miktarda Yağlama (MMY) ve Nano-MMY Koşullarında Frezeleme

Deney yapılırken kuru, minimum miktarda yağlama (MMY) ve Nano-MMY frezeleme yöntemleri kullanılmıştır. Minimum miktarda yağlama yönteminde basınçlı hava özelliği ile cihaz nozulundan püskürtülen yağ, kesici takımı ve iş parçasını soğutarak aynı zamanda çıkan talaşları uzaklaştırarak kesme bölgesinde oluşan ısıyı azaltmaya yarar. Bu yağlama etkisi ile sürtünme azalır, kesici takım ömrü ve yüzey kalitesi artmış olur. Bununla birlikte pozitif açıdan bakıldığında minimum miktarda yağlama gibi teknikler uygulanarak kesme sıvısı tüketimi ve üretim maliyetleri en aza indirilebilir (Gürbüz, vd., 2017).

Kuru soğutma işleminde ise iş parçası ve kesici takım üzerine herhangi bir yağlayıcı ve soğutucu verilmez. Çalışmada Şekil 4.6'da gösterilen SBH firmasının Werte marka Mikro STN 15 model Çift Kanallı Mikro yağlama sistemi kullanılmıştır. MMY sisteminin kullanıldığı bütün deneylerde 100 ml/s hacimsel debi yağlama uygulanmıştır. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Werte marka Mikro STN 15 model MMY yağlama cihazı

Çizelge 4.3. Werte marka Mikro STN 15 model MMY cihazının teknik özellikleri

Çalışma basıncı	4-6 bar
En düşük yağ miktarı	0,0012 ml
En yüksek yağ miktarı	0,028 ml
Yağlama aralığı	0,1-10 sn
Yağlama süresi	0,1-10 sn
Hazne	1,5 l

Cihaz üzerinde bulunan 2 adet nozul püskürtme ucunun 1 tanesi kullanılarak sabit miktarda basınçlı hava ile az miktarda yağ iş parçası ve kesici takım üzerine yollanarak yağlama işlemi yapılmıştır. MMY cihazının yağlama ucu Şekil 4.7’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Mikro yağlama cihazı lülesinin kesici takıma göre yerleştirilmesi

Literatür incelendiğinde birçok araştırmacı farklı bitkisel yağların (soya fasulyesi, palmye, mısır, fıstık, kolza tohumu, jatropha, hint yağı ve ayçiçeği yağı) etkisini incelemiş ve bitkisel yağın bir MMY baz sıvısı olarak işlemeyi iyileştirdiğini bulmuşlardır (Wang, vd., 2016b; Talib, vd., 2017; Lawal, vd., 2013; Rahim ve Sasahara, 2011c; Zhang, vd., 2015a; Zhang, vd., 2015b; Zhang, vd., 2015c). Bu bağlamda soğutucu yağ için ise Şekil 4.8’deki OilO firmasının yer fıstığı yağı isimli ürünü MMY ve Nano-MMY deneylerinde kullanılmıştır.



Şekil 4.8. OilO marka yer fıstığı yağı

Şekil 4.9’da yağlayıcıya Nano-MMY deneylerinde hacimce %0,5 oranında eklenen Nanografi firmasından alınan 5 nm kalınlığında 7 µm çapında grafen gösterilmiştir. Grafen malzemenin yağlayıcı içinde düzgün dağılım göstermesi için yüzey aktifleştirici olarak Tekkim firmasından alınan hacimce %0,25 sodyum dodesil sülfat eklenmiştir. Çizelge 4.4’te fıstık yağı, grafen ve sodyum dodesil sülfat yoğunlukları verilmiştir.



Şekil 4.9. 5 nm kalınlığında 7 µm çapında grafen

4.5 Deney Tasarımı ve Kullanılan Kesme Parametreleri

Deneyisel tasarım, ürünün kalite özelliklerini iyileştirmek amacıyla parametre değerlerini optimize etmek için kullanılır. Geleneksel deney tasarım yöntemleri karmaşıktır ve her zaman istenen hedeflere ulaşmaz. Ayrıca, parametrelerinin sayısı arttığında bu yöntemler çok sayıda deney yapılmasını yol açar. Yapılan çalışmada kesme parametrelerini farklı kombinasyonlarda oluşturmak için deney tasarımının hazırlanmasında tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır.

Deneylerde ilerleme (f) ve kesme hızı (V) parametreleri Hardox 500 çeliğinin frezelenmesinde uygulanmış ve her deney esnasında yüzey pürüzlülüğü, titreşim, ses, sıcaklık ve tezgahın gücü ölçülmüştür. Literatür çalışmaları ve üretici firma tavsiyeleri doğrultusunda belirlenen kesme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kesme parametreleri ve seviyeleri

Kesme parametreleri	Seviye		
	1	2	3
Kesme koşulu (-)	Kuru	MMY	Nano-MMY
İlerleme (mm/diş)	0,10	0,15	0,20
Kesme hızı (m/dk)	80	130	180

Çizelge 4.6'te tam faktöriyel deney tasarımına göre oluşturulan deney koşulları verilmiştir. Her deneyde kesme derinliği sabit 1 mm alınmıştır ve her pasoda alınan talaş hacmi 4800 mm³ sabit şekilde tutulmuştur. Her deney koşulunda Hardox 500 çeliğinden farklı iki ucu kullanarak kesici takımla bir paso alınmıştır.

Çizelge 4.6. Deney koşulları

Deney No	Kesme Koşulu (-)	İlerleme (mm/diş)	Kesme hızı (m/dk)
1	Kuru	0,10	80
2	Kuru	0,10	130
3	Kuru	0,10	180
4	Kuru	0,15	80
5	Kuru	0,15	130
6	Kuru	0,15	180
7	Kuru	0,20	80
8	Kuru	0,20	130
9	Kuru	0,20	180
10	MMY	0,10	80
11	MMY	0,10	130
12	MMY	0,10	180
13	MMY	0,15	80
14	MMY	0,15	130
15	MMY	0,15	180
16	MMY	0,20	80
17	MMY	0,20	130
18	MMY	0,20	180
19	Nano-MMY	0,10	80
20	Nano-MMY	0,10	130
21	Nano-MMY	0,10	180
22	Nano-MMY	0,15	80
23	Nano-MMY	0,15	130
24	Nano-MMY	0,15	180
25	Nano-MMY	0,20	80
26	Nano-MMY	0,20	130
27	Nano-MMY	0,20	180

Hardox 500 çeliğinin frezelenmesinde kullanılan ilerleme ve kesme hızlarına karşılık gelen dönme hızı (devir/dk) ve ilerleme hızı (mm/dk) sırasıyla denklem (4.1) ve (4.2) ile hesaplanmıştır. İşleme süresi (dk) ve talaş kaldırma hızı (R_{MR} , mm³/dk) ise denklem (4.3) – (4.5) yardımıyla belirlenmiştir (Groover, 2010). Hesaplanan değerler Çizelge 4.7’de verilmiştir. Deney esnasında ve sonrasında yüzey pürüzlülüğü, titreşim, ses, sıcaklık ile güç ve enerji tüketimi sonuçları kayıt altına alınarak analiz edilmiştir.

$$N = \frac{V}{\pi D} \quad (4.1)$$

N = Dönme hızı (devir/dk)

V = Kesme hızı (mm/dk)

D = Freze çakısı çapı (mm)

$$f_r = N n_t f \quad (4.2)$$

f_r = İlerleme hızı (mm/dk)

n_t = Freze çakısındaki diş sayısı (1 adet)

f = İlerleme (mm/diş)

$$A = 0,5(D - \sqrt{D^2 - w^2}) \quad (4.3)$$

A = Yaklaşma mesafesi (mm)

w = Frezeleme genişliği (mm)

$$T_m = \frac{L+2A}{f_r} \quad (4.4)$$

T_m = İşleme süresi (dk)

L = Parça uzunluğu (mm)

$$R_{MR} = w d f_r \quad (4.5)$$

R_{MR} = Talaş kaldırma hızı (mm³/dk)

d = Kesme derinliği (mm)

Çizelge 4.7. Hesaplanan parametrelerin değerleri

Deney No	Kesme Koşulu	V (m/dk)	f (mm/diş)	fr (mm/dk)	N (dev/dk)	Tm (dk)	Rmr (mm ³ /dk)
1	KURU	80	0,1	79,6	795,8	2,65	1909,9
2		130	0,1	129,3	1293,1	1,63	3103,5
3		180	0,1	179,0	1790,5	1,18	4297,2
4		80	0,15	119,4	795,8	1,77	2864,8
5		130	0,15	194,0	1293,1	1,09	4655,3
6		180	0,15	268,6	1790,5	0,79	6445,8
7		80	0,2	159,2	795,8	1,32	3819,7
8		130	0,2	258,6	1293,1	0,82	6207,0
9		180	0,2	358,1	1790,5	0,59	8594,4
10	MMY	80	0,1	79,6	795,8	2,65	1909,9
11		130	0,1	129,3	1293,1	1,63	3103,5
12		180	0,1	179,0	1790,5	1,18	4297,2
13		80	0,15	119,4	795,8	1,77	2864,8
14		130	0,15	194,0	1293,1	1,09	4655,3
15		180	0,15	268,6	1790,5	0,79	6445,8
16		80	0,2	159,2	795,8	1,32	3819,7
17		130	0,2	258,6	1293,1	0,82	6207,0
18		180	0,2	358,1	1790,5	0,59	8594,4
19	NANO-MMY	80	0,1	79,6	795,8	2,65	1909,9
20		130	0,1	129,3	1293,1	1,63	3103,5
21		180	0,1	179,0	1790,5	1,18	4297,2
22		80	0,15	119,4	795,8	1,77	2864,8
23		130	0,15	194,0	1293,1	1,09	4655,3
24		180	0,15	268,6	1790,5	0,79	6445,8
25		80	0,2	159,2	795,8	1,32	3819,7
26		130	0,2	258,6	1293,1	0,82	6207,0
27		180	0,2	358,1	1790,5	0,59	8594,4

4.6 Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Hardox 500 çeliğinin frezelenmesi işlemi ardından her deney sırası tekrarlanarak parça üzerinden kesme yönüne dik bir şekilde 6 farklı noktadan alınan ölçüm Şekil 4.10'da

sırasıyla önce Dailyaid marka DR100 model yüzey pürüzlülük cihazı sonra ölçüm gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Dailyaid marka DR100 model yüzey pürüzlülük cihazı ve ölçümü

Deneyde kullanılan Dailyaid marka DR100 model yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri ise Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Dailyaid marka DR100 model yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri

Özellikler	Değerler
Ölçüm uzunluğu	2,5 mm
Ra ölçüm aralığı	0,05-15 μm
Algılayıcı çapı	10 μm
Algılayıcı açısı	90°
Duyargaç kılavuz kafa basıncı	0,5 N

4.7 Titreşimin Ölçülmesi

Deneyler esnasında sırasıyla Şekil 4.12’de gösterilen PCE marka VT 1300 model titreşim ölçme cihazı ve Hardox 500 çeliğinin tam ortasından ve frezelenen yüzeyin 1 cm altından ölçüm gösterilmiştir.



Şekil 4.12. PCE marka VT 1300 model titreşim ölçme cihazı ve ölçümü

4.8 Sesin Ölçülmesi

Deneyleerde Hardox 500 çeliğinden 1 m uzağa yerleştirilen Şekil 4.13'te gösterilen PCE marka 322A model ses seviye ölçme cihazı ile her işlemde ortamdaki ses ölçülmüştür.



Şekil 4.13. PCE marka 322A ses seviye ölçme cihazı

4.9 Sıcaklığın Ölçülmesi

Her bir deney anında Hardox 500 çeliğinde ısıdan etkilenen bölge Testo marka 881 model termal görüntüleyici kamera ile ölçülmüştür. Şekil 4.14'te cihaz ve ölçüm gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Testo marka 881 model termal kamera ve ölçümü

4.10 Güç ve Enerjinin Ölçülmesi

Frezeleme deneylerinde Şekil 4.15'te gösterilen HIOKI marka 3390 model güç analiz cihazı ile frezeleme işlemi esnasında freze tezgahının kullandığı güç ölçülmüştür.



Şekil 4.15. HIOKI marka 3390 model güç analiz cihazı ve ölçümü

Enerji tüketimi (kJ) ile özgül enerji tüketimi (J/mm³) denklem (4.6) ve (4.7) yardımıyla hesaplama işlemi yapılmıştır.

$$E = PT_m \quad (4.6)$$

E = Enerji (J), P =Güç (W), T_m = İşleme süresi (s)

$$SE = \frac{E}{H} \quad (4.7)$$

SE =Özgül Enerji (J/mm³), H = Bir pasoda alınan toplam talaş hacmi (mm³)

4.11 ANOVA (Varyans) Analizi

ANOVA, her bir faktörün sonuç üzerindeki etkisini miktarsal olarak belirlemek için kullanılır. Bu analiz, hangi faktörlerin anlamlı olduğunu ve çıktıyı en çok etkilediğini ortaya koyar. Örneğin; Ross (1996), yaptığı çalışmalarda ANOVA yöntemini birlikte kullanarak daha anlamlı sonuçlar elde etmiştir.

ANOVA çizelgesi oluştururken öncelikle her faktörün serbestlik derecesi belirlenerek işleme başlanır (Kütükde, 2014). Her faktörün serbestlik derecesi (Sd_A), her faktörün aralarındaki etkileşim serbestlik derecesi (Sd_{AxB}), toplam serbestlik derecesi (Sd_T) ve hatanın serbestlik derecesi sırasıyla (Sd_e) denklem (4.8-4.11) ile bulunur. Burada, \bar{n} : her faktördeki seviyeyi, N : gözlem sayısını temsil eder (Başar, 2023).

$$Sd_A = \bar{n} - 1 \quad (4.8)$$

$$Sd_{AxB} = (Sd_A)(Sd_B) \quad (4.9)$$

$$Sd_T = n - 1 \quad (4.10)$$

$$Sd_e = Sd_T - Sd_A - Sd_B - Sd_C - Sd_{AxB} - Sd_{AxC} - Sd_{BxC} \quad (4.11)$$

Tüm faktörler için kareler toplamı (KT) ise denklem (4.12) yardımıyla hesaplanır. Denklem üzerinde a : A faktörü için yapılan gözlem sayısını, \bar{n}_{Ai} : A faktörü

içerisindeki her seviyeye ait kademe miktarını ve \bar{T} : yapılan gözlem sayısının toplamını belirtmektedir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

$$KT_A = \left[\sum_{i=1}^a \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right] - \frac{\bar{T}^2}{n} \quad (4.12)$$

ANOVA çizelgesinin en sağında bulunan sütun, her bir faktör/faktörler arası etkileşimin kalite karakteristiği üzerindeki % Katkı Oranlarını (**KO**) gösterir ve sırasıyla denklem (4.13-4.14) ile hesaplanmaktadır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

$$KO = \frac{KT_A 100}{GKT} \quad (4.13)$$

$$KO_{AxB} = \frac{KT_{AxB} 100}{GKT} \quad (4.14)$$

4.12 Regresyon Analizi

Bu yöntem istatistiksel bir teknik olup, bir bağımlı değişken (y) ile bir veya daha fazla bağımsız değişken (x) arasındaki ilişkiyi modellemeye ve bu ilişkiyi incelemeye olanak sağlar. Temel amacı, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini anlamak ve gelecekteki değerleri tahmin etmektir.

Denklemlerden elde edilmiş belirtme katsayısı (R^2), bağımsız değişkenlerin (x) bağımlı değişkeni (y) açıklama oranı yani denklemdaki açıklama miktarının açıklanmayan miktara bölünmesi olarak ifade edilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen denklemlerin R^2 değeri, 1'e yaklaştıkça bağımlı değişkendeki değişimin büyük kısmı bağımsız değişkenler tarafından belirlenebilecektir (Asiltürk ve Akkuş, 2011; Gökçe, 2021). Denklem (4.15)'de birinci dereceden regresyon denklemi gösterilmiştir.

$$Y_1 = \hat{y} - \varepsilon = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \quad (4.15)$$

Y_1 : 1. Dereceden denklem yanıtı

\hat{y} : Logaritmik ölçekte ölçülen yanıtlar

x_1, x_2, x_3, x_4 : Kontrol faktörlerinin logaritmik dönüşümleri

b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 : Parametre katsayıları

ϵ : Deneysel hata

4.13 Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, karar süreçlerinde birden fazla ve çoğunlukla birbirine zıt kriterin dikkate alındığı problemlerin çözümüne yönelik yaklaşımlar sunmaktadır. Bu yöntemler, belirli bir hedef doğrultusunda birçok alternatifi, bir dizi kritere göre değerlendirir ve en iyi seçimi yapmaya olanak sağlar. ÇKKV, birden fazla kriterin aynı anda dikkate alınması gerektiği durumlarda karar vericilere büyük avantaj sağlar (Hwang ve Yoon, 1981). Mühendislik, ekonomi, işletme ve birçok alanda karar alma süreçlerinde geniş bir uygulama alanına sahiptir (Triantaphyllou, 2000).

Hwang ve Yoon (1981), tarafından geliştirilen TOPSIS gibi yöntemler, alternatiflerin en iyi ve en kötü çözümlerle olan uzaklıklarını dikkate alarak sıralama yapmaktadır. VIKOR ise, uzlaşma çözümleri bulmayı amaçlayan bir ÇKKV yöntemidir ve alternatifler arasındaki dengeyi sağlama yeteneği ile bilinmektedir (Opricovic ve Tzeng, 2004). Ayrıca Gri İlişkisel Analizi (GİA), özellikle belirsizliklerin ve eksik verilerin bulunduğu karar problemlerinde etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Julong, 1989).

Ağırlıklandırma yöntemleri, çok kriterli karar verme (ÇKKV) süreçlerinde her bir kriterin karar üzerindeki önemini belirlemek için kullanılır. Karar vericiler, her bir kriterin problem için taşıdığı öneme göre ağırlıklar belirler. Farklı ağırlıklandırma yöntemleri, kriterlerin göreceli önemini belirlerken farklı yaklaşımlar sunar.

Literatür incelendiğinde ağırlıklandırma yöntemleri, subjektif, objektif veya karma yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Subjektif yöntemler, karar vericinin tecrübelerine ve bilgisine dayalı olarak ağırlık belirlerken, objektif yöntemler, veriye dayalı matematiksel yöntemlerle ağırlıkları belirler. Karma yöntemler ise her iki yaklaşımı birleştirerek yapılmaktadır (Wang ve Luo, 2010).

Objektif ağırlıklandırma yöntemlerinde, ağırlık belirlemek için karar matrisi elemanları kullanılır. Bu yöntemlerde, ağırlıkları belirlemek için her bir kritere ilişkin

farklı alternatiflerin performanslarındaki değişimlerinden yararlanır (Keshavarz-Ghorabae, vd., 2021). Entropy, CRiteria Importance Through Inter-criteria Correlation (CRITIC), Standart sapma (Standard Deviation-SD), Method based on the Removal Effects of Criteria (MERECE), Criterion Impact LOSs (CILOS), Integrated Determination of Objective CRiteria Weights (IDOCRIW), Entegre Veri Odaklı Ağırlıklandırma Sistemi (Integrated Data Driven Weighting System (IDDWS), Eşit ağırlık (Mean weight (MW)) gibi yöntemler objektif kriter ağırlıklandırma yöntemlerine örnektir.

Bu çalışmada, Hardox 500 çeliğinin MMY yöntemi ile frezelenmesi sırasında ortaya çıkan verilerin, çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak optimizasyonunu sağlamak için kriterlerin ağırlıklandırılması için CRITIC metodu, ÇKKV problemlerinin çözümünde ise GİA yönteminden yararlanarak hesaplama yapılmıştır.

4.13.1 CRITIC Yöntemi

CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) yöntemi, kriterlerin her biri için iki temel faktörü baz alır:

Standart Sapma: Kriterin içsel değişkenliği. Yüksek standart sapma, o kriterin alternatifler arasında daha fazla ayırım yaptığını gösterir (Diakoulaki, vd., 1995).

Kolerasyon: Bir kriterin diğer kriterlerle olan ilişkisi. Kriter ağırlıkları belirlenirken kriterlerin standart sapması ile kriterler arasındaki korelasyon da dikkate alınmaktadır (Wang ve Luo, 2010).

Bu yöntem, karar vericilerin subjektif değerlendirmelerini ortadan kaldırmak ve daha nihai sonuç için analiz sürecinde objektifliği artıran bir tekniktir. Yöntemin adımları aşağıda verilmiştir (Diakoulaki, vd., 1995; Jahan, vd., 2012).

1.Adım: Karar matrisi elemanları denklem (4.16) ve (4.17) kullanılarak normalize edilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (\text{kazanç yönlü kriterler}) \quad (4.16)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{max} - x_{ij}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (\text{maliyet yönlü kriterler}) \quad (4.17)$$

x_j^{max} ve x_j^{min} j. kriterin maksimum ve minimum değerleridir. $i=1, \dots, m$ $j=1, \dots, n$

2.Adım: CRITIC yönteminde, kriterler arasındaki korelasyon dikkate alınır. Korelasyon katsayısı, her bir kriter çiftinin ne kadar ilişkili olduğunu gösterir. Korelasyon katsayısı şu formülle (4.18) hesaplanır.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j) \cdot (r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}} \quad j, k=1, \dots, n \quad (4.18)$$

3.Adım: Bu adımda toplam bilgi ve standart sapma sırası ile denklem (4.19) ve (4.20) yardımıyla hesaplanır.

$$C_j = \sigma_j \cdot \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}) \quad (4.19)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{m}} \quad (4.20)$$

4.Adım: Değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları aşağıdaki (4.21) şekilde hesaplanır.

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4.21)$$

4.13.2 Gri İlişkisel Analizi (GİA) Yöntemi

Bu yöntem, gri sistem teorisi temelinde geliştirilen ve belirsizliklerin olduğu durumlarda çok kriterli karar vermede kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, alternatiflerin performansları ideal bir referans çözümle kıyaslanarak değerlendirilir (Julong, 1989).

Kontrol teorisinde insanlar mevcut bilgilerin netlik derecesini tanımlayabilmek için renkleri kullanmışlardır. Hiç bilinmeyen bilgileri belirtmek için Siyah'ı, tamamen bilinen bilgiler için Beyaz'ı, kısmen bilinen bilgilerde ise Gri'yi kullanırız (Liu ve Lin, 2010).

Aşağıda GİA adımları gösterilmiştir (Julong, 1989; Zhai, vd., 2009).

1. Adım: ‘m’ in alternatif ‘n’ in kriter değerlerini gösterdiği X karar matrisi aşağıda verilmiştir.

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(m) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n(1) & x_n(2) & \dots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (i= 1,\dots,n \text{ ve } j= 1,\dots,m) \quad (4.22)$$

2.Adım: GRA’da veriler normalize edilmelidir, çünkü kriterlerin farklı birimlerde ölçülmesi alternatiflerin karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Verilen kriterler farklı şekilde ölçüldüğünden, birbiri arasında kıyaslama yapılabilir hale gelmesi için normalleştirme işlemi yapılır (Tayyar, vd., 2014). Normalizasyon işlemi için iki yaygın yöntem kullanılır.

Pozitif kriterler (maksimizasyon hedefi):

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (4.23)$$

Negatif kriterler (minimizasyon hedefi):

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (4.24)$$

Bu iki formülle her bir kriter normalleştirilir ve normalize edilmiş karar matrisi x'_{ij} elde edilir.

3.Adım: Bu adımda önceki adımda elde edilen değerlerden yararlanılarak normalleştirilmiş karar matrisi ortaya çıkarılır ve karar matrisindeki her sütündaki en yüksek değerler baz alınarak referans serisi hesaplanmış olur.

$$X'_0 = \begin{bmatrix} x'_1(1) & x'_1(2) & \dots & x'_1(m) \\ x'_2(1) & x'_2(2) & \dots & x'_2(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x'_n(1) & x'_n(2) & \dots & x'_n(m) \end{bmatrix} \quad (i= 1,\dots,n \text{ ve } j= 1,\dots,m) \quad (4.25)$$

$$X'_0 = X'_0(1), X'_0(2), \dots, X'_0(m) \quad (4.26)$$

Burada X'_0 , her bir kriter için normalize edilmiş en yüksek değeri temsil eden referans serisidir.

4.Adım: Normalize edilen karar matrisinden 3. Adım'da bulunan referans serisi çıkarılarak fark matrisi elde edilmiş olur.

$$\Delta_{0i}(j) = |x'_0(j) - x'_i(j)| \quad (4.27)$$

$$\Delta_{ij} = \begin{bmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{01}(2) & \dots & \Delta_{01}(m) \\ \Delta_{02}(1) & \Delta_{02}(2) & \dots & \Delta_{02}(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta_{0n}(1) & \Delta_{0n}(2) & \dots & \Delta_{0n}(m) \end{bmatrix} \quad (i= 1,\dots,n \text{ ve } j= 1,\dots,m) \quad (4.28)$$

5.Adım: Fark matrisinde elde edilen her değer için gri ilişkisel katsayı hesaplanır.

$$\gamma_{0i}(j) = \frac{\min_{i-1}^n \min_{j-1}^m \Delta_{0i}(j) + \zeta \cdot \min_{i-1}^n \min_{j-1}^m \Delta_{0i}(j)}{\Delta_{0i}(j) + \zeta \cdot \min_{i-1}^n \min_{j-1}^m \Delta_{0i}(j)} \quad (4.29)$$

ζ (ayırım katsayısı), genellikle 0.5 olarak alınır ve kriterler arasındaki ayırımı ayarlamaya yararmaktadır.

6.Adım: Bulunan gri ilişkisel katsayı değeri ile kriterin ağırlığı ile çarpılıp, her alternatif için toplandığında gri ilişki derecesi elde edilmiş olur.

$$\Gamma_{0i} = \sum_{j=1}^m w(j) \cdot \gamma_{0i}(j), \quad \sum_{j=1}^m w(j) = 1 \quad (4.30)$$

Burada $w(j)$, j. kriterin ağırlığını gösterir. Alternatifler, gri ilişki derecelerine göre büyükten küçüğe doğru sıralanır. En yüksek gri ilişki derecesine sahip alternatif, ideal çözüme en yakın olan alternatiftir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hardox 500 çeliğinin frezelenmesi aşamasında yüzey pürüzlülüğü, titreşim, ses, sıcaklık ve güç için ayrı ayrı bulgular saptanıp değerlendirme yapılmıştır. Öncelikle her çıktı için tek yanıtı değerlendirme yapılmıştır. Sonrasında ise ANOVA ve regresyon analizi yapılmıştır. En sonda ise CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırma yaparak Gri İlişkisel Analizi (GİA) sonuçları çıkarılmıştır. Aşağıda her çıktının değerlendirmesi ve optimizasyon verileri gösterilmiştir.

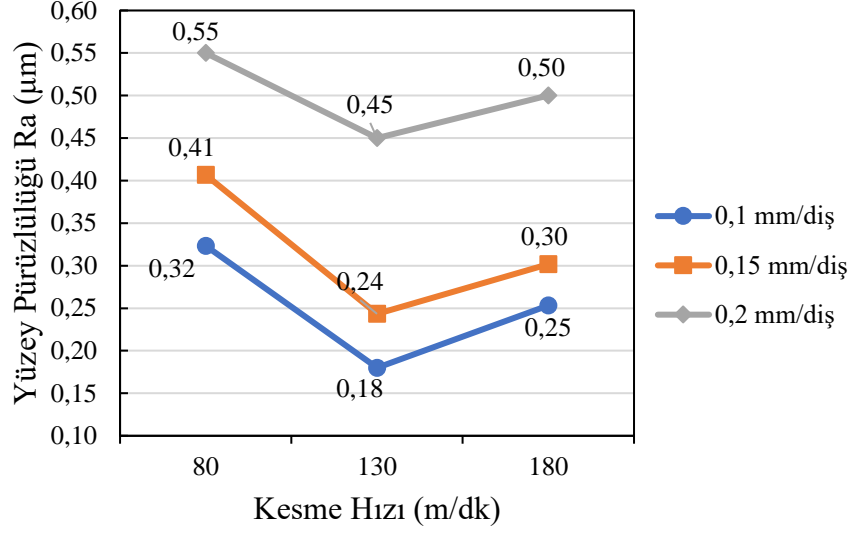
5.1 Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

Talaş kaldırma yöntemiyle üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü, malzeme yapısı, işleme parametreleri ve seçilen yöntem sonucunda oluşur. Yapılan araştırmalarda, yüzey pürüzlülüğünün doğru bir şekilde ölçülmesi ve en iyi yüzey pürüzlülüğü ölçüm yönteminin seçilmesi, üretim süreci için çok önemli bir karar olarak kabul edilmektedir (Güllü, vd., 2003).

Yapılan çalışmada her deney sonrası Hardox 500 çeliğinin işleme yönüne dik olacak şekilde frezelenen yüzeyin 6 farklı noktasından yüzey pürüzlülüğü Ra (μm) ölçümü yapılmış ve değerler ile ortalamaları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Kuru, MMY ve Nano-MMY işleme durumlarındaki deneylerin yüzey pürüzlülük grafikleri ise sırasıyla Şekil 5.1 – 5.3’te verilmiştir.

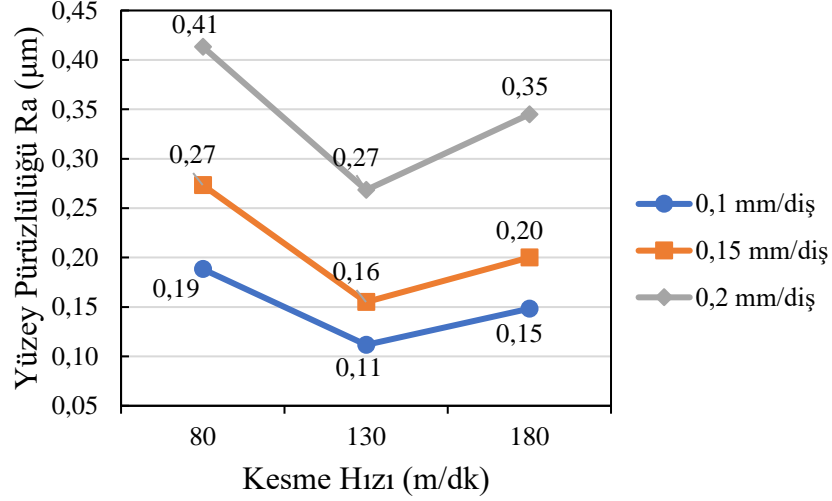
Çizelge 5.1. Deney sonrası ölçülen değerler ve ortalamaları

Deney No	Kesme Koşulu	V (m/dk)	f (mm/diş)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, μm)						
				1	2	3	4	5	6	Ort.
1	KURU	80	0,1	0,31	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,32
2		130	0,1	0,15	0,16	0,17	0,19	0,2	0,21	0,18
3		180	0,1	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,25
4		80	0,15	0,39	0,4	0,4	0,41	0,42	0,42	0,41
5		130	0,15	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,24
6		180	0,15	0,29	0,29	0,3	0,3	0,31	0,32	0,30
7		80	0,2	0,55	0,53	0,57	0,58	0,52	0,55	0,55
8		130	0,2	0,47	0,43	0,45	0,49	0,41	0,45	0,45
9		180	0,2	0,5	0,48	0,5	0,52	0,51	0,49	0,50
10	MMY	80	0,1	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,2	0,19
11		130	0,1	0,1	0,1	0,11	0,11	0,12	0,13	0,11
12		180	0,1	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,15
13		80	0,15	0,28	0,28	0,29	0,26	0,27	0,26	0,27
14		130	0,15	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16
15		180	0,15	0,19	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,20
16		80	0,2	0,4	0,4	0,41	0,42	0,42	0,43	0,41
17		130	0,2	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,27
18		180	0,2	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,35
19	NANO-MMY	80	0,1	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,15
20		130	0,1	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08
21		180	0,1	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,12
22		80	0,15	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23
23		130	0,15	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,13
24		180	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16
25		80	0,2	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36	0,35
26		130	0,2	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23
27		180	0,2	0,29	0,29	0,3	0,3	0,3	0,31	0,30



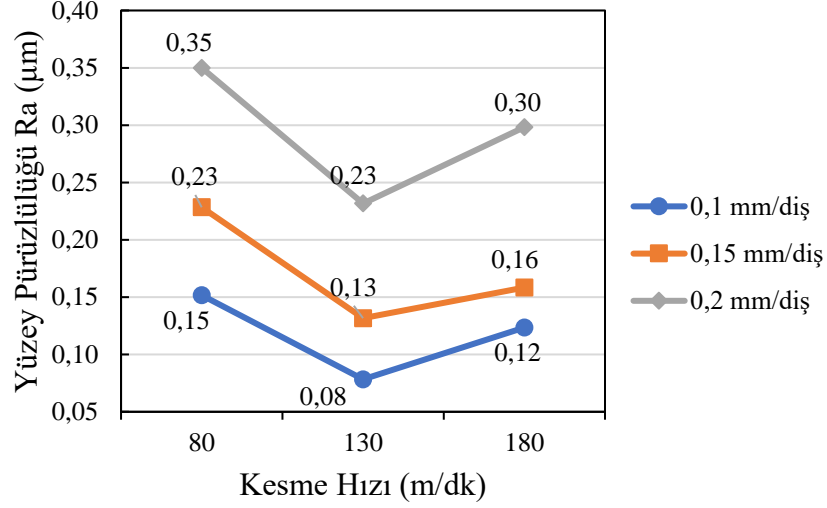
Şekil 5.1. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) grafiği

Kuru işleme ortamındaki deney sonucunda yüzey pürüzlülüğü değerleri, deneylere göre geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. En düşük pürüzlülük değeri 0,18 µm (Deney No: 2) olarak ve 0,1 mm ilerleme, 130 m/dk kesme hızı ile ölçülürken, en yüksek değer 0,55 µm (Deney No: 7) olarak ve 0,2 mm ilerleme, 80 m/dk kesme hızı ile kaydedilmiştir. Bu bulgu, literatürdeki çalışmalarla uyumludur. Örneğin, Çakır ve Emiroğlu (2015), kuru işleme ortamlarında daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edildiğini ve bunun kesme bölgesinde yeterli soğutma ve yağlama eksikliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Kesme bölgesindeki sıcaklık artışı ve sürtünme kuvvetlerinin artması, yüzeyde daha fazla deformasyon ve dolayısıyla daha yüksek pürüzlülüğe yol açmaktadır.



Şekil 5.2. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) grafiği

MMY işleme ortamı ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri, kuru kesmeye kıyasla daha düşük ve daha tutarlı sonuçlar vermiştir. En düşük pürüzlülük değeri 0,11 µm (Deney No: 11) olarak ve 0,1 mm ilerleme, 130 m/dk kesme hızı ile belirlenirken, en yüksek değer 0,41 µm (Deney No: 16) olarak ve 0,2 mm ilerleme, 80 m/dk kesme hızı ile olmuştur. Literatürde MMY'nın, özellikle yüzey kalitesini iyileştirme açısından önemli avantajlar sağladığı bilinmektedir. Dhar, vd. (2006), MMY'nın kesme sıvısının minimum miktarda kullanılmasıyla hem soğutma hem de yağlama sağladığını ve bu sayede daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini göstermiştir. Bu çalışmalarda, MMY'nın yüzey kalitesine olan katkısının kesme sıcaklığını ve sürtünmeyi azaltarak gerçekleştiği ifade edilmiştir.



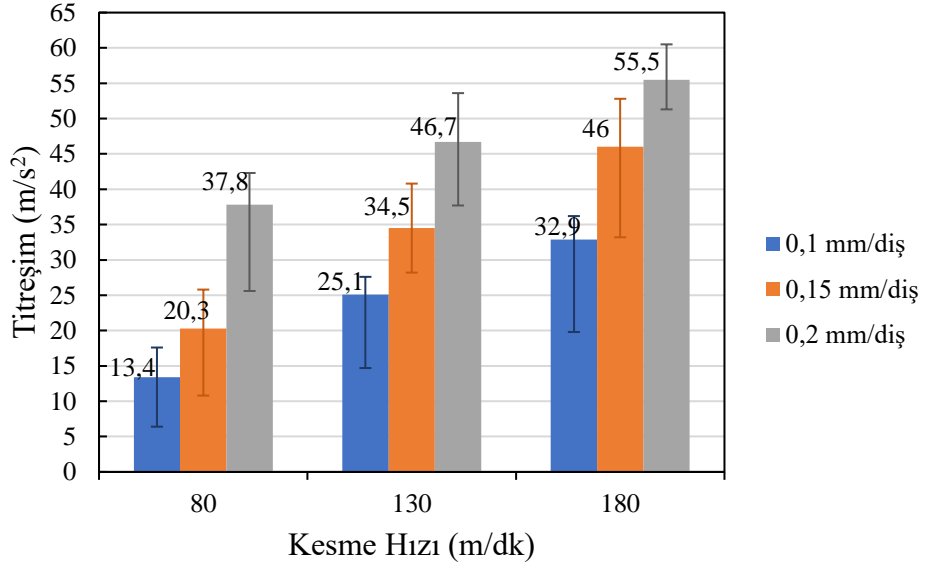
Şekil 5.3. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Nano-MMY işleme ortamında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) grafiği

Nano-MMY uygulaması, yüzey pürüzlülüğünü daha da azaltmış ve en düşük değer 0,08 µm (Deney No: 20) olarak ve 0,1 mm ilerleme, 130 m/dk kesme hızı ile ölçülmüştür. Literatürde de Nano-MMY'nın geleneksel MMY'ya kıyasla daha üstün performans sunduğu bildirilmiştir. Örneğin; Kharkwal, vd. (2018), nano katkı kesme sıvılarının, partiküllerin yüzeyde daha ince ve etkili bir yağlama filmi oluşturması sayesinde daha düşük pürüzlülük sağladığını belirtmişlerdir. Bu bulgular, özellikle nano yağlayıcıların işleme sırasında sürtünme ve aşınmayı azaltarak daha düzgün yüzeyler oluşturduğunu göstermektedir.

5.2 Titreşimin Değerlendirilmesi

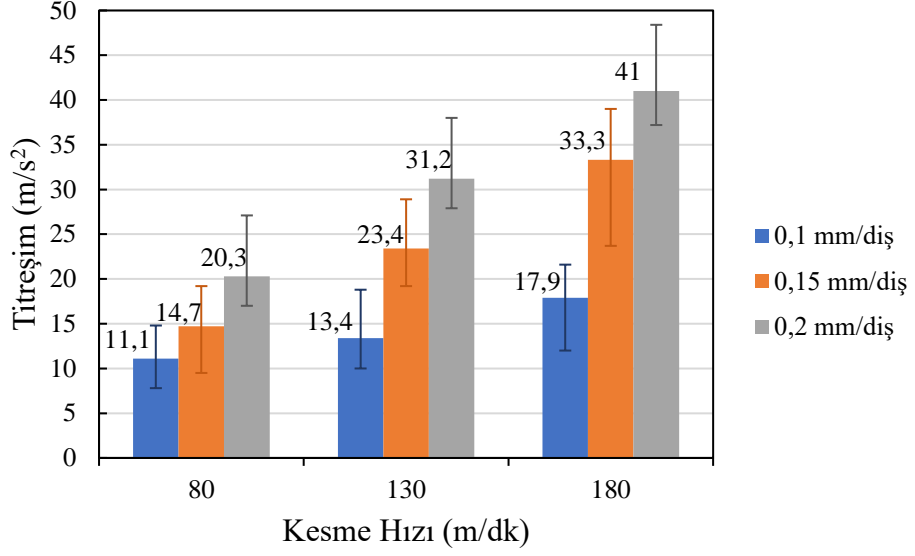
Titreşim analizleri, özellikle kesme işlemlerinde yüzey kalitesini, takım ömrünü ve genel işleme verimliliğini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu çalışmada, farklı yağlama yöntemlerinin (Kuru, MMY ve Nano-MMY) titreşim performansına etkisi incelenmiştir. Yağlama türleri arasındaki titreşim farkları, her bir yöntemin kesme bölgesindeki sürtünme ve sıcaklık koşullarını nasıl değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Literatürde, yüksek titreşim değerlerinin genellikle yüzey kalitesini olumsuz etkilediği ve işleme sırasında kesme kuvvetlerinde artışa neden olduğu vurgulanmaktadır (Rahim ve Sasahara, 2011; Garcia, vd., 2020).

Deneyleerde Hardox 500 iş parçası üzerinden alınan titreşim m/s^2 değerlerinin minimum, maximum ve ortalama değerleri izelge 5.2'te gösterilmiştir. Tüm kesme koşullarında gerçekleşen deneyleerin ortalama değer grafikleri de sırasıyla şekil 5.4 – 5.6'de gösterilmiştir.



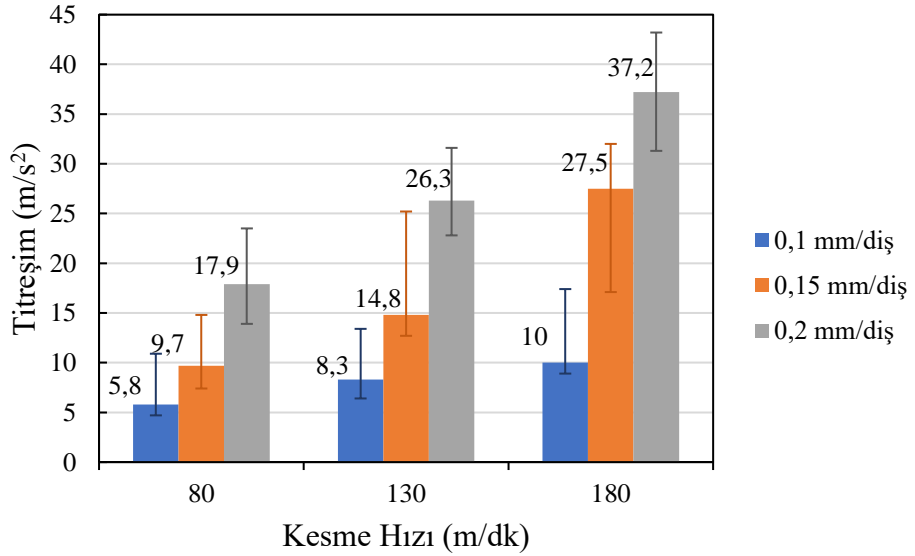
şekil 5.4. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında ölçülen ortalama titreşim grafiği

Kuru işleme ortamında elde edilen titreşim verileri, minimum $6,4 m/s^2$, maksimum $60,5 m/s^2$ ve ortalama $25,7 m/s^2$ değerlerine ulaşmıştır. Bu yüksek değerler, özellikle yüksek kesme hızlarında (rneğin, $180 m/dk$ 'da $55,5 m/s^2$) iş parçasında aşırı deformasyon ve takım aşınmasına yol açmıştır. Li, vd. (2018), kuru kesme işlemlerinde yüksek titreşimlerin, yüzey kalitesinin düşmesine ve iş parçasının toleranslarının bozulmasına yol açtığını bildirmiştir.



Şekil 5.5. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında ölçülen ortalama titreşim grafiği

MMY uygulamalarında titreşim değerleri daha düşük seviyelerde kalmıştır. Minimum 7,8 m/s², maksimum 48,4 m/s² ve ortalama 21,6 m/s² gibi değerler elde edilmiştir. En yüksek titreşim değeri, 48,4 m/s² ile 180 m/dk kesme hızında ölçülmüştür. İyener, vd. (2020), MMY yağlama sisteminin, titreşimleri kontrol etme kapasitesinin arttığını ve böylece kesme sırasında daha az aşınma ve daha iyi yüzey kalitesi sağladığını belirtmektedir.



Şekil 5.6. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında ölçülen ortalama titreşim grafiği

Nano-MMY işleme ortamı, titreşim seviyelerini en düşük düzeye indirmiştir. Minimum 4,7 m/s², maksimum 43,2 m/s² ve ortalama 19,8 m/s² olarak ölçülen titreşim değerleri, Nano-MMY sisteminin etkinliğini ortaya koymaktadır. Moretti, vd. (2020), nano yağlama sistemlerinin kesme işlemi sırasında daha stabil bir ortam yaratarak titreşimleri azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

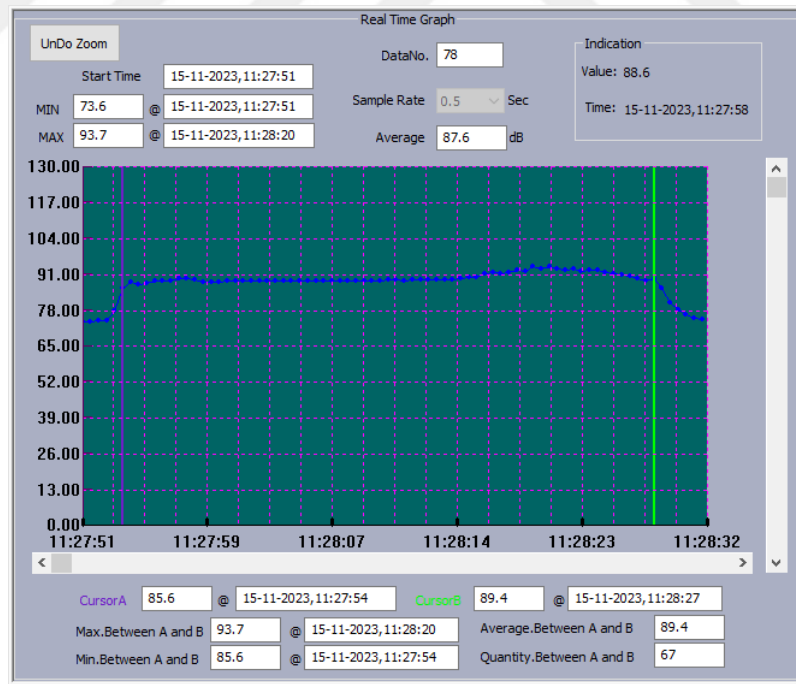
Çizelge 5.2. Denede ölçülen minimum, maximum ve ortalama titreşim değerleri

Deney No	Kesme Koşulu	V (m/dk)	f (mm/diş)	Titreşim (m/s ²)		
				Min	Max	Ortalama
1	KURU	80	0,1	6,4	17,6	13,4
2		130	0,1	14,7	27,6	25,1
3		180	0,1	19,8	36,2	32,9
4		80	0,15	10,8	25,8	20,3
5		130	0,15	28,2	40,8	34,5
6		180	0,15	33,2	52,8	46
7		80	0,2	25,6	42,3	37,8
8		130	0,2	37,7	53,6	46,7
9		180	0,2	51,3	60,5	55,5
10	MMY	80	0,1	7,8	14,8	11,1
11		130	0,1	10	18,8	13,4
12		180	0,1	12	21,6	17,9
13		80	0,15	9,5	19,2	14,7
14		130	0,15	19,2	28,9	23,4
15		180	0,15	23,7	39	33,3
16		80	0,2	17	27,1	20,3
17		130	0,2	27,9	38	31,2
18		180	0,2	37,2	48,4	41
19	NANO-MMY	80	0,1	4,7	10,9	5,8
20		130	0,1	6,4	13,4	8,3
21		180	0,1	8,9	17,4	10
22		80	0,15	7,4	14,8	9,7
23		130	0,15	12,7	25,2	14,8
24		180	0,15	17,1	32	27,5
25		80	0,2	13,9	23,5	17,9
26		130	0,2	22,8	31,6	26,3
27		180	0,2	31,3	43,2	37,2

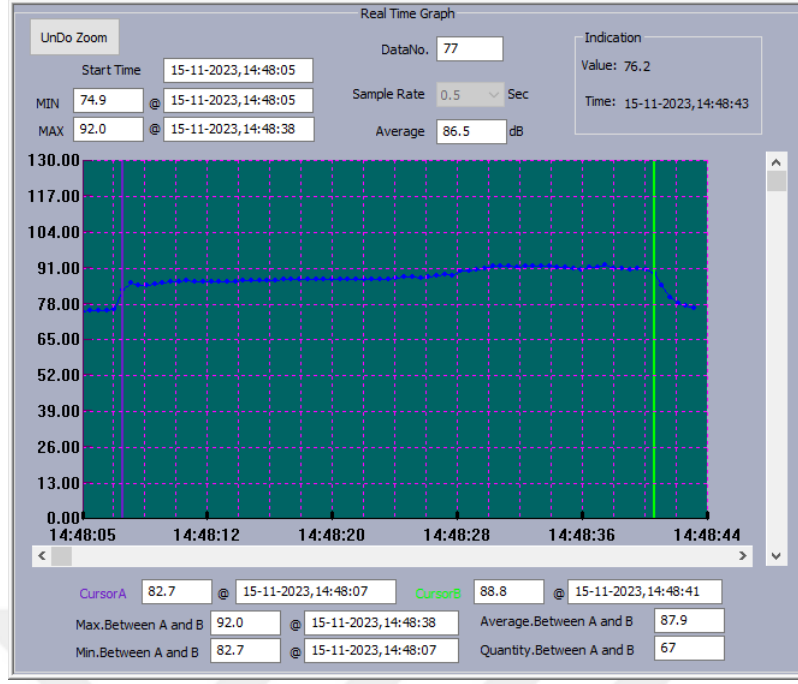
5.3 Sesin Değerlendirilmesi

Frezede ses seviyeleri, kesme işlemlerinde ortaya çıkan gürültünün, çalışma ortamı ve iş güvenliği üzerindeki etkileri nedeniyle önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Çalışmada farklı yağlama yöntemlerinin (Kuru, MMY ve Nano-MMY) frezeleme sırasında ölçülen ses seviyelerine etkisi incelenmiştir. Genel olarak, kuru kesme koşullarında sürtünmenin yüksek olması nedeniyle ses seviyelerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sürtünme, iş parçası ve takım arasındaki temas yüzeyinde gürültüye neden olarak çalışma ortamında rahatsız edici bir duruma yol açmaktadır (İynen, vd., 2020).

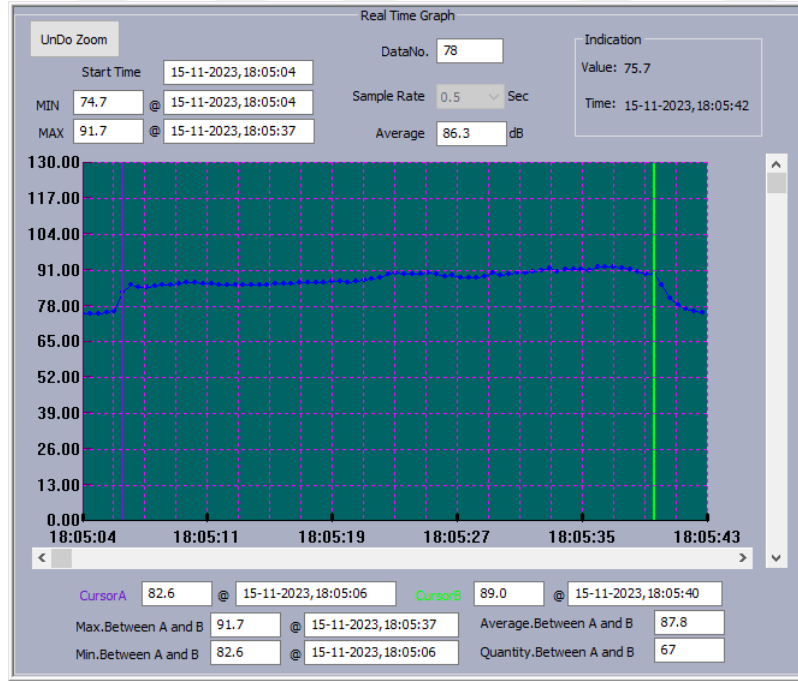
Deneyle esnasında Kuru, MMY ve Nano-MMY ortamlarda maximum ilerleme ve kesme hızında (deney 9, 18 ve 27) alınan ses ölçüm cihazının yazılımı vasıtasıyla alınan grafikler Şekil 5.7 – 5.9’da gösterilmiştir. Tüm deneylerdeki ses değerlerinin minimum, maximum ve ortalama değerleri Çizelge 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Deney 9’da cihaz yazılımından alınan grafik



Şekil 5.8. Deneş 18’de cihaz yazılımından alınan grafik

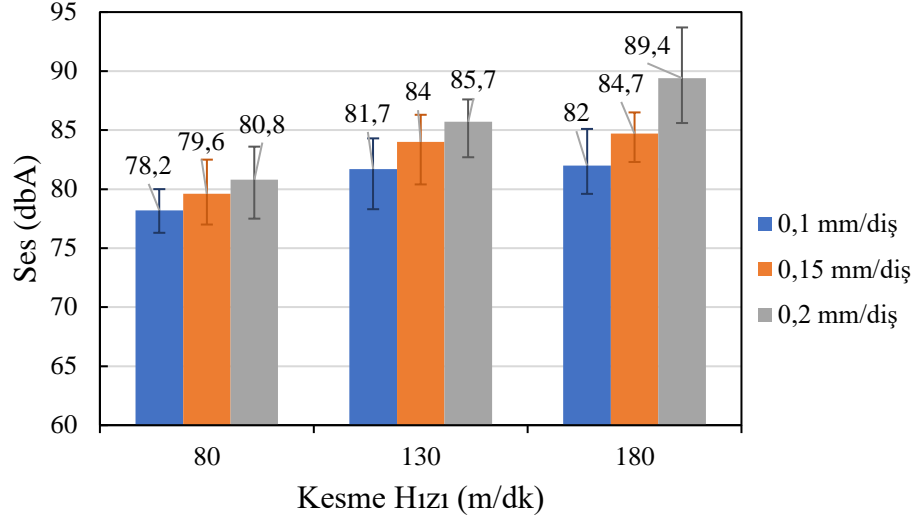


Şekil 5.9. Deneş 27’de cihaz yazılımından alınan grafik

Çizelge 5.3. Deneylerde ölçülen minimum, maximum ve ortalama ses değerleri

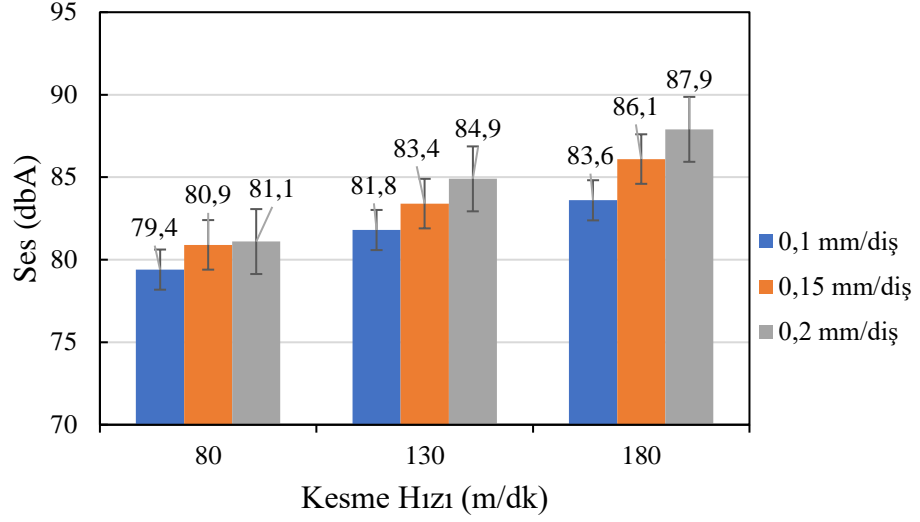
Deney No	Kesme Koşulu	V	f	Ses (dbA)		
				Min	Max	Ortalama
1	KURU	80	0,1	76,3	80	78,2
2		130	0,1	78,3	84,3	81,7
3		180	0,1	79,6	85,1	82
4		80	0,15	77	82,5	79,6
5		130	0,15	80,4	83,3	82
6		180	0,15	82,3	86,5	84,7
7		80	0,2	77,5	83,6	80,8
8		130	0,2	82,7	87,6	85,7
9		180	0,2	85,6	93,7	89,4
10	MMY	80	0,1	76,1	82	79,4
11		130	0,1	80	83,5	81,8
12		180	0,1	82	84,6	83,6
13		80	0,15	77,7	83,3	80,9
14		130	0,15	82	84,3	83,4
15		180	0,15	82,7	89,5	86,1
16		80	0,2	78,8	83,7	81,1
17		130	0,2	82,5	86,8	84,9
18		180	0,2	82,7	92	87,9
19	NANO-MMY	80	0,1	75,7	81,2	78,5
20		130	0,1	79,4	82,5	81,7
21		180	0,1	81,4	84,1	82,7
22		80	0,15	76,8	82,1	80,5
23		130	0,15	80,8	83,7	82,6
24		180	0,15	82,5	86,3	85,0
25		80	0,2	78,0	83,4	80,8
26		130	0,2	82,4	86,3	84,6
27		180	0,2	82,6	91,7	87,8

Deneylerde tüm işleme (Kuru, MMY, Nano-MMY) ortamlarında gerçekleşen ortalama ses (dbA) grafikleri sırasıyla Şekil 5.10 – 5.12’de gösterilmiştir.



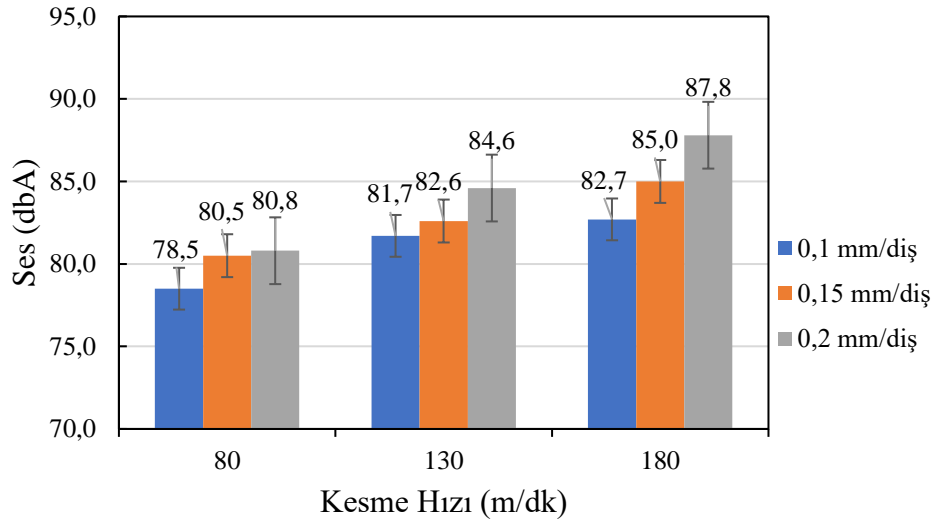
Şekil 5.10. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında ölçülen ortalama ses grafiği

Deneyleerde elde edilen ses seviyeleri, işleme ortamına bağılı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Kuru işleme ortamında, özellikle yüksek kesme hızlarında, ses seviyelerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Deneyle No 9'da maksimum 93,7 dB(A) ses seviyesine ulaşılmış olup, bu değer diğer tüm ortamlar arasında en yüksek seviyeyi temsil etmektedir. Kuru işleme ortamındaki bu yüksek ses seviyeleri, iş parçası ile kesici takım arasındaki sürtünmenin artması ve kesme kuvvetlerinin yükselmesi ile ilişkilendirilebilir. Garcia, vd. (2020)'ye göre, kuru işleme işlemleri genellikle daha yüksek gürültü seviyeleri ile karakterize edilir ve işleme kalitesini olumsuz etkiler. Ayrıca bir diğer literatür araştırmasında da olduğu gibi, kuru işleme işlemlerinde ses seviyelerinin genellikle daha yüksek olduğu ve bu durumun işleme sırasında olumsuz bir çalışma ortamı oluşturduğu belirtilmektedir (Moretti, vd., 2020). Yüksek ses seviyesi, işleme kalitesinin düşmesine ve operatörler için rahatsızlık yaratabilecek bir ortamın oluşmasına neden olabilir.



Şekil 5.11. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında ölçülen ortalama ses grafiği

MMY ortamında ise ses seviyelerinin kuru işleme ortamına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Özellikle Deney No 10'da 76,1 dB(A) ile en düşük ses seviyelerinden biri elde edilmiştir. MMY'nin kesme bölgesine yeterli miktarda soğutma ve yağlama sağlayarak sürtünmeyi azaltması ve böylece ses seviyelerini düşürdüğü söylenebilir. Bu bulgu, literatürde de desteklenmektedir; bazı çalışmalar MMY'nin daha sessiz bir işleme ortamı yarattığını ve bu sayede iş yeri güvenliği ve operatör konforunu artırdığını belirtmektedir (Moretti, vd., 2020; İynen, vd., 2020).



Şekil 5.12. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında ölçülen ortalama ses grafiği

En düşük ses seviyeleri ise nano-MMY ortamında kaydedilmiştir. Deney No. 19'da minimum 75,7 dB(A) ses seviyesi ölçülmüş olup, bu değer tüm deneyler arasında en sessiz ortamı temsil etmektedir. Nano-partiküllerin kesme bölgesindeki soğutma ve yağlama performansını daha da iyileştirdiği, bu sayede sürtünme ve kesme kuvvetlerini azaltarak ses seviyelerini en aza indirdiği görülmektedir. Literatürde de nano-MMY'nın, geleneksel yağlama yöntemlerine kıyasla hem titreşim hem de ses seviyeleri üzerinde olumlu etkileri olduğu vurgulanmaktadır (Li, vd., 2018). Nano-MMY'nın işleme süreçlerinde gürültü seviyelerini azaltarak iş yeri güvenliğini artırabileceği ve operatörler için daha rahat bir çalışma ortamı sağladığı belirtilmektedir.

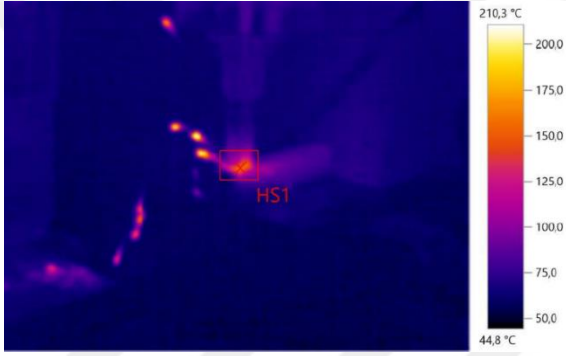
5.4 Sıcaklığın Değerlendirilmesi

Frezeleme işlemi sırasında kesici takım ve iş parçası arasında oluşan sıcaklık, takım ömrü, yüzey kalitesi ve iş parçasının boyutsal doğruluğu üzerinde doğrudan etkilidir. Çalışmada Kuru, MMY ve Nano-MMY uygulamalarının, kesici takımın etkilenen bölgelerinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, en yüksek sıcaklık değerleri kuru kesme ortamında gözlemlenmiş olup, MMY ve Nano-MMY uygulamalarında sıcaklık seviyelerinin önemli ölçüde düştüğü saptanmıştır.

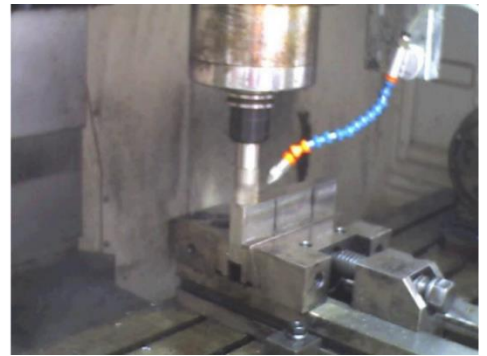
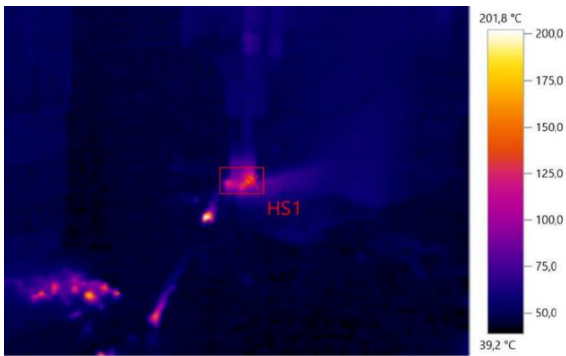
Deneyler esnasında kesici takım iş parçasının sonuna geldiğinde termal kamera ile Hardox 500 çeliğinde sıcaklıktan etkilenen bölgenin fotosu çekilmiştir. Deneylerde maximum ilerleme ve kesme hızında (deney 9, 18 ve 27) termal kameradan alınan görüntülerden "Testo IRSofT 4.8" yazılımıyla belirlenen Hardox 500 çeliğinde ısıdan etkilenen bölge ve sıcaklıkları Şekil 5.13 – 5.15'de gösterilmiştir. Isıdan etkilenen bölgeden ölçülen iş parçasında oluşan en yüksek sıcaklıklar ise Çizelge 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Deney 9 koşulunda ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı



Şekil 5.14. Deney 18 koşulunda ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı

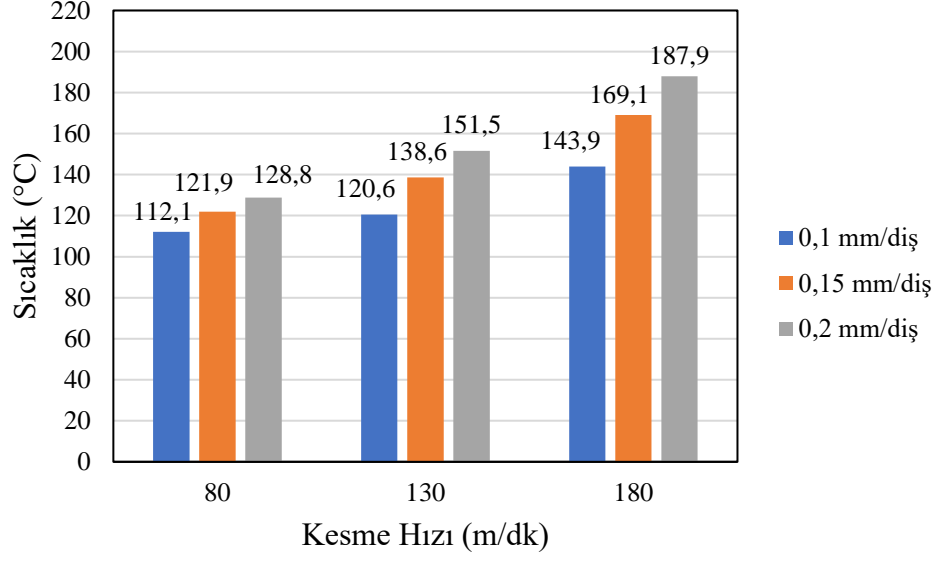


Şekil 5.15. Deney 27 koşulunda ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı

Çizelge 5.4. Frezeleme işleminde ısıdan etkilenen bölgelerin en yüksek sıcaklık değerleri

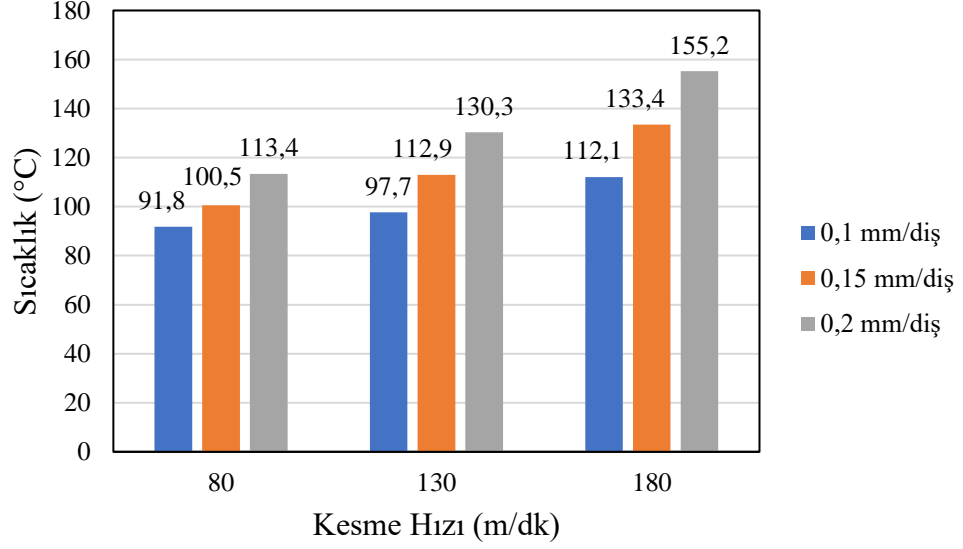
Deney No	Kesme Koşulu	V (m/dk)	f (mm/diş)	Sıcaklık (°C)
1	KURU	80	0,1	112,1
2		130	0,1	120,6
3		180	0,1	143,9
4		80	0,15	121,9
5		130	0,15	138,6
6		180	0,15	169,1
7		80	0,2	128,8
8		130	0,2	151,5
9		180	0,2	187,9
10	MMY	80	0,1	91,8
11		130	0,1	97,7
12		180	0,1	112,1
13		80	0,15	100,5
14		130	0,15	112,9
15		180	0,15	133,4
16		80	0,2	113,4
17		130	0,2	130,3
18		180	0,2	155,2
19	NANO-MMY	80	0,1	85,3
20		130	0,1	90,4
21		180	0,1	102,2
22		80	0,15	92,1
23		130	0,15	102,8
24		180	0,15	119,6
25		80	0,2	110,6
26		130	0,2	128,7
27		180	0,2	146,1

Kuru, MMY ve Nano-MMY ortamlarda gerçekleşen deneylerde Hardox 500 çeliğinde oluşan en yüksek sıcaklıkların grafiği Şekil 5.16 – 5.18’de gösterilmiştir.



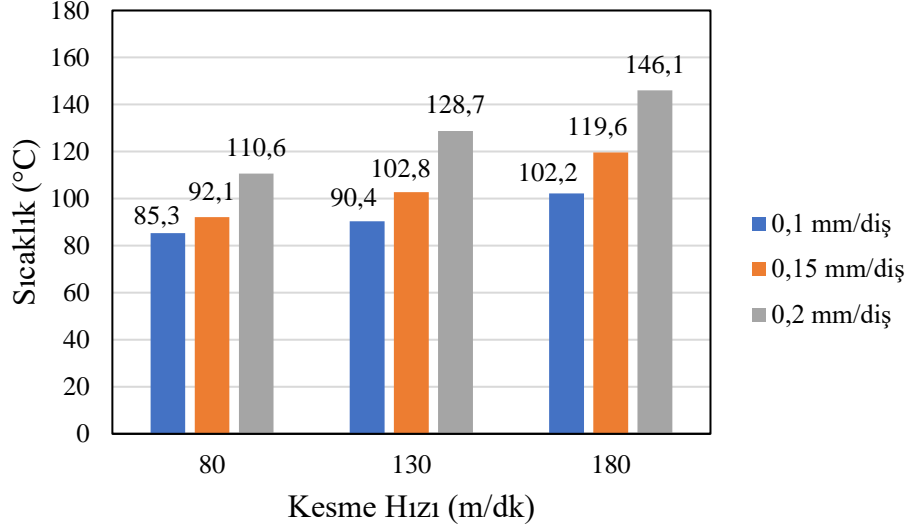
Şekil 5.16. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru ortamda iş parçasında oluşan en yüksek sıcaklık

Kuru işleme ortamında, sıcaklık değerleri diğer yöntemlere kıyasla en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Deneysel olarak kaydedilen en yüksek sıcaklık değeri 187,9°C ile elde edilmiştir. Kuru kesme sırasında, kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmenin artması nedeniyle bu bölgede oluşan ısı hızla yükselmektedir. Li, vd. (2018), çalışmasında da belirtildiği gibi, kuru işleme, yüksek sıcaklıklar nedeniyle takım aşınmasını hızlandırmakta ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Aynı zamanda, kuru kesme işlemlerinde yüksek sıcaklıkların termal hasara neden olabileceğini ve takım ömrünü kısaltabileceğini ortaya koymuştur (Talib, vd., 2017; Rahim ve Sasahara, 2011c). Bu bulgular, deneysel sonuçlarla da örtüşmektedir.



Şekil 5.17. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY ortamda iş parçasında oluşan en yüksek sıcaklık

MMY ile yapılan işlemler, kesme bölgesine minimum miktarda yağın püskürtülmesiyle sıcaklıkların kontrol altında tutulmasına olanak sağlamıştır. MMY, kuru işleme ortamına göre sıcaklığı önemli ölçüde azaltmış, en yüksek sıcaklık değeri 155,2°C olarak ölçülmüştür. Srikant, vd. (2015), çalışmasında da MMY'nin sıcaklıkları düşürerek hem yüzey kalitesini iyileştirdiği hem de kesici takımın ömrünü uzattığı vurgulanmıştır. Sharma ve Kumar (2020), MMY'nin hem çevre dostu hem de sıcaklık kontrolü açısından etkili bir yağlama yöntemi olduğunu belirtmiştir. Çalışmalar, MMY'nin kesme sırasında sürtünmeyi azaltarak daha düşük sıcaklıklarda daha verimli işleme sağladığını göstermektedir.



Şekil 5.18. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY ortamında iş parçasında oluşan en yüksek sıcaklık

Nano-MMY ortamda ise frezeleme işlemlerinde en düşük sıcaklık değerlerini ortaya koymuştur. En düşük sıcaklık değeri 85,3°C ile kaydedilmiş olup, nano-partikül içeren yağlayıcıların daha etkili bir soğutma ve yağlama sağladığı görülmüştür. Moretti, vd. (2020) ve İynen, vd. (2020), nano-parçacıkların ısı iletkenliğini artırarak kesme bölgesindeki sıcaklıkların düşürülmesinde önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, nano-MMY'nin hem sıcaklık kontrolünde hem de işleme kalitesinde diğer yöntemlere kıyasla daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır.

5.5 Güç ve Enerji Tüketiminin Değerlendirilmesi

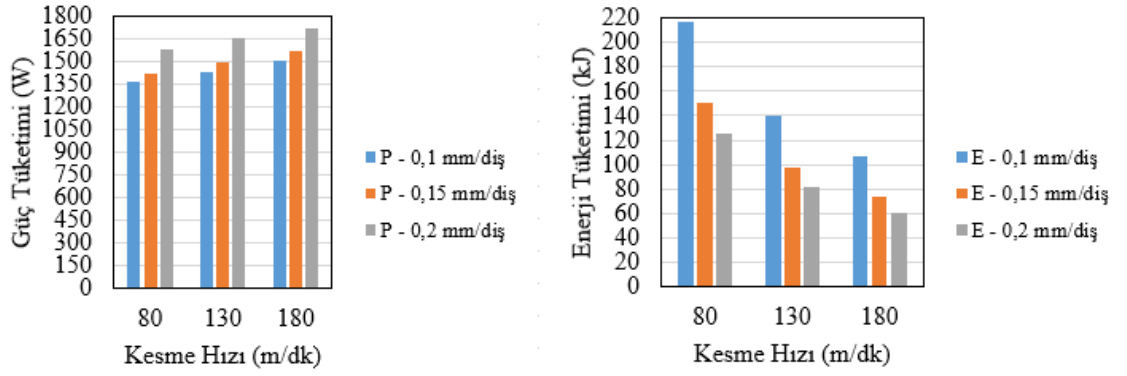
Kesme işlemi sırasında güç tüketimi, talaş kaldırma sürecinin enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından kritik bir göstergedir. Bu çalışmada, Kuru, MMY ve Nano-MMY ortamlarındaki güç tüketimi değerleri karşılaştırılmış ve Nano-MMY'nin güç tüketimi üzerindeki olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Kuru kesme ortamında en yüksek güç tüketimi gözlemlenirken, Nano-MMY uygulamasında daha düşük güç tüketim değerleri kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, soğutma ve yağlamanın sürtünme kuvvetini azaltarak enerji verimliliğine katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Frezeleme deneylerinde güç analiz cihazı ile frezeleme işlemi esnasında freze tezgahının kullandığı güç değerleri ölçülmüştür. Güç analiz cihazının maşaları dik

işlem tezgâhının gerekli kablolarına bağlanmıştır. Güç analiz cihazından elde edilen ham verilerden özel bir yazılım aracılığı ile harcanan toplam güç hesaplanmıştır. Denklem (4.6) ile enerji hesaplanmıştır. Ölçülen güç değerleri ile hesaplanan enerji değerleri Çizelge 5.5’da gösterilmiştir. Şekil 5.19 – 5.21’de ise Kuru, MMY ve Nano-MMY işleme ortamlarında gerçekleşen frezeleme deneylerinin güç grafikleri ile enerji grafikleri yanyana verilmiştir.

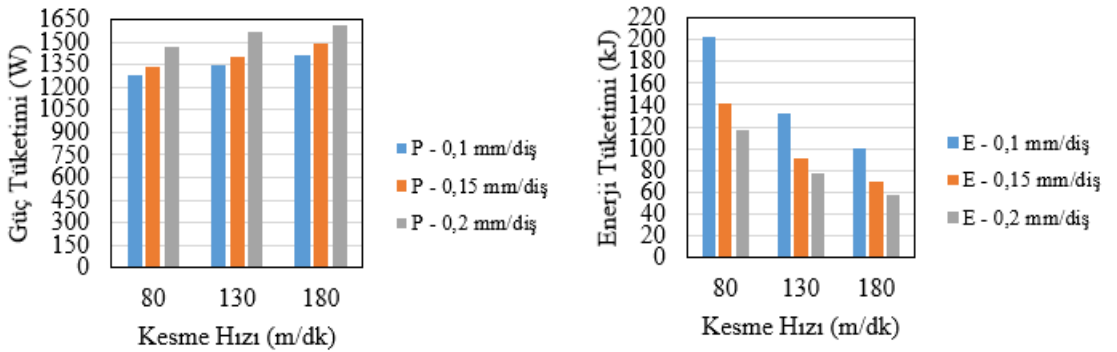
Çizelge 5.5. Deneylerde ölçülen güç ve enerji değerleri

Deney No	Kesme Koşulu	V (m/dk)	f (mm/diş)	Güç	Enerji
1	KURU	80	0,1	1362	216,51
2		130	0,1	1435	140,38
3		180	0,1	1511	106,75
4		80	0,15	1418	150,27
5		130	0,15	1499	97,76
6		180	0,15	1568	73,85
7		80	0,2	1581	125,66
8		130	0,2	1659	81,15
9		180	0,2	1719	60,72
10	MMY	80	0,1	1275	202,68
11		130	0,1	1346	131,67
12		180	0,1	1410	99,62
13		80	0,15	1337	141,69
14		130	0,15	1402	91,43
15		180	0,15	1485	69,94
16		80	0,2	1463	116,28
17		130	0,2	1568	76,69
18		180	0,2	1612	56,94
19	NANO-MMY	80	0,1	1236	196,48
20		130	0,1	1303	127,47
21		180	0,1	1370	96,79
22		80	0,15	1301	137,88
23		130	0,15	1361	88,76
24		180	0,15	1444	68,01
25		80	0,2	1419	112,79
26		130	0,2	1541	75,37
27		180	0,2	1563	55,21



Şekil 5.19. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında ölçülen güç ve enerji grafiği

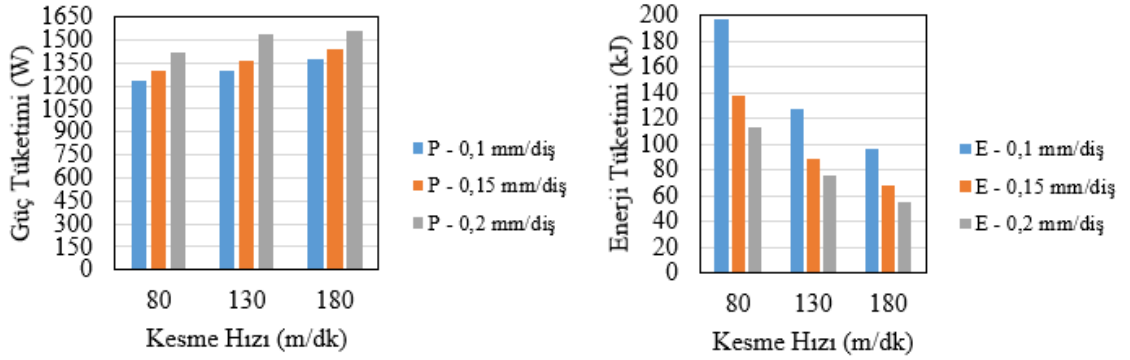
Yapılan deneylerde elde edilen güç ve enerji tüketimi sonuçları, farklı yağlama yöntemleri arasında önemli farklar ortaya çıkarmıştır. Genel olarak kuru kesme koşullarında en yüksek güç ve enerji tüketimi değerleri gözlenmiştir. Kuru kesme sırasında ölçülen en yüksek güç 1719 W, enerji tüketimi ise 216,51 kJ olarak kaydedilmiştir. Kuru işleme, kesme bölgesinde yüksek sürtünme ve ısı birikmesine yol açtığından, yüksek enerji tüketimine neden olmaktadır (Rahim ve Sasahara, 2011; Khosrojerdı, vd., 2019).



Şekil 5.20. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında ölçülen güç ve enerji grafiği

MMY ile yapılan kesme işlemlerinde, güç ve enerji tüketimi kuru kesmeye göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu durum, MMY'nın kesme bölgesinde etkili bir soğutma ve yağlama sağlamasından kaynaklanmaktadır (Rahim ve Sasahara, 2011). MMY'da

en düşük güç tüketimi 1275 W, enerji tüketimi ise 202,68 kJ olarak belirlenmiştir. MMY'nin sağladığı etkili soğutma ve yağlama özellikleri, sürtünmeyi azaltarak enerji verimliliğini artırmaktadır (Yıldız ve Nalbant, 2008; García, vd., 2020; Pimenov, vd., 2021). Ayrıca Yıldız ve Nalbant (2008), MMY'nin kullanımının enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda iş parçasının yüzey kalitesini de önemli ölçüde iyileştirdiğini belirtmiştir. Bu çalışma, MMY ve Nano-MMY uygulamaları arasındaki enerji tüketimi farkını doğrulayan sonuçlar sunmaktadır.



Şekil 5.21. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında ölçülen güç ve enerji grafiği

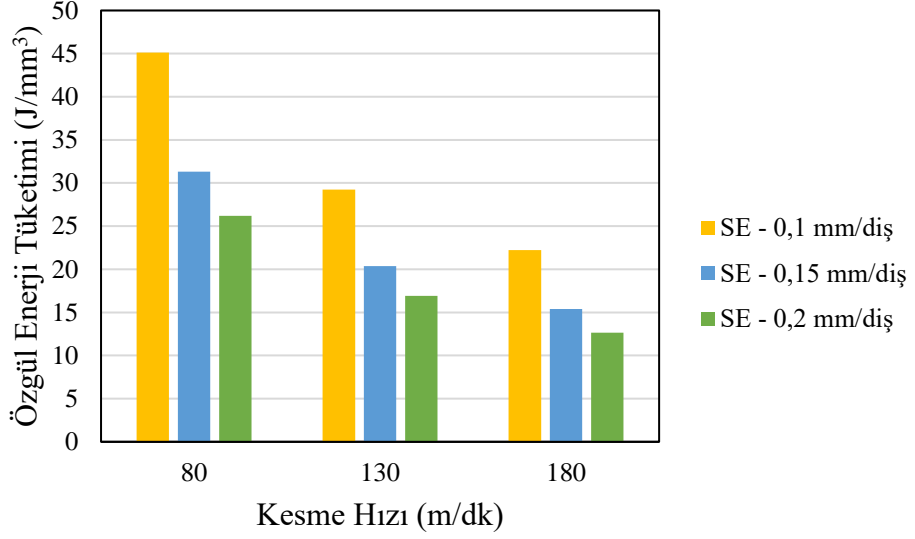
Nano-MMY ile gerçekleştirilen kesme işlemlerinde, güç ve enerji tüketimi daha da düşük seviyelere inmiştir. Nano-MMY'da en düşük güç tüketimi 1236 W, enerji tüketimi ise 196,48 kJ olarak kaydedilmiştir. Nano-MMY'nın nano partiküllerin sürtünmeyi azaltma ve ısı transferini iyileştirme özelliği, enerji tüketimini azaltmakta önemli bir rol oynamaktadır (Li, vd., 2018; Sharma ve Kumar, 2020). Ayrıca Elmunafi, vd. (2015), nano partikül katkılı MMY'nin (Nano-MMY) kesme sıvılarının enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda takım ömrünü uzattığını ve daha düşük güç tüketimi sağladığını göstermiştir. Çalışmalarında, nano katkılı yağlayıcıların standart MMY uygulamalarına göre daha düşük enerji tüketimi sağladığı ortaya konulmuştur.

Enerji tüketimi (kJ) ile özgül enerji tüketimi (J/mm³) denklem (4.6) ve (4.7) yardımıyla hesaplama işlemi yapılmıştır. Çizelge 5.6'de ise hesaplanan değerler gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Deneylerde hesaplanan talaş kaldırma hızı, işleme süresi, enerji tüketimi ve özgül enerji tüketimi değerleri

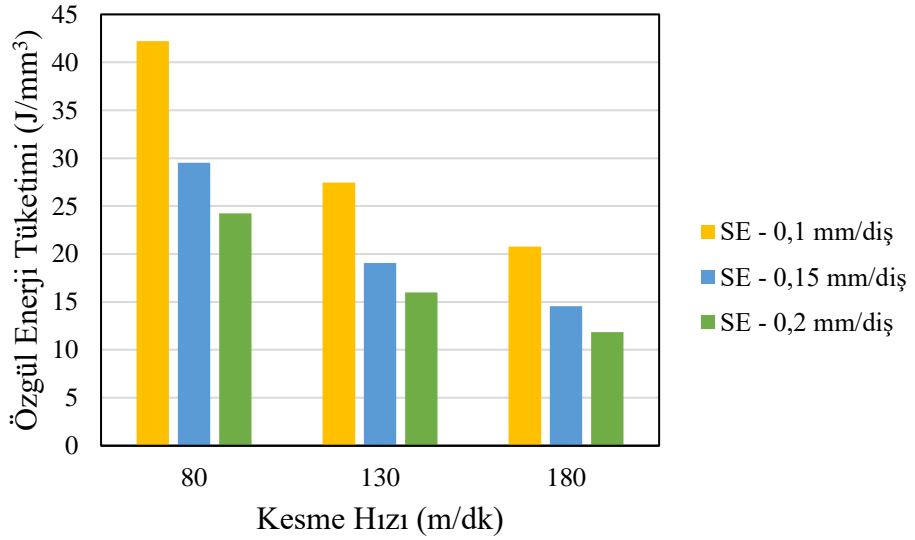
Deney No	Kesme Koşulu	V (m/dk)	f (mm/diş)	R _{MR} (mm ³ /s)	T _m (s)	E (kJ)	SE (J/mm ³)
1	KURU	80	0,1	31,83	159	216,51	45,11
2		130	0,1	51,73	97,8	140,38	29,25
3		180	0,1	71,62	70,7	106,75	22,24
4		80	0,15	47,75	106	150,27	31,31
5		130	0,15	77,59	65,2	97,76	20,37
6		180	0,15	107,43	47,1	73,85	15,39
7		80	0,2	63,66	79,5	125,66	26,18
8		130	0,2	103,45	48,9	81,15	16,91
9		180	0,2	143,24	35,3	60,72	12,65
10	MMY	80	0,1	31,83	159	202,68	42,23
11		130	0,1	51,73	97,8	131,67	27,43
12		180	0,1	71,62	70,7	99,62	20,75
13		80	0,15	47,75	106	141,69	29,52
14		130	0,15	77,59	65,2	91,43	19,05
15		180	0,15	107,43	47,1	69,94	14,57
16		80	0,2	63,66	79,5	116,28	24,23
17		130	0,2	103,45	48,9	76,69	15,98
18		180	0,2	143,24	35,3	56,94	11,86
19	NANO-MMY	80	0,1	31,83	159	196,48	40,93
20		130	0,1	51,73	97,8	127,47	26,56
21		180	0,1	71,62	70,7	96,79	20,17
22		80	0,15	47,75	106	137,88	28,72
23		130	0,15	77,59	65,2	88,76	18,49
24		180	0,15	107,43	47,1	68,01	14,17
25		80	0,2	63,66	79,5	112,79	23,5
26		130	0,2	103,45	48,9	75,37	15,7
27		180	0,2	143,24	35,3	55,21	11,5

Tüm kesme koşullarında ortaya çıkan özgül enerji tüketimlerinin grafikleri ise aşağıda Şekil 5.22 – 5.24'te gösterilmiştir.



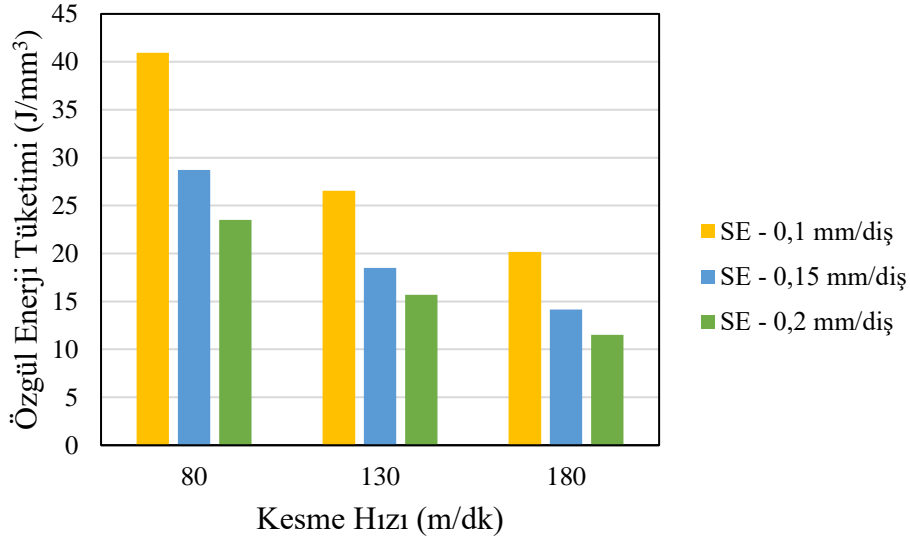
Şekil 5.22. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) Kuru işleme ortamında hesaplanan özgül enerji tüketimi grafiği

Şekil 5.22’de ki grafik ve hesaplanan veriler incelendiğinde kuru ortamda yüksek talaş kaldırma oranlarında (deney no: 9, R_{MR} : 143,24 mm³/s) özgül enerji tüketimi azalmakta (12,65 J/mm³), bu da talaşın daha verimli şekilde kaldırıldığı durumlarda enerji tüketiminin optimize edilebileceğini göstermektedir (Sharma ve Kumar, 2020).



Şekil 5.23. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) MMY işleme ortamında hesaplanan özgül enerji tüketimi grafiği

MMY ortamındaki yüksek talaş kaldırma oranlarında (deney no: 18, R_{MR} : 143,24 mm^3/s) ise özgül enerji tüketimi 11,86 J/mm^3 'e düşmüştür. Bu sonuç, MMY'nın yüksek verimli talaş kaldırma süreçlerine katkı sağladığını göstermektedir.



Şekil 5.24. Parametreleri farklı alınan (kesme hızı ve ilerleme) NANO-MMY işleme ortamında hesaplanan özgül enerji tüketimi grafiği

Son olarak Nano-MMY'nın, yüksek talaş kaldırma oranlarında (deney no: 27, R_{MR} : 143,24 mm^3/s) özgül enerji tüketimini 11,50 J/mm^3 'e kadar düşürdüğü görülmektedir. Bu da deneydeki en düşük özgül enerji tüketim verisinin Nano-MMY işleme ortamında olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, Nano-MMY'nın, kesme bölgesinde daha etkili bir yağlama ve soğutma sağlaması ile açıklanabilir (Li, vd., 2018).

5.6 Optimizasyon

Hardox 500 çeliğinin frezelenmesinde her çıktının deney sonucu değerlendirildikten sonra ANOVA ve Regresyon analizleri yapılmıştır. Devamında ÇKKV çalışmalarında ise, kriter ağırlıklarının tespiti önemli olmakla beraber, karar verme yöntemlerinde kullanıldığı için ağırlıkların tespiti için objektif yöntem olan CRITIC metodu, ÇKKV

problemlerinin çözümünde ise Gri İlişkisel Analizi (GİA) yönteminden yararlanarak hesaplamalar yapılmıştır.

5.6.1 ANOVA (Varyans) Analizi Sonuçları

Bu deney çalışmasında ANOVA tekniği kullanılarak deney parametrelerinin her bir çıktı üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Çizelge 5.7’de yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve ses için Çizelge 5.8’de ise sıcaklık ve güç için ANOVA sonuçları verilmiştir. Burada A değeri kesme koşulu (Kuru, MMY, Nano-MMY), B değeri ilerleme miktarı, C değeri kesme hızı, Sd kısaltması serbestlik derecesi, KT kısaltması kareler toplamı, KO kısaltması kareler ortalaması, Kt.O. kısaltması ise katkı oranını ifade etmektedir.

Çizelge 5.7. Yüzey pürüzlülüğü, Titreşim ve Ses için ANOVA sonuçları

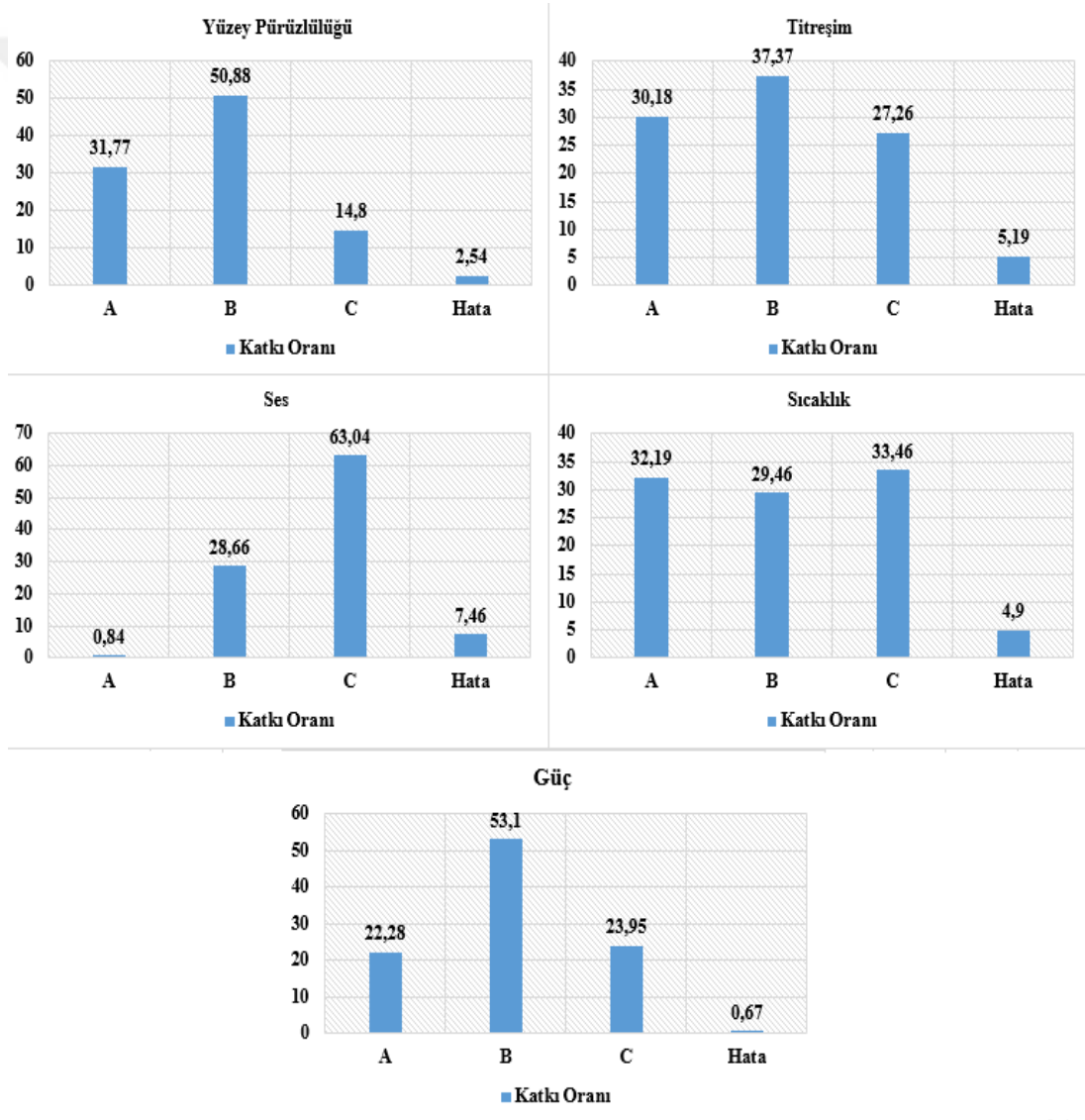
Yüzey Pürüzlülüğü	Faktörler	Sd	KT	KO	F-değeri	p-değeri	%Kt.O.
	A	2	0,1266	0,0633	124,92	0	31,77%
	B	2	0,2029	0,1014	200,08	0	50,88%
	C	2	0,0590	0,0295	58,21	0	14,80%
	Hata	20	0,0101	0,0005			2,54%
	Toplam	26					100,00%
$R^2: \%97,46, R^2(adj): \%96,69, R^2(pred): \%95,37$							
Titreşim	Faktörler	Sd	KT	KO	F-değeri	p-değeri	%Kt.O.
	A	2	1389,9	694,97	58,19	0	30,18%
	B	2	1721,1	860,55	72,05	0	37,37%
	C	2	1255,4	627,72	52,56	0	27,26%
	Hata	20	238,9	11,94			5,19%
	Toplam	26					100,00%
$R^2: \%94,81, R^2(adj): \%93,26, R^2(pred): \%90,55$							
Ses	Faktörler	Sd	KT	KO	F-değeri	p-değeri	%Kt.O.
	A	2	1,816	0,9078	1,12	0,345	0,84%
	B	2	62,142	31,0711	38,41	0	28,66%
	C	2	136,702	68,3511	84,49	0	63,04%
	Hata	20	16,18	0,809			7,46%
	Toplam	26					100,00%
$R^2: \%92,54, R^2(adj): \%90,30, R^2(pred): \%86,40$							

Çizelge 5.7 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü için, ilerleme miktarı (B) %50,88 ile en yüksek katkı oranına sahip, ardından kesme koşulu (A) %31,77 ve kesme hızı (C) %14,80 oran çıkmaktadır. Hata oranının %2,54 olması ve modelin belirtme katsayısı R^2 : %97,46 değeri ile veriyi açıklaması çalışmanın oldukça uyumlu sonuçlar verdiğinin göstergesidir. Titreşimde, ilerleme miktarı (B) %37,37 ile en yüksek katkıya sahipken, kesme koşulu (A) %30,18 ve kesme hızı (C) %27,26 ile onu takip etmektedir. Hata oranının %5,19 olması ve modelin belirtme katsayısı R^2 : %94,81 değeri ile veriyi açıklaması çalışmanın oldukça uyumlu sonuçlar verdiğinin göstergesidir. Ses bulgularında, kesme hızı (C) %63,04 ile en yüksek katkıya sahipken, ilerleme miktarı (B) %28,66 ve ile onu takip etmektedir. Ayrıca, kesme hızı ve ilerleme miktarının etkili bir parametre olmasına karşın kesme koşulu (A) etkisiz bir parametre olduğu belirlenmiştir. Burada modelin belirtme katsayısı R^2 : %92,54 değeri ile iyi bir uyum sağlıyor, ancak ses için modelin açıklayıcılığı diğer değişkenlere göre daha düşük bulunmuştur. Kesme koşulu (A) için p-değeri (0.345) bu faktörün anlamlı olmadığına işaret etmektedir. Ancak ilerleme miktarı (B) ve kesme hızı (C) faktörleri için 0 değeri anlamlı etkiler olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.8. Sıcaklık ve Güç için ANOVA sonuçları

Sıcaklık	Faktörler	Sd	KT	KO	F-değeri	p-değeri	%Kt.O.
	A	2	5347,3	2673,63	65,66	0	32,19%
	B	2	4894	2447,01	60,1	0	29,46%
	C	2	5558,3	2779,15	68,25	0	33,46%
	Hata	20	814,4	40,72			4,90%
	Toplam	26					100,00%
R^2 : %95,10, $R^2(Adj)$: %93,63, $R^2(pred)$: %91,07							
Güç Tüketimi (W)	Faktörler	Sd	KT	KO	F-değeri	p-değeri	%Kt.O.
	A	2	86397	43198	332,29	0	22,28%
	B	2	205953	102976	792,1	0	53,10%
	C	2	92889	46445	357,26	0	23,95%
	Hata	20	2600	130			0,67%
	Toplam	26					100,00%
R^2 : %99,33, $R^2(Adj)$: %99,13, $R^2(pred)$: %98,78							

Sıcaklık için yapılan Anova analizinde, C faktörü %33,46 ile en yüksek katkıyı sağlıyor, ardından A (32,19%) ve B (29,46%) faktörleri gelmektedir. R^2 : %97,46 değeri modelin verinin %95,10'unu açıkladığını göstermektedir. Hata oranı %4,90 bulunmuştur. Bu durum ise çalışmanın oldukça uyumlu sonuçlar verdiğinin göstergesidir. Son olarak Çizelge 5.8'den güç için yapılan analiz sonucuna bakıldığında, B faktörü %53,10 ile en yüksek katkıya sahipken, A (22,28%) ve C (23,95%) onu izlemektedir. Tüm faktörler için p-değeri (0) anlamlı etkiler olduğunu göstermektedir. Oldukça yüksek bir uyumun modelin belirtme katsayısına (R^2 : %99,33) bakıldığında anlaşılması aşikar bir durumdur. Ayrıca kontrol faktörlerinin % katkı oranları Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Kontrol faktörlerinin tüm çıktılar üzerindeki % katkı oranları

5.6.2 Regresyon Analizi Sonuçları

Hardox 500 çeliğinin frezelenmesinde regresyon analizi kullanılarak deney parametrelerinin her bir çıktı üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Çizelge 5.9'da tüm çıktıkların birinci dereceden regresyon denklemleri ve matematiksel modelin belirtme katsayıları verilmiştir. Burada A: Kesme koşulu (1: Kuru, 2: MMY ve 3: Nano-MMY), B: İlerleme (1: 0.10 mm/diş, 2: 0.15 mm/diş ve 3: 0.20 mm/diş) ve C: Kesme hızı (1: 80 m/dk, 2: 130 m/dk ve 3: 180 m/dk) olarak seçilmiş ve kodlanmıştır.

Çizelge 5.9. Tüm çıktıklar için Regresyon denklemleri ve belirtme katsayıları

Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	$Ra = 0,7793 - 0,2194 A - 0,0256 B - 0,3761 C + 0,04056 A*A + 0,04222 B*B + 0,08389 C*C - 0,01833 A*B + 0,00667 A*C - 0,00167 B*C$
	$R^2: \%98,61, R^2(adj): \%97,87, R^2(pred): \%96,51$
Titreşim	$\text{Titreşim} = 16,18 - 15,80 A + 6,37 B + 6,33 C + 3,17 A*A + 0,19 B*B + 0,27 C*C - 0,942 A*B - 1,800 A*C + 2,267 B*C$
	$R^2: \%97,23, R^2(adj): \%95,76, R^2(pred): \%91,66$
Ses	$\text{Ses} = 72,50 + 3,12 A + 0,11 B + 3,08 C - 0,550 A*A + 0,167 B*B - 0,433 C*C - 0,308 A*B - 0,150 A*C + 0,850 B*C$
	$R^2: \%97,19, R^2(adj): \%95,70, R^2(pred): \%92,32$
Sıcaklık (T)	$T = 144,59 - 44,45 A - 3,37 B - 1,70 C + 8,76 A*A + 1,49 B*B + 4,39 C*C + 1,325 A*B - 4,850 A*C + 5,617 B*C$
	$R^2: \%99,20, R^2(adj): \%98,78, R^2(pred): \%98,02$
Güç Tüketimi (W)	$\text{Güç} = 1421,6 - 168,4 A - 56,8 B + 106,4 C + 27,44 A*A + 41,28 B*B - 8,56 C*C - 3,08 A*B - 1,33 A*C + 1,08 B*C$
	$R^2: \%99,37, R^2(adj): \%99,03, R^2(pred): \%98,34$

Çizelge 5.9'a bakıldığında yüksek bir R^2 değeri (%98,61) ile model, yüzey pürüzlülüğünün büyük bir kısmını açıklayabiliyor. Bu değer titreşimde de yüksek bir R^2 (%97,23) ile bu model titreşimdeki varyasyonun büyük çoğunluğunu açıkladığı görülmektedir. Ses değerine bakıldığında; model ses değişimini iyi açıklıyor (R^2 %97,19), ancak prediktif gücü biraz daha düşük (%92,32) olduğu görülmektedir. Sıcaklık ve güç tüketim değerleri sırasıyla R^2 (%99,20), R^2 (%99,37) alırken model güçlerinin mükemmel bir şekilde açıklandığını kanıtlamıştır. Tüm çıktılar göz önüne alındığında geliştirilen modellerin yüksek tahmin yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.

5.6.3 CRITIC Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Ağırlıklandırma yöntemlerinden objektif olanlarında, kriter ağırlıklarını belirlemek amacıyla karar matrisinin elemanları kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde, ağırlıkları saptamak için genellikle her kritere ilişkin farklı alternatiflerin performanslarındaki çeşitlerinden yararlanılmaktadır (Keshavarz-Ghorabae, vd., 2021). Bu çalışmada objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden yaygın olarak tercih edilen CRITIC yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin çözüm aşamaları aşağıda verilmiştir.

1.Adım: Tam faktöriyel deney tasarımına göre yapılan deneylerdeki karar matrisi elemanları maliyet yönlü kriter denklemi (4.17) ile minimize edilerek normalizasyon yapılmış ve Çizelge 5.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.10. Karar matrisi

Deney No	Kesme Koşulu	V (m/dk)	f (mm/diş)	Ra (µm)	Titreşim (m/s ²)	Ses (dbA)	Sıcaklık (°C)	Güç Tüketimi (W)
1	KURU	80	0,1	0.32	13.4	78.2	112.1	1362
2		130	0,1	0.18	25.1	81.7	120.6	1435
3		180	0,1	0.25	32.9	82	143.9	1511
4		80	0,15	0.41	20.3	79.6	121.9	1418
5		130	0,15	0.24	34.5	82	138.6	1499
6		180	0,15	0.3	46	84.7	169.1	1568
7		80	0,2	0.55	37.8	80.8	128.8	1581
8		130	0,2	0.45	46.7	85.7	151.5	1659
9		180	0,2	0.5	55.5	89.4	187.9	1719
10	MMY	80	0,1	0.19	11.1	79.4	91.8	1275
11		130	0,1	0.11	13.4	81.8	97.7	1346
12		180	0,1	0.15	17.9	83.6	112.1	1410
13		80	0,15	0.27	14.7	80.9	100.5	1337
14		130	0,15	0.16	23.4	83.4	112.9	1402
15		180	0,15	0.2	33.3	86.1	133.4	1485
16		80	0,2	0.41	20.3	81.1	113.4	1463
17		130	0,2	0.27	31.2	84.9	130.3	1568
18		180	0,2	0.35	41	87.9	155.2	1612
19	NANO-MMY	80	0,1	0.15	5.8	78.5	85.3	1236
20		130	0,1	0.08	8.3	81.7	90.4	1303
21		180	0,1	0.12	10	82.7	102.2	1370
22		80	0,15	0.23	9.7	80.5	92.1	1301
23		130	0,15	0.13	14.8	82.6	102.8	1361
24		180	0,15	0.16	27.5	85	119.6	1444
25		80	0,2	0.35	17.9	80.8	110.6	1419
26		130	0,2	0.23	26.3	84.6	128.7	1541
27		180	0,2	0.3	37.2	87.8	146.1	1563

CRITIC ağırlıklandırma yöntemiyle yapılan analiz sonucunda, farklı kriterler arasındaki ilişkiler ve her bir kriterin göreceli önemi belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü (µm), titreşim (m/s²), ses (dbA), sıcaklık (°C), ve güç tüketimi (W) gibi kriterler üzerinde yapılan değerlendirmeler, her bir parametrenin standart sapması (σ_j),

korelasyon katsayıları (ρ_{jk}) ve ağırlık katsayıları (w_j) belirlenerek sonuçlar elde edilmiştir.

2.Adım: Değerlendirme kriterleri arasındaki ilişkiyi ölçmek adına doğrusal korelasyon katsayıları (ρ_{jk}) denklem (4.18) yardımıyla hesaplanarak Çizelge 5.11 ve 5.12’de sırası ile gösterilmiştir.

Çizelge 5.11. İlişki katsayısı matrisi

	Ra	Titreşim	Ses	Sıcaklık	Güç Tüketimi
Ra	1	0.6237	0.1891	0.5987	0.6734
Titreşim	0.6237	1	0.7578	0.9669	0.9555
Ses	0.1891	0.7578	1	0.7499	0.7661
Sıcaklık	0.5987	0.9669	0.7499	1	0.9349
Güç Tüketimi	0.6734	0.9555	0.7661	0.9349	1

Çizelge 5.12. ρ_{jk} matrisi

	Ra	Titreşim	Ses	Sıcaklık	Güç Tüketimi
Ra	0	0.3763	0.8109	0.4013	0.3266
Titreşim	0.3763	0	0.2422	0.0331	0.0445
Ses	0.8109	0.2422	0	0.2501	0.2339
Sıcaklık	0.4013	0.0331	0.2501	0	0.0651
Güç Tüketimi	0.3266	0.0445	0.2339	0.0651	0

Yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık ($\rho = 0.598$) ve güç tüketimi ($\rho = 0.673$) ile pozitif bir ilişkiye sahiptir. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün sıcaklık ve güç tüketimi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Literatürde, yüzey pürüzlülüğünün işleme kalitesi ve parçanın performansı üzerinde en belirleyici kriterlerden biri olduğu belirtilmektedir. Türkmenoğlu, vd. (2020), Ra’nın yüzey kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğunu ve yüksek Ra değerlerinin iş parçasının kullanım ömrünü azaltabileceğini göstermişlerdir, bu da CRITIC analizindeki bulguları destekler niteliktedir.

Titreşim, ses ($\rho = 0.757$) ve güç tüketimi ($\rho = 0.955$) ile güçlü bir korelasyon göstermektedir. Bu, titreşim seviyesindeki artışların güç tüketimini ve gürültü seviyesini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Titreşim, genellikle işleme kararlılığı ve işleme sürecinin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Montgomery ve Altintas (1991), yüksek titreşim seviyelerinin işleme kalitesini düşürdüğünü ve iş parçasında istenmeyen deformasyonlara neden olabileceğini göstermiştir.

Ses, titreşim ve sıcaklık ile orta dereceli bir ilişki bulunurken, yüzey pürüzlülüğü ile daha zayıf bir ilişkiye sahiptir ($\rho = 0.189$).

3.Adım: Bu adımda toplam bilgi (C_j) denklem (4.19), standart sapma (σ_j) denklem (4.20) ve değerlendirme kriter ağırlıkları (w_j) denklem (4.21) yardımıyla hesaplanarak Çizelge 5.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.13. C_j , σ_j , w_j değerleri

	σ_j	C_j	w_j
Ra	0.2635	0.5046	0.350
Titreşim	0.2678	0.1864	0.129
Ses	0.2578	0.3963	0.275
Sıcaklık	0.2464	0.1847	0.128
Güç Tüketimi	0.2529	0.1695	0.118
TOPLAM			1

Çalışmada hesaplanan kriter ağırlıklarına bakıldığında; yüzey pürüzlülüğü (Ra) %35 ile en yüksek ağırlığa sahip parametre olarak bulunmuştur. Bu, yüzey kalitesinin işleme süreçlerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. %27.5 ile ses ikinci en önemli parametre olarak belirlenmiştir. Ses seviyesi, işleme sürecinde hem kaliteyi hem de operatör güvenliğini etkileyen bir faktördür. Titreşim %12,9 ağırlığa sahipken, sıcaklık (T) %12,8 ve %11,8 ile güç tüketimi ağırlığı en düşük ağırlık parametresi olarak bulunmuştur. Güç tüketimi, enerji verimliliği gibi etkenler üzerinde önemi yüksek olsa da, diğer parametrelerle kıyaslanınca daha düşük öneme sahiptir.

5.6.4 Gri İlişkisel Analizi (GİA) Optimizasyon Sonuçları

Çalışmada, CRITIC yöntem ile ağırlıklandırma yapıp, GİA ile optimizasyon yapılmıştır.

1. Adım: Karar matrisi için denklem (4.22) kullanılarak hesaplama yapılmış ve Çizelge 5.14'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.14. Karar matrisi

Deney No	Kesme Koşulu	V (m/dk)	f (mm/diş)	Ra (µm)	Titreşim (m/s ²)	Ses (dbA)	Sıcaklık (°C)	Güç Tüketimi (W)
1	KURU	80	0,1	0.32	13.4	78.2	112.1	1362
2		130	0,1	0.18	25.1	81.7	120.6	1435
3		180	0,1	0.25	32.9	82	143.9	1511
4		80	0,15	0.41	20.3	79.6	121.9	1418
5		130	0,15	0.24	34.5	82	138.6	1499
6		180	0,15	0.3	46	84.7	169.1	1568
7		80	0,2	0.55	37.8	80.8	128.8	1581
8		130	0,2	0.45	46.7	85.7	151.5	1659
9		180	0,2	0.5	55.5	89.4	187.9	1719
10	MMY	80	0,1	0.19	11.1	79.4	91.8	1275
11		130	0,1	0.11	13.4	81.8	97.7	1346
12		180	0,1	0.15	17.9	83.6	112.1	1410
13		80	0,15	0.27	14.7	80.9	100.5	1337
14		130	0,15	0.16	23.4	83.4	112.9	1402
15		180	0,15	0.2	33.3	86.1	133.4	1485
16		80	0,2	0.41	20.3	81.1	113.4	1463
17		130	0,2	0.27	31.2	84.9	130.3	1568
18		180	0,2	0.35	41	87.9	155.2	1612
19	NANO-MMY	80	0,1	0.15	5.8	78.5	85.3	1236
20		130	0,1	0.08	8.3	81.7	90.4	1303
21		180	0,1	0.12	10	82.7	102.2	1370
22		80	0,15	0.23	9.7	80.5	92.1	1301
23		130	0,15	0.13	14.8	82.6	102.8	1361
24		180	0,15	0.16	27.5	85	119.6	1444
25		80	0,2	0.35	17.9	80.8	110.6	1419
26		130	0,2	0.23	26.3	84.6	128.7	1541
27		180	0,2	0.3	37.2	87.8	146.1	1563

2.Adım: Normalizasyon için denklem (4.24) kullanılarak parametreleri minimize ederek (en küçük en iyi) hesaplama yapılmıştır. Veriler Çizelge 5.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.15. Normalize edilmiş karar matrisi

Deney No	Kesme Koşulu	V	f	Ra	Titreşim	Ses	Sıcaklık	Güç Tüketimi
1	KURU	80	0,1	0.4894	0.8471	1.0000	0.7388	0.7391
2		130	0,1	0.7872	0.6117	0.6875	0.6559	0.5880
3		180	0,1	0.6383	0.4547	0.6607	0.4288	0.4306
4		80	0,15	0.2979	0.7082	0.8750	0.6433	0.6232
5		130	0,15	0.6596	0.4225	0.6607	0.4805	0.4555
6		180	0,15	0.5319	0.1911	0.4196	0.1832	0.3126
7		80	0,2	0.0000	0.3561	0.7679	0.5760	0.2857
8		130	0,2	0.2128	0.1771	0.3304	0.3548	0.1242
9		180	0,2	0.1064	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	MMY	80	0,1	0.7660	0.8934	0.8929	0.9366	0.9193
11		130	0,1	0.9362	0.8471	0.6786	0.8791	0.7723
12		180	0,1	0.8511	0.7565	0.5179	0.7388	0.6398
13		80	0,15	0.5957	0.8209	0.7589	0.8519	0.7909
14		130	0,15	0.8298	0.6459	0.5357	0.7310	0.6563
15		180	0,15	0.7447	0.4467	0.2946	0.5312	0.4845
16		80	0,2	0.2979	0.7082	0.7411	0.7261	0.5300
17		130	0,2	0.5957	0.4889	0.4018	0.5614	0.3126
18		180	0,2	0.4255	0.2918	0.1339	0.3187	0.2215
19	NANO-MMY	80	0,1	0.8511	1.0000	0.9732	1.0000	1.0000
20		130	0,1	1.0000	0.9497	0.6875	0.9503	0.8613
21		180	0,1	0.9149	0.9155	0.5982	0.8353	0.7226
22		80	0,15	0.6809	0.9215	0.7946	0.9337	0.8654
23		130	0,15	0.8936	0.8189	0.6071	0.8294	0.7412
24		180	0,15	0.8298	0.5634	0.3929	0.6657	0.5694
25		80	0,2	0.4255	0.7565	0.7679	0.7534	0.6211
26		130	0,2	0.6809	0.5875	0.4286	0.5770	0.3685
27		180	0,2	0.5319	0.3682	0.1429	0.4074	0.3230

3.Adım: Referans serisine olan uzaklığı saptamak için denklem (4.27) kullanılarak hesaplama yapılır. Bu değerler Çizelge 5.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.16. Uzaklık matrisi

Deney No	Kesme Koşulu	V	f	Ra	Titreşim	Ses	Sıcaklık	Güç Tüketimi
1	KURU	80	0,1	0.5106	0.1529	0.0000	0.2612	0.2609
2		130	0,1	0.2128	0.3883	0.3125	0.3441	0.4120
3		180	0,1	0.3617	0.5453	0.3393	0.5712	0.5694
4		80	0,15	0.7021	0.2918	0.1250	0.3567	0.3768
5		130	0,15	0.3404	0.5775	0.3393	0.5195	0.5445
6		180	0,15	0.4681	0.8089	0.5804	0.8168	0.6874
7		80	0,2	1.0000	0.6439	0.2321	0.4240	0.7143
8		130	0,2	0.7872	0.8229	0.6696	0.6452	0.8758
9		180	0,2	0.8936	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
10	MMY	80	0,1	0.2340	0.1066	0.1071	0.0634	0.0807
11		130	0,1	0.0638	0.1529	0.3214	0.1209	0.2277
12		180	0,1	0.1489	0.2435	0.4821	0.2612	0.3602
13		80	0,15	0.4043	0.1791	0.2411	0.1481	0.2091
14		130	0,15	0.1702	0.3541	0.4643	0.2690	0.3437
15		180	0,15	0.2553	0.5533	0.7054	0.4688	0.5155
16		80	0,2	0.7021	0.2918	0.2589	0.2739	0.4700
17		130	0,2	0.4043	0.5111	0.5982	0.4386	0.6874
18		180	0,2	0.5745	0.7082	0.8661	0.6813	0.7785
19	NANO-MMY	80	0,1	0.1489	0.0000	0.0268	0.0000	0.0000
20		130	0,1	0.0000	0.0503	0.3125	0.0497	0.1387
21		180	0,1	0.0851	0.0845	0.4018	0.1647	0.2774
22		80	0,15	0.3191	0.0785	0.2054	0.0663	0.1346
23		130	0,15	0.1064	0.1811	0.3929	0.1706	0.2588
24		180	0,15	0.1702	0.4366	0.6071	0.3343	0.4306
25		80	0,2	0.5745	0.2435	0.2321	0.2466	0.3789
26		130	0,2	0.3191	0.4125	0.5714	0.4230	0.6315
27		180	0,2	0.4681	0.6318	0.8571	0.5926	0.6770

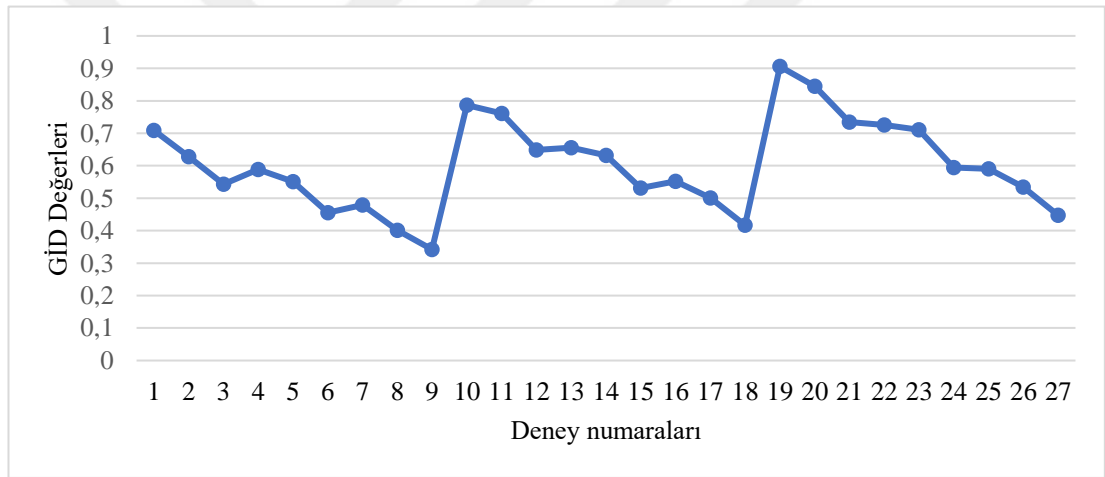
4. ve 5. Adım: 4. adımda denklem (4.29) kullanılarak Gri ilişkisel katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca burada, tüm performans kriterleri için ζ (ayırım katsayısı)

değeri 0.5 olarak alınmıştır. Son olarak 5. adımda, denklem (4.30) kullanılarak her bir kriterin gri ilişkisel katsayısı ile CRITIC yöntemiyle hesaplanan kriter ağırlıkları çarpılarak Gri İlişkisel Derecesi (GİD) elde edilmiştir. Çizelge 5.17’de performans kriterlerinin Gri ilişkisel katsayıları, GİD değerleri ve sıralama değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.17. Gri ilişkisel katsayıları, GİD ve Sıralama değerleri

Deney No	Ra	Titreşim	Ses	Sıcaklık	Güç Tüketimi	GİD	Sıralama
	0.350	0.129	0.275	0.128	0.118		
1	0.4947	0.7658	1.0000	0.6569	0.6571	0.7086	8
2	0.7015	0.5629	0.6154	0.5924	0.5482	0.6279	12
3	0.5802	0.4783	0.5957	0.4668	0.4676	0.5435	18
4	0.4159	0.6315	0.8000	0.5836	0.5702	0.5890	15
5	0.5949	0.4641	0.5957	0.4904	0.4787	0.5512	17
6	0.5165	0.3820	0.4628	0.3797	0.4211	0.4556	23
7	0.3333	0.4371	0.6829	0.5411	0.4118	0.4787	22
8	0.3884	0.3779	0.4275	0.4366	0.3634	0.4010	26
9	0.3588	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3422	27
10	0.6812	0.8242	0.8235	0.8875	0.8610	0.7864	3
11	0.8868	0.7658	0.6087	0.8053	0.6871	0.7608	4
12	0.7705	0.6725	0.5091	0.6569	0.5812	0.6491	10
13	0.5529	0.7363	0.6747	0.7714	0.7051	0.6560	9
14	0.7460	0.5854	0.5185	0.6502	0.5926	0.6324	11
15	0.6620	0.4747	0.4148	0.5161	0.4924	0.5312	20
16	0.4159	0.6315	0.6588	0.6461	0.5155	0.5518	16
17	0.5529	0.4945	0.4553	0.5327	0.4211	0.5004	21
18	0.4653	0.4138	0.3660	0.4233	0.3911	0.4173	25
19	0.7705	1.0000	0.9492	1.0000	1.0000	0.9057	1
20	1.0000	0.9086	0.6154	0.9096	0.7828	0.8453	2
21	0.8545	0.8554	0.5545	0.7522	0.6431	0.7342	5
22	0.6104	0.8643	0.7089	0.8830	0.7879	0.7261	6
23	0.8246	0.7341	0.5600	0.7456	0.6589	0.7105	7
24	0.7460	0.5338	0.4516	0.5993	0.5373	0.5943	13
25	0.4653	0.6725	0.6829	0.6697	0.5689	0.5903	14
26	0.6104	0.5480	0.4667	0.5417	0.4419	0.5342	19
27	0.5165	0.4418	0.3684	0.4576	0.4248	0.4478	24

Tüm veriler incelendiğinde, en yüksek ilişki derecesine sahip olan deney numarası 19 olup, GİD değeri 0.905'dir. En yüksek Gri ilişki derecesi; 80 m/dk kesme hızı ve 0,1 mm/diş ilerleme miktarı koşullarında elde edilmiştir. Bu, yüzey pürüzlülüğü, titreşim, ses, sıcaklık ve güç gibi çoklu kriterlerin en uygun düzeyde olduğu koşulun bu deneyde elde edildiğini göstermektedir. En düşük GİD değerine sahip deney ise 9 numaralı deney (0.342) bulunmuştur. En düşük Gri ilişki derecesi; 180 m/dk kesme hızı ve 0,2 mm/diş ilerleme miktarı koşullarında elde edilmiştir. Bu deneyde işleme kalitesi parametreleri daha az optimal olarak değerlendirilmektedir. Şekil 5.26'da deney numarası ve GİD oranı dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 5.26. Deney numarasına göre GİD oranı grafiği

Şekil 5.26 incelendiğinde, GİD değerinin en yüksek olduğu 19 numaralı deney koşulu gözlemlenmiştir. Buna karşın, 9 numaralı deney düşük GİD değeri ile daha zayıf performans göstermiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Hardox 500 çeliğinin kuru, MMY, Nano-MMY kesme koşulu kullanarak frezelenmesinde elde edilen çıktılarının incelenmesi ve çok kriterli karar verme yöntemleriyle optimizasyonu ele alınmıştır. Farklı değişkenler olarak 3 adet kesme hızı ve ilerleme miktarı ile toplamda 27 tane deney çalışması yapılmıştır.

Yapılan çalışma sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Bu bulgular ışığında kuru kesme ortamında, Hardox 500 malzemesi üzerinde yapılan testlerde, kesme hızının ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde önemli etkiler gösterdiği tespit edilmiştir. Kesme hızının arttığı durumlarda yüzey pürüzlülüğü genellikle artış göstermiş, ancak belirli bir hız aralığında pürüzlülük en aza inmiştir. Özellikle 130 m/dk kesme hızında, ilerleme hızına bağlı olarak en düşük pürüzlülük değerlerine ulaşılmıştır. Ancak ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü yükselmiştir.

MMY (Minimum Miktar Yağlama) kullanımı, kuru kesme ortamına kıyasla yüzey pürüzlülüğünde önemli bir iyileşme sağlamıştır. MMY, kesme bölgesinde yağlama sağlayarak sürtünmeyi azaltmış ve yüzey kalitesini iyileştirmiştir. Bunun sonucunda, MMY uygulamalarında yüzey pürüzlülüğü değerleri belirgin şekilde düşmüştür.

Nano-MMY uygulamaları, yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuçları vermiştir. Nano partiküllerle desteklenen bu yağlama yöntemi, kesme bölgesinde daha ince ve etkili bir yağ filmi oluşturarak sürtünmeyi en aza indirmiş ve bu da daha düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlamıştır. Nano-MMY, sert malzemelerde yüzey pürüzlülüğünü azaltmada en etkili yöntem olmuştur.

İlerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Bu durum, kesme işlemi sırasında malzeme üzerine uygulanan kuvvetlerin artmasıyla yüzeyde daha fazla deformasyon oluşmasına bağlanabilir.

ANOVA analizi sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki faktörlerin etkisi oldukça anlamlıdır ($p < 0,001$). Özellikle ilerleme miktarı, yüzey pürüzlülüğüne en yüksek katkıyı sağlayarak %50,88'lik bir katkı oranına

ulaşmıştır. Kuru, MMY, Nano-MMY işleme ve kesme hızı gibi faktörler de sırasıyla %31,77 ve %14,80 katkı sağlamaktadır. Modelin yüksek R² değeri (%97,46), bağımsız değişkenlerin yüzey pürüzlülüğünü etkili bir şekilde açıkladığını göstermektedir.

Regresyon analizi sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiyi kesme koşulu (A) ve kesme hızı (C) göstermiştir. MMY ve Nano-MMY işleme yöntemleri, kuru işlemeden daha düşük Ra değerleri sağlamış, yani daha kaliteli yüzeyler elde edilmiştir. Kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü belirgin şekilde azalmaktadır, bu da kesme hızının yüzey kalitesine olumlu katkıda bulunduğunu göstermektedir. Regresyon modelinin R² değeri %98,61, bu da yüzey pürüzlülüğünün büyük ölçüde açıklanabildiğini göstermektedir.

- Titreşim deneyleri sonuçlarında, farklı yağlama ortamlarının (Kuru, MMY, Nano-MMY) Hardox 500 işleme sırasında titreşim performansını önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Deneylerde elde edilen verilere göre, kuru kesme işlemi, özellikle yüksek kesme hızlarında titreşim seviyelerinin en yüksek olduğu ortam olarak öne çıkmaktadır. Bu, özellikle Deney No 9'da maksimum 60.5 m/s² titreşim değerine ulaşılmış olmasıyla belirginleşmiştir. Kuru işleme, kesme bölgesindeki sürtünmenin daha fazla olması nedeniyle yüksek titreşim üretmiş, bu da işleme kalitesini olumsuz etkilemiştir.

MMY işleme ortamında yapılan deneylerde, titreşim seviyelerinin kuru kesmeye göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Özellikle Deney No 10'da 7.8 m/s²'lik minimum titreşim değeri elde edilmiş olup, ortalama titreşim değerleri genel olarak kuru işleme ortamından daha düşük çıkmıştır. MMY'nın kesici yüzey ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi azalttığı ve bu sayede daha düşük titreşim seviyelerine olanak sağladığı anlaşılmaktadır.

Nano-MMY ise tüm deneyler arasında en düşük titreşim seviyelerini sağlamıştır. Özellikle Deney No 20'de 6.4 m/s²'lik maksimum ve 8.3 m/s²'lik ortalama titreşim değerleri ile diğer ortamlar arasında en iyi titreşim performansını sunmuştur.

ANOVA analizi sonuçlarına göre, titreşim üzerindeki faktörlerin etkisi de anlamlıdır (p < 0,001). İlerleme miktarı (B) faktörü, titreşime en yüksek katkıyı

(%37,37) sağlarken, kesme koşulu (A) ve kesme hızı (C) faktörleri sırasıyla %30,18 ve %27,26 katkı göstermiştir. R^2 değeri %94,81, modelin veriyi açıklama yeteneğinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Regresyon analizi sonuçlarına göre, titreşim üzerinde en güçlü negatif etkiyi yine kesme koşulu (A) göstermektedir. MMY ve Nano-MMY, kuru işleme kıyasla daha düşük titreşim seviyeleri sağlamıştır. İlerleme miktarı (B) ve kesme hızı (C) ise titreşimi artırıcı etkiler göstermektedir. Modelin R^2 değeri %97,23 olup, titreşim seviyelerinin parametrelerce iyi bir şekilde açıklandığını göstermektedir.

- Ses için yapılan deneysel çalışmalarda, kesme ortamı ve yağlama yöntemlerinin ses düzeyleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Kuru işleme koşullarında ses seviyeleri, özellikle yüksek kesme hızlarında belirgin şekilde artmış ve en yüksek ortalama ses seviyesi 89,4 dB(A) olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, işleme sırasında soğutma ve yağlama olmamasından kaynaklanan artan sürtünme ve kesme kuvvetlerinin gürültü seviyesini artırdığına işaret etmektedir. Kuru işleme koşulları, bu nedenle iş sağlığı ve güvenliği açısından daha fazla risk oluşturmaktadır.

MMY işleme sırasında ses seviyelerinin, kuru işleme ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmüştür. Bu, MMY'nin kesme bölgesindeki sürtünme ve ısıyı etkin bir şekilde kontrol ederek daha düşük kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla daha az gürültüye neden olduğunu göstermektedir.

En düşük ses seviyeleri ise Nano-MMY ortamında elde edilmiştir. Bu deneylerde, nano-partiküllerin kesme bölgesindeki etkin yağlama ve soğutma etkileri, hem kesme kuvvetlerini hem de ses seviyelerini minimize etmiştir. Nano-MMY ile ölçülen ortalama ses seviyeleri 78,5 dB(A) ile en düşük değere ulaşmış, bu da hem operatör konforunu artırmış hem de iş güvenliğini iyileştirmiştir.

ANOVA analizi sonuçlarına göre, ses ölçümleri için A faktörü yani işleme şekilleri (kuru, MMY, Nano-MMY) anlamlı bir etki göstermemektedir ($p = 0,345$). Ancak B ve C faktörleri anlamlı sonuçlar sunmakta ve sırasıyla %28,66 ve %63,04 katkı sağlamaktadır. Modelin R^2 değeri %92,54, ses üzerindeki

faktörlerin açıklayıcılığının diğer parametreler kadar yüksek olmadığını göstermektedir.

Regresyon analizi sonuçlarına göre, ses seviyeleri üzerinde kesme koşulu (A) ve kesme hızı (C) pozitif etki göstermektedir. Özellikle kesme hızı arttıkça ses seviyelerinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. Regresyon modelinin R^2 değeri %97,19, ses seviyesinin büyük bir kısmının bu modelle açıklanabileceğini göstermektedir.

- Bu çalışmada, farklı yağlama koşulları altında gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde sıcaklık değerleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, kuru kesme koşullarında sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Örneğin, kuru kesme sırasında en yüksek sıcaklık $187,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür, bu değer MMY ve Nano-MMY koşullarında kaydedilen en yüksek sıcaklıkların (sırasıyla $155,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $146,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) oldukça üzerindedir. Bu durum, kuru koşulların, kesme işlemi sırasında soğutma etkisinin olmaması nedeniyle, alet ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi artırarak daha fazla ısı ürettiğini göstermektedir.

ANOVA analizi sonuçlarına göre, sıcaklık üzerinde de tüm faktörlerin etkisi anlamlıdır ($p < 0,001$). C faktörü %33,46'lık katkı ile en etkili faktör olurken, A ve B faktörleri sırasıyla %32,19 ve %29,46 katkı sağlamaktadır. R^2 değeri %95,10, sıcaklık üzerindeki faktörlerin etkisini iyi bir şekilde açıkladığını göstermektedir.

Regresyon analizi sonuçlarına göre, sıcaklık üzerinde en güçlü negatif etki kesme koşulu (A) tarafından sağlanmıştır. MMY ve Nano-MMY işlemleri, kuru işlemeden önemli ölçüde daha düşük sıcaklık değerleri sağlamıştır. Kesme hızı (C) ve ilerleme miktarı (B) da sıcaklık üzerinde hafif etkiler göstermektedir. Modelin R^2 değeri %99,20 olup, sıcaklık değişimlerinin neredeyse tamamı bu modelle açıklanabilmektedir.

- Deneysel bulgular, kesme işlemlerinde farklı yağlama yöntemlerinin güç ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Kuru kesme koşulları altında, güç tüketimi ve enerji ihtiyacı, diğer yağlama yöntemlerine kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Örneğin, kuru

kesme sırasında elde edilen maksimum güç tüketimi 1719 W olarak belirlenmişken, enerji tüketimi 216,51 kJ olarak ölçülmüştür.

MMY yöntemi, güç ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. MMY ile gerçekleştirilen işlemlerde güç tüketimi 1275-1612 W aralığında değişirken, enerji tüketimi 202,68 kJ'ye kadar düşmüştür. Ayrıca, talaş kaldırma oranındaki artış, özgül enerji tüketimini azaltmakta ve bu durum enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır.

Nano-MMY yöntemi, kesim işlemi sırasında en düşük güç ve enerji tüketimi ile dikkat çekmektedir. Bu yöntemde güç tüketimi 1236-1563 W arasında iken, enerji tüketimi 196,48 kJ olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, Nano-MMY'nın özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.

ANOVA analizi sonuçlarına göre, güç ölçümlerinde tüm faktörlerin etkisi yine anlamlıdır ($p < 0,001$). B faktörü %53,10 ile en yüksek katkıyı sağlarken, A ve C faktörleri sırasıyla %22,28 ve %23,95 katkı yapmaktadır. Modelin yüksek R^2 değeri (%99,33), faktörlerin güç üzerindeki etkilerini güçlü bir şekilde açıklamaktadır.

Regresyon analizi sonuçlarına göre, güç tüketimi üzerinde en önemli etki kesme koşulu (A) tarafından sağlanmıştır. MMY ve Nano-MMY, kuru işlemeden çok daha düşük güç gereksinimi ile sonuçlanmıştır. Kesme hızı (C), pozitif bir etkiye sahip olup, hız arttıkça güç tüketimi artmaktadır. Regresyon modeli güç değişimlerini %99,37 oranında açıklayabilmektedir, bu da oldukça güçlü bir model olduğunu göstermektedir.

- Bu çalışmada, CRITIC yöntemi ile yapılan işleme parametrelerinin ağırlıklandırılması sonucunda yüzey pürüzlülüğü (%35), en yüksek ağırlığa sahip kriter olarak tespit edilmiştir. Bu durum, yüzey kalitesinin iş parçalarının genel performansı üzerinde en önemli etken olduğunu göstermektedir. Ses seviyesi (%27.5), iş güvenliği ve çevresel faktörler açısından önemli bir kriter olarak öne çıkmıştır. Titreşim (%12.9) ile güç tüketimi (%11.8) arasında yüksek bir korelasyon bulunmuştur. Sıcaklık (%12.8) ise kesici takımın performansı ve iş parçasının mikroyapısal özellikleri üzerinde önemli bir

etkiye sahiptir. Kesme sırasında sıcaklığın artması, takım ömrünü azaltırken yüzey kalitesini de olumsuz etkileyebilir.

- Gri ilişkisel analizi (GİA), deneysel verilerin değerlendirilmesinde etkili bir yöntem olarak kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, 27 farklı deney için çeşitli performans kriterleri (yüzey pürüzlülüğü, titreşim, ses, sıcaklık, güç) dikkate alınarak normalize edilmiş karar matrisi oluşturulmuştur. Elde edilen gri ilişki katsayıları ve sıralama değerleri, her bir deneyin performansını belirlemede önemli bir rol oynamıştır. Deney 19, en yüksek gri ilişki derecesine (GİD) sahip olarak sıralamada birinci gelmiştir. Bu durum, deneyi gerçekleştiren yani 80 m/dk kesme hızı ve 0,1 mm/diş ilerleme miktarı koşullarının optimal olduğunu göstermektedir. Performans kriterlerinin tümü açısından başarılı bir sonuç alınmıştır. Deney 9, en düşük gri ilişki derecesine sahip olup sıralamada sonuncu olmuştur. Bu durum, söz konusu deneyin belirli bir optimizasyon ve iyileştirme sürecine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Tüm deneyler incelendiğinde, güç ve titreşim gibi kriterlerin, genel performans üzerindeki etkisinin belirgin olduğu görülmüştür. Bu kriterlerin iyileştirilmesi, toplam performansı etki etme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Alınan sonuçlara göre tez çalışması için öneriler aşağıda verilmiştir;

- Hardox 500 yerine yüksek sertlikte ve aşınma direncine sahip malzemelerin Kuru, MMY, Nano-MMY kesme koşullarında işlenebilirliği incelenebilir.
- Farklı geometri ve kaplamaya sahip kesici takımlar kullanılarak frezeleme deneyleri yapılabilir.
- MMY sisteminde sabit tutulan nozul açısı ve mesafesi, püskürtme debisi gibi parametreler optimize edilerek çalışma genişletilebilir.
- MMY sisteminde kesme sıvısı olarak kullanılan fıstık yağı yerine başka %100 bitkisel yağ kullanılabilir.
- Farklı oranlarda nano grafen partikülleri kullanılabilir.
- Nano akışkan hazırlamada kullanılan grafen nano partikülü yerine başka nano partiküller kullanılabilir.
- Nano akışkan hazırlamada tekli yerine karma nano partiküller karışıma eklenebilir.

- Nano akışkanın hazırlanmasında SDS dışında farklı yüzey aktif maddeler kullanılabilir.
- Sıcaklık ve güç tüketiminin düşük olduğu deneylerde enerji verimliliği ön plana çıkmıştır. Bu nedenle, enerji tasarrufunun kritik olduğu durumlarda, bu parametre değerlerinin kullanımı tavsiye edilir.
- Deneysel sonuçlar Yapay zekâ yöntemleri ile tahmin edilebilir.
- GİD değerlendirilmesi, işleme kalitesini artırmaya yönelik etkili bir yaklaşımdır. Bu analizler, süreçlerin daha iyi optimize edilmesi ve verimliliğin artırılması için kullanılabilir.
- Gri ilişkisel analizi gibi çok kriterli karar verme yöntemlerinin yanı sıra, farklı yöntemler de kullanılabilir. Bu, daha kapsamlı bir analiz ve değerlendirme süreci sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Akkurt, M., Talaş Kaldırma Bilimi ve Teknolojisi CNC Takım Tezgahları ve Üretim Otomasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul, 533, 2012.
- Altıntaş, Y., Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibration and CNC Design, Cambridge University Press, USA, 2000.
- Anandan, V., Naresh Babu, M., Muthukrishnan, N., Performance of silver nanofluids with minimum quantity lubrication in turning on titanium: a phase to green manufacturing, J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng, 42, 198, 2020.
- Asiltürk, I., Akkuş, H., Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, Measurement, 44(9), 1697-1704, 2011.
- Aslan, A., Salur, E., Kuntoğlu, M., Evaluation of the role of dry and MQL regimes on machining and sustainability index of Strenx 900 steel, Lubricants, 2022.
- Ateş, H., Nano Parçacıklar ve Nano Teller, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 3(1), 437-442, 2015.
- Baig, N., Kammakakam, I., Falath, W., Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges, Materials advances, 2(6), 1821-1871, 2021.
- Başar, G., Sic ve B4C Parçacık Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilmesi Ve Delik Kalitesinin İyileştirilmesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Osmaniye, 98, 2023.
- Bensaid, K., Dhiflaoui, H., Bouzaiene, H., Yahyaoui, H., Fredj, N. B., Effects of the cooling mode on the integrity and the multi-pass micro-scratching wear resistance of Hardox 500 ground surfaces, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.
- Bulut, H., Özcan, Ş., Atelye ve Teknoloji I, Gül Yayınevi, Ankara, 1991.
- Cönger, D., Emiroğlu, U., Uysal, A., Altan, E., Alüminyum 6061 Malzemenin MMY Yöntemi ile Frezelenmesinde Nano MoS2 Katkılı Kesme Sıvısı Kullanımının Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi, MATİM, 2019.
- Çağan, S. Ç., Buldum, B. B., Özkul, İ., Hafif Metallerde Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Sisteminin Kullanımı, ECJSE, 2018.

- Çakır, O., Emiroğlu, U., 304 ve 430 Paslanmaz Çeliklerin Kimyasal İşlenmesi, Düzenleme Kurulu, 158, 2015.
- Çelik, B., Küresel grafitli ggg-70 dökme demirin minimum miktarda yağlama tekniği kullanılarak frezelenmesinde işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, 69, 2018.
- Debnath, S., Reddy, M.M., Pramanik, A., Dry and Near-Dry Machining Techniques for Green Manufacturing, In: Gupta, K. Innovations in Manufacturing for Sustainability, Materials Forming, Machining and Tribology, Springer, Cham, 2019.
- Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., Ahmed, M., Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel, Journal of materials processing technology, 172(2), 299-304, 2006.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., Papayannakis, L., Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method, Computers & Operations Research, 22(7), 763-770, 1995.
- Dilipak, H., Asal, Ö., Yalçınkaya, A., Ünal, Ş., Minimum Miktarda Yağlama Tekniği İle Frezeleme İşleminde Yüzey Pürüzlülüğünün ANFIS İle Modellenmesi, International Journal of Innovative Engineering Applications, 5(2), 162-170, 2021.
- Duc, T. M., Ngoc, T. B., Effectiveness of alumina nanofluid on slotting end milling performance of SKD 11 tool steel. Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME), 9(2), 359-369, 2020.
- Duc, T. M., Long, T. T., Chien, T. Q., Tuan, N. M., Study of cutting forces in hard milling of Hardox 500 steel under MQCL condition using nano additives, SSRG Int J Mech Eng, 6(11), 1-7, 2019.
- Duc, T.M., Long, T.T., Tuan, N.M., Novel Uses of Al₂O₃/MoS₂ Hybrid Nanofluid in MQCL Hard Milling of Hardox 500 Steel, Lubricants, 9(4), 45 2021.
- Eksilmez, N., Hardox 500 Çeliğinin Lazerle Kesilmesinde Kesme Geometrisinin ve İşleme Parametrelerinin Kesim Kalitesi Üzerine Etkisinin Araştırılması, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 53, 2021.

- Eleren, A., Karagül, M., 1986-2006 Türkiye Ekonomisinin Performans Değerlendirmesi, Yönetim ve Ekonomi Dergisi, 15(1), 1-14, 2008.
- Elmunafi, M. H. S., Mohd Yusof, N., Kurniawan, D., Effect of cutting speed and feed in turning hardened stainless steel using coated carbide cutting tool under minimum quantity lubrication using castor oil, Advances in Mechanical Engineering, 7(8), 2015.
- Garcia, M. V., Lopes, J. C., Diniz, A. E., Rodrigues, A. R., Volpato, R. S., de Angelo Sanchez, L. E., Bianchi, E. C., Grinding performance of bearing steel using MQL under different dilutions and wheel cleaning for green manufacture, Journal of Cleaner Production, 257, 120376, 2020.
- Gökçe, B., Taşgetiren, S., Kalite için deney tasarımı, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(1), 71-83, 2009.
- Gökçe, H., Al 1050- H14 alaşımının delinmesi sürecinde yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu, takım aşınması, çaptan ve silindiriklikten sapmanın modellenmesi ve tahmini, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 2(1), 23-40, 2021.
- Güllü, A., Özdemir, A., Demir, H., (2003). Yüzey Pürüzlülüğü Ölçme Yöntemleri ve Mukayesesi. Teknoloji, 6, 2003.
- Gürbüz, H., Baday, Ş., Gönülaçar, Y.E, Minimum miktarda yağlamanın frezeleme işlemleri üzerine etkisinin araştırılması: Derleme. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 7(2/2), 59-78. 2017.
- Groover, M.P., Fundamentals of modern manufacturing materials, processes, and systems, Wiley, USA, 2010.
- Handfield, R. B., Walton, S. V., Seegers, L. K., Melnyk, S. A., ‘Green’ value chain practices in the furniture industry, Journal of operations management, 15(4), 293-315, 1997.
- ‘‘Hardox 500 çeliğini işleme alanları’’ Erişim adresi: https://www.bruce-eng.co.uk/product_range/hardox-500-tuf/ , Erişim Tarihi:22.05.2024.
- ‘‘Hardox 500 çeliğinin uygulama alanları’’ Erişim adresi: <https://www.kamleshmetalloy.com/blog/hardox-500-steel-plate-properties-characteristics-and-applications/> , Erişim Tarihi:21.05.2024.
- Harish, V., Tewari, D., Gaur, M., Yadav, A. B., Swaroop, S., Bechelany, M., Barhoum, A., Review on nanoparticles and nanostructured materials: Bioimaging,

- biosensing, drug delivery, tissue engineering, antimicrobial, and agro-food applications, *Nanomaterials*, 12(3), 457, 2022.
- Hwang, C. L., Yoon, K., Methods for multiple attribute decision making. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey, 58-191, 1981.
- İynen, O., Şahinoğlu, A., Özdemir, M., Yılmaz, V., Investigation of the effect of cutting parameters on the surface roughness value in the machining of AISI 4140 steel with Taquchi method. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2840-2849, 2020.
- Jahan, A., Mustapha, F., Sapuan, S. M., Ismail, M. Y., Bahraminasab, M., A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58, 411-420, 2012.
- Joshi, K. K., An experimental investigations in turning of Incoloy 800 in dry, MQL and flood cooling conditions, *Procedia Manufacturing*, 20, 350-357, 2018.
- Julong, D., Introduction to grey system theory. *The Journal of grey system*, 1(1), 1-24, 1989.
- Kang, M. C., Kim, K. H., Shin, S. H., Jang, S. H., Park, J. H., Kim, C., Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HRC) by coated carbide tools. *Surface and Coatings Technology*, 202(22-23), 5621-5624, 2008.
- Keshavarz-Ghorabae M, Amiri M, Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J., Determination of Objective Weights Using a New Method Based on the Removal Effects of Criteria (MEREC), *Symmetry*, 13(4):525, 2021.
- Kharkwal, H., Joshi, H. C., Singh, K. P., Fabrication and characterization of layered graphene oxide biocompatible nano-film by various methods. *J. Biochem. Biophys*, 6, 1-19, 2018.
- Khosrojerdi, S., Lavasani, A. M., Delfani, S., Vakili, M., Experimental Study based Graphene Oxide Nanoplatelets Nanofluid Used in Domestic Application on the Performance of DASCs with Indirect Circulation Systems, *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 3(1), 43-52, 2019.

- Kumar, A., Sharma, A. K., Katiyar, J. K., State-of-the-Art in Sustainable Machining of Different Materials Using Nano Minimum Quantity Lubrication (NMQL), *Lubricants*,11(2):64, 2023.
- Kuntoğlu, M., Machining induced tribological investigations in sustainable milling of Hardox 500 steel: A new approach of measurement science, *Measurement*, 201, 111715, 2022.
- Kurşuncu, B., Yaraş, A., AISI O2 çeliğinin frezelenmesinde minimum miktarda yağlama (MMY) sisteminin kesme performansına etkisi, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(2), 125-128, 2017.
- Kütükde, K., Seramik takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin delinebilirlik özelliklerinin belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Ankara, 252, 2014.
- Lawal, S. A., Choudhury, I. A., Nukman, Y., A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant, *Journal of Cleaner Production*, 41, 210-221, 2013.
- Li, C., Wang, Y., Zhang, Y., Yang, M., Li, B., Dong, L., Wang, J., Processing characteristics of vegetable oil-based nanofluid MQL for grinding different workpiece materials, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5, 327-339, 2018.
- Liu, S., Lin, Y., *Grey Information Theory and Applications*, Verlag Berlin Heidelberg Almanya: Springer, s.1-55, 2010.
- Maruthi, G. D., Rashmi, R., Green Manufacturing: It's Tools and Techniques that can be implemented in Manufacturing Sectors, *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3350-3355, 2015.
- Majerik, J., Danisova, N., Experimental testing methods of Hardox 500 face milling by Pramet 8230 carbide inserts. *Ann Fac Eng Hunedoara (Online)* vol, 8, 263-266, 2010.
- Minh, D. T., The, L. T., Bao, N. T., Performance of Al₂O₃ nanofluids in minimum quantity lubrication in hard milling of 60Si2Mn steel using cemented carbide tools. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(7), 2017.
- Montgomery, D., Altintas, Y., "Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling." *ASME. J. Eng. Ind*, 113(2): 160–168, 1991.

- Moretti, G.B., de Moraes, D.L., Garcia, M.V., Grinding behavior of austempered ductile iron: a study about the effect of pure and diluted MQL technique applying different friability wheels, *Int J Adv Manuf Technol* 108, 3661–3673, 2020.
- National Nanotechnology Initiative: The Initiative and its Implementation Plan, pp. 19–20, Washington, D.C., National Science and Technology Council, Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and technology, 2000.
- Opricovic, S., Tzeng, G. H., Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, *European journal of operational research*, 156(2), 445-455, 2004.
- Orji, I., Wei, S., A detailed calculation model for costing of green manufacturing. *Industrial Management & Data Systems*, 116(1), 65-86, 2016.
- Pal, A., Chatha, S. S., Sidhu, H. S., Experimental investigation on the performance of MQL drilling of AISI 321 stainless steel using nano-graphene enhanced vegetable-oil-based cutting fluid, *Tribology international*, 151, 106508, 2020.
- Patole, P. B., Kulkarni, V. V., Optimization of process parameters based on surface roughness and cutting force in MQL turning of AISI 4340 using nano fluid, *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 104-112, 2018.
- Pimenov, D. Y., Mia, M., Gupta, M. K., Machado, A. R., Tomaz, Í. V., Sarikaya, M., Kapłonek, W., Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: A review and future prospect, *Journal of materials research and technology*, 11, 719-753, 2021.
- Qin, X., Gui, L., Li, H., Rong, B., Wang, D., Zhang, H., Zuo, G., Feasibility Study on the Minimum Quantity Lubrication in High-Speed Helical Milling of Ti-6Al-4V, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 6(7), 1222-1233, 2012.
- Rahim, E. A., Sasahara, H., A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys. *Tribology international*, 44(3), 309-317, 2011.
- Ross, P. J., Taguchi techniques for quality engineering. McGraw-Hill, 1996.
- Rotella, G., Dillon, O.W., Umbrello, D., Settineri, L., Jawahir, I.S., The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy, *International Journal, Advanced Manufacturing Technology*, 71, 47-55, 2013.

- Salem, S. S., Hammad, E. N., Mohamed, A. A., El-Dougdoug, W., A comprehensive review of nanomaterials: Types, synthesis, characterization, and applications, *Biointerface Res. Appl. Chem*, 13(1), 41, 2022.
- Sangwan, K. S., Choudhary, K., Benchmarking manufacturing industries based on green practices, *Benchmarking: An International Journal*, 25(6), 1746-1761, 2018.
- Sharma, T., Kumar, R. S., Stable SiO₂-TiO₂ composite-based nanofluid of improved rheological behaviour for high-temperature oilfield applications, *Geosystem Engineering*, 23(1), 51-61, 2020.
- Singh, T., Singh, C.D. and Singh, R., A review on minimum quantity lubrication (MQL) assisted machining processes using mono and hybrid nanofluids, *Industrial Lubrication and Tribology*, 75(9), 1054-1076, 2023.
- Srikant, R. R., Cedar Falls, I. A., Prasad, M. R., Tool wear prediction in machining aisi 1040 steel under MQL, In *Proceedings of International Conference on Recent Trends in Mechanical Engineering-2K15 (NECICRTME-2K15)*, Vol. 20, p. 21st, 2015.
- Sultana, N., Dhar, N. R., A critical review on the progress of MQL in machining hardened steels, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(4), 3834-3858, 2022.
- “TaeguTec Kesici Takım Kataloğu” Erişim adresi: <https://www.huvema.nl/en/catalog/product/view/id/21667/s/solid-carbide-milling-insert-apkt-6196959/>, Erişim Tarihi: 20.09.2024.
- Talaşlı İmalat İşlemleri ve Makineleri Tesviyecilik, *EMO-Makine Market Dergisi*, 2006.
- Talib, N., Sasahara, H., Rahim, E.A., Evaluation of modified jatropa-based oil with hexagonal boron nitride particle as a biolubricant in orthogonal cutting process, *Int J Adv Manuf Technol* 92, 371–391, 2017.
- Tampu, N. C., Brabie, G., Chirita, B. A., Herghelegiu, E., Radu, M. C., Influence of the cooling liquid on surface quality characteristics in milling, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 95, No. 1, p. 012024)*, IOP Publishing, 2015.
- Tayyar, N., Akcanlı, F., Genç, E., Erem, I., BİST’e kayıtlı bilişim ve teknoloji alanında faaliyet gösteren işletmelerin finansal performanslarının analitik hiyerarşi

- prosesi (AHP) ve gri ilişkisel analiz (GİA) yöntemiyle değerlendirilmesi, Muhasebe ve Finansman Dergisi, (61), 19-40, 2014.
- Tönshoff, H. L., Spintig, W., Neises, A., König, W., Machining of Holes Developments in Drilling Technology, Annals of the CIRP, 43, 1994.
- Triantaphyllou, E., Multi criteria decision making methods (pp. 5-21). Springer Us, 2000.
- Türkmenoğlu, Z. F., Özvan, A., Özvan, E. E., Türkmenoğlu, M., Akkaya, İ., Varol, O. O., Kahraman, E., Yüksek Sıcaklığın Doğal Taşların Petrografik, Parlaklık ve Pürüzlülük Özelliklerine Etkisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(4), 937-948, 2020.
- ul Haq, M. A., Hussain, S., Ali, M. A., Farooq, M. U., Mufti, N. A., Pruncu, C. I., Wasim, A., Evaluating the effects of nano-fluids based MQL milling of IN718 associated to sustainable productions, Journal of Cleaner Production, 310, 127463, 2021.
- Uysal, A., Ferritik paslanmaz çeliğin nano MoS2 parçacık takviyeli kesme sıvısı kullanılarak MMY yöntemi ile frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 7(1), 151-158, 2016.
- Wang, Y., Li, C., Zhang, Y., Yang, M., Li, B., Jia, D., Mao, C., Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils, Journal of Cleaner Production, 127, 487-499, 2016.
- Wang, Y. M., Luo, Y., Integration of correlations with standard deviations for determining attribute weights in multiple attribute decision making. Mathematical and Computer Modelling, 51(1-2), 1-12, 2010.
- Yıldız, Y., Nalbant, M., A review of cryogenic cooling in machining processes, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(9), 947-964, 2008.
- Zhai, L. Y., Khoo, L. P., Zhong, Z. W., Design concept evaluation in product development using rough sets and grey relation analysis. Expert systems with applications, 36(3), 7072-7079, 2009.
- Zhang, D., Li, C., Jia, D., Zhang, Y., Zhang, X., Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding, Chinese Journal of Aeronautics, 28(2), 570-581, 2015.

Zhang, Y., Li, C., Jia, D., Zhang, D., Zhang, X., Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 99, 19-33, 2015.

Zhang, Y., Li, C., Jia, D., Zhang, D., Zhang, X., Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil, *Journal of Cleaner Production*, 87, 930-940, 2015.



ÖZGEÇMİŞ

- 1. Adı Soyadı** : Ömer ERDAŞ
2. Ünvanı : Uzman Öğretmen
3. Öğrenim Durumu : Lisans

Derece	Bölüm/Program	Okul/Üniversite	Bitirme Yılı
Lise	Makine	Arif Molu Anadolu Teknik Lisesi	2002
Lisans	Talaşlı Üretim Öğretmenliği	Gazi Üniversitesi	2008
Lisans	Makine Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2021

5. İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
İmalatçı (Stajyer)	İl Özel İdaresi, Kayseri	07.2005 – 08.2005
İmalatçı (Stajyer)	Efor Çelik Kapı, Kayseri	07.2006 – 08.2006
Tasarımcı	El-ma Tasarım, Ankara	07.2008 – 09.2008
Satış Danışmanı	Nato Güvenlik, Kayseri	06.2009 – 09.2009
Uzman Öğretmen	İl Milli Eğitim Müdürlüğü, Kahramanmaraş	12.2010 - Halen



T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ÇALIŞMASI BENZERLİK RAPORU FORMU
(SAVUNMA SONRASI)

FORM
TEZLİ YL-24

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ

Adı ve Soyadı	Ömer ERDAŞ
Öğrenci Numarası	2212709110
Ana Bilim/ Ana Sanat Dalı	Makine Mühendisliği
Danışman Unvanı, Adı-Soyadı	Doç. Dr. Yusuf FEDAI
Tez Başlığı (Türkçe)	HARDOX 500 ÇELİĞİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI KESME KOŞULLARININ CRITIC-GRİ İLİŞKİSEL ANALİZİ YÖNTEMİYLE ÇOK YANITLI OPTİMİZASYONU

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Özet ve Abstract c) Giriş, d) Ana bölümler, e) Sonuç ve f) Kaynakça kısımlarından oluşan toplam 95 sayfalık kısmına ilişkin, 16/01/2025 tarihinde Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 13'tür.

Filtreleme Tip 1 (maksimum %30)

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç,
- 3- Alıntılar dâhil.

Filtreleme Tip 2 (maksimum %10)

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç,
- 3- Alıntılar hariç,
- 4- 5 Kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç.

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Çalışması Benzerlik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Tarih ve İmza

Öğrenci

Danışman Onayı
UYGUNDUR

Doç. Dr. Yusuf FEDAI
(İmzası)

Enstitü Onayı
UYGUNDUR

İlkay AĞIR
(İmzası)

AÇIKLAMALAR

1. Lisansüstü tezler, savunma öncesinde benzerlik raporu ile birlikte Enstitüye teslim edilir.
2. Benzerlik raporu ile ilgili olarak etik kurallar dâhilindeki benzerlik oranları ilgili Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenir. (Enstitü Yönetim Kurulu tarafından tezin, intihal kapsamı dışında değerlendirilmesi için TURNITIN'den alınan raporda "benzerlik oranı"nın, "alıntılar hariç" en fazla %10, "alıntılar dahil" % 30'u geçmemesi şeklinde kabul edilmiştir).

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
80000 Osmaniye / TÜRKİYE

<http://osmaniye.edu.tr/lisansustu>

Tel: +90 328 827 10 00/4107-4006

E-Posta: lisansustu@osmaniye.edu.tr