



**PH13-8Mo ÇELİĞİNİN FREZELENMESİNDE
FARKLI İŞLEME ŞARTLARININ
İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİ**

**2024
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Hakan YURTKURAN

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**PH13-8M₀ ÇELİĞİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI İŞLEME
ŞARTLARININ İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİ**

Hakan YURTKURAN

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Mart 2024**

Hakan YURTKURAN tarafından hazırlanan “PH13-8Mo ÇELİĞİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI İŞLEME ŞARTLARININ İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 01/03/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç Dr. Gültekin UZUN (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa GÜNAY (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Nafiz YAŞAR (DPÜ)

Üye : Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Mehmet BOY (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Hakan YURTKURAN

ÖZET

Doktora Tezi

PH13-8Mo ÇELİĞİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI İŞLEME ŞARTLARININ İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİ

Hakan YURTKURAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Mart 2024, 124 sayfa

Bu çalışmada, PH13-8Mo paslanmaz çeliğin frezelenmesinde yenilikçi ve sürdürülebilir soğutma/yağlama yöntemlerinin işleme performansı üzerinde etkileri ve işlenebilirlik süreçleri boyunca tezgâh tarafından tüketilen enerji miktarı incelenmiştir. İşleme deneyleri kaplamalı sementit karbür takımlar kullanılarak CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Bu hedefle, kuru, Minimum Miktarda Yağlama (MMY), Grafen (GRP+MMY), Kriyojenik (CRYO), CRYO+MMY, Hegzagonal Bor Nitrür (hBN+MMY) kesme koşulları oluşturulmuştur. Deneyler kesme hızı (40-80 m/dak), ilerleme (0,04-0,12 mm/dev) ve sabit (0,8 mm) kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. 6 farklı kesme koşulunun kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm kesme koşullarında kesme kuvvetinin değerlendirilmesinde en iyi sonuca GRP+MMY ortamında ulaşılmıştır. En iyi yüzey pürüzlülük değerine ise tüm kesme koşullarında hBN+MMY kesme ortamında ulaşılmıştır.

CRYO+MMY kesme koşulunda ise en düşük enerji tüketimi verilerine ulaşılmıştır. Kuru ve MMY işlemeye kıyasla GRP+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla kesme kuvvetlerinde ortalama %14,62 ve %8,04'lük bir iyileşme görülmüştür. Kuru işlemeye kıyasla CRYO kesme rejimi kullanıldığında yüzey pürüzlülüğünde ortalama %20,59 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Fakat MMY, GRP+MMY ve hBN+MMY işleme koşullarında ortalama yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla %2,03, %9,07 ve %23,56'lık artış söz konusudur. Tüm kesme ortamlarında ilerleme hızı 0,04 mm/dev'den 0,08 mm/dev'e çıktığında enerji tüketimi ortalama %3,14 artmıştır. Ayrıca ilerleme hızı 0,08 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e çıktığında bu artış oranı %2,46 olarak görülmektedir. ANOVA sonuçları değerlendirildiğinde tüm kesme koşullarında ilerleme hızı, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkin parametre olarak görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Minimum Miktarda Yağlama (MMY), Paslanmaz çelik, Nano partikül, Frezeleme, Enerji tüketimi, Sürdürülebilir imalat.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EFFECT OF DIFFERENT PROCESSING CONDITIONS ON MACHINABILITY IN MILLING PH13-8Mo STEEL

Hakan YURTKURAN

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

March 2024, 124 pages

In this study, the effects of innovative and sustainable cooling/lubrication methods on machining performance in milling PH13-8 Mo stainless steel and the amount of energy consumed by the machine during the machinability processes were examined. Machining experiments were carried out on a CNC vertical machining center using coated cementite carbide tools. With this goal, dry, Minimum Quantity Lubrication (MQL), Graphene (GRP+MQL), Cryogenic, CRYO+MQL, Hexagonal Boron Nitride (hBN+MQL) cutting conditions were created. The experiments were carried out at cutting speed (40-80 m/min), feed (0.04-0.12 mm/rev) and constant (0.8 mm) cutting depth. The effects of 6 different cutting conditions on cutting force, surface roughness and energy consumption were examined. In evaluating the cutting force under all cutting conditions, the best result was achieved in the GRP+MQL environment.

The best surface roughness value was reached in the hBN+MQL cutting environment under all cutting conditions. In the CRYO+MQL cutting condition, the lowest energy consumption data was reached. Compared to dry and MMY machining, an average improvement of 14.62% and 8.04% in cutting forces was observed when using the GRP+MQL cutting regime, respectively. Compared to dry machining, an average of 20.59% improvement in surface roughness was achieved when the cryogenic cutting regime was used. However, there is an increase of 2.03%, 9.07% and 23.56% in the average surface roughness under MMY, GRP+MQL and hBN+MQL processing conditions, respectively. Energy consumption increased by an average of 3.14% when the feed rate increased from 0.04 mm/rev to 0.08 mm/rev in all cutting environments. Additionally, when the feed rate increases from 0.08 mm/rev to 0.12 mm/rev, this increase rate is seen as 2.46%. When ANOVA results were evaluated, feed rate was seen as the most effective parameter on cutting force and surface roughness in all cutting conditions.

Key Word : Minimum Quantity Lubrication (MQL), Stainless Steel, Nano Particle, Milling, Energy Consumption, Sustainable Manufacturing
Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, saygıdeğer danıőmanım, kıymetli hocam Prof. Dr. Mustafa GÜNEY'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

alıőmalarım boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Doç Dr. Gültekin UZUN ve Doç Dr. Nafiz YAŞAR'a, deneylerin yapılmasında emeği olan Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ ve Doç. Dr. Mehmet BOY'a teşekkür ederim. Fikirlerinden ilham aldığım Dr. Öğr. Üyesi Emre YURTKURAN'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Tezin oluşma sürecinde gösterdikleri sabır ve anlayıő için öncelikle biricik eőim Sevim'e ve çocuklarım Arda ve Azra'ya teőekkürü borç bilirim.

Bu tez alıőması, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü tarafından KBÜBAP-22-DR-073 proje numarası ile desteklendiğinden KBÜ BAP birimine teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ	19
BÖLÜM 3	21
PASLANMAZ ÇELİKLER.....	21
3.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ	22
3.2. PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ.....	23
3.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	24
3.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler	25
3.2.3. Ferritik-Östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler	25
3.2.4. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	28
3.2.5. Çökeltme Sertleştirme Uygulanan Paslanmaz Çelikler	29
BÖLÜM 4	31
FREZELEME.....	31

	<u>Sayfa</u>
4.1. FREZELEMEDE PARAMETRELER.....	33
4.1.1. Kesme Hızı	33
4.1.2. İlerleme Miktarı	35
4.1.3. Kesme Derinliği.....	35
4.2. FREZELEME TERMİNOLOJİSİ.....	36
4.2.1. Kesme Kuvvetleri	36
4.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü	39
4.2.2.1. Yüzey Pürüzlülük En Büyük Değeri (R_t , R_{max})	40
4.2.2.2. Yüzey Pürüzlülük Aritmetik Ortalaması (R_a).....	40
4.2.2.3. Ortalama Yüzey Pürüzlülük Yüksekliği (R_z).....	41
4.2.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Birimi ve Dereceleri	42
4.2.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Yöntemleri	43
4.2.5. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler	44
4.3. FREZELEMEDE ENERJİ TÜKETİMİ.....	45
4.3.1. Talaşlı İmalatta Enerji Tüketimi ve Sınıflandırma	46
4.4. FREZELEMEDE KESİCİ TAKIM AŞINMASI	47
BÖLÜM 5	51
TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNDE SOĞUTMA VE YAĞLAMA	51
5.1. KESME SIVILARININ TEMEL KATEGORİLERİ.....	52
5.2. SOĞUTMA/YAĞLAMA YÖNTEMLERİ.....	54
5.2.1. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi.....	55
5.2.1.1. İçten MMY	58
5.2.1.2. Dıştan MMY	59
5.2.2. Nano MMY Yöntemi.....	60
5.2.3. Hibrid Nano MMY Yöntemi	62
BÖLÜM 6	63
MATERYAL VE YÖNTEM	63
6.1.DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME VE EKİPMANLAR	63
6.1.1. Malzeme	63

	<u>Sayfa</u>
6.1.2. Kesici Takım ve Tutucu.....	64
6.1.3. Takım Tezgahı	65
6.1.4. MMY Sistemi	66
6.1.4.2. Nano Partikül Tozlar.....	67
6.1.5. Nano Akışkan Karıştırma Prosesi.....	69
6.2. ANALİZ VE ÖLÇÜM CİHAZLARI.....	70
6.2.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	70
6.2.2. Kesme Kuvveti Ölçümü	72
6.2.3. Enerji Tüketimi Ölçümü	74
BÖLÜM 7	77
BULGULAR VE TARTIŞMA	77
7.1. KESME KUVVETİ.....	77
7.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	88
7.3. ENERJİ TÜKETİMİ	96
BÖLÜM 8	99
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
8.1. KESME KUVVETİ SONUÇLARI.....	99
8.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ SONUÇLARI	100
8.3. ENERJİ TÜKETİMİ SONUÇLARI	101
8.4. ÖNERİLER	102
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	127

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Paslanmaz çeliklerin çekme mukavemeti ve uzama kombinasyonları ...	22
Şekil 3.2. Çeliğin üretiminin şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.3. Paslanmaz çelikten oluşan esnek bir borunun katman oluşumu	27
Şekil 3.4. Deniz suyu flaş odası tesisi için tasarlanmış evaporatör kovanları serisi	28
Şekil 4.1. (a) Çevresel frezeleme (b) Alın frezeleme	32
Şekil 4.2. Aynı ve zıt yönlü frezeleme.	33
Şekil 4.3. Frezelemede talaş kaldırma işlemi	34
Şekil 4.4. Kesme derinliği ve kesme genişliğinin şematik olarak gösterimi.....	36
Şekil 4.5. Frezeleme işleminde kesme kuvveti yönleri	38
Şekil 4.6. Yüzey pürüzlülük en büyük değeri (R_t , R_{max}).....	40
Şekil 4.7. Yüzey pürüzlülük ortalama değeri R_a	41
Şekil 4.8. Ortalama yüzey pürüzlülük yüksekliği R_z	42
Şekil 4.9. Yüzey pürüzlülük dereceleri	43
Şekil 4.10. ABD'de toplam enerji tüketiminde nihai kullanım sektörlerinin payı	46
Şekil 4.11. Enerji tüketiminin sınıflandırılması	46
Şekil 4.12. Takım aşınma formlarına genel bir bakış.....	48
Şekil 4.13. a) Kesme kenarının ufalanması, b) Mekanik yorulma ve c) Kırılma.....	48
Şekil 5.1. Metal işleme sıvılarının başlıca işlevleri.	52
Şekil 5.2. Kesme sıvılarının DIN 51385'e göre sınıflandırılması.....	53
Şekil 5.3. Metal işlemede kullanılan soğutma/yağlama yöntemleri.....	55
Şekil 5.4. MMY'nin verimli döngüsü.	57
Şekil 5.5. Metal kesmede ısı oluşumu.	58
Şekil 5.6. İçten MMY yöntemi.	58
Şekil 5.7. MMY sistemlerinin şeması: tek kanallı sistem ve çift kanallı sistem.	59
Şekil 5.8. Nano MMY mekanizması	61
Şekil 5.9. Tek-Adım ve İki-Adım yöntemi	61
Şekil 6.1. Kesici takım tutucu ve kaplamalı kesici takım özellikleri	65
Şekil 6.2. MMY sistemi içeren deneysel set.	66

Sayfa

Şekil 6.3. MMY deneylerinde kullanılan nozul	67
Şekil 6.4. Karıştırma prosesinin şematik gösterimi.....	70
Şekil 6.5. Yüzey pürüzlülük ölçümü.	72
Şekil 6.6. Yukarı yönlü frezelemenin şematik gösterimi.	73
Şekil 6.7. Kesme kuvveti ölçümü.....	74
Şekil 6.8. Enerji tüketimi ölçümü.....	76
Şekil 7.1. Fr'nin değişimi; a)V=40 m/dak, b)V=60 m/ dak, c)V=80 m/ dak	79
Şekil 7.2. Ra'nın değişimi; a)V=40 m/dak, b)V=60 m/ dak, c)V=80 m/ dak	89
Şekil 7.3. Enerji tüketimi değişimi; a)V=40 m/dak, b)V=60 m/dak, c)V=80 m/dak	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Literatür değerlendirmesi.	6
Çizelge 6.1. Tüm deneylerde kullanılan parametreler	63
Çizelge 6.2. PH13-8 Mo çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri. 64	64
Çizelge 6.3. CNC tezgâhına ait teknik özellikler.	66
Çizelge 6.4. MMY cihazına ait özellikler.	67
Çizelge 6.5. Nano partiküllere ve azot gazına ait genel özellikler.	69
Çizelge 6.6. MarSurf M300 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait teknik özellikler. 71	71
Çizelge 6.7. Kistler 9257B Dinamometrenin teknik özellikleri.....	73
Çizelge 6.8. Enerji tüketimi ölçüm cihazı	75
Çizelge 7.1. Tüm işleme koşulları için Fr ANOVA analiz sonuçları.	86
Çizelge 7.2. Tüm işleme koşulları için Ra ANOVA analiz sonuçları.	95

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- Cr : krom
Ni : nikel
CO₂ : karbondioksit
H₂S : hidrojen sülfür
f_z : diş başına ilerleme, (mm/dev)
Z : kesici takımdaki kesici diş sayısı, (adet)
V_f : tabla ilerlemesi (mm/dak)
a_e : radyal kesme derinliği, (mm)
a_p : aksenal kesme derinliği, (mm)
Mo : molibden
F_c : teğetsel kesme kuvvet, (N)
F_f : ilerleme kuvveti, (N)
F_r : bileşke kesme kuvveti, (N)
R_{max} : en büyük yüzey pürüzlülük değeri
R_a : ortalama yüzey pürüzlülüğü
f : ilerleme hızı, (mm/dev)
F : kesme kuvveti, (N)
HRC : rockwell C sertliği
nm : nanometre

KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans Analizi
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
BUE	: Built-Up-Edge (Talaş Yapışması)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Nümerik Kontrol)
CNT	: Carbon Nanotube (Karbon Nano Tüp)
CLA	: Center Line Average (Merkez Hat Ortalaması)
CRYO	: Cryogenic (Kriyojenik)
DIN	: German Institute for Standardization (Alman Enstitüsü Standartları)
DSS	: Duplex Stainless Steel (Dubleks Paslanmaz Çelik)
EG	: Ethylene Glycol (Etilen Glikol)
EP	: Extreme Pressure Additive (Aşırı Basınç Ekleme)
FSS	: Ferritic Stainless Steel (Ferritik Paslanmaz Çelik)
GRP	: Grafen
hBN	: Hegzagonal Bor Nitrür
HSS	: High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
ISO	: International Organization for Standardization
MQL	: Minimum Quantity Lubrication (Minimum Miktarda Yağlama)
NanoMMY	: Nanopartikül Katkılı Minimum Miktarda Yağlama
PH	: Precipitation Hardening (Çökelmeyle Sertleştirilmiş)
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
MRR	: Monthly Recurring Revenue (Aylık Yinelenen Değer)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Paslanmaz çelikler, kayda değer konsantrasyonlarda nikel ve krom alaşım elementleri içeren demir esaslı alaşımlar ailesini ifade etmektedir. “Paslanmaz” terimi, bu alaşım elementlerine atfedilebilen koruyucu yüzey oksit tabakasının sağladığı korozyon direncinden türemiştir. Spesifik paslanmaz çelikler, arzu edilen şekillendirme, birleştirme ve mekanik özellikleri ile sahip olduğu kabul edilebilir korozyon direnci, dayanıklılık ve üretim ekonomisi özellikleriyle biyomedikal uygulamalar için kullanışlıdır [1]. Endüstrinin ihtiyaç duyduğu malzeme taleplerini karşılamak için çeşitli paslanmaz çelik kaliteleri üretilir. Bu amaçla çeliğe başka alaşım elementleri de eklenir. Nikel, bakır, titanyum, alüminyum, silikon, molibden, niyobyum, belirli çelik kalitesine gerekli özellikleri kazandırmak için alaşımlanmış yaygın olarak kullanılan elementlerden bazılarıdır. Paslanmaz çelikler beş farklı kategoriye ayrılır. Bunlardan dördü kristalografik yapıya sahiptir; bunlar martensitik, ferritik, östenitik ve östenitik artı ferritiktir (dubleks olarak adlandırılır). Beşinci sınıf, belirli özelliklerin üretilmesi için kullanılan ısıtma işleminin türüne dayanmaktadır; bunlar genellikle PH çelikleri olarak adlandırılan çöktürmeyle sertleştirilebilir alaşımlar olarak adlandırılır [2]. Çeliklere ısıtma işlemleri başlığı altında, tavlama, yumuşatma tavlama, normalize tavlama, gerilim giderme tavlama, su verme, menevişleme difüzyon tavlama ve rekristalizasyon tavlama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu ısıtma işlem yöntemleri sayesinde, çeliklerin sertlik, mekanik özellik, fiziksel özellik, elektriksel özellik, korozyona ve yüksek sıcaklığa dayanım özellikleri iyileştirilebilir. Havacılık endüstrisindeki hızlı büyüme, uçak yapımında kullanılan malzemelerin de geliştirilmesi için bir zemin hazırlamıştır [3]. Temel faktör, ağırlığın azaltılması ve hava taşıtı parçalarının/yapılarının servis ömrünün uzaması ile maliyetin düşürülmesidir. Bu nedenle, endüstrideki birçok alanda ağırlığı azaltmak, hasar toleransı, yorulma ve korozyon direncini arttırmak için optimize

edilmiş özelliklere sahip malzemeler geliştirmeye yönelik birçok araştırma yapılmıştır [4]. Endüstriyel uygulamalar için mühendislik malzemelerinin seçimi hem ekonomik hem de çevresel sorunları etkilediğinden, bu malzemelerin üstün özelliklere sahip olması beklenir. Yüksek mukavemetli çelikler normalde uçak gövdesinin yapısal ağırlığının sadece %5-15'ini oluştururken, genellikle iniş takımı bileşenleri, kontrol yüzeyi menteşeleri ve helikopter şanzımanları gibi oldukça kritik parçalar için kullanılırlar. Yüksek mukavemetli çeliklerin en önemli avantajları, son derece yüksek mukavemetleri ve sertlikleridir. Çökeltmeyle sertleşen (PH) paslanmaz çelikler, yarı östenitik veya martensitik olarak sınıflandırılır. Çökeltme ile sertleşen (PH) paslanmaz çeliklerin önemli özellikleri, imalat kolaylığı, yüksek mukavemet, iyi süneklik ve mükemmel korozyon direncidir. Endüstride, yarı östenitik ve martensitik olmak üzere iki temel PH paslanmaz çelik grubu vardır [5]. PH13-8Mo çeliği, mükemmel dayanım ve süneklik kombinasyonunu, 900–1000 °C sıcaklık aralığında ilk adım olan çözelti tavlamasından ve ardından oda sıcaklığına kadar havayla soğutmadan oluşan bir ısıl işleme almaktadır [6]. Uçakların iniş takımlarında yüksek yük altında dayanımını koruyabilen ve korozif ortamlara dayanıklı olan PH13-8Mo çeliği havacılık endüstrisi başta olmak üzere, çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu tür malzemelerin işlenmesi sırasında iş parçasının yüzey kalitesinin artırılması, kesici takım ömrünün optimize edilmesi, talaş kaldırma esnasında harcanan gücün (enerji tüketimi) hesaplanması, işleme koşullarının doğru belirlenmesi ve işleme maliyetlerinin azaltılması son derece önemlidir [7].

PH grubu çeliklerin işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesi, işlenen yüzeyin yüzey bütünlüğünü sağlamak, kesme kuvvetlerini ve dolayısıyla enerji tüketimini azaltmak, takım ömrünü optimize etmek, doğru kesme sıvısı kullanmak gibi bir dizi operasyonu kapsamaktadır. Yüzey kalitesi ve güç tüketimleri, işleme işlemi sırasında birçok değişkenden etkilenen kriterlerden biridir. Bu kriterler, kesme derinliği, ilerleme hızı, takım ve talaş geometrisi, iş parçasının malzemesi, kesme hızı, takım ve makine özellikleri, sıkma yöntemi, takım aşınmasının özellikleri, titreşim ve sıcaklık gibi faktörlerden etkilenebilirler. Bu nedenle kesici takıma etki eden güç tüketimi ve dolayısıyla kesme kuvvetleri takımın durumu hakkında önemli bilgiler vermektedir [8].

Talaş kaldırma operasyonlarında işleme verimliliğini arttırmak, oluşan ısıyı en hızlı ve etkin şekilde kesme bölgesinden uzaklaştırmak için uygulanan güncel yöntemlerden birisi de kesme sıvılarının kullanımudur. Kesme sıvılarının temel görevi, kesme bölgesini soğutmak, takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünmeyi en aza indirmek, işleme esnasında çıkan talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırmaktır. Aynı zamanda yüksek kesme hızlarında kesme sıcaklığının düşürülmesini sağlayan soğutma sıvısının sıcaklığı malzeme yumuşama sıcaklığından daha düşük tutma özelliği, takım ömrünü önemli ölçüde uzatmaktadır. Son on yılda yapılan bazı araştırmalar, işleme sürecinde sürdürülebilirliği artırmak için alternatif soğutma/yağlama ortamlarını keşfetmeye veya kesme sıvısı kullanımını azaltmaya yönelik girişimlerin yapıldığını göstermiştir [9]. Kuru işleme, minimum miktarda yağlama (MMY) ve nano partikül katkılı kesme sıvısı kullanımı, geleneksel kesme sıvılarına göre daha çevre dostu yöntemler olarak bilinmektedir. Kuru işleme hem maliyet hem de çevresel kirlilik açısından doğru bir yöntem olsa da çoğu uygulamada sınırlılıkları bulunmaktadır. MMY yönteminde, basınçlı hava yoluyla kesme bölgesine az miktarda yağlayıcı püskürtülür [10]. MMY, işleme sırasında kesme sıvısı tüketimini kayda değer bir şekilde azaltır ve su esaslı emülsiyon soğutucular ile ilgili olumsuz çevre ve sağlık sorunlarını en aza indirir [11]. Zamanla geliştirilen yeni alaşımlar ve ağır işleme koşulları araştırmacıları farklı soğutma tiplerine yönlendirmiştir. Bu soğutma tipleri içerisinde en önemli gelişme sağlayan yöntem, MMY yönteminde kullanılan kesme sıvısının içerisine nano boyutlarda katı partiküllerin katıldığı nano akışkan yöntemidir. Nano akışkanlar, nanopartiküllerin temel akışkanlarda süspansiyon edilmesiyle elde edilir. Birçok araştırmacı, nanoakışkanların yüksek ısı transfer oranlarına ve sürtünme azaltma özelliklerine sahip olduğunu araştırmıştır. Bu özellikler, minimum miktarda yağlamanın yağlama ve soğutma etkisini iyileştirebilir [12]. Nano akışkan karışım içerisine hegzagonal Bor Nitrür (hBN), grafit, karbon nano tüp (CNT) gibi katı nano partiküller eklenebilmektedir. Hegzagonal Bor Nitrür (hBN), grafit benzeri katmanlı katı yağlayıcı yapısından dolayı “beyaz grafit” olarak da bilinir [13]. Atomik katmanları üzerinde bulunan nitrojen, van der Waals kuvveti ile bağlanmış bir 2D atomik levha benzeri yapı oluşturmak için bor ile kovalent olarak bağlanır. Eşsiz özellikleri, özellikle kimyasal ve termal stabilitesi sayesinde, 1000°C'ye kadar oksidatif bozunmaya karşı daha yüksek seviyede direnç sağlar [14,15].

Bu çalışmada, literatürde üzerinde kısıtlı araştırmaların olduğu PH13-8Mo çeliğinin frezelenmesinde farklı işleme koşullarının işlenebilirliğe etkileri araştırılmıştır. PH13-8Mo çeliğinin işlenmesinde harcanan enerji tüketimi hesaplanarak, işleme maliyeti başta olmak üzere diğer koşulların optimizasyonu sağlanmıştır. Nano akışkan karışımları oluşturmada katı haldeki hegzagonal Bor Nitrür (hBN) nano partikülleri ile grafen kullanılacaktır. Ayrıca CRYO işlemeyle beraber MMY yöntemi aynı anda kullanılarak sonuçlar gözlemlenmiştir. Performans kriter göstergesi olarak yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve kesme gücü (enerji tüketimi) belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sayısal değerler matematiksel modelleme yöntemi ile modellenmiş ve en uygun parametre değerleri belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda paslanmaz çelikler grubunda tercih edilen maraging çelikleri, havacılık endüstrisi ve savunma sanayinde sıkça kullanılmaktadır. Maraging çeliklerinin üstün özelliklerinin yanında işleme esnasında karşılaşılan zorluklar, araştırmacıların dikkatini çekmiştir. İdeal bir işleme ortamının oluşturulması için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi ve kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesici takım ömrünün iyileştirilmesi gerekmektedir. Maraging çeliklerinin temel özellikleri çok düşük karbon içermeleri ve yüksek mukavemete sahip olmalarıdır. Bu sebeple maraging çeliklerinin etkin işlenebilirliği araştırılması gereken diğer bir konudur. Kesme gücü, ilgili tezgâhın talaş kaldırma esnasında harcadığı güçtür ve enerji yönetimi açısından oldukça değerli bir veridir. Yüksek mukavemetli malzemelerin işlenmesinde bu verinin değerlendirilmesinin işleme maliyetine doğrudan etkisi bulunmaktadır. Klasik soğutma/yağlama yöntemlerinin maraging çeliklerinin işlenebilirliği üzerinde yeterli performans gösterememesi nedeniyle araştırmacılar yeni yöntemler geliştirmeye çalışmaktadır. Son araştırmalar incelendiğinde, işleme verimliliğinin artırılmasında, alternatif ve ekolojik soğutma/yağlama yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerin öncüleri olarak ilk akla gelen kesme koşulları MMY ve Nano MMY'dir. Maraging çeliklerinin işlenebilirliği, kesme gücü, kesici takım ömrü ve soğutma/yağlama yöntemleri halihazırda güncelliğini korumaktadır. Bu alanlarda son yıllarda yapılan çalışmaların bazıları Çizelge 2.1'de tablo halinde belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. Literatür değerlendirmesi.

Literatür No	Deney malzemesi ve operasyon	Takım malzemesi ve kesme sıvısı	Kesme parametreleri <i>A- Kesme hızı (m/dak)</i> <i>B- İlerleme miktarı (mm/dev)</i> <i>C- Kesme derinliği (mm)</i>	Çıktılar/Sonuçlar
[16]	Nimonic 80A <i>Tornalama</i>	Kaplamalı sermet uçlar <i>Kuru işleme, MMY ve Nano MMY</i>	<i>A</i> 75 <i>B</i> 0,1 <i>C</i> 0,4	Yüzey pürüzlülük değerleri soğutma koşullarından büyük ölçüde etkilenmiş ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri işleme koşulları ile değişmiştir. Nano MMY ve MMY, kuru işlemeye kıyasla daha iyi yüzey kalitesi sunmaktadır.
[17]	PH15-5 Çelik <i>Tornalama</i>	TiAlN kaplı tungsten karbür uçlar	<i>A</i> 100-200 <i>B</i> 0,05-0,10-0,15	Deney sonrası alınan numunelerle karşılaştırıldığında sertlikteki azalmaya bağlı olarak lazerle yüzey işlemlenmiş numunelerin altında seçilen parametrelerin tüm aralığı için kesme kuvvetinde ortalama %9'luk bir azalma gözlemlenmiştir.
[18]	AISI 4340 Çelik <i>Sert tornalama</i>	Kare şekilli kaplamasız sermet uç (SNMG 120,408). <i>Dört NFMQL kesme sıvısı (CuO, ZnO, Fe₂O₃ ve Al₂O₃)</i>	<i>A</i> 80, 100, 120, 140 <i>B</i> 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 <i>C</i> 0.1, 0.2, 0.3, 0.4	İşlenmiş parçanın yüzey kaplamasının, nanoakışkan formdaki alüminyum oksit esaslı nanoakışkanın bakır oksit esaslı nano sıvıya değişmesiyle iyileştiği gözlemlenmiştir. Bakır oksit esaslı nano akışkan kullanılırken daha az kesme kuvveti gerektiği belirlenmiştir.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[19]	AISI 4340 Çelik <i>Frezeleme</i>	ADMT 080304 R-D56 CVD Kaplama <i>4 tip MMY kesme SIVISI</i>	A 251.37 ile 376.99 B 0,05 ile 0,066	Metal işleme sıvısının viskozitesi, MMY tekniği söz konusu olduğunda uygun yağlamayı sağlamada önemli bir rol oynamıştır.
[20]	PH13-8 Mo Çelik <i>Frezeleme</i>	Kaplama (PVD) sementit karbür <i>MMY - MWCNT</i>	A Kuru işleme: 120 Saf MMY: 180 Nanofluid MMY: 240 B Kuru işleme: 0,1 Saf MMY: 0,15 nanofluid MMY: 0,2	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) kuru, saf MMY ve MCWNTs tabanlı nanofluid-MMY altında sırasıyla 1.079 µm, 1.047 µm ve 0.949 µm, Ra için hesaplanan değerlerin ortalaması ise 0.944 µm olarak bulunmuştur.
[21]	PH13-8 Mo Çelik <i>Frezeleme</i>	Kaplama (PVD) sementit karbür	A 80 B 0,112	Birincil çapak oluşumu, aksel kesme derinliği sırasıyla 57 mm ve 40 mm radyal kesme derinliği için 2,0 mm'nin ve 0,6 mm'nin altında oluşmuştur.
[22]	AISI 4340 Çelik <i>Sert tornalama</i>	Silici seramik uç	A 140 – 180 – 220 B 0,05 – 0,2 – 0,35 C 0,1 – 0,2 – 0,3	ANOVA sonuçlarından, ilerleme hızının Ra'yı etkileyen ana kesme parametresi olduğu ve bunun hem takım aşınması hem de itme kuvveti üzerindeki etkisini gösterdiği belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[23]	410, PH13-8Mo ve 300M Çelik <i>Tornalama</i>	Karşılaştırma	A 100 – 120 – 140 B 0,05 – 0,2 – 0,35 C 0,1 – 0,2 – 0,3	PH 13-8Mo, Ra cinsinden 0.11 µm'a kadar en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Bununla beraber, parametre tarama aşamasında, iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için, en az 120 m/dak kesme hızı ve 0,088 mm/dev ilerleme miktarı kullanılması gerektiği öngörülmüştür.
[24]	PH15-5 Çelik <i>Tornalama</i>	Kyocera, Megacoat Nano sınıfı tungsten karbür uç Kuru, ıslak, MMY ve kriyojenik	A 199 – 129 – 83 B 0,333 – 0,222 – 0,111	Diğer kesme ortamlarına (kuru, ıslak, MMY ve kriyojenik) kıyasla kuru işleme için daha yüksek ilerleme ve itme kuvveti değerleri gözlemlenmiştir.
[25]	PH15-5 Çelik <i>Tornalama</i>	TiAlN Kaplamalı tungsten karbür uç	A 100 – 150 – 200 B 0,05 – 0,1 – 0,15	Yüzey pürüzlülüğü (Ra) ilerleme miktarının artmasıyla artarken, kesme hızının ve köşe radyüsünün artmasıyla azalmıştır. Daha yüksek kesme hızı, daha düşük ilerleme miktarı ve orta uç radyusu ile daha iyi yüzey kalitesi sağlandığı gözlemlenmiştir.
[26]	PH17-4 Çelik <i>Tornalama</i>	AlTiN PVD kaplı KC5010 tungsten kaplamalı karbür uçlar Kriyojenik, MMY, kuru	A 500 – 775 – 1200 B 0,096 – 0,143 – 0,191 C 0,2 – 0,4 – 0,6	Düşük yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için optimum kesme koşulu kombinasyonu $v = 1200$ rpm, $f = 0.096$ mm/dev, $d = 0.6$ mm ve Taguchi yöntemi ile kriyojenik ortam olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğünde %53,5 azalma olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[27]	2205 Dupleks paslanmaz çelik <i>Tornalama</i>	Kaplamalı sementit karbür uçlar <i>MMY</i>	A 200 B 0,2 C 1	Minimum enerji tüketimine MMY3 koşulu ile 203.67 kJ olarak ulaşılmıştır. Bunun nedeni, MMY3 işleme koşulu sırasında daha az kuvvet gerekmesi olgusudur.
[28]	EN-31 Çelik <i>Tornalama</i>	SNMG120408 Karbür uçlar <i>MMY</i>	A 78 – 123 – 196 B 0,08 – 0,11 – 0,168 C 0,5	En iyi işleme kombinasyonu, MMY sistemi ile 196 m/dk kesme hızında, 0,08 mm/dev ilerleme miktarında bulunmuştur.
[29]	Sertleştirilmiş çelik 40CrMnMo <i>Tornalama</i>	Kaplamalı karbür mikro yapı tornalama takımı (CCMSTT)	A 115 B 0,42 C 2	Sementit karbür tornalama kesici takımlarının mikro olukları, mekanik yapının işlenmiş yüzeyinin artık çekme gerilimini azaltabileceği ve işlenmiş yüzeyin mikroyapısal (tane boyutu) tekdüzeliğini iyileştirebileceği sonucuna varılabilir.
[30]	PH17-4 Çelik <i>Tornalama</i>	AlTiN kaplı KC5010 tungsten kaplamalı karbür uçlar	A 25 – 85 – 132 B 0,048 – 0,143 – 0,238 C 0,2 – 0,6 – 1	Optimum tornalama parametreleri sırasıyla $v = 132$ m/dak, $f = 0.143$ mm/dev ve $d = 0.2$ mm ($v^3-f^2-d^1$)'de Taguchi eşleştirilmiş TOPSIS çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[31]	2507 Dupleks paslanmaz çelik <i>Tornalama</i>	Tungsten karbür uçlar (KCM15) <i>Kuru, ıslak, kriyojenik, MMY</i>	A 140 B 0.05 – 0.10 – 0.15 – 0.20 – 0.25 C 1	Kuru kesme koşullarında aşınma ve yapışma, aşınma mekanizmalarında ilk sırada yer almıştır. Dolayısıyla daha fazla takım aşınmasına neden olduğu görülmüştür. MMY ortamında, talaş segmentleri tamamen kırılma mekanizması ile oluşturulmuştur ve bu, yüksek bir segmentasyon oranına yol açmıştır.
[32]	PH17-4 Çelik <i>Tornalama</i>	AlTiN PVD kaplı KC5010 tungsten kaplamalı karbür uçlar <i>Kuru, ıslak, MMY, kriyojenik</i>	A 78,5 B 0,143 C 0,2 – 0,4 – 0,6 – 0,8 – 1	Kesme derinliği arttıkça tornalama performansının arttığı gözlemlenmiştir. Kriyojenik işleme, diğer işleme ortamlarına kıyasla daha az kalın talaş oluşturmuştur.
[33]	PH15-5 Çelik <i>Tornalama</i>	PVD Mega-Nanocoat CNMG120408M S PR1535 karbür uçlar <i>MMY, kriyojenik</i>	A 130 B 0,222 C 1	En düşük krater aşınması (0.014 mm) kriyojenik işlemede de gözlemlenmiştir. Krater aşınmasını daha sonra sırasıyla ıslak ve MQL işleme için 0.019 mm ve 0.089 mm değerlerinde takip ettiği görülmüştür.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[34]	PH17-4 Çelik <i>Tornalama</i>	CNMG 120408- GM tungsten karbür uçlar	A 100 – 150 – 200 B 0,1 – 0,12 – 0,15 C 0,5 – 0,75 – 1	Korelasyon analizinin performansı, kriyojenik işlem görmüş kesici uç için kesme hızının artırılmasının, ilerlemenin ve kesme derinliğinin azaltılmasının, PH 17–4 paslanmaz çeliği işlerken geleneksel kesici uçlarda daha düşük kesme kuvvetleri oluşturmada daha yüksek mukavemet gösterdiğini bildirmektedir.
[35]	PH15-5 Çelik <i>Tornalama</i>	CVD Ti (C, N) – Al ₂ O ₃ kaplamalı karbür uç <i>Kuru işleme</i>	A 120 B 0,2 C 0,2	Yan yüzdeki aşınmanın artırılması, etkilenen derinliği artırarak iş parçasının artık gerilmesi üzerinde yüksek bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
[36]	AISI 304 Çelik <i>Tornalama</i>	Kaplamalı sermet kesici takımlar	A 240 B 0,15 C 0,4	Al ilavesi, termal stabiliteyi ve aşınma performansını iyileştirerek kaplamaya faydalı olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, aşırı miktarda alüminyum ile performansta az bir miktar düşüş görülmüştür.
[37]	M2 Çelik <i>Tornalama</i>	Kaplamalı karbür uçlar <i>Aloe vera yağı kullanılarak hazırlanan kesme sıvısı</i>	A 500 – 800 – 1250 B 0,18 – 0,27 – 0,36 C 0,2 – 0,4 – 0,6	Aloe vera yağının kullanıldığı yüzey pürüzlülüğü, geleneksel kesme sıvısına kıyasla %6,7 oranında daha düşüktür.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[38]	AISI 420 Çelik <i>Tornalama</i>	PVD TiN kaplı sermet kesici takım <i>Mono/hibrit nano akışkan</i>	A 120 B 0,1 C 1	Hem mono hem de hibrit nanoakışkanlar, kuru ve baz akışkan MMY destekli işlemeye kıyasla sertleştirilmiş AISI 420 çeliğinin sermet kesici takımlarla tornalanmasında kesici takım arıza modlarının önemli ölçüde önlenmesine önemli katkılarda bulunmuştur.
[39]	AISI H13 Çelik <i>Frezeleme</i>	Si ₃ N ₄ esaslı seramik, Ti(C, N) esaslı sermet ve piyasada bulunan iki Al ₂ O ₃ esaslı seramik uçlar	A 100 B 0,05 C 0,5	Dört çeşit seramik parmak freze takımının kesme kuvvetleri, esas olarak seramik ve iş parçası malzemeleri arasındaki düşük kimyasal aktiviteye bağlı olan karbür takımdan daha azdır.
[40]	AISI 1525 Çelik <i>Tornalama</i>	Tungsten karbür uçlar <i>Jatropha yağ esaslı kesme sıvısı</i>	A 355 – 500 – 710 B 0,10 – 0,15 – 0,20 C 0,75 – 1,00 – 1,25	Varyans sonuçlarının analizi, yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızından büyük ölçüde etkilendiğini, kesme sıcaklığının ise hem jatropha hem de mineral yağ esaslı kesme sıvıları için kesme hızından en çok etkilenen parametre olduğu görülmüştür.
[41]	AISI 4340 Çelik <i>Tornalama</i>	Kaplanmamış sementit karbür <i>MMY, nanoakışkan</i>	A 60 – 80 – 100 B 0,1 – 0,15 – 0,2 – 0,3 C 0,25 – 0,2 – 0,3 – 0,4	Tüm deneylerde, nanoakışkanların kullanımı, geleneksel kesme sıvısı kullanımına kıyasla işleme bölgelerinde kesme sıcaklığını azaltmıştır.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[42]	Orta karbonlu C45 Çelik malzeme	AISI M2 HSS Kesici takım <i>Kriyojenik işleme</i>	A 38,6 – 57,5 – 62,5 B 0,046 – 0,062 – 0,087 C 0,2 – 0,4 – 0,6	Kesme kuvvetleri için en uygun parametreler, kesme derinliği 0,6 mm, kesme hızı 57,5 m/dk şeklinde bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için en uygun parametreler kesme derinliği 0,2 mm, kesme hızı 38,6 m/dk şeklinde bulunmuştur.
[43]	Dubleks paslanmaz çelik GX6CrNiN26-7	AlTiN ile kaplanmış tungsten karbür uçlar <i>Frezeleme</i>	A 90 – 120 – 240 – 300 B 0,1 – 0,15 – 0,20 C 2,5 – 7,5	Geleneksel frezeleme operasyonu için en iyi sonuçlar 120 m/dk kesme hızı, 17,16 cm ³ /dk talaş kaldırma oranı ve 20 dakikalık takım ömrü ile elde edilmiştir.
[44]	AISI 321 Paslanmaz çelik <i>Delik delme</i>	HSS Matkap <i>Kuru, ıslak, saf bitkisel yağ MMY ve nano akışkan MMY</i>	A 7,91 B 0,125	Saf MMY tekniğinin, işlenmiş iş parçasının yüzey kalitesini önemli ölçüde artırmakla kalmadığı, aynı zamanda kuru ve ıslak delme ile karşılaştırıldığında kesme sıcaklığını da düşürdüğü rapor edilmiştir.
[45]	AISI 4340 Paslanmaz çelik <i>Sert tornalama</i>	Kaplamasız sermet takım <i>Hava ile soğutma, su esaslı soğutma ve MMY</i>	A 80 – 100 – 120 – 140 B 0,05 – 0,1 – 0,15 – 0,2 C 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4	Deneyle, kesme kuvveti ve ilerleme miktarını etkileyen temel kesme parametresinin kesme derinliği olduğunu göstermiştir. Radyal kuvvette, basınçlı hava ve suda çözünür soğutucu için kesme hızının ana kesme parametresi olduğu sonucuna varmıştır. Ancak nanoakışkan durumunda, kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı sırasıyla kesme kuvvetini, ilerleme miktarı ve radyal kuvveti etkileyen başlıca kesme parametreleri olarak görülmüştür.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[46]	AISI 4140 Çelik <i>Yüksek hızda tornalama</i>	TiN kaplamalı takım SNMG 120408 <i>Kuru, ıslak, MMY</i>	A 100 – 150 – 200 – 250 – 300 B 0,05 – 0,1 – 0,2 C 0,4	Nanoakışkan MMY yağlaması, geleneksel soğutma sıvısı yağlamasına kıyasla daha iyi ısı emici özellikler göstermiştir.
[47]	AISI H-13 Çelik <i>Sert tornalama</i>	Kaplanmış ve kaplanmamış tungsten karbür uçlar <i>MMY yöntemiyle geliştirilmiş yeşil kesme sıvısı</i>	A 55 – 125 B 0,04 – 0,28 C 0,5	Minimum miktarda kesme sıvısı ile işleme, kuru işleme ve mineral yağ ile işlemeye kıyasla yapışma ve kayma bölgelerinin uzunluğu azaltmıştır.
[48]	AISI 4142 Çelik <i>Tornalama</i>	DNMG 150608-PM Kaplama: CVD TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN <i>MMY işleme şartları</i>	A 67,5 B 0,18 C 0,8	MMY işleme için elde edilen optimum parametreler, 110 mL=saat akış hızı, 10 döngü=dak sıvı frekansı ve 5 cm nozul mesafesidir.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[49]	AISI 1045 Çelik <i>Tornalama</i>	Kaplanmamış karbür uçlar <i>Bitkisel esaslı yağ, ester yağı, nanoakışkan MMY</i>	A 55,96 B 0,1 C 1,0	Grafit yağ esaslı nanoakışkan MMY, kuru kesme ve MMY ile karşılık gelen esas yağ ile karşılaştırıldığında kesme kuvvetini ve sıcaklığını açıkça azalttığı görülmüştür.
[50]	EN-24 Alaşımılı çelik <i>Sert tornalama</i>	Çok katmanlı (TiN/TiCN/TiN) PVD kaplamalı sermet uçlar <i>Sis soğutmalı ve kuru kesme ortam şartları</i>	A 80 – 100 – 120 B 0,05 – 0,1 – 0,15 C 0,1 – 0,2 – 0,3	Çeliğin sert tornalanması sırasında suda çözünür soğutma sıvısının metal işleme sıvısı için iyi bir seçenek olduğunu doğrulanmıştır.
[51]	Nimonic 80A <i>Tornalama</i>	Kaplamalı karbür uçlar	A 45 – 60 – 75 B 0,1 – 0,2 – 0,3 C 0,5 – 1 – 1,5	Deneysel Fc ve Ff değerlerinin, artan ilerleme hızı ve kesme derinliği ile arttığı gözlemlenmiştir. Ancak artan talaş derinliği ile Fr değerleri biraz değişiklik göstermiştir.
[52]	Nimonic 90 ve Ti6Al4V süper alaşım <i>Tornalama</i>	PVD TiN kaplı karbür uçlar <i>Kuru ve MMY işleme</i>	A 60 – 120 B 0,15 – 0,25	Nimonic 90'ın işlenmesi sırasında aşırı çentik aşınmasının nedeni, iş parçasının kesici takım üzerine yapışmasıyla açıklanmıştır.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[53]	AISI 4320 Çelik <i>Tornalama</i>	<i>Kuru, ıslak ve MMY işleme koşulları</i>	A 188,5 B 0,15 C 1	MMY'nin en belirgin özelliği, takım ömrünün ve üretkenliğin arttırılmasıdır. MMY, iyi takım ve iş parçası etkileşimi sağlar, böylece daha az kesme kuvveti elde eder.
[54]	AISI 4130 Çelik <i>Tornalama</i>	Titanyum nitrür kaplı karbür uçlar <i>Saf bitkisel yağ, Al₂O₃ esaslı bitkisel yağ, nano MMY</i>	A 50 – 80 – 100 B 0,075 – 0,1 – 0,125 C 0,5 – 1 – 1,5	Kesme hızının arttırılması ile daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Nano kesme destekli MMY tornalama, saf bitkisel yağ destekli MMY tornalamaya kıyasla daha iyi yüzey kalitesi sağlamıştır.
[55]	Ti6Al4V <i>Frezeleme</i>	Sementit karbür parmak freze elmas kaplama <i>Kuru, scCO₂, scCO₂WMMY, cCO₂-OoWMMY</i>	A 20 – 40 – 60 B 0,025 – 0,035 – 0,045 – 0,055 C 0,3 – 0,5 – 0,7 – 0,9	Ti6Al4V malzemesinin frezelenmesinde, takım aşınmasını sınırlamak için yağlama sistemi, soğutma sisteminden daha önemlidir.
[56]	Ti1023 Çelik <i>Frezeleme</i>	PVD kaplama TiAlN karbür uçlar	A 20 – 40 – 60 – 80 – 100 – 200-300 B 0,08 C 1	Takım aşınmasının sertleşme üzerindeki etkisinin önemli olduğunun altı çizilmiştir. Belirli bir takım aşınmasından sonra, yüzeyin altında yumuşama bölgeleri görülür. Takım aşınması arttığında yumuşama bölgeleri daha belirgindir.

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[57]	AISI 4340 Çelik	Karbür uçlar	A 110	Çeliğin işlenmesinde MMY jet, daha az takım aşınması, daha iyi takım ömrü ve kuru ve ıslak işlemeye kıyasla daha iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır.
	<i>Tornalama</i>	<i>Kuru, ıslak, MMY</i>	B 0,16	
			C 1,5	
[58]	AISI9310 Çelik	Kaplamasız karbür uç	A 223 – 246 – 348 – 483	Düşük alaşımlı çeliğin işlenmesinde kullanılan karbür uç ve MMY jetin önemli katkısı ile takım ömründe kayda değer bir iyileşme görülmüştür. Yan aşınmadaki azalma, daha yüksek kesme hızı ve ilerlemeye izin veren üretkenlik artışına (MRR) olanak sağlamıştır.
	<i>Tornalama</i>	<i>Kuru, ıslak, MMY</i>	B 0,10 – 0,13 – 0,16 – 0,18	
			C 1,0	
[59]	AISI4340 Çelik	AlTiN, TiAlN/TiSiN ve nanokristal AlTiCrN gibi PVD kaplamalı takımlar. Karbür tornalama uçları.	A 100 – 125 – 150	Bu çalışmada incelenen farklı kaplamalı takımlar arasında nanokristal AlTiCrN karbür takımın daha uzun takım ömrü ürettiği gözlemlenmiştir. Bu kaplamalı takım ile elde edilen daha uzun takım ömrü, kaplamanın alt tabakaya daha yüksek yapışma mukavemetine bağlanabilir ve bu takımın yüksek sertlik ile yüksek tokluk sağlayan nanokristal kaplama yapısı, kesici kenarın kenar kırılmasına karşı oldukça dirençli olmasını sağlar, bu aşınma türü bu tipik olarak çelik parçaların sert tormalanması sırasında meydana gelir.
	<i>Sert tornalama</i>		B 0,088	
		<i>MMY</i>	C 0,3	

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

[60]	AISI1040 Çelik <i>Tornalama</i>	Kaplanmamış karbür uçlar <i>Kuru, ıslak ve MMY işleme koşulları</i>	A 64 – 80 – 110 – 130 B 0,10 – 0,13 – 0,16 – 0,20 C 1,0	MMY işleminin kesme performansı, kesme sıvısı kullanılan geleneksel işlemeden daha iyidir. MMY, esas olarak talaş-takım etkileşimini iyileştiren ve kesme kenarlarının keskinliğini koruyan kesme sıcaklığını düşürerek faydalar sağlar.
[61]	AISI H13 Çelik <i>Tornalama</i>	Tungsten karbür keçisi uçlar <i>Islak ve MMY</i>	A 55 – 65 – 90 – 115 – 125 B 0,04 – 0,08 – 0,16 – 0,24 – 0,28 C 0,5	Bio kesme sıvısının viskozitesi ve parlama noktası yüksektir; bu, sıvının daha iyi yağlama performansına sahip olduğunu ve mineral yağa kıyasla yüksek sıcaklıkta sert işleme için daha güvenli olduğunu göstermiştir.
[62]	Paslanmaz Çelik 304 <i>Tornalama</i>	TiAlN kaplamasız/kapla malı (PVD) karbür uçlar	A 140 – 180 – 224 B 0,1 – 0,15 – 0,2 C 0,5 – 1 – 1,5	Kaplamalı karbür kesici uç ile işlemeden kaynaklanan MRR (Malzeme kaldırma oranı) değerinin, kaplamasız karbür kesici uç ile işlemeye göre 4.330,7 mm ³ /dak miktarında daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.
[63]	Dubleks paslanmaz çelik 2205 <i>Tornalama</i>	Nano-çok katmanlı PVD kaplı TiAlN uçlar <i>Kuru kesme, kriyojenik soğutma</i>	A 72 – 119 – 197 B 0,111 C 1	Tornalama işlemleri sıvı nitrojen kullanımı, kuru tornalamaya göre kesme sıcaklığını yaklaşık %53 – 58 oranında azaltmıştır.

2.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Literatür araştırmaları incelendiğinde, PH13-8 Mo çeliğinin işlenebilirliğı üzerine oldukça kısıtlı çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Çalışmalar daha çok yine PH13-8 Mo çeliğinin benzerleri olan PH grubu çeliklere yoğunlaşmıştır. Ancak PH13-8 Mo çeliğinin farklı işleme koşulları ile değerlendirildiğı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu durum, talaşlı imalat işlemleri üzerine yapılan çalışmaların maliyetli olmasına ve PH grubu çeliklerin spesifik uygulamalarda kullanılmasına atfedilebilir. Çalışmalar incelendiğinde, yüzey pürüzlülük değerlerinin soğutma/yağlama koşullarından ciddi derecede etkilendiğı görülmektedir. PH grubu çelikler üzerine yapılan bazı çalışmalarda, yüzey pürüzlülüğünün ilerleme miktarının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Minimum enerji tüketimine MMY yöntemi kullanılarak ulaşmanın mümkün olacağı da yine literatür çalışmalarından yola çıkarak söylenebilir. Bu durumun gerekçesi olarak MMY işleme koşullarında daha az kuvvet ihtiyacı oluşması gösterilebilir. Bazı araştırmalarda kesme kuvvetini ve ilerleme miktarını etkileyen temel kesme parametresinin kesme derinliğı olduğu görülmüştür. Takım aşınmasının sertleşme üzerindeki etkilerinin önemli olduğunun altı çizilmiştir. Çelik malzemelerin sert işlenmesinde incelenen farklı kaplamalı takımlar arasında nano kristalli AlTiCrN karbür takımın, takım ömrü açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durum kaplamalı takım ile elde edilen daha uzun kesici takım ömrü, kaplamanın alt tabakaya daha yüksek yapışma mukavemetine bağlanabilir. Bu durum, kesici takımın yüksek sertlik ile yüksek tokluk sağlayan nanokristal kaplama yapısı, kesici kenarın kenar kırılmasına karşı oldukça dirençli olmasını sağlar. Ayrıca bu aşınma türünün tipik olarak çelik parçaların sert tornalanması esnasında meydana geldiğı rapor edilmiştir. Literatür çalışmalarında değerlendirilmesi gereken diğeri bir konuda şüphesiz kesme koşulları içerisinde yer alan soğutma sistemleridir. Bu alan ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde genel kanı, MMY kesme koşullarının, ıslak ve kuru kesme koşullarına göre kesme kuvveti açısından daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Metal işleme sıvısının viskozitesi MMY yöntemi söz konusu olduğunda, uygun yağlamayı sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Bazı deneylerde nanoakışkanların kullanımı, geleneksel kesme sıvısına kıyasla işleme bölgelerinde kesme sıcaklığını azaltmıştır. Yine MMY ile işlemede, kuru işleme ve mineral yağlar kullanılarak işlemeye kıyasla, yapışma ve kayma

bölgelerinin uzunluğunun azaltıldığı belirtilmiştir. Nano MMY kesme koşulları, kesme kuvveti ve kesme sıcaklığında kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarına göre daha iyi performans göstermiştir. MMY'nin en belirgin özelliği, takım ömrünü ve dolayısıyla üretkenliğin artırılmasını sağlamasıdır. MMY işleminin kesme performansı, kesme sıvısının kullanıldığı geleneksel işlemeden daha iyidir. Aynı zamanda MMY takım-talaş etkileşimini iyileştirerek kesme sıcaklığının azaltılmasına yardımcı olur. Özellikle Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde takım aşınmasını sınırlamak için yağlama sisteminin, soğutma sisteminden daha önemli olduğu vurgulanmıştır. Bio kesme sıvılarının viskozitesinin yüksek olduğu belirtilmiştir. Buna göre bio kesme sıvılarının daha iyi yağlama performansına sahip olduğunu ve mineral yağlara kıyasla yüksek sıcaklıklarda sert işleme için daha güvenilir olduğu belirtilmiştir.

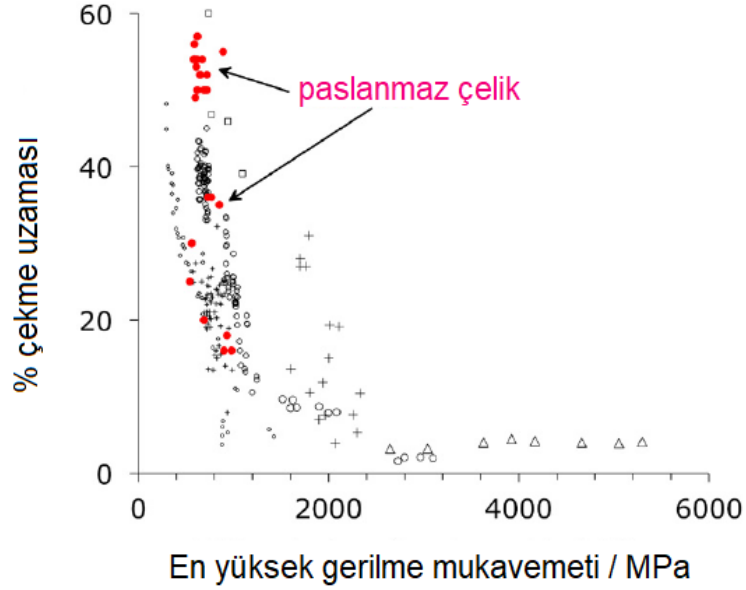
Literatür genel değerlendirmesi sonucunda, kesme koşullarının işleme performansı üzerinde ciddi etkileri olduğu karşımıza çıkmaktadır. Özellikle MMY yönteminde kullanılan yağın içerisine nano partiküller eklenmesiyle, işleme performanslarının daha da iyileştiği anlaşılmıştır. PH13-8 Mo çelik üzerine işlenebilirlik konusunda kapsamlı bir çalışma yapılmadığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmayla literatür zenginliği kısıtlı olan PH13-8 Mo çeliği frezelenmiştir. Literatürde PH grubu çeliklerin işlenebilirliklerinin değerlendirilmesi üzerine yapılan az sayıda çalışmanın karşılığı olarak PH13-8 Mo çeliğinin kesme koşullarının işlenebilirliğe etkileri tüm yönleriyle ele alınmıştır. Bu yönler özetle, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve gücü, takım aşınması ve ömrü, soğutma yöntemlerinin değerlendirilmesi şeklindedir. Yapılan değerlendirme ve gözlemler sonucunda, işlenebilirlikleri oldukça zor olan PH grubu çeliklerin işleme performanslarının iyileştirilmesi, konu ile ilgili literatür eksiklerinin giderilmesi ve sürdürülebilir çevre için soğutma/yağlama sistemlerinin geliştirilmesi adına yapılan çalışmanın literatürde etkin bir role sahip olacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM 3

PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler mükemmel korozyon dayanımları yanında, değişik mekanik özelliklere sahip türlerinin bulunması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirliği, şekil verme kolaylığı estetik görünüşleri gibi özelliklere sahiptirler. Kullanımları giderek yaygınlaşan paslanmaz çeliklerin tüketimi, artık toplumlarda refah seviyesinin bir göstergesi sayılmaktadır. Dünyada yılda 20 milyon ton civarında paslanmaz çelik tüketilmektedir. Bunların büyük çoğunluğu yassı mamul biçimindedir. Daha az miktarlarda ise; çubuk, tel, boru, dövme parça ve döküm parça olarak kullanılmaktadır. Paslanmaz çelikler diğer çeliklere oranla fiyat bakımından daha pahalıdır, ancak bakımlarının ucuz ve kolay olması, uzun ömürlü olmaları, tümüyle geri kazanabilmeleri ve çevre dostu bir malzeme olmaları çok büyük avantajlar sağlar. Dolayısıyla parçanın tüm ömrü dikkate alınarak yapılacak fiyat analizlerinde, tasarımlarda paslanmaz çelik kullanımının daha ekonomik olduğu görülür. Paslanmaz çelikler bileşimlerinde en az %11 krom içeren bir çelik ailesidir. Bu çeliklerin yüksek korozyon dayanımını sağlayan unsur; yoğun, sünek, çok ince ve saydam bir oksit tabakasının bulunmasıdır. Çok ince olan bu amorf tabaka sayesinde paslanmaz çelikler kimyasal reaksiyonlara karşı pasif davranarak indirgeyici olmayan ortamlarda korozyona karşı dayanım kazanırlar. Söz konusu oksit tabakası, oksijen bulunan ortamlarda oluşu ve diğer etkilere (aşınma, kesme veya talaşlı imalat vb.) bozulsa dahi kendini onararak eski özelliklerine tekrar kavuşur [64]. Paslanmaz çelikler, ham haliyle lekeler, renk bozulmasına veya paslanma nedeniyle kütle kaybına karşı dayanıklıdır. Bunun nedeni, yüzeyde substratı reaktif ortamdan izole eden pasif bir oksit filmi oluşturmak için yeterli krom içermesidir. Film, hasar durumunda saniyeler içinde reform yapabilmektedir. Uygun bir alaşım elementi kombinasyonu ile paslanmaz çelikler tamamen östenitik, ferrit ve östenit karışımı, tamamen ferritik veya martensitik olabilir. Yaşlandırma ile sertleştirilmiş olabilir

veya olmayabilirler. Farklı kombinasyonlarda alaşımlandırılan çelikler, modern binaların cephelerinden sanatsal kreasyonlara ve nükleer reaktörler gibi kritik uygulamalara kadar birçok alanda güvenle kullanılırlar. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi mukavemet ve süneklik açısından, tüm paslanmaz çelik çeşitleri, düşük alaşımlı çeliklerle aynı genel eğilimi takip etmektedir.

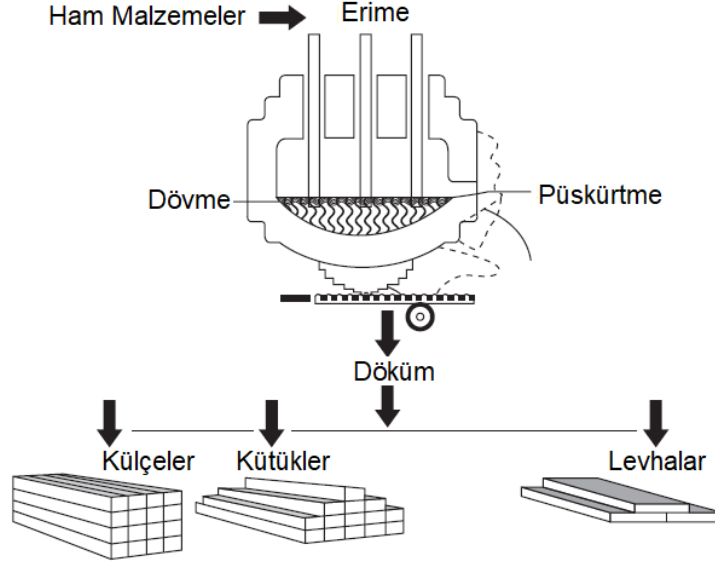


Şekil 3.1. Paslanmaz çeliklerin çekme mukavemeti ve uzama kombinasyonları [65].

3.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ

Paslanmaz çelik üretimi bir dizi süreci içerir. Önce çelik bir elektrik ark ocağında eritilir ve krom, silikon, nikel vb. alaşım elementleri eklenir ve yoğun ısıda eritilir. Genellikle bu işlem yaklaşık 8 ila 12 saat devam eder. Bu sayede tüm hammaddeler erir ve üretim süreci başlar. Erime aşamasında eriyik metalin üzerinde azot gazı püskürtülür. Erimiş paslanmaz çeliğin, hava ile teması minimum seviyeye indirilir. Daha sonra erimiş metalin çeşitli şekillerden birine döküm işlemi yapılır. Bu şekiller, blum, dikdörtgen şekiller, kütükler, 1,5 inçlik yuvarlak, kare şekiller veya levhalar, çubuklar ve tüpler içerebilir (Şekil 3.2). Yarı mamul çelik, çeliğin ısıtıldığı ve kütüklerin çubuk ve tellere dönüştürüldüğü bir dizi rulodan geçirildiği sıcak haddeleme ile başlayan şekillendirme işlemlerinden geçmektedir. Levhalar, şeritler halinde oluşturulur. Plakalar, 5 milimetre kalınlığında ve 10 inçten (250 milimetre)

geniş olacak şekilde, 0.1875 inçten büyük dikdörtgen şekiller olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.2. Çeliğin üretiminin şematik gösterimi [2].

3.2. PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ

Korozyona ve ısıya dayanıklı olan paslanmaz çelikler, yüksek oranda krom ve nikel içermektedirler. Paslanmaz çeliklerde korozyon direncinin yüksek olması, yüzeyde ince ve kararlı krom oksit veya nikel oksit tabakalarının oluşmasından kaynaklıdır [66]. Paslanmaz çeliklere farklı özellikler kazandırmak amacıyla birçok alaşım elementi kullanılabilir. Bu şekilde endüstrinin ihtiyaç duyduğu farklı paslanmaz çelik türleri elde edilebilir. Bu türler aşağıda sıralanmıştır:

- Östenitik paslanmaz çelikler
- Ferritik paslanmaz çelikler
- Ferritik-Östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler
- Martenzitik paslanmaz çelikler
- Çökeltme sertleştirilmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler

3.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelikler arasında östenitik kaliteler, korozyona karşı yüksek dirençleri, mükemmel mekanik özellikleri, iyi kaynaklanabilirlikleri ve düşük bakım maliyetleri nedeniyle en yaygın olarak kullanılanlardır. Östenitik çeliklerin tipik alaşım elementi %16-26 arasında krom ve %6-22 arasında nikeldir. İçerisindeki karbon içeriği çok düşük oranlarda artırılabilir. Östenitik paslanmaz çelikler, eş eksenli östenit tanelerinden oluşan tek fazlı bir yapıya sahiptir. Östenitin yüzey merkezli kübik (FCC) yapısı, yüksek süneklik, yüksek sıcaklıklara karşı iyi direnç ve kriyojenik sıcaklıklarda bile darbeye karşı mükemmel direnç sağlar. Östenitik paslanmaz çelikler manyetik değildir ve ısı işlemleriyle mekanik özellikleri gelişmez. Ancak soğuk işleme sertleştirilebilirler. Östenitik paslanmaz çelikler en fazla sayıda alaşıma sahiptir. Bu alaşımlar iki grupta toplanabilir: birinci grup krom-nikel alaşımlarını (AISI300 serisi) ve ikinci grup krom-manganez-nikel alaşımlarını (AISI200 serisi) temsil etmektedir. Birinci grup en önemli kategoriye sahiptir ve en yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelikleri içerir. AISI 300 serisinde en iyi bilinen alaşım, 18-8 çelik olarak ta adlandırılan AISI 304 (%18 Cr-%8 Ni) çeliğidir. Östenitik paslanmaz çelikler, özellikle gıda, içecek ve ilaç endüstrilerinde çok sayıda uygulamaya sahiptir. Bu malzemelerin yaygın kullanımı, iyi hijyenik özelliklerinden ve mükemmel uzun vadeli performanslarından kaynaklanmaktadır. Sıvılaştırılmış gazların, mutfak gereçlerinin, cerrahi aletlerin, nakliyenin, artık sıvıların arıtılmasının, sivil inşaatın, havacılık ve deniz endüstrilerinin depolanmasında yaygın olarak kullanılırlar. İyi mekanik özellikleri ve korozyona karşı yüksek dirençleri nedeniyle kimyasal ve nükleer tesislerde kritik bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde hem katmanlar hem de talaş yığılması (BUE) oluşumu özellikle önemlidir. Östenitik paslanmaz çelikleri ağır koşullar altında işlemek için takım geometrisinin ve takım malzemesinin optimizasyonu esastır. Takım geometrisi ile ilgili olarak, malzeme gerilmesini en aza indirmek ve daha düşük kesme kuvvetleriyle daha yumuşak bir kesme elde etmek için çok keskin bir kenar önerilir. Pozitif talaş açılarının ve geniş talaş kırıcıların kullanılması, sürtünmeden kaynaklanan ısıyı azaltarak sürekli kesmeyi ve talaşların düzgün çıkışını destekler [67].

3.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, iyi sıcaklık mukavemetleri, klorür kaynaklı stres korozyon çatlamasına karşı iyi dirençleri, oksidasyona ve ıslak korozyona karşı iyi dirençleri ve termal yorgunluğa karşı yeterli dirençleri nedeniyle sıklıkla otomotiv egzoz bileşenleri olarak kullanılır. Ferritik ve östenitik paslanmaz çelik arasında karşılaştırma yaparsak, östenitik paslanmaz çelikten nispeten daha düşük maliyeti nedeniyle ferritik çeliklerin kullanımı binek ve ticari araçlarda hızla artmaktadır [68]. Ferritik paslanmaz çelikler %14-27 arasındaki oranlarda krom içerirler ve bunların karbon oranı martenzitik paslanmaz çeliklerin karbon oranından daha düşüktür. Bu çelikler ısı ile sertleştirilemezler, ancak soğuk şekil değiştirme ile biraz sertleştirilebilirler. Ferritik paslanmaz çelikler manyetik özelliklere sahip olup hem sıcak hem de soğuk şekillendirmeye elverişlidirler. Yumuşatma tavından sonra bu çeliklerin sertliği en düşük, süneklik ve korozyon direnci ise en yüksek değerlerine ulaşır. Krom oranı %20'den daha yüksek olan ferritik paslanmaz çeliklerde, 550°C-850°C arasındaki sıcaklıklarda yapılan uzun süreli tavlama işlemi sonucunda sigma (σ) fazı oluşur. Bu faz, yüksek sıcaklıklardaki uygulama sırasında da oluşur ve çeliğin sertliğini artırır, ancak gevrekleşmeye neden olduğu ve korozyon direncini azalttığı için genellikle istenmez. Ferritik paslanmaz çelikler işleme özelliği ve korozyon direnci bakımından martenzitik paslanmaz çeliklerden daha üstündür. Ancak, yüksek sıcaklıklardaki mukavemet değerleri martenzitik paslanmaz çeliklerin mukavemet değerlerinden daha düşüktür. Sertlikleri su verme ile değil, soğuk deformasyon ile artırılabilir. Bu çelikler mutfak aletleri, devamlı su ve buhar etkisi altında bulunan kaplar, çatal, kaşık ve süs eşyası yapımında kullanılır. Türk Standartlarında X10Cr17, X12Cr17, X20Cr20, X10Cr17Mo ve X8Cr17Ti şeklinde gösterilen çelikler ferritik paslanmaz çeliklere örnek olarak verilebilir [69,70].

3.2.3. Ferritik-Östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler

Dubleks paslanmaz çelikler (DSS'ler) veya ferritik-östenitik paslanmaz çelikler, neredeyse paslanmaz çeliklerinki kadar uzun bir geçmişe sahiptir. Neredeyse 80 yıllık bir geçmişleri olduğundan martensitik, ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklere teknik olarak alternatifler oluşturmuşlardır. Olumlu birçok özellik kombinasyonuna

sahip olduklarından, çok geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler. Yıllar boyunca, işleme, fabrikasyon ve uygulama gerekliliklerini karşılamak için birkaç dubleks alaşım geliştirilmiş ve optimize edilmiştir. Bugün çok çeşitli uygulamalar için farklı dubleks paslanmaz çelik grupları mevcuttur. Çoğu DSS, nispeten yüksek krom içeriği nedeniyle standart östenitik kalitelere kıyasla üstün korozyon performansı sergiler. Son yıllarda nikel fiyatlarındaki hızlı artışın bir sonucu olarak, bu tip düşük nikelli paslanmaz çeliklerin kullanılmasına olan ilgi, özellikle emtia östenitik kaliteler seviyesinde korozyon direncine sahip daha yalın dubleks alaşımlarda artmıştır [71]. Dubleks çeliklerin üstün özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Ağırlık tasarrufu (Hafiflik)
- Taneler arası korozyona direnç
- Kombinasyon korozyon direnci ve yüksek mekanik mukavemet
- Yorulma dayanımı (Korozyon yorulma direnci)
- Sertlik/aşınma direnci
- Termal genişleme gibi fiziksel özellikler
- Üstün plastik davranış

Çoğu durumda, bu faktörlerin birden fazlası bir dubleks paslanmaz çeliğin seçilmesinin nedeni olmuştur. İsveç'teki Avesta Steelworks, 1930'lardan başlayarak ilk iki ticari dubleks alaşımını üretmiştir. Alaşımlardan biri olan Avesta 453S, %26 Cr, %5 Ni ve %1,5 Mo içeriyordu ve kabaca aynı amaçlarla aside dayanıklı bir malzeme olarak kullanılmıştır. Çeliğin sertliği ve mukavemeti onu işlenmesi zor hale getirdiğinden levha şeklinde kullanımı oldukça zordu [72]. 1930'lardan günümüze kadar dubleks paslanmaz çelikler çok çeşitli testlerden geçerek, dayanım özellikleri uygun alaşımlandırma işlemleriyle geliştirilmiştir. Bu sayede, petrol, gaz ve açık deniz endüstrilerindeki diğer birçok uygulamanın yanı sıra boru hatları için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Petrolün kendisi normalde çok aşındırıcı olmasa da üretim alanlarının etrafındaki doğal çevre ve çıkarma işleminin kendisi aşındırıcı ortamlar oluşturabilir. İşlenmemiş petrol ve gaz, aşındırıcılığı önemli ölçüde etkileyen çeşitli CO₂ ve H₂S seviyeleri içerir. Açık deniz endüstrisi için deniz suyu kullanımı gereklidir ve korozyona dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. En aşındırıcı

ortamlar, yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlara sahip derin ekşi kuyularda bulunur. Bu durumların çoğu için farklı dubleks alaşımlar özel çözümler sunmuştur [73]. Petrol ve gaz endüstrisinde dubleks paslanmaz çeliklerin önemli bir uygulaması, petrol ve doğal gazın taşınması için akış hatlarıdır. Bugün muhtemelen dünya çapında kurulmuş ve çok iyi hizmet performansına sahip 1.000 km'den fazla kaynaklı dubleks akış hattı bulunmaktadır. Bu akış hatları için kullanılan ana kalite, daha yüksek H₂S seviyeleri için bazı süper dubleks paslanmaz çeliklerin kullanıldığı 2205'tir. Akış hatlarındaki boru çapları 4-36 inç arasında değişir. Boru hatlarının büyük bir kısmı açık deniz kurulumlarında kullanılmaktadır [74]. Esnek borular farklı malzemelerin katmanlarından oluşurlar ve paslanmaz çelik katman, birbirine bağlı birçok küçük bölümden oluşur ve belirli bir dereceye kadar bükülebilir bir boru oluşturur (Şekil3.3).



Şekil 3.3. Paslanmaz çelikten oluşan esnek bir borunun katman oluşumu.

Paslanmaz çelik, petrol kulelerinin üst tarafı inşaatı için idealdir. Yaşam alanları ve diğer önemli alanların çevresine, kaza durumunda personelin korunması için koruyucu duvarlar örülmektedir. Bu bariyerlere “patlama duvarları” denir ve bir patlama meydana geldiğinde mümkün olduğu kadar çok enerji emebilmelidir. Koruyucu duvarların, mümkün olduğu kadar sağlam kalması için burkulmaya karşı iyi bir direnç göstermesi de arzu edilir. 2304 gibi saf bir dubleks paslanmaz çelik, bu özelliklere sahiptir ve daha sonra sıklıkla patlatma duvarlarının imalatı için tercih edilmektedir [75]. Tuzdan arındırma tesislerinde, evaporatör kapları için katı

paslanmaz çelik kullanımı çok uygun maliyetli bir seçim olabilir. Doğru dubleks kalite seçilirse, bir korozyon payı verilmesine gerek olmadığından, yumuşak çeliğe göre çok daha ince masterlar kullanılabilir. Flaş odalarında, aşındırıcı koşullar alt kısımlarda üst kısımlara göre daha tehlikeli olabilir. Bu durum, malzeme maliyetlerini sınırlayabilmek için, çeşitli kalite çeliklerin kullanılmasına olanak sağlar. 2205 gibi daha korozyona dayanıklı bir dubleks kalitenin kullanımı, kovanların alt kısmı ile sınırlandırılabilirken, 2304 gibi daha düşük korozyon direncine sahip daha ucuz bir kalite, kovanların üst kısmı için yeterli olacaktır. İki farklı dubleks sınıfını kullanan bu tip yapı, Dual Duplex™ konsepti olarak adlandırılır [76]. Şekil 3.4'te 2205 dubleks paslanmaz çelik kalite kullanılan bir kurulum örneği verilmiştir.



Şekil 3.4. Deniz suyu flaş odası tesisi için tasarlanmış evaporatör kovanları serisi.

3.2.4. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, nispeten yüksek mukavemet ve toklukla birlikte yüksek korozyon direncine sahiptir [77]. Martenzitik paslanmaz çelikler, %12-18 arasındaki oranlarda Cr içeren yüksek alaşımlı çeliklere suda veya yağda su verilerek elde edilirler. Alaşımsız çeliklerin sertlik ve mukavemeti gibi martenzitik durumdaki paslanmaz çeliklerin sertlik ve mukavemeti de daha çok karbon oranına bağlıdır. Bu çelikler 1000°C dolayındaki sıcaklıklarda östenitleştirildikten sonra suda veya yağda su verilerek sertleştirilir. Sertleştirme işleminden sonra söz konusu çelikler, gevrekliğin azaltılıp, sünekliğin artırılması için temperleme işlemine tabi tutulur.

Temperleme işlemi, genelde 590°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılır. 400°C-510°C arasındaki sıcaklıklarda bu çeliklerin darbe dayanımında önemli ölçüde düşme meydana gelir. Bu nedenle bu çelikler bu sıcaklıklar arasında temperlenmezler. Temperleme sıcaklığı arttıkça bazı karbürlerin çökmesi nedeniyle bu çeliklerin korozyon dirençleri biraz azalır, ancak bu durum önemli bir sorun teşkil etmez. Martenzitik paslanmaz çelikler manyetik olup hem sıcak hem de soğuk şekillendirmeye elverişlidirler. Bu çeliklerden karbon oranı düşük olanlar talaşlı yöntemle işlenebilirler. Söz konusu çelikler atmosferde ve farklı kimyasal ortamlarda yüksek korozyon direnci sergilerler. Martenzitik paslanmaz çelikler üstün korozyon direnci gerektiren uygulamalardan başka, yüksek sıcaklıkta mekanik zorlamalara dayanım gerektiren yerlerde de kullanılırlar. Örneğin X20Cr13Mo çeliği, özellikle buhar türbini kanatları ve basınçlı döküm kalıplarının yapımında tercih edilir. Karbon oranı yüksek olan martenzitik paslanmaz çelikler (X40Cr13, X70Cr17 ve X90Cr18MoV) ise kesici alet ve rulmanlı yatak yapımında kullanılır. Söz konusu çelikler su verme işleminden sonra 200-300°C arasındaki sıcaklıklarda temperlenirler. Temperleme işleminden sonra bu çelikler 58-60 RSD-C arasında bir sertliğe sahip olurlar [78]. Martenzitik paslanmaz çelikler, döküm halinde nadiren kullanılır ve döküm külçeler genellikle alaşımın erime noktasının 0.75'i kadar sıcaklıklarda gerçekleştirilen bir açık kalıp dövme işleminden geçer. Son olarak, son bileşeni (örneğin Türbin milleri) elde etmek için normalizasyon, su verme ve temperleme işlemleri ve ardından işleme operasyonları uygulanır. Açık kalıp dövme işleminden önce, döküm külçeler, büyük boyutlu külçelerde dövme sıcaklığına ulaşmak için onlarca saat yeniden ısıtılır. Bu nedenle, yeniden ısıtma/dövme sıcaklığının seçimi, dökülmüş dendritik yapının tamamen bozulmasını sağlamak, katılaşma gözenekliliğini ortadan kaldırmak ve kimyasal (makro segregasyon) homojenliğini azaltmak için kritik öneme sahiptir [79].

3.2.5. Çökeltme Sertleştirilmesi Uygulanan Paslanmaz Çelikler

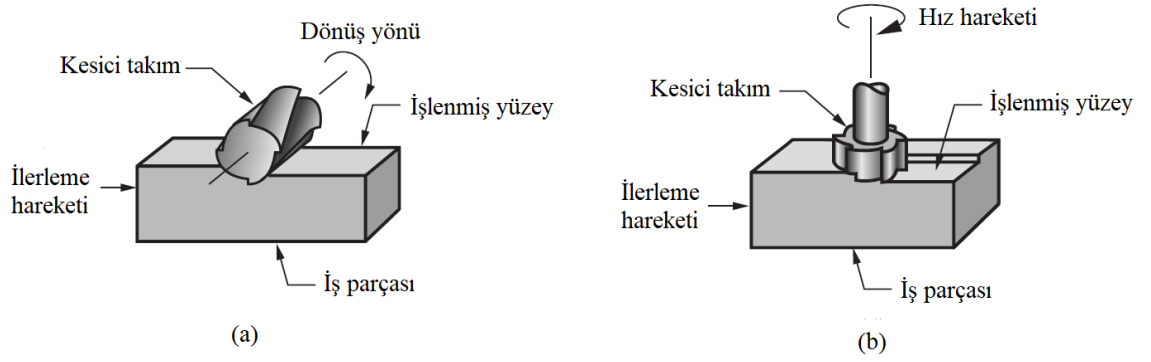
Çökeltme ile sertleştirilmiş (PH) paslanmaz çelikler, östenitik veya martensitik matrise sahip paslanmaz çeliğin alt sınıfıdır. PH paslanmaz çelikler, mükemmel mekanik ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı nükleer, havacılık ve kimya endüstrilerinde yapısal malzemeler olarak artan bir önem kazanmıştır. Bu çelikler,

östenitik kalitelerden daha yüksek mukavemet ve 400 serisi martensitik kalitelerden daha iyi olan korozyon direnci gösterir ayrıca geleneksel üretim süreçlerine uygundur. PH paslanmaz çeliklerin ısı işlemleri iki adımda yapılır. Başlangıçta, varsa intermetaliklerin çözünmesi nedeniyle çözelti tavlama işlemi uygulanır. Bu işlem latta martenzitik yapı kazandırır. Yüksek sertlik ancak eskitme ısı işleminden sonra elde edilir. Yaşlandırma uygulanmadan önce genellikle numuneler istenilen şekle getirilir ve ardından eskitme ısı işlemi uygulanır [80]. Çökeltme sertleştirilmesi uygulanan paslanmaz çelikler, literatürde bazı kaynaklarda martenzitik paslanmaz çelikler başlığı altında da kabul edilmektedir. PH grubu çeliklerin bu üstün özelliklerinin yanında, daha yüksek çekme dayanımlarına sahip çelikler, normal atmosfer sıcaklığında nispeten zayıf süneklik sergiler. Mukavemet-süneklik ikilemi endüstriyel uygulamalar için büyük engeller oluşturmaktadır. Bu nedenle, PH çeliğinin yüksek mukavemet ve mükemmel sünekliğin üstün bir kombinasyonunu elde etmesi için makul bir tasarım ve basit bir proses gereklidir [81]. Esas olarak bu çeliklerin gelişimi, 1970'lerin sonlarında kobalt maliyetindeki kıtlık ve artıştan dolayı kobalt içermeyen maraging çelikleri geliştirme çabaları sonucunda başlamıştır [82]. Bu çelikler, daha düşük mukavemetli tok ve korozyona dayanıklı östenitik paslanmaz çelikler ile daha yüksek mukavemetli ancak daha düşük tokluğa sahip martenzitik paslanmaz çelikler arasındaki teknolojik boşluğu başarıyla doldurabilir. PH grubu çelikler genellikle titanyum alaşımlarına nazaran daha az maliyetlidir [83]. Bu çelikler kimyasal bileşimlerine bağlı olarak östenitik, yarı östenitik veya martenzitiktir. Ancak çökeltme ile sertleştirilmiş martenzitik paslanmaz alaşımlar en çok tercih edilen çelik yapılarıdır. Genellikle %4-7 Ni içeren bu malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için gövdelerine molibden, bakır, titanyum ve niyobyum gibi elementler eklenir [84]. PH13-8 Mo gibi çökeltmeyle sertleşen paslanmaz çeliklerin yapısında nikel ve alüminyum içeren ferritik ve martenzitik türlerin yüksek sıcaklıklarda (400 °C'nin üzerinde) bile sertleşebildiği gösterilmiştir [85].

BÖLÜM 4

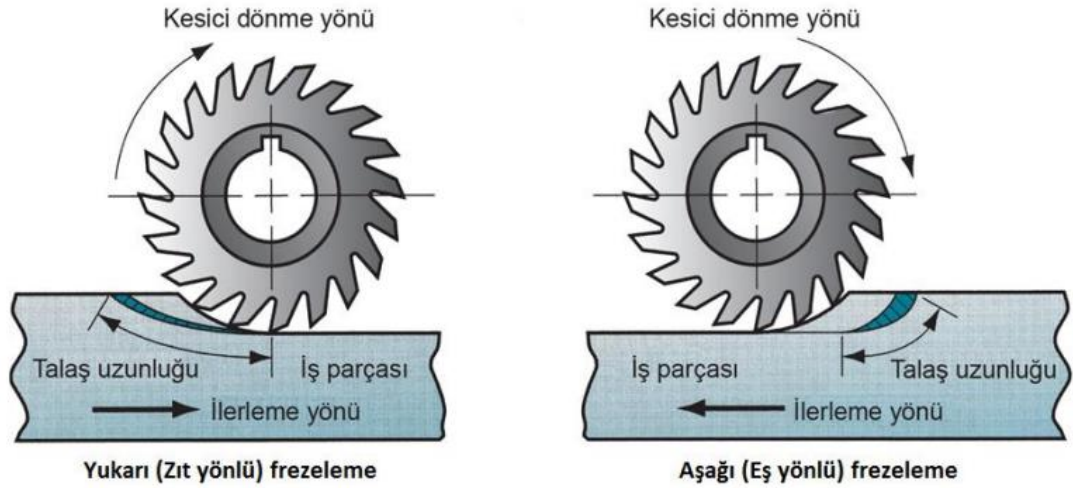
FREZELEME

Frezeleme, iş parçasının birden fazla kesme kenarına sahip silindirik bir takıma doğru parçanın ilerletildiği talaşlı imalat işlemidir. Frezelemede, birden fazla kesme kenarı olan dönen bir kesici takım, bir düzlem veya düz yüzey oluşturmak için iş malzemesi boyunca yavaşça ilerler. İlerleme hareketinin yönü, takımın dönüş eksenine diktir. Hız hareketi, dönen freze çakısı tarafından sağlanır. Takım eksenini ile ilerleme yönü arasındaki bu yönlendirme, frezelemeyi delme işleminden ayıran özelliklerden biridir. Delme işleminde kesici takım, dönme eksenine paralel bir yönde ilerler. Frezelemede kesici takıma freze bıçağı, kesici kenarlara dış denmektedir. Frezelemenin iki temel biçimi, Şekil 4.1(a) ve (b)'de olduğu gibi çevresel frezeleme ve yüzey frezelemedir. Bu işlemi gerçekleştiren geleneksel takım tezgâhlarına freze tezgâhı denmektedir. Normalde frezeleme ile oluşturulan geometrik şekil, düz bir yüzeydir. Diğer iş geometrileri ya kesici yolu ya da kesici şekli aracılığıyla oluşturulabilir. Mümkün olan şekil çeşitliliği ve yüksek üretim oranları sayesinde frezeleme, en çok yönlü ve yaygın olarak kullanılan işleme operasyonlarından biridir. Frezeleme, kesintili bir kesme işlemidir; bu, kesicinin dişlerinin her devir sırasında işe girip çıkması anlamına gelir. Bu kesintili kesme işlemi, dişleri her dönüşte bir darbe kuvveti ve termal şok döngüsüne maruz bırakmaktadır. Takım malzemesi ve kesici takım geometrisi bu koşullara dayanacak şekilde tasarlanmalıdır [86,87].



Şekil 4.1. (a) Çevresel frezeleme (b) Alın frezeleme [88].

Çevresel frezelemede, işlenmiş bileşenlerin kalitesi için yüzey doğruluğu çok önemlidir. Dolayısıyla çevresel frezelemenin üretim alanında hala önemli olmasının nedenlerinden biridir [89]. Çevresel frezelemede, freze çakısının dönüş yönü frezelemenin Şekil 4.2’de gösterilen iki türünü birbirinden ayırır: bu türler yukarı frezeleme ve aşağıya frezeleme şeklinde isimlendirilir. Yukarı frezelemede, zıt yönlü frezeleme olarak da adlandırılır, freze çakısının dişinin iş parçasına girdiğinde dişin hareket yönü parçanın ilerleme yönü ile zıttır. Bu durumda, “ilerlemeye karşı” bir frezeleme gerçekleşmektedir. Aşağıya frezelemede ise dişler iş parçasına girdiğinde freze çakısının hareketi iş parçasının ilerleme hareketi ile aynı yöndedir. Bu durum “ilerlemeyle beraber” frezelemenin gerçekleştiğini gösterir. Bu iki tip frezelemenin göreceli geometrileri onların kesme hareketlerinde farklılıklara yol açar. Yukarıya frezelemede, her diş tarafından oluşturulan talaş çok ince olarak başlar ve kalınlığı dişin parça içindeki kesme işlemi ilerledikçe artar. Aşağıya frezelemede ise her talaş kalın olarak başlar ve kesme ilerledikçe kalınlığı azalır. Aşağıya frezelemede oluşan talaş boyu yukarıya frezelemede oluşan talaş boyundan daha kısadır (şekildeki talaş boyları arasındaki farkın görülebilmesi için abartılmıştır). Bu freze çakısının bir birim kesilen talaş debisi için iş parçası içinde daha az kaldığını gösterir. Dolayısıyla, aşağıya frezelemede takım ömrü daha uzun olur. İş parçası içinde kesme yapan dişler için kesme kuvveti yönü freze çakısının çevresine teğettir. Yukarı frezelemede, bu kesme kuvvetleri freze çakısının dişleri iş parçasından çıkarken parçayı yukarı doğru kaldırma eğilimindedir. Aşağı frezeleme ise bu kesme kuvvetlerinin yönü aşağıyadır ve iş parçasını freze tablasında tutmaya doğru baskı uygular.



Şekil 4.2. Aynı ve zıt yönlü frezeleme.

Alın frezelemede, freze çakısının eksenini frezelenmekte olan yüzeye diktir ve kesme işlemi çakının dış çevresinde ve ucunda bulunan kesme kenarları ile gerçekleşir. Çevresel frezelemede olduğu gibi alın frezelemenin çeşitli türleri bulunmaktadır [88].

4.1. FREZELEMEDE PARAMETRELER

4.1.1. Kesme Hızı

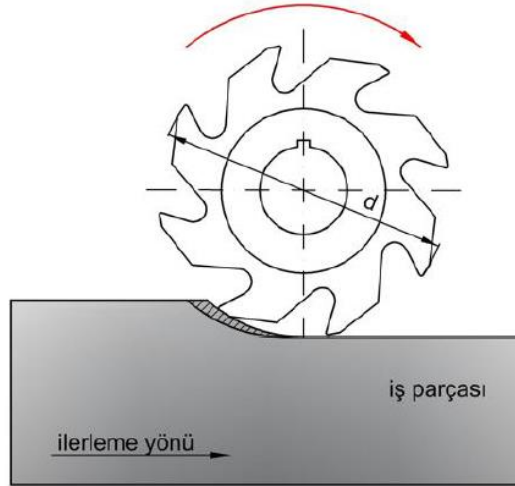
Freze makinelerinde frezenin kesme hızı, torna makinelerindeki kesme hızı tarifine teorik olarak uymakla beraber, pratik olarak torna tezgahlarında olandan farklıdır. Tornada kesici takım durağan (dönme hareketi yapmayan) olduğu halde freze makinelerinde kesici takımlar dönme hareketi yaparlar. Bu yüzden kesme hızı formülündeki ($V = \pi \cdot d \cdot n / 1000$ m/dak) “d” harfi, burada frezenin çapını gösterir. Buna göre freze bir devir yapınca aldığı yol = $\pi \cdot d$ mm kadar olacaktır. Frezenin bir dakikada yaptığı devir sayısı (n) ile gösterilirse, bir dakikada aldığı yol = $\pi \cdot d \cdot n$ (mm) olur. Kesme hızı, freze ağızlarından herhangi birinin bir dakikada metre cinsinden aldığı yol olduğundan, bir dakikada alınan yol ($V = \pi \cdot d \cdot n$) metre cinsinden yazılırsa, kesme hızı formülü Eşitlik 4.1’de verilen şekilde hesaplanır [90].

$$V = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \text{ m/dak} \quad (4.1)$$

Yukarıda verilen değişkenlerin anlamları ise aşağıda belirtilmiştir:

- n : Devir sayısı (dev/dak)
d : Kesici takım çapı (mm)
V : Kesme hızı (m/dak)

Frezeleme esnasında işleme yönü, kesme kuvveti, talaş kesiti sürekli değişim gösterebilir. Şekil 4.3'te frezelemede talaş kaldırma işlemi gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Frezelemede talaş kaldırma işlemi.

Bütün talaşlı üretim tezgahlarında olduğu gibi, freze tezgahlarında da kesme hızı, esas olarak işlenen malzemenin sertliğine ve freze malzemesinin cinsine göre seçilir. Bu iki temel özellikten başka kesme hızının saptanmasında ayrıca kaldırılacak talaşın Şekli (kaba talaş, ince talaş vb.), soğutma sıvısı kullanıp kullanılmayacağı, iş parçasının bağlanma Şekli, kesme derinliği, vals veya alın frezesi oluşu gibi önemli faktörlerde rol oynamaktadır. Bu değerler göz önünde tutularak, frezeler için kesme hızı tabloları hazırlanmıştır. Bir için frezelenmesi için, kesme hızı tablosundan yararlanmak son derece kolaydır. Ancak, bunun için işlenecek malzemenin cinsini kesin olarak bilmek gerekir. Malzemenin sertliği kesme hızını çok etkilemektedir.

Sert malzemeler işlenirken kullanılan kesme hızı, yumuşak malzemeler işlenirken kullanılan kesme hızından daha düşük olur.

4.1.2. İlerleme Miktarı

Frezede ilerleme, kesici takımın her dönüş hareketinde milimetre cinsinden kat edilen yol olarak tanımlanır. Frezelemede diş başına ilerleme (f_z) ise kesici takımda bulunan diş sayısının (Z) çarpımına eşittir. Aşağıdaki denklemlerden faydalanarak ilerleme değerleri hesaplanabilir.

$$f_z = \frac{V_f}{n \times Z} \quad (4.2)$$

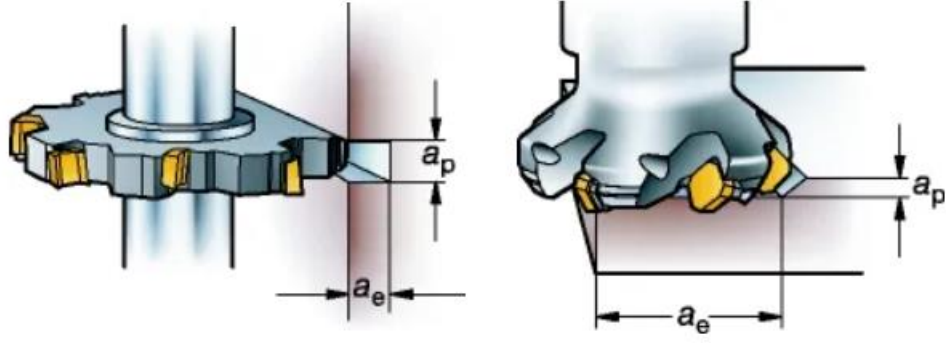
f_z : Diş başına ilerleme (mm/dev)

Z : Kesici takımdaki kesici diş sayısı (adet)

V_f : Tabla ilerlemesi (mm/dak)

4.1.3. Kesme Derinliği

Kesme derinliği (a_p) aksenal yöndeki kesilmemiş ve kesilmiş yüzey arasındaki farktır. Maksimum a_p birincil olarak kesici uç boyutu ve tezgâh gücüyle sınırlıdır. Diğer bir kritik faktör ise, kaba talaş işlemede tork ve ince talaş işlemede titreşimdir. Kesme genişliği (a_e), kesicinin işleme sırasındaki radyal genişliğidir. Özellikle dalma aşamasında kritik önem taşır ve köşe frezelemedeki titreşim için maksimum a_e daha da kritik öneme sahiptir [91]. Şekil 4.4'te frezeleme işleminde kesme derinliği ve kesme genişliği şematik olarak gösterilmiştir. Kesme derinliği, iş parçası malzemesinin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde en etkin parametrelerden birisidir.



Şekil 4.4. Kesme derinliği ve kesme genişliğinin şematik olarak gösterimi [91].

4.2. FREZELEME TERMINOLOJİSİ

4.2.1. Kesme Kuvvetleri

Frezeleme işleminde talaş kaldırma esnasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri talaş kalınlığının farklı olması ve devir sayısının değişken olması nedeniyle değişken ve geometrik olarak karmaşıktır. Bu nedenle kesme kuvvetlerinin kolay hesaplanabilmesi için pratikte ortalama talaş kalınlığına karşılık gelen ortalama kesme kuvvetleri dikkate alınır [92]. Dolayısıyla kesme kuvvetleri, ortalama kesme kuvveti (F_c), ortalama radyal kuvvet (F_r) ve ortalama ilerleme kuvveti (F_f) olmak üzere üç bileşene ayrılır [93–95].

Aynı anda parçadan talaş kaldıran kesici uç sayısı;

$$Z_e = Z \cdot \frac{\varphi_s}{360} \quad (4.3)$$

Kesici takımlara ait ortalama kesme kuvvetleri;

$$F_c = Z_e \cdot F_{cz} \quad (4.4)$$

$$F_f = Z_e \cdot F_{fz} \quad (4.5)$$

$$F_r = Z_e \cdot F_{rz} \quad (4.6)$$

bağıntıları ile bulunur.

Helisel silindirik frezelemede F_c , F_r , F_f kuvvetlerine ek olarak aksenal kuvvet olan F_a meydana gelir ve aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanır;

$$F_a = F_c \cdot \tan \lambda \quad (4.7)$$

Alın frezeleme işleminde kesme kuvvetlerinin durumu, ortalama talaş kaldırma kuvvetinin (F_z) bileşenleri, ortalama kesme kuvveti (F_c) ve normal kuvvettir (F_n). F_n normal kuvvetin bileşenleri ise ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvettir (F_r). Burada bir kesici uca karşılık gelen ortalama kesme kuvveti (F_{cz});

$$F_c = Z_e \cdot F_{cz} = Z_e \cdot B \cdot h_m \cdot k_s \quad (4.8)$$

Bağıntısı ile bulunur. Kesici takıma karşılık gelen toplam ortalama kesme kuvveti ise;

$$F_c = Z_e \cdot F_{cz} = Z_e \cdot B \cdot h_m \cdot k_s \quad (4.9)$$

Bağıntısı ile bulunur. Burada;

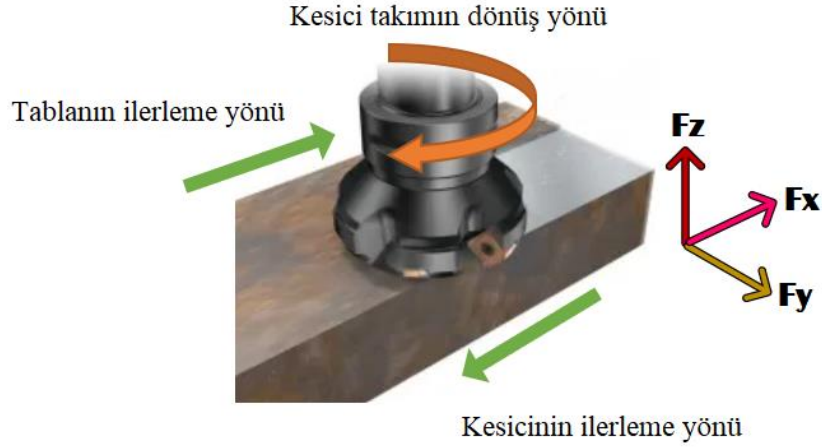
Z_e : Aynı anda talaş kaldıran kesici uç sayısı,

B : Kesme derinliği,

h_m : Ortalama talaş kalınlığı,

k_s : Özgül kesme kuvveti'dir.

Teorik hesaplamalarda, ortalama radyal kuvvet (F_r) ve ortalama ilerleme kuvveti (F_f) deneylere dayanan aşağıdaki bağıntılara göre bulunabilir [96]. Frezelemede kesici takım, iş parçasının hareket yönü ve kuvvet yönleri Şekil 4.5'te görülmektedir.



Þekil 4.5. Frezeleme iþleminde kesme kuvveti yönleri.

F_x (F_f): X eksenini yönünde ölçülen kuvvet (N), ilerleme doğrultusunda yön verir.

F_y (F_c): Y eksenini yönünde ölçülen teğetsel kuvvet (N), takım dönme yönüne zıt doğrultusunda yön verir.

F_z (F_r): Z eksenini yönünde ölçülen kuvvet (N), kesici takım dönme yönü doğrultusunda yön verir.

Frezeleme esnasında kesme kuvvetine etki eden faktörler aþađıdaki biçimde sıralanabilir;

- Kesme parametreleri,
- Kesici takım tipi ve geometrisi,
- Kesici takımın frezeleme iþlemine başlama yönü ve yanaþma açısı,
- Talaþ kalınlığı,
- Kesici takımdaki aşınma mekanizmaları,
- Frezeleme yöntemi,
- İþ parçası malzeme tipi,
- İþ parçasının bağlanma şekli ve rijitliği [97].

Frezeleme iþleminde istenilen sonucu elde etmek için kesme kuvvetlerinin hesaplanması ve buna bağlı olarak da iþ mili ve iþ bağlama aparatının boyutlandırılması gerekmektedir. Kesme kuvveti ölçümleri iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu sistemlerinden birincisi, adaptif kuvvet ölçme olarak

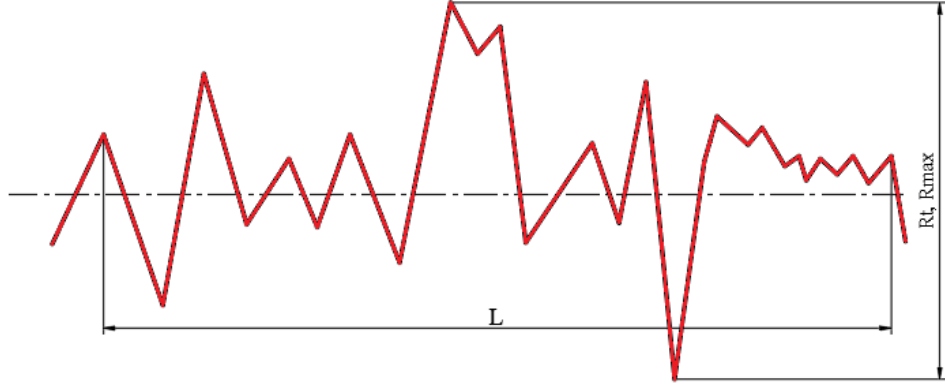
adlandırılan, tezgâh kontrol sistemi veya kesicinin bağlı bulunduğu motordan alınan akım veya elektrik sinyallerinin analizi ile kuvvet ölçümünün gerçekleştirilmesidir. İkinci ölçme sistemi ise, iş parçası veya kesici üzerine yerleştirilen dönüştürücüler (gerinim ölçerler, yük hücreleri, dinamometreler) sayesinde kuvvet ölçümünün gerçekleştirilmesidir [98–100].

4.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Katı yüzeylerin özellikleri yüzey etkileşimi için çok önemlidir çünkü yüzey özellikleri gerçek temas alanını, sürtünmeyi, aşınmayı ve yağlamayı etkiler. Tribolojik fonksiyonlara ek olarak, optik, elektriksel ve termal performans, boyama ve görünüm gibi diğer uygulamalarda yüzey özellikleri önemlidir. Yüzeylerin çoğu kimyasal olarak reaktiftir. Asil metaller dışında, tüm metaller, alaşımlar ve birçok ametal havada yüzey oksit katmanları oluşturur, diğer ortamlarda muhtemelen başka katmanlar (örneğin, nitrürler, sülfürler ve klorürler) oluştururlar [101]. Yüzey kalitesi, ölçülen yüzey pürüzlülük değeriyle doğrudan ilişkilidir. Teknolojik gelişmelerin artışıyla iş parçası yüzey kalitesi de önem kazanmıştır [102]. Yüzey pürüzlülüğü işlenen yüzeylerin kalite karakteristiği olmanın yanında, imalat yöntemleriyle işlenen yüzeylerin küçük aralıklardaki düzensizlikler olarak da tanımlanabilmektedir. Frezelemede özellikle kesikli işleme ile iş parçasından talaş kaldırıldığından, takım geometrisinin, kesme parametrelerinin (kesme derinliği, frezeleme yöntemi, kesme hızı, ilerleme vb.) ve soğutma yöntemlerinin ideal seviyede seçilmesi son derece önemlidir. Kesici takım BUE oluşumu, tezgâh kaynaklı titreşim, kesici takım ve iş parçasının rijit bağlanması gibi değişkenler kontrol altına alınır ise ideal yüzey pürüzlülüğüne ulaşılması mümkündür [103–106]. İşlenen yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin tespiti, yüzey kalitesi ve ölçümü uluslararası standartlarda belirlenmiştir [107]. Yüzey pürüzlülük, genel olarak yüzey pürüzlülüğün en büyük değeri (R_t ya da R_{max}), aritmetik ortalaması (R_a), karesel ortalamanın karekökü (R_q veya RMS), beş en yüksek beş en çukur noktanın ortalaması (R_z) olmak üzere dört farklı şekilde değerlendirilebilir.

4.2.2.1. Yüzey Pürüzlülük En Büyük Değeri (R_t , R_{max})

Yüzey pürüzlülük en büyük değeri “ R_t ya da R_{max} ” ile sembolize edilmektedir. Yüzey pürüzlülük en büyük değeri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Yüzey pürüzlülük en büyük değeri (R_t , R_{max}).

4.2.2.2. Yüzey Pürüzlülük Aritmetik Ortalaması (R_a)

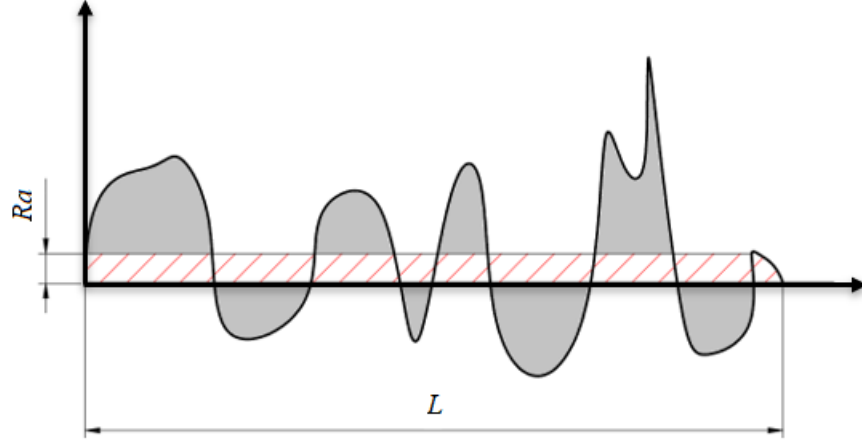
Merkez hat ortalaması (CLA) olarak da bilinen aritmetik ortalama yükseklik parametresi, genel kalite kontrolü için evrensel olarak en çok kullanılan pürüzlülük parametresidir. Şekil 4.7’de gösterildiği gibi, pürüzlülük düzensizliklerinin ortalama hattın ortalama mutlak sapması olarak tanımlanır. Bu parametrenin tanımlanması ve ölçülmesi kolaydır ve yükseklik değişimlerinin iyi bir genel tanımını verir. Aritmetik ortalama yükseklik parametresinin matematiksel tanımı ve dijital uygulaması sırasıyla aşağıdaki gibidir [108]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (4.10)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (4.11)$$

Ortalama profil çizgisinin altında kalan ölçümlerin mutlak değeri alınır. İş parçası imalat resimlerinde yüzey pürüzlülük değeri olarak genelde R_a kullanılmaktadır. Pratikte $R_a = (0,16 \sim 0,25) \times R_t$ şeklinde hesaplanabilir. Örneklem uzunluğu

standartlarda verildiği üzere 0,08-2,5-8 ve 25 mm olarak tercih edilebilir. Yüzeysel pürüzlülük aritmetik ortalama değeri R_a aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade edilebilir [109].



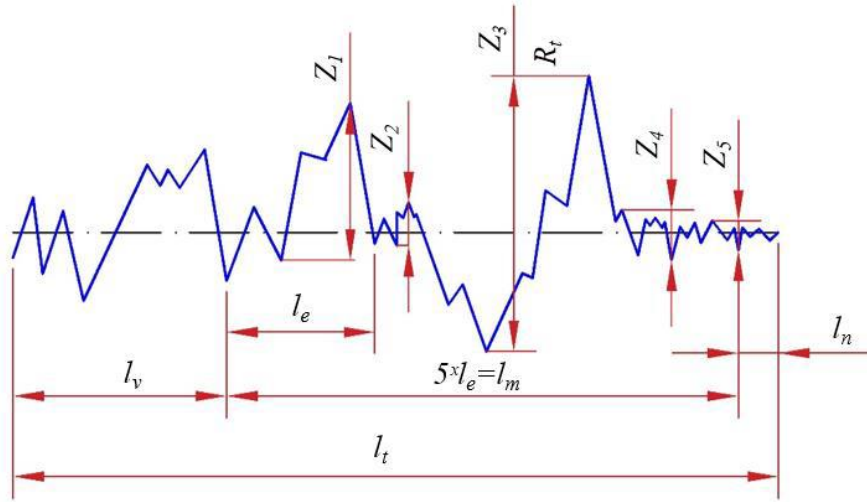
Şekil 4.7. Yüzeysel pürüzlülük ortalama değeri R_a .

4.2.2.3. Ortalama Yüzeysel Pürüzlülük Yüksekliği (R_z)

Ortalama yüzeysel pürüzlülük yüksekliği, ortalama profil çizgisine paralel ve profille kesişmeyen, yüzeysel pürüzlülük profilinin en yüksek beş tepe ve en düşük beş çukur noktaları arasındaki ortalama uzaklık olarak ifade edilmektedir (Şekil 4.8). R_z sembolü ile gösterilmektedir. R_z aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade edilebilir [110].

$$R_z = \frac{1}{5}(z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5) \quad (4.12)$$

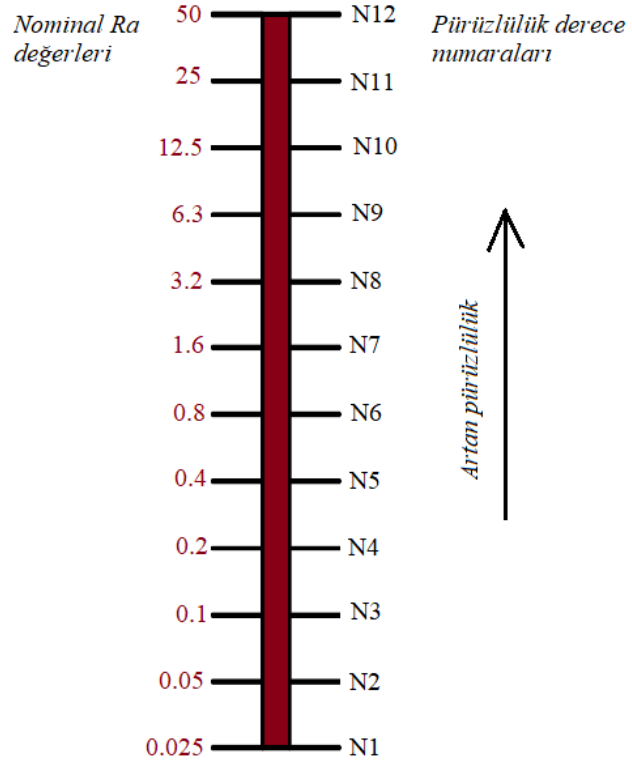
Bu parametre ara sıra meydana gelen yüksek tepe noktalarına veya derin oyuklara karşı R_a 'dan daha hassastır. Alman DIN sistemi, R_z 'yi, profilin değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek beş tepe noktasının ve en düşük beş çukur toplamının ortalaması olarak tanımlar [108].



Şekil 4.8. Ortalama yüzey pürüzlülük yüksekliği R_z [111].

4.2.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Birimi ve Dereceleri

Yüzey pürüzlülüğünün ölçüsü “ μm ” ya da “ $\mu\text{inç}$ ” dir. Literatürde yaygın olarak “ μm ” (mikron metre) kullanılmaktadır. İşlenmiş bir yüzeye ait ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a) performansı önemli ölçüde etkilemeksizin değişebilmektedir. Bu durumdan dolayı uygun olmayan bir tasarım dokusu üzerindeki çizimlerin adlandırılması için bilinen en iyi yöntem “yüzey pürüzlülük” derecelerinin oluşturulmasıdır. Bu bilgiye göre, tolerans bantları ve “N” harfiyle gösterilen pürüzlülük dereceleri belirlenmiştir. Pürüzlülük derecesi arttıkça yüzeyin kaba olma durumu artmaktadır. Her pürüzlülük derecesi R_a 'nın iki katını göstermektedir ve bu değerler performansla uyum sağlayan geometrik işlemin sonucudur. Pürüzlülük derecelerinin her biri birçok uygulamada karşılaşılan işlemlerin performansını sergileyen en üst sınır değeridir. Örneğin, R_a değeri $0.6 \mu\text{m}$ olan bir yüzeyin pürüzlülük derecesi N5 ile N6 arasındadır. Bu değer N5 pürüzlülük derecesine ait olduğu Şekil 4.9’da görülebilir. Ayrıca, pürüzlülük derecelerinin kullanımı R_a 'nın μm veya $\mu\text{inç}$ birimleriyle ölçüsel hale getirilmesinde de önemlidir.



Şekil 4.9. Yüzey pürüzlülük dereceleri [111]

4.2.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Yöntemleri

Yüzey pürüzlülüğünün doğru biçimde ölçülmesi hem işleme zamanından tasarruf sağlanması hem de maliyetin optimize edilmesi noktasında önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey pürüzlülük ölçüm yöntemleri iş parçasının geometrisine, işlenen yüzeyin genel durumuna ve uygulanan işleme yöntemine göre farklılık gösterebilir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde aşağıda maddeler halinde verilen yöntemler kullanılabilir [112]:

- Dokunarak ölçme yöntemi,
- Mekanik çalışmayla ölçme yöntemi,
- Hidrolik yöntem,
- Pnömatik yöntem,
- Yüzey dinamometresi yöntemi,
- Kapasitans yöntemi,
- X ışını (X-Ray) yöntemi,

- Elektron mikroskobu (SEM/TEM) yöntemi,
- Optik mikroskop yöntemi,
- Kesit alma yöntemi,
- Karşılaştırmalı mikroskop yöntemi,
- Optik profilometre yöntemi,
- Optik parazit yöntemi,
- Işık bant mikroskop yöntemi,
- Elektro fiber optik yöntemi
- İnterferans mikroskop yöntemi,
- Kisilev profilometre yöntemi,
- Yaylı profilometre yöntemi,
- Elektrikli profilometre yöntemi,
- Leving profilografi yöntemi,
- Linnik ikili mikroskop yöntemi,
- Hava master yöntemi,
- Fotoğraflama yöntemi,
- Görsel komparatör yöntemi,
- Çok sayıdaki yükseltinin masterla okunma yöntemi,
- Kaydetme özellikli indikatör yöntemi,
- İzleyici uç yöntemi.

4.2.5. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler

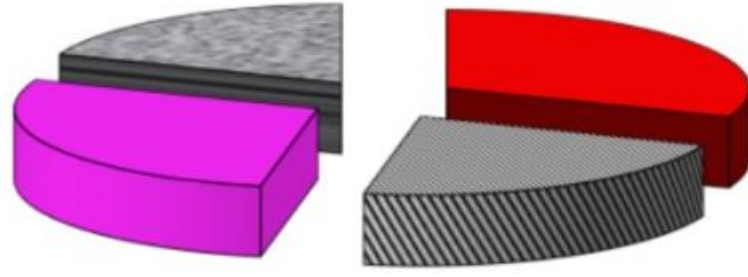
Aşağıda maddeler halinde verilen faktörler yüzey pürüzlülüğüne etki etmektedir [113]:

- Kesici takımdaki titreşimler,
- Kesici takım geometrisi,
- İşlenen iş parçasında meydana gelen titreşim ve balans,
- İlerleme miktarı,
- Kesme hızı,
- Talaş derinliği,
- Kesici ucun üzerine talaş yapışması (BUE),

- İşlenen malzemenin süreksiz talaş vermesi,
- Bir önceki yüzey kalitesi.

4.3. FREZELEMEDE ENERJİ TÜKETİMİ

Sanayi sektöründe enerji tüketen operasyonların başında imalat işlemleri gelir. İmalat işlemleri işlenmemiş malzemeleri makineler ve/veya takım tezgâhları vasıtasıyla son veya ara ürün haline getirmek için yürütülen işlemlerdir. Döküm, kaynak, yüzey iyileştirme, ısıl işlem, talaşlı imalat temel imalat işlemlerindedir. İmalat işlemlerinin yaygın olarak kullanılanlarından biri de talaşlı imalat işlemidir. Talaşlı imalat işlemlerinin başında frezeleme, tornalama, vargelleme, planyalama, taşlama, broşlama ve delik delme işlemleri gelir [114–117]. Talaşlı imalat işlemleri genellikle takım tezgahlarıyla yapılmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle takım tezgâhları da zamanla gelişmiş ve bilgisayar kontrollü tezgahların sayısı artmıştır. Takım tezgâhı üretim teknolojisinin gelişmesi ile tezgahlar çok hassas kesim yapabilecek kabiliyete ulaşmaktadır. Takım tezgahlarının yaygın kullanımı takım tezgahlarını sanayi sektöründeki önemli enerji tüketimi kalemlerinden biri kılmıştır. Takım tezgâhları çalışmak için elektrik enerjisine ihtiyaç duyar. Ülkemizde üretilen elektriğin çoğu da hem karbon salınımı yüksek olan hem de enerji dönüşüm verimliliği düşük olan fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu yüzden enerjiyi verimli kullanmak adına takım tezgahlarının talaşlı imalat operasyonları süresince harcadığı enerjiyi belirlemek önemli hale gelmiştir. Her takım tezgahının enerji tüketimi gerek kullanım amacına göre gerekse kesime yardımcı alt birimlerinin farklı kabiliyetlerde olmasından ötürü kendine özgüdür. Bu yüzden her tezgâhın özgün güç tüketim profillerinin çıkarılması gerekmektedir. Bu profiller operasyonlar için harcanacak enerji tüketim değerlerinin tahminini kolaylaştırır ve dolayısıyla enerjiyi daha verimli kullanmak adına geliştirilecek işleme stratejilerinin belirlenmesine yardımcı olur [118,119]. ABD'deki toplam enerji tüketimindeki nihai kullanım sektörlerinin payları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sanayi sektörü toplam enerji tüketiminin yaklaşık %31'ini oluşturmaktadır. İmalat, sanayi sektöründeki enerji tüketiminin yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır. Talaşlı imalat önemli bir üretim süreci kümeleridir [120]. Enerji tüketimini azaltan işleme, sürdürülebilir üretime ulaşmak için büyük önem taşımaktadır [121].

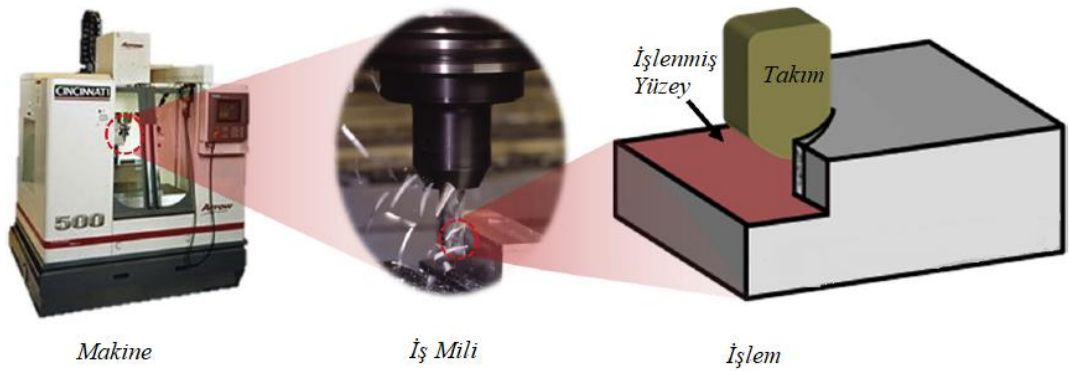


- 1 Endüstriyel (%31)
- 2 Yerleşim Bölgeleri (%22)
- 3 Taşımacılık (%28)
- 4 Ticari Alanlar (%19)

Şekil 4.10. ABD'de toplam enerji tüketiminde nihai kullanım payı [121].

4.3.1. Talaşlı İmalatta Enerji Tüketimi ve Sınıflandırma

Bir takım tezgahının enerji tüketimi, tezgâh, iş mili ve proses seviyeleri gibi parametrelerle farklı seviyelerde değerlendirilebilir (Şekil 4.11). Makine düzeyinde, tüm takım tezgâhı tarafından tüketilen enerji (örn. kontrol sistemleri, soğutma ve yağlama üniteleri, tahrik sistemleri, iş mili motoru, imalat süreci vb.) dikkate alınmaktadır. Enerji tüketimi ile işleme koşulları arasındaki ilişkiyi bu düzeyde anlamak, takım tezgahlarının genel enerji verimliliğini iyileştirmek için pratiktir. Bu düzeyde enerji tüketimini analiz etmenin sorunu, tüketilen enerjinin takım tezgahına bağlı olmasıdır. Farklı üretim süreçlerini ve hatta farklı takım tezgahlarını kullanan aynı süreci karşılaştırmak pratik değildir.



Şekil 4.11. Enerji tüketiminin sınıflandırılması [122].

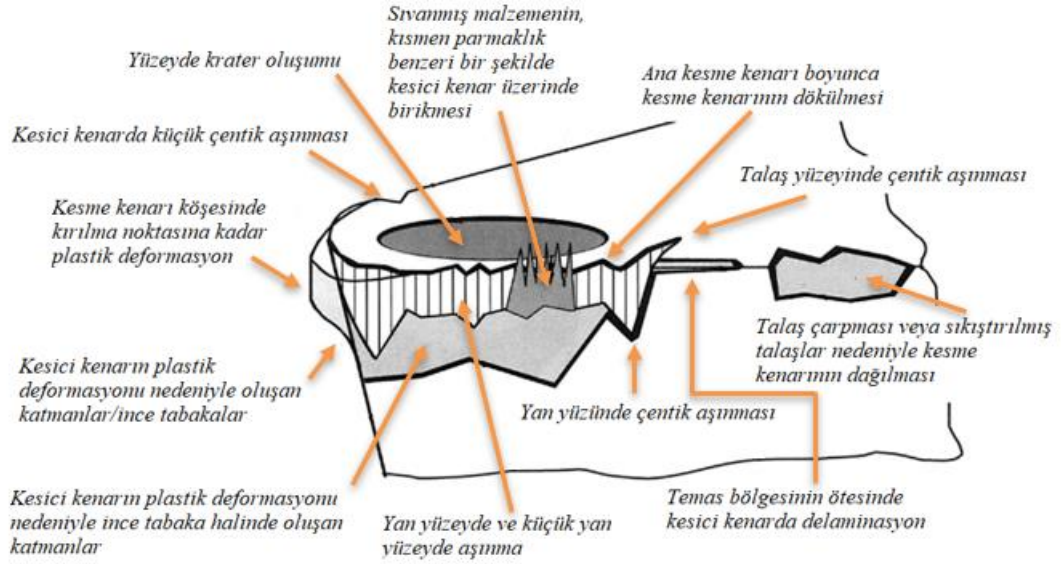
İş mili seviyesinde, iş mili motorunun tükettiği enerji dikkate alınır. İş mili motoru tarafından tüketilen elektrik, frezelemede kesici takımı döndürür. Milin toplam enerjisinin %15'inden fazlasını tüketebileceği araştırmalarda görülmüştür. Bu seviyedeki enerji tüketimi, iş mili motor verimliliğini analiz etmede yararlı olmaktadır. Ancak bu noktada sorun makine tezgahında olan soruna benzemektedir. Mil enerjisi, makinelere göre değişen belirli bir motora bağlıdır.

Proses seviyelerinde, yalnızca gerçek malzeme kaldırma işlemi tarafından tüketilen enerji dahil edilir ve bu enerji takım tezgahlarından bağımsızdır. Proses seviyesindeki enerji tüketimi genellikle bir parçanın işlenmesinde makine enerji tüketiminin %15'inden az olsa da işleme seviyesindeki destekleyici enerji tüketimi büyük enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturur. Diğer taraftan, proses seviyesindeki enerji tüketimi, talaş oluşumunu ve yüzey oluşumunu yönetir. Bu nedenle proses seviyesindeki enerji tüketimi, makine veya mil seviyesindeki enerji tüketiminden çok kesme mekaniği ile ilgilidir. Tezgâh düzeyinde, fiili malzeme kaldırma için kullanılan enerjinin yanı sıra, iş parçası taşıma sistemi, takım değiştiriciler, kontrol sistemi ve makine yağlama sistemi gibi yardımcı ekipmanlara güç üretebilmek için ek enerji sağlanmalıdır [122].

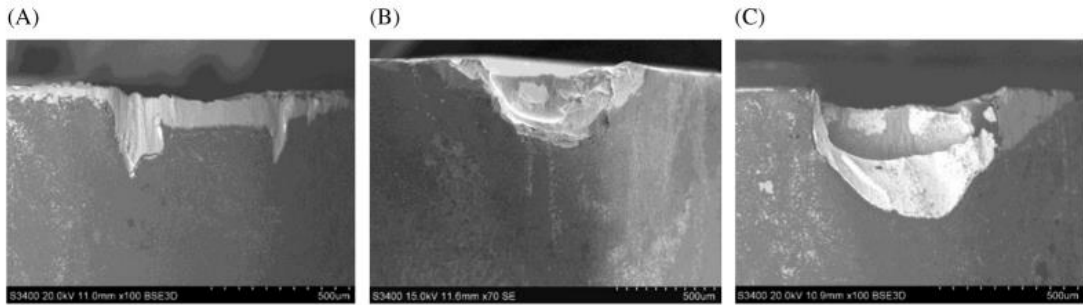
4.4. FREZELEMEDE KESİCİ TAKIM AŞINMASI

Kesici takım kenarlarının hasarları, takım yüzeylerindeki gerilim durumundan ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu durumda kesme şartlarına (örneğin, tormalama, frezeleme veya delme, kesme koşulları ve kesme sıvısının bulunup bulunmadığı) ve türüne bağlıdır. Talaşlı imalatta takım hasar modu ve hasar oranı, kesme işlemindeki ve kesme koşullarındaki değişikliklere duyarlıdır. İşleme maliyetini en aza indirmek için, yalnızca belirli bir işleme operasyonu için en uygun takım ve çalışma malzemesi kombinasyonunu bulmak değil, aynı zamanda takım ömrünü güvenilir bir şekilde tahmin etmek de gereklidir [123,124]. Kesici takım hasarına, ölçeğine ve nasıl ilerlediğine göre aşınma ve kırılma olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Şekil 4.12 ve 4.13). Pratik uygulamalarda bu iki kesici takım hasar grubu net bir şekilde ayırt edilememektedir. Aşınma, genellikle bir pürüz, mikro temas üzerinde veya daha küçük ölçekte, moleküler veya atomik çıkarma mekanizmalarına kadar sürekli olarak

ilerleyen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır [125,126]. Öte yandan, kesici takımların kırılması (arızası), Şekil 4.13'te gösterildiği gibi, mikro aşınmadan büyük kırılmaya (yıkıcı arıza) kadar sürekli bir hasar ölçeği yelpazesini kapsamaktadır.



Şekil 4.12. Takım aşınma formlarına genel bir bakış [127].



Şekil 4.13. a) Kesme kenarının ufalanması, b) Mekanik yorulma ve c) Kırılma [127].

Yüzey pürüzlülüğü anormal derecede yüksek olduğunda (Şekil 4.13-A), küçük parçacıkların gevrek kırılmasından kaynaklı kesme kenarında çapaklanma oluşmaktadır. Mekanik çatlama (Şekil 4.13-B), kesici takım malzemesinin mukavemeti ve kırılma tokluğu yeterli olmadığında sürekli yük değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.13-C'de gösterilen brüt kırılma (yıkıcı veya erken aşınma), ağır kesme koşullarının neden olduğu toplu kırılmayı gösterir. Önceden

belirgin mekanik semptomlar olmadan aniden ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.13'te gösterildiği gibi, bir takımın ilerleyen aşınması esas olarak iki bölgede gerçekleşir:

1. Talaşın takım-talaş teması boyunca kayma hareketinden kaynaklanan bir krater ve/veya talaş yığılması (BUE) oluşumu ile karakterize edilen talaş yüzeyindeki aşınma.

2. Yeni oluşturulan iş parçası yüzeyinin sürtünme hareketinden karakteristik yüzeyin olduğu ana ve küçük kesme kenarlarına ve kesici takımın ucuna bitişik bölgeler dahil olmak üzere yan yüzeydeki aşınma.

Krater aşınması: Kesici takımların talaş yüzeylerinde gözlenen krater aşınması, genellikle nispeten yumuşak çeliklerin ve sfero dökümlerin sürekli talaşların olduğu yüksek hızlarda işlenmesi sırasında meydana gelir. Öncelikle, bir takım ucunun talaş yüzü ile sıcak talaş arasındaki kimyasal etkileşimden kaynaklanır. Adezyon, difüzyon veya çözünme gibi termal olarak aktive olan bazı durumlar aşınma sürecine dahil olabilir.

Yan yüzey aşınması: Yan yüzey aşınması ise, iş parçası malzemesinin sert bileşenleri tarafından şiddetli aşınmanın bir sonucu olarak yanak yüzünde gözlenir. Bu aşınma mekanizması, aşındırıcı parçacıkların esas olarak Fe₃C sementit ve metalik olmayan inklüzyonlar olduğu çeliklerin ve dökme demirlerin işlenmesi sırasında yaygın olarak gözlenir.

BUE: Talaşın takım ucuna kaynaklanması olarak adlandırılır. Tipik olarak yumuşak düşük karbonlu çelikler veya sünek paslanmaz çelikler ve demir dışı malzemeler (esas olarak alüminyum, nikel, kobalt ve titanyum alaşımları) düşük kesme hızlarında ve düşük ilerleme hızlarında işlendiğinde ortaya çıkar. BUE tipik olarak, her döngü sırasında kopan takım malzemesinin küçük parçaları taşınırsa ciddi aşınma aşınmasına neden olur.

Çentik aşınması: Çentik aşınması (kanal açma), genellikle takım malzemesinin ana ve küçük kesme kenarlarının kenarlarından oksitlenmesine veya talaşın sert, testere dişi dış kenarının aşınmasına (örneğin, sert işlemede) atfedilir. Çentik açma, östenitik

paslanmaz çelikler, titanyum ve nikel bazlı süper alaşımlar gibi yüksek çalışma sertleşmesine sahip olma ve yüksek takım ucu sıcaklıkları üretme eğiliminde olan iş parçası malzemelerinde ciddi bir teknolojik sorundur.

Kesici takım burun aşınması: Takım ucunun körelmesi olarak da adlandırılan burun aşınması, belirli bir işleme operasyonunda yüksek sıcaklıkta bir takım malzemesinin yetersiz deformasyon direncinden kaynaklanır.

Termal atlaklar: Frezeleme gibi kesintili kesme (termo-mekanik yorulma) ile ilişkili döngüsel ısıtma ve soğutma, kesici kenarda yüksek sıcaklık gradyanları oluşturduğunda kesici takımda termal çatlaklar meydana gelmektedir. Uzun süre ile, kesici kenara paralel yanal çatlaklar görünebilir. Termal ve yanal çatlaklar birleşebilir ve kesici takım malzemesinin küçük parçalarının kırılmasına neden olabilmektedir [127].

BÖLÜM 5

TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNDE SOĞUTMA VE YAĞLAMA

Son yirmi yılda imalat sanayileri, en yüksek üretkenliği elde etmek ve rekabetçi dünyada güçlü bir dayanak elde etmek için yakın ağ imalatını, yüksek hızlı işlemeyi tercih etmiştir ABD'de, geleneksel işleme için yıllık 100 milyar doların üzerinde harcama yapılmaktadır. Talaşlı imalatta kesme parametreleri özellikle kesme hızı verimliliği etkileyen en önemli parametredir. Kesme sıcaklığının oluşturulması, belirli kesici takım iş parçası çifti için kesme hızına önemli ölçüde bağlı olduğundan, kullanılacak kesme hızı her zaman kısıtlamalara sahiptir. Metal kesmede, kesme sırasındaki istenmeyen yüksek sıcaklık talaş-takım ve takım-iş arayüzündeki yüksek sürtünmeden kaynaklanan bölge, kesici takımların zarar görmesinin ana nedenidir. İşleme sırasında kesme sıvılarının kullanımının takım ömrünü, yüzey kalitesini iyileştirmeye ve kesme kuvvetlerini düşürmeye yardımcı olduğu yaygın olarak bildirilmektedir. Ancak kesme sıvısının bol kullanımı çevresel ve ekolojik sorunlar oluşturur ve kesme sıvılarının uzaklaştırma maliyetini artırır. 21. yüzyılda, çevre bilinciyle geliştirilmiş yasa ve yönetmeliklerin tamamlanmasıyla, yeşil kesme, özellikle minimum miktarda yağlama (MMY), kuru kesme ve bol miktarda çözünebilir yağla işlemenin yararları ve sakıncaları arasında bir denge olarak kurulmuştur [128].

Kuru işleme veya kesme sıvısı olmadan işleme en yaygın ve temiz üretim yaklaşımıdır ancak daha yüksek kesme değişkenleri bu işlemin uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. İşleme sertleşmesi, talaşların plastik deformasyonu, daha yüksek takım aşınması, düşük yüzey kalitesi kuru kesmenin başlıca olumsuz etkilerinden bazılarıdır. Kuru işlemede, takım yüzeyi ile iş parçası arasındaki plastik deformasyon ve takım arasındaki sürtünme nedeniyle oluşan ısıdan dolayı çok büyük miktarda güç kaybedilir. Isı oluşumu nedeniyle yaklaşık %20-30 oranında güç kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla talaşlı imalatta metal işleme sıvılarının gerekliliği

kaçınılmazdır. Metal işleme sıvılarının ana fonksiyonları Şekil 5.1'de gösterilmektedir [129].



Şekil 5.1. Metal işleme sıvılarının başlıca işlevleri.

5.1. KESME SIVILARININ TEMEL KATEGORİLERİ

Kesme sıvıları daha geniş anlamda metal işleme sıvıları, soğutma ve/veya yağlama etkileriyle kesme performansını iyileştirmek için talaş oluşturma bölgesine yerçekimiyle veya uygun basınç altında sağlanır. Genel olarak, bu etkiler üretilen ısı miktarına bağlıdır (yani, yağlama etkisi düşük kesme hızlarında daha önemlidir, halbuki soğutma daha yoğun ısı üretimi nedeniyle daha yüksek kesme hızlarında çoğunlukla baskın etki olarak görülmektedir). Soğutma, üretilen ısının bir kısmının dağıtılması ve iletilmesiyle sağlanır. Farklı standartlarda bir şekilde birleşik bir terminoloji sistemi kullanılmasına rağmen, mevcut farklı kesme sıvısı türleri, çok çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Örneğin, Alman DIN 51385, Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, kesme sıvılarının suyla karışmayan, suyla karışabilen ve su esaslı kesme sıvıları olarak sınıflandırılmasını önermektedir. Suyla karışmayan (yağ esaslı olarak da bilinir) kesme sıvıları, düz veya saf yağlar, kullanıma hazır ürünler olarak sağlanır. Su ile karışabilen ürünler, uygulamadan önce seyreltilmesi gereken bir konsantre olarak sağlanır ve su esaslı (karışık) kesme sıvıları, basitçe suya eklenerek hazırlanır. Bileşenler karıştırıldıktan sonra bir çözelti veya bir emülsiyon oluşturabilir.



Şekil 5.2. Kesme sıvılarının DIN 51385'e göre sınıflandırılması [130].

Kesme sıvılarının bilinen dört temel kategorisi bulunmaktadır:

1. Seyreltilmemiş olarak kullanılan ve genellikle mineral yağlar olan düz veya saf yağlar, ancak bunlar genellikle yağlar, bitkisel yağlar ve esterler gibi diğer yağlayıcıları ve kayganlığı artırmak için klor, kükürt ve fosfor esaslı aşırı basınçlı (EP) bileşikleri içerir. Bu bileşiklere ek olarak aşınmaya ve korozyona karşı korumayı, dayanıklılığı ve köpürme eğilimini iyileştiren diğer maddeleri de içermektedir.
2. Kullanımdan önce yağın suda dağılmasına izin veren emülgatörler ile yağdan oluşan mineral çözünür yağlar (emülsiyonlar). Bu yağlar, tipik konsantrasyon aralığı %3-15 olan seyreltilmiş formda kullanılır. Emülgatör miktarı, tipik olarak 1 ila 10 µm arasında değişen yağ damlacıklarının boyutunu belirler.
3. Yarı sentetik sıvılar (veya mikro emülsiyonlar) esas olarak sentetik ve çözünür yağ sıvılarının bir kombinasyonudur ve sonuç olarak her iki bileşik türünün özelliklerini sergiler. Doğal ve sentetik emülgatörler, yağ damlacıkları ve berrak emülsiyonlardan oluşurlar.
4. Genellikle korozyon inhibitörlerinin eklenmesiyle alkalın inorganik ve organik bileşiklerden formüle edilmiş mineral yağsız solüsyonlar olan sentetik sıvılar. Kullanımdan önce, %3 ila %10 konsantrasyon aralığında su ile seyreltilirler. Endüstriyel uygulamaya göre, bu sıvılar genellikle en iyi soğutma performansını sağlar [130].

5.2. SOĞUTMA/YAĞLAMA YÖNTEMLERİ

Kesme bölgesinde, sürtünme kaynaklı yüksek sıcaklıklar oluşmakta ve bu da işleme performansını, kesici takım ömrünü olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Yüksek sıcaklıkların kontrol altına alınmasında kesme sıvılarının soğutma fonksiyonunun iyi olması bir gerekliliktir. Kesme sıvılarının bir diğer fonksiyonu olan yağlayıcılık, kesici takım-iş parçası-talaş ara yüzeylerine nüfuz eden tribo film tabakası oluşmasına sürtünmenin azaltılmasına, kesme sıcaklıklarının düşürülmesine yardımcı olur. Kesme bölgesinde biriken talaşlar doğrudan iş parçası yüzey kalitesini etkileyebilmektedir. Kesme sıvılarının talaşları kesme bölgesinden uzaklaştırma fonksiyonu sayesinde oluşabilecek deformatik çizikler nispeten engellenerek yüzeyler korunabilmektedir. Kesme sıvılarının soğutma, yağlama ve talaşın uzaklaştırılması fonksiyonları etkin olsa da kesme bölgesinde kesici takım-iş parçası-talaş teması sonucu sürtünme sonucu ısılar oluşabilmektedir. Kesme bölgesindeki bu temas yüzünden ısının da yardımıyla kesici takım veya iş parçası yüzeylerine talaşlar yapışabilmektedir. Kesme sıvılarının içeriğine katılan sülfür, klorür gibi kimyasal ajanlar sayesinde kesme bölgesi daha da kayganlaşarak, olası yapışma durumları minimize edilmiş olur. Metal işlemede sıklıkla kullanılan soğutma/yağlama yöntemleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Son yıllarda özellikle malzeme teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte süper alaşım gibi işlenebilirliği zor olarak bilinen malzemelerin, endüstriyel uygulamalarda kullanım oranını da artırmıştır [131–133].



Şekil 5.3. Metal işlemede kullanılan soğutma/yağlama yöntemleri [134].

Metal işlemede kullanılan konvansiyonel ıslak soğutma/yağlama yönteminin toksik olma, çevreye verdiği zararlar, işleme performansının yetersiz gelmesi gibi dezavantajları yüzünden sürdürülebilir soğutma/yağlama yöntemlerinin geliştirilme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Sürdürülebilirlik kavramı, esasen ekolojik sistemlerin fonksiyonlarını, süreçlerini ve üretkenliğini gelecekte de devam ettirebilme yetisi olarak tanımlanabilmektedir. Bu noktadan hareketle sürdürülebilir imalat için soğutma stratejilerinin geliştirilmesi bir zorunluluk haline gelmeye başlamıştır [135,136].

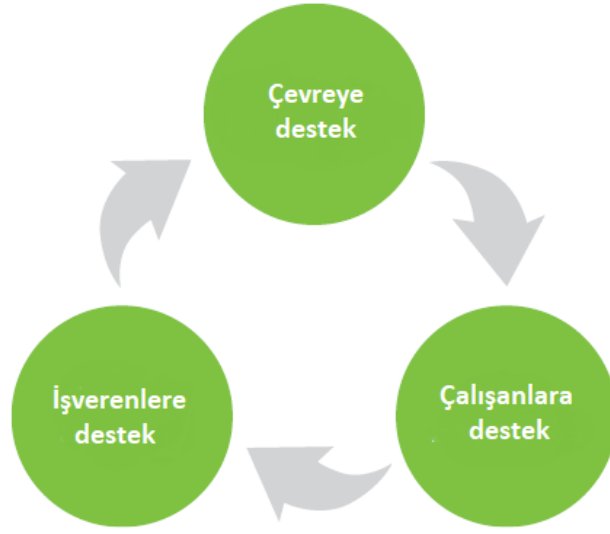
5.2.1. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi

MMY teknolojisi, çok az miktarda kesme sıvısını (genellikle 30–100mL/h) belirli bir basınca sahip sıkıştırılmış gazla karıştırıp atomize etmek ve daha sonra etkili bir yağlama sağlamak amacıyla karışımı kesme alanına püskürtmek için kullanılır. Sonuç olarak, kesme kuvveti, takım aşınması ve kesme sıcaklığı önemli ölçüde azaltılır ve yüzey kalitesi büyük ölçüde iyileştirilir [137–139]. Bu soğutma metodolojisi, ürün, proses, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe yol açan ekolojik ve ekonomik dengeyi korumak amacıyla kuru işlemin dezavantajlarının üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. Metal işleme sıvılarının tüketimini azaltmak için MMY

sistemine duyulan ihtiyacın nedeni, üretim döngüsündeki uygulamalar sırasında çevresel tehlikeleri, operatör sağlığı sorununu, soğutma maliyetini ve bunlarla ilişkili atığın uzaklaştırılması sorunlarını en aza indirmektir. Öte yandan, konvansiyonel taşmalı soğutma, işleme sırasında daha iyi soğutma kabiliyetine sahip olmakla birlikte, bu petrol esaslı kesme sıvılarının ekonomik ve son derece önemli atıkların uzaklaştırılmasıyla birlikte ekolojik denge üzerindeki olumsuz etkileri kaçınılmazdır. Taşmalı soğutmanın olumsuz etkisini gidermek için endüstri kuru işlemeyi tercih etmeye başladı, bu tür işlemenin bir sonucu olarak daha sert malzemelerin işlenmesinde zorluk ve seri üretim sırasında düşük kaliteli ürün gibi çeşitli sorunlar ortaya çıktı. Taşkın soğutmanın olumsuz etkisini gidermek için endüstri kuru işlemeyi tercih etmeye başlamıştır. Bu tür işlemenin bir sonucu olarak daha sert malzemelerin işlenmesinde zorluk ve seri üretim sırasında düşük kaliteli ürün gibi çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, taşkın soğutma ve kuru işlemeyle ilgili tüm bu sorunların üstesinden gelmek için, minimum miktarda yağlama veya kuru işleme yakın olarak ifade edilen soğutma ve yağlama için bir teknoloji uygulanmıştır [140].

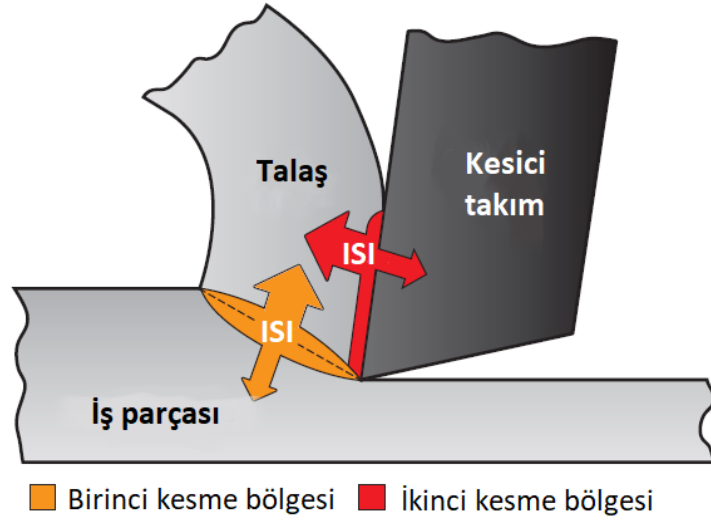
Akışkandaki aşırı azalma, metal işleme sıvısı emisyonlarının hem havaya hem de çalışanların cildine neden olduğu sağlık tehlikelerini büyük ölçüde azaltmaktadır. Kurallara uygun uygulandığında, minimum miktarda yağlama sıvıları çalışma alanı boyunca yayılmaz. Makinenin elektrik aksamına girmezler ve yüzeylerdeki boyayı çözmezler. Bu, tüm çalışma alanlarını daha temiz hale getirir ve makinelerin ömrünü uzatır.

Son olarak, taşmalı soğutma sıvısına kıyasla minimum miktarda yağlama sistemi, küresel çevre için açık ara daha iyidir. Minimum miktarda yağlama sisteminin en önemli yanı başlattığı verimli döngüdür. Şekil 5.4'te gösterilen olumlu sonuçları pekiştirmek için tüm unsurlar birbiriyle birlikte çalışmaktadır.



Şekil 5.4. MMY'nin verimli döngüsü [141,142].

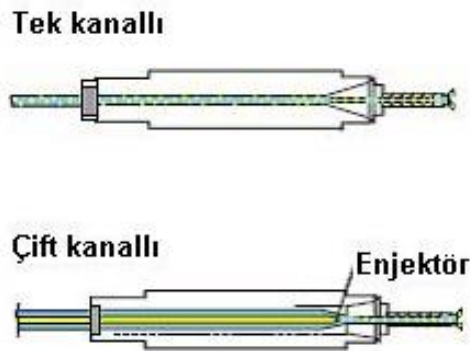
Metal işlemede, metal, iş parçasından talaşı kesen bir kesici takımın kesici kenarı ile çıkarılmaktadır. Metalin deforme edilmesinde kullanılan enerji, birincil ve ikincil kesme bölgelerinde çoğunlukla ısı şeklinde uzaklaştırılmaktadır (Şekil 5.5). Birincil kesme bölgesinde açığa çıkan enerjiden kaçınılması neredeyse imkansızdır. İş parçası üzerindeki moleküler bağların kırılmasının bir sonucudur. Isının bir kısmı iş parçasına, geri kalanı talaşa gitmektedir. İkincil kesme bölgesinde takım ile iş parçası arasındaki sürtünme - ve ortaya çıkan ısı - hem kesici takımın hem de talaşın ısınmasına neden olur. Bu bölgedeki ısı erken kesici takım aşınmasına en fazla katkıda bulunan durumlardan birisidir. Düzgün bir şekilde uygulandığında minimum miktarda yağlama yöntemi, kesme bölgesini yağlayarak bu ıyı büyük ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 5.5. Metal kesmede ısı oluşumu [143].

5.2.1.1. İçten MMY

Dahili minimum miktarda yağlama yönteminde soğutma uygulaması hava, hava akımı içerisinde yağ sisi (aerosol) küçük yağ damlacıkları ile yapılır. Aerosol, yağlama sisteminin rezervuarı içerisinde üretilerek hortumlarla dönen milin içinden geçer. Kesici takımın içindeki minimum miktarda yağlama, soğutma kanallarından da geçerek iş parçasına ulaşır. Şekil 5.6'da kesici takım içinden soğumanın şematik olarak gösterimi verilmiştir



Şekil 5.6. İçten MMY yöntemi [144].

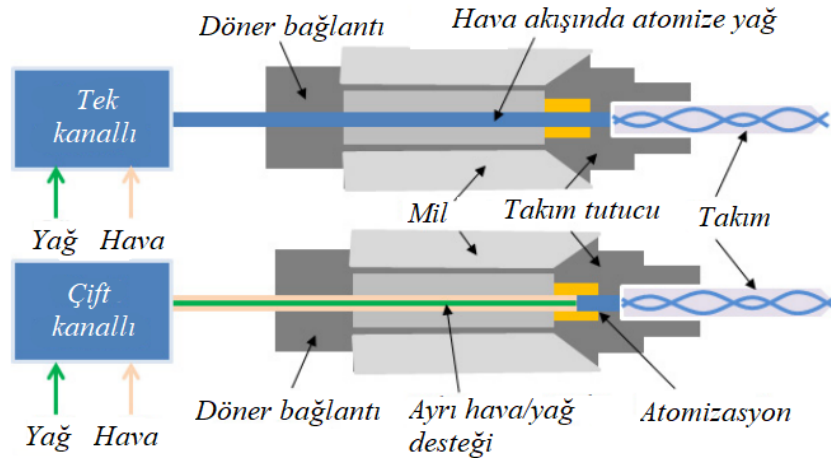
Takım içinden soğutma yöntemi, uzunluk-çap oranının üçten fazla olması koşuluyla delme, raybalama, kılavuz çekme gibi işleme proseslerinde en iyi şekilde uygulanmaktadır. Çeşitli boyutlarda kesici takımlarının kullanıldığı derin delik delme

durumunda, yüksek kesme hızlarında çok derin delikler oluşturmak için takım içinden minimum miktarda yağlama uygulamasının her zaman kullanılacağı belirtilmektedir [145].

5.2.1.2. Dıştan MMY

Bu yağlama sisteminde, yağlayıcı kesici takımın etrafına püskürtme nozulları ile uygulanır. Bu sistem, standart işlemler (tornalama, frezeleme, delme) için giriş seviyesinde uygulanması için çok idealdir. Harici yağlama için cihazlar, temas noktalarının yakınında ayrı yağlama ve püskürtme havası taşır. Bu, boru tesisatı paketlerinde koaksiyel veya paralel olarak gerçekleşir [146].

Harici soğutma yönteminin kullanımı, uygulanması kolaydır ve özel bir araç gerektirmez; ancak derin işleme için yetersizdir. Bu durumun nedeni kesici takımlar iş parçasının içinde veya arkasında gizli olduğundandır. Ayrıca, kesici kenarda yağ kapsamı sağlamak için ve farklı takımlara da uyum sağlamak için manuel ayarlama gerekmektedir. Şekil 5.7’de gösterildiği gibi, yağ ve havanın makinenin dışında karıştırıldığı ve mil boyunca yönlendirildiği tek kanallı sistemlerin en büyük dezavantajı, bu sistemin aerosol akımı için uzun hareket mesafesi nedeniyle daha büyük damlacık boyutu üretmesidir. Ancak, tek kanallı sistem portal makineler, testere vb. için hala tercih edilmektedir. Çünkü bu işlemler işlenmiş boyutlar ve işlenebilirlik üzerinde hassas kontrol gerektirmez.



Şekil 5.7. MMY sistemlerinin şeması: tek kanallı sistem ve çift kanallı sistem [147].

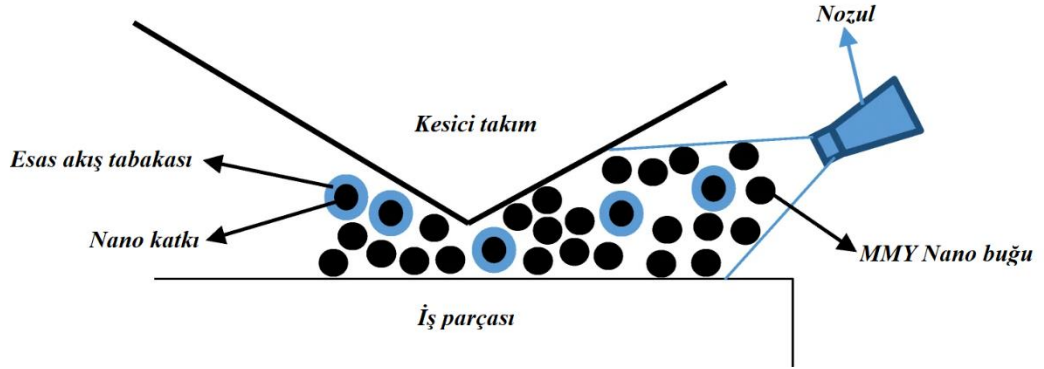
Buna karşılık, hava ve yağın kesici takım noktasına yakın karıştırıldığı çift kanallı sistemler genel işlemlerde daha sağlamdır. Yağ ve hava, iki paralel borudan mil boyunca yönlendirilir ve takım tutucuya yakın bir yerde karıştırılır. Bu yol, karışımın daha az dağılmasını ve düşmesini sağlar ve özellikle merkezkaç kuvvetinin önemli hale geldiği yüksek iş mili hızı için, tek kanallı sistemlerden daha ince ve daha üniform buğu sağlamaktadır. Ayrıca, çift kanallı sistemler kesimler arasında takım değiştirirken veya bir kesim sırasında akış hızını değiştirirken daha az gecikme süresine sahiptir, bu da birden fazla takım çalıştıran işleme merkezleri için faydalıdır. [147].

5.2.2. Nano MMY Yöntemi

Esas yağda çok çeşitli boyutlara sahip asılı nano katkı maddeleri, işleme bölgesinden önemli miktarda ısı aktaran gelişmiş ısı transfer katsayısı göstermektedir. Ayrıca, geliştirilmiş takım ömrü, minimum miktarda yağlama tabanlı nano akışkanlar ile bağlantılıdır. Bu durumun nedeni nano katkı maddeleri, önemli ölçüde sürtünme katsayısını azaltmak için iş parçası-takım arayüzünde ayırıcılar olarak çalışmaktadır. Böylece, esas kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü performans ölçütleri azaltılmıştır. Bütünleşmiş nano katkı tabanlı minimum miktarda yağlama mekanizması ve temel avantajları açık literatürde şu şekilde özetlenmiştir:

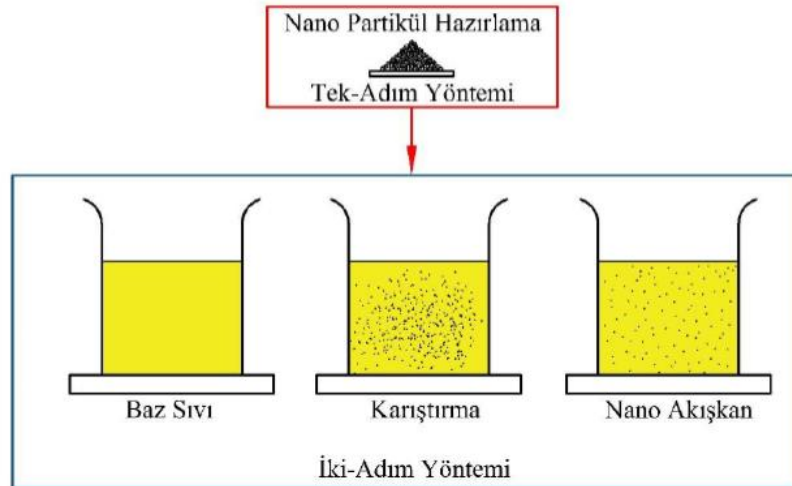
- MMY nozulunda atomize edilmiş nano katkı maddeleri ve yüksek basınçlı havanın bir kombinasyonu olarak ince bir buğu sağlamak
- Takım ve iş parçası yüzeylerine çarpan damlacıklar, sürtünme veya yağlama gibi tribolojik özellikleri geliştiren bir tribo-film tabakası oluşturması
- Çok çeşitli boyutlu nanopartiküllerin yüksek konsantrasyonu, takım ve iş parçası yüzeyi arasında yakın ve daha geniş temasta bir ayırıcı olarak kilit bir rol oynayan genel nano katkı maddelerini arttırması
- MMY sisteminin yüksek basıncı nedeniyle dar takım-iş parçası arayüzünde nano kesme sıvısının varlığı, iş parçası yüzeyinde kimyasal reaksiyon oluşmasına yardımcı olan doğrudan temas direnci sağlamıştır. Genel olarak artan parçacık sayısı, döndürülen yüzey üzerinde ince bir koruyucu tribo-film tabakası oluşturmuştur.

Böylece, Nano MMY'ler, takım-iş parçası arayüzü bağlantısının iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, uygulanan nano akışkanlar, daha yüksek kesme kuvvetlerini ve sıcaklığı sınırlayarak yüzey kalitesini ve takım aşınmasını iyileştirmiştir. Şekil 5.8'de Nano MMY'lerin çalışma mekanizması gösterilmiştir [148].



Şekil 5.8. Nano MMY mekanizması [148].

Nano akışkanlar nanometre (nm) ölçülerinde (genelde <100 nm) katı partiküllerin su, etilen glikol (EG), sentetik yağ, bitkisel esaslı yağ vb. esas sıvıya karıştırılmasıyla oluşturulurlar. Nano akışkanlar hazırlamasında iki farklı yöntem tercih edilmekte olup bunlar Tek-Adım ve İki-Adım yöntemleridir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Tek-Adım ve İki-Adım yöntemi [149].

5.2.3. Hibrid Nano MMY Yöntemi

Tornalama, frezeleme, delme ve taşlama teknolojilerinde yaygın veya hibrit nanoakışkanların kullanılması büyük önem taşımaktadır. Öte yandan, ekonomi, çevre ve güvenlik konuları, işleme teknolojisinde nanoakışkanların kullanılması gerekliliğini artırmaktadır. Hibrit nanoakışkanlar, yaygın nanoakışkanlara kıyasla daha iyi tribolojik özellikler ve işleme performansı göstermektedir [150]. Nano akışkan hazırlamada; hBN, MoS₂, çok duvarlı karbon nano tüp (MWCNT), grafit, grafen ve alüminyum oksit/alümina (Al₂O₃) gibi farklı özelliklere sahip nano partiküller kullanılabilir. Nano partiküllerin, birbirinden farklı olan (şekilleri, ısı taşıma kapasiteleri gibi) özellikleri bulunmaktadır. Bundan dolayı son zamanlarda birbirinin üstün özelliklerinin bir araya getirildiği hibrid nano akışkanlar üzerinde çalışmalarda artışlar görülmektedir. Nano akışkanların kullanıldığı endüstriyel uygulamaların artışıyla nano teknolojik işleme kavramı ortaya çıkmaya başlamıştır. Hibrid nano akışkan hazırlarken İki-Adım yöntemi (Şekil 5.8) kullanılmakta olup birbirine göre farklı özelliklere sahip en az iki nano partikül baz sıvıya farklı tekniklerle karıştırılmaktadır. Nano partiküller birbirlerine göre farklı üstün özelliklere sahiptirler. Bu özellikler termal iletim, yağlayıcılık, yapışma, korozyon önleme şeklinde sıralanabilir [151,152].

BÖLÜM 6

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, PH13-8 Mo paslanmaz çelik malzemesinin frezelenmesinde kuru, Minimum Miktarda Yağlama (MMY), Grafen (GRP+MMY), Kriyojenik (CRYO), CRYO+MMY ve Hegzagonal Bor Nitrür (hBN+MMY) işleme koşullarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler optimize edilerek en uygun kesme koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyler, değişken kesme hızı (40-60-80 m/dak), ilerleme (0,04-0,08-0,12 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,8 mm) gerçekleştirilmiştir (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. Tüm deneylerde kullanılan parametreler

Parametreler	Deneyler
Kesme Koşulu	Kuru, MMY, GRP+MMY, CRYO, CRYO+MMY, hBN
Kesme Hızı	40, 60 ve 80 (m/dak)
İlerleme	0,04-0,08 ve 0,12 (mm/dev)
Kesme Derinliği	0,8 mm

6.1.DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME VE EKİPMANLAR

6.1.1. Malzeme

Deneylerde, silindirik geometriye sahip 113,11x50 mm ebatlarında, PH13-8Mo paslanmaz çelik numuneler kullanılmıştır. Numuneler, kesme işleminde oluşan ısının malzeme kimyasal kararlılığını etkilememesi için 50-20-20-23,11 mm ebatlarında testere tezgahında kesilerek hazır hale getirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan


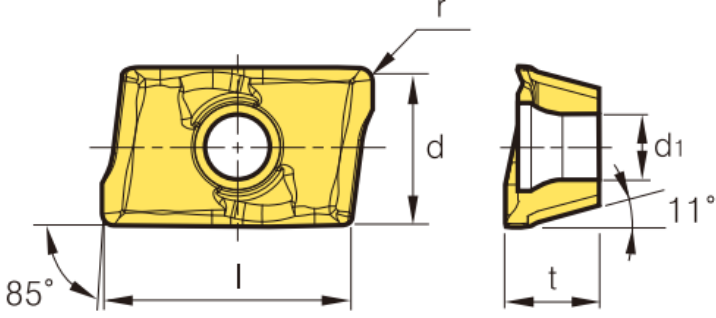
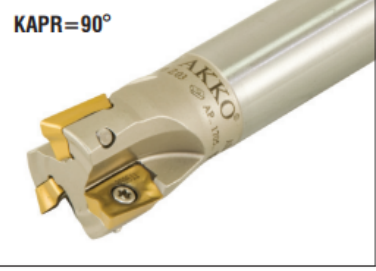
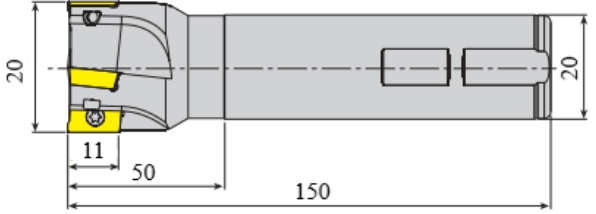
numunelerin kimyasal içeriği ve mekanik özellikleri ise Çizelge 6.2’de yer almaktadır.

Çizelge 6.2. PH13-8 Mo çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri.

Kimyasal kompozisyon (% ağırlıkça)				
C-0.05	Mn-0.1	Si-0.1	P-0.01	Ni-7.5-8.5
Cr-12.25-13.25	Mo 2-2.5	Al 0.9-1.35		
Mekanik özellikler				
Kopma	Akma	Yüzde uzama (%)	Sertlik	
mukavemeti	mukavemeti	10	(HRC)	
(MPa)	(MPa)		43	
1410	1310			

6.1.2. Kesici Takım ve Tutucu

Alın frezeleme operasyonlarında sırasıyla kesici takım ve takım tutucu olarak APMT11 T0308 PDSR-MM kodlu PVD kaplamalı karbür takımlar ve AEM90-AP11-D20-W20-L150-Z03-H kodlu bağlama takımı kullanılmıştır. Uçlar ve takım tutucu Korloy tarafından imal edilmiştir (Şekil 6.1).

Görüntü	Kaplama Tipi	Kaplama Kalınlığı	Kaplama Yöntemi	Sertlik
	TiAlN	4 µm	PVD	1600 HV
				
				
				

Şekil 6.1. Kesici takım tutucu ve kaplamalı kesici takım özellikleri.

6.1.3. Takım Tezgâhı

Frezeleme deneyleri, Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü laboratuvarında bulunan Taksan TMC 500V marka CNC dik işleme tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Kesici takım süpürme çapı 20 mm olup, iş parçasından frezelenen genişlik (radyal kesme derinliği) ISO 8688-1 standardı dikkate alınarak kesici takım çapının %60'ına tekabül eden 12 mm olarak belirlenmiştir. CNC tezgâhına ait teknik özellikler Çizelge 6.3'te verilmiştir.

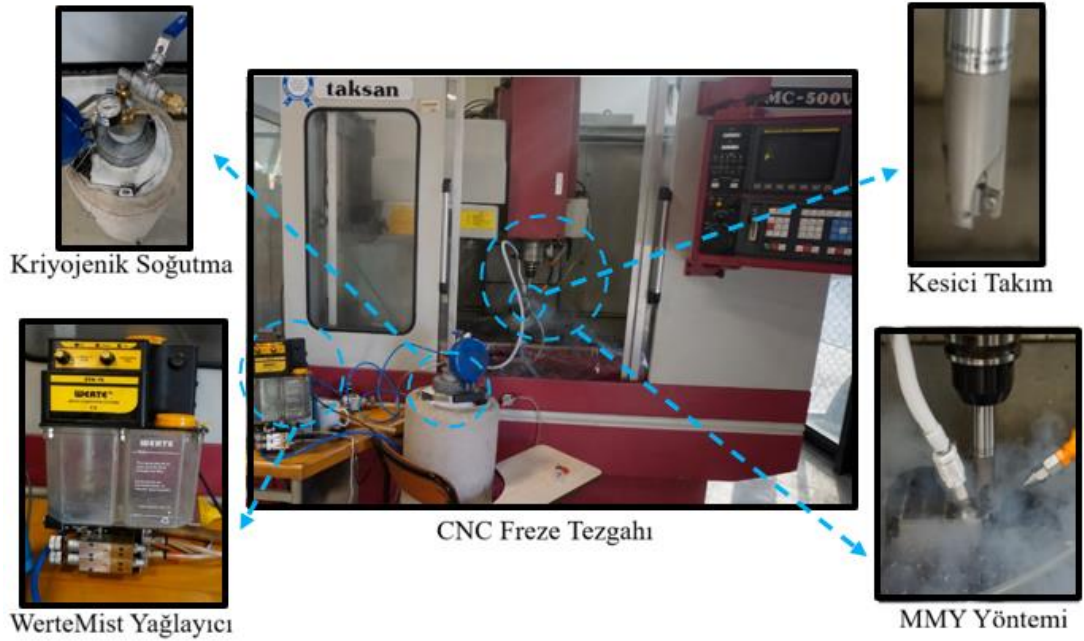
Çizelge 6.3. CNC tezgâhına ait teknik özellikler.

Markası	TAKSAN TMC 500V
Tabla ölçüleri (mm)	750 x 400
Azami iş parçası ağırlığı (kg)	400
İş mili devir aralığı (dev/dak)	80 - 80000
Takım magazin kapasitesi (adet)	16
İş mili azami tork (Kgm)	7.2
İşletim sistemi	Siemens - Fanuc

6.1.4. MMY Sistemi

Tüm deneylerde kullanılan MMY sistemi için SBH Company (İstanbul, Türkiye) tarafından sağlanan Werte-STN15 Çift Kanallı Mikro yağlama sistemi kullanılmıştır. WerteMist olarak adlandırılan mineral kesme sıvısı da SBH firması tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca hava kompresörü basıncı (8 bar) bir kontrol valfi ile MMY sistemi için en verimli basınç olan 5 bar düşürülmüştür.

Tüm deneylerde kullanılan MMY sistemi deney seti Şekil 6.2’de ve cihaz teknik özellikleri ile yağlayıcı özellikleri Çizelge 6.4’te verilmiştir.



Şekil 6.2. MMY sistemi içeren deneysel set.

Çizelge 6.4. MMY cihazına ait özellikler.

Werte STN15 değerlerinin özellikleri			
Çalışma voltajı	24 V AC/DC	Yağlama aralığı	0.1 s–10s
Çalışma basıncı	4–6 bar	Yağlama süresi	0.1 s–10s
Yağ miktarı min – max	0.0012–0.028 ml	Rezervuar	1.5 l

WerteMist yağlayıcının özellikleri			
Bileşim	Trietanolamin	Kaynama noktası	100 °C
Ağırlık	%2.2	Yoğunluk	1015 kg/m ³
pH	8.0–8.9	Viskozite	300 * 10 ⁻⁶ m ² /s

Deneylerde kullanılan Werte marka STN15 model cihaz, kesme sıvısını nozul vasıtasıyla, kesme bölgesine dıştan basınçlı havayla gönderen bir sisteme sahiptir. Deneylerde 1 mm çapında tek nozul kullanılmıştır. Nozul tüm deneylerde kesme bölgesinden 45 mm uzaklıkta ve 45° açıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. MMY sisteminde kullanılan nozula ait görüntüler Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. MMY deneylerinde kullanılan nozul.

6.1.4.2. Nano Partikül Tozlar

Kesme yağı içerisine farklı konsantrasyon oranlarında nano partikül tozlar eklendiğinde MMY sisteminin performansı olumlu yönde artmaktadır. Nano akışkan adı verilen bu karışımlar, nanometre ölçülerinde (1-100 nm) katı partiküllerin su, EG,

sentetik yağ, bitkisel esaslı yağ vb. esas sıvıya eklenmesiyle elde edilirler [153]. Bu çalışmada nano akışkan karışımların hazırlanmasında kriyojenik (LN₂), hBN ve grafen nano partikülleri tercih edilmiştir. Boyutları 40 ila 50 nm arasında değişen nano-hBN parçacıkları, ticari mineral kesme sıvısına (WerteMist) ağırlıkça %0,25 oranlarında ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım, nanopartikül topaklanmasını azaltmak için Hydra Ultrasonic Stirrer ile bir saat karıştırılmıştır. Daha sonra, nanoparçacıkların kesme sıvısı ile homojenleşmesini artırmak ve verimli bir nano-akışkan elde etmek için MTops MS300HS marka manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Kriyojenik işlemede azot gazı işleme bölgesine doğrudan uygulanmıştır. Grafen nano partikülleri ise bitkisel yağ ile %0,25 oranında karıştırılarak MMY yöntemi kullanılarak kesme bölgesine uygulanmıştır. hBN, 1000 °C'ye kadar stabil kalan, yağlayıcı özelliği yüksek, toksik olmayan ve beyaz renkte katı bir maddedir [154]. Doğada bulunmayan yapay bir malzeme olan hegzagonal bor nitrür, bor ve azotun bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Hegzagonal bor nitrür, sıcaklık ve basınç etkisiyle kübik bor nitrüre dönüştüğünde, elmasın tipik özelliklerine benzer özelliklere sahip olabilmektedir. Birçok özellikleri bir arada bulundurması nedeniyle bor nitrür ve ürünlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bor nitrür, taşıdığı yüksek ısı şok direnci, ısı iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık, kimyasal kararlılık ve yağlayıcılık gibi üstün özelliklere sahip sentetik bir malzemedir. hBN'nin grafitten farkı ise beyaz oluşu ve yüksek elektrik direncidir. Saf ve hatasız hBN saydamdır, grafit ise siyahtır [155,156]. Grafen, keşfedilen ilk iki boyutlu malzemenin ve şimdiye kadar ki en yüksek termal iletkenliğe sahip karbon malzemenin mükemmel termal iletkenliğine (5300 W/m K'ye kadar termal iletkenlik) ve çok iyi yağlama özelliklerine sahiptir [157]. Kriyojenik soğutma (LN₂), kesme bölgesindeki sıcaklığı kesici takım malzemelerinin yumuşama sıcaklığı aralığının çok altında tutmak için etkili bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Genel olarak, kriyojenik işlemede, düşük sıcaklıklarda (-196 °C) nitrojen gibi sıvılaştırılmış gazlar kesme bölgesine püskürtülmektedir [158]. Yukarıda bahsedilen avantajlarından dolayı tez çalışmada bitkisel esaslı yağın yanı sıra kriyojenik, hBN ve grafen kullanılmıştır. Nano akışkan hazırlamada kullanılan hBN ve grafit nano partiküllerine ait teknik özellikler ile kriyojenik işlemede kullanılan sıvı azot gazının kimyasal özellikleri Çizelge 6.5'te verilmiştir.

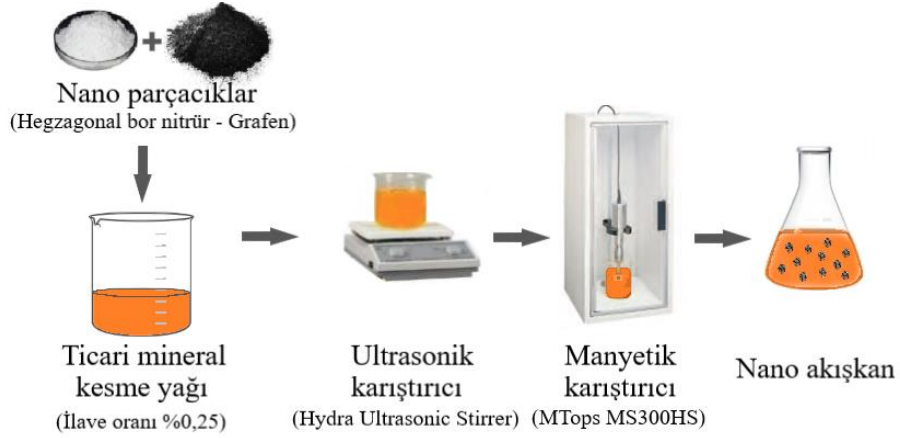
Çizelge 6.5. Nano partiküllere ve azot gazına ait genel özellikler.

Nano partikül tipi	Boyut (mm)	Safılık (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Şekil	Görünüş
hBN	80	99,85	2,29	Küresel	Beyaz
Grafen	80t		2	Lamelli	Siyah
LN ₂ (Azot gazı)	-	99,99	0,808	-	-

6.1.5. Nano Akışkan Karıştırma Prosesi

Nanoakışkanların hazırlanma yöntemi, temel kesme sıvısının termo-fiziksel özelliklerinin yükseltilmesinde önemli bir rol oynar. Nanoakışkanları sentezlemek için kullanılan geleneksel yöntemler Bir adım ve İki adım yöntemi şeklinde sıralanabilir. Bunlardan hibrit nanoakışkan hazırlamada yaygın olarak kullanılan iki aşamalı yöntemde nanoparçacıklar önce çeşitli yöntemler kullanılarak kuru toz halinde sentezlenir ve ikinci aşamada hazırlanan nanoparçacıklar etilen glikol, su ve yağlar gibi bir ortama dağıtılmaktadır [159]. Uygulama kolaylığına ve işleme kalitesine dair avantajlara sahip olduğundan, [160] deneysel çalışmada İki-Adım yöntemi kullanılmıştır.

Boyutları 40-50 nm arasında değişen nano-hBN (hegzagonal boron nitrid) ve grafen parçacıkları, ticari mineral kesme sıvısına (WerteMist) ağırlıkça %0.25 oranlarında ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım, nanopartikül topaklanmasını azaltmak için Hydra Ultrasonic Stirrer ile bir saat karıştırılmıştır. Daha sonra, nanoparçacıkların kesme sıvısı ile homojenleşmesini artırmak ve verimli bir nano-akışkan elde etmek için MTops MS300HS marka manyetik karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. Karıştırma prosesinin şematik gösterimi.

Nano akışkanlar hazırlanırken karışıma, yüzey gerilimini azaltma, homojen bir dağılım elde etme, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti gibi parametrelerde iyileşme sağlamak adına sürfaktan gibi yüzey aktif maddeleri eklenebilmektedir [161,162]. Fakat eklenen bu yüzey aktif maddeleri (ajanlar) kesme yağının yüksek sıcaklıklarda özelliklerini değiştirebilmekte, saflığını etkileyebilmekte ve köpük üretebilmektedirler [163]. Deneyler esnasında özellikle soğutma süresince kesme bölgesine iletilen akışkanların işleme kalitesi açısından tatmin edici olduğu ve MMY cihazının yapısal özellikleri gereği nano akışkan karışımlara herhangi bir katkı maddesi eklenmemiştir.

6.2. ANALİZ VE ÖLÇÜM CİHAZLARI

6.2.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

İşlenmiş yüzey kalitesi esas olarak iş parçası malzemesi, takım malzemesi ve geometrisi, kesme bölgesi sıcaklığı, talaş geometrisi, kesme sıvısı vb. tarafından etkilenmektedir. Daha yüksek yüzey kalitesi iş parçası kaybının önüne geçmektedir. Tipik olarak, işlenmiş yüzeyin özelliğini kontrol etmek için ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) kullanılmaktadır [27,164]. Geliştirilmiş yüzey kalitesi, yorulma mukavemetini, aşınma direncini arttırmakta ve bitmiş parçaların korozyon davranışını azaltmaktadır. İyi bir yüzey kalitesine ulaşmada kesme parametrelerinin ve kesici takım malzemesinin, geometrisinin uygun seçilmesi oldukça önemlidir. Bu

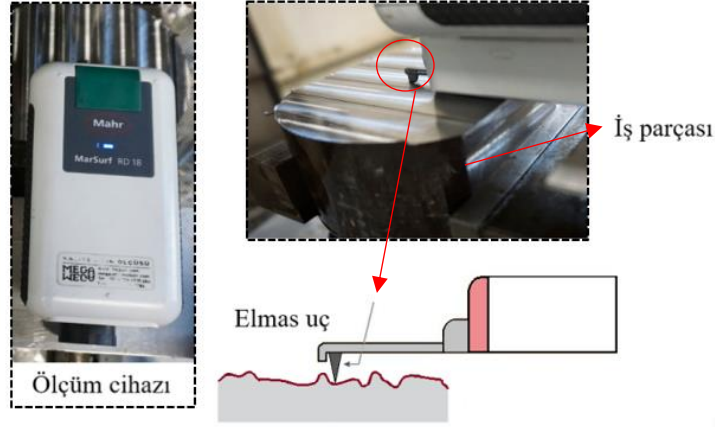
çalışmanın temel hedeflerinden birisi de MMY, Nano MMY ve kriyojenik kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla, yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde Karabük Üniversitesi TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu bünyesinde bulunan MarSurf M300 taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait teknik özellikler Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Yüzey pürüzlülük kriterlerinden ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) dikkate alınmış ve ISO 4287 standardına göre ölçümler yapılmıştır. Ra değerleri 0,8 mm ve 4 mm'lik bir kesme ve örnekleme uzunluğu uygulanarak belirlenmiştir. Pürüzlülük ölçümleri kesme uzunluğu boyunca üç bölgeden (ön-orta-uç) yapılmış ve ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.6. MarSurf M300 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait teknik özellikler.

Marka model	Mahr MarSurf M300
Ölçüm prensibi	Kalem yöntemi
Ölçüm birimi	Seçilebilir
Ölçüm aralığı (μm)	350
Profil çözünürlüğü (nm)	8
Özellikler	Ra, Rq, Rz (Ry (JIS) Rz'ye eşdeğer)
Bağıl nem (%)	30 ila 85
Değerlendirme ünitesinin ağırlığı	1
yaklaşık (kg)	
Besleme ünitesinin ağırlığı yaklaşık (gr)	300
Tarama hızı (mm/s)	0.5
Prob ucu (μm)	2
Ölçüm kuvveti yaklaşık (mN)	0.7
Kalibrasyon fonksiyonu	Dinamik

Cihazın kalibrasyonu her ölçüm öncesi yenilenmiştir. İşlenmiş yüzeyde oluşabilecek oksitlenmenin, pürüzlülük değerlerine olumsuz etki etmemesi için pürüzlülük ölçümleri deneyin hemen akabinde gerçekleşmiştir. Şekil 6.5'te yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve ölçüm şekli gösterilmektedir.



Şekil 6.5. Yüzey pürüzlülük ölçümü.

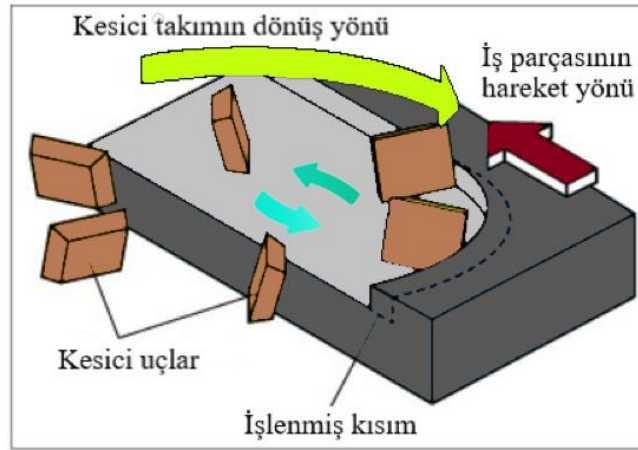
6.2.2. Kesme Kuvveti Ölçümü

İşleme sırasında kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen parametrelerden (ilerleme miktarı, talaş derinliği, kesme hızı, takım geometrisi, talaş geometrisi, iş parçası malzemesi, takım aşınması, sıcaklık ve titreşim vb.) doğrudan etkilenebilen kesme kuvvetinin, tolerans ihlallerine neden olabilecek parça ve takım sapmalarına neden olduğu için işlenebilirlik özellikleri arasında önemli bir etkisi vardır [165]. Metal kesme işlemlerinde kesme kuvveti, dirençli bir gövdeden malzeme çıkarmak için gerekli olan kuvvettir. Kesici takımı boyutlandırma, kesme için gereken gücü tahmin etme, kesme parametrelerini optimize etme vb. söz konusu olduğunda kesme kuvvetini tespit etmek doğru bir işlenebilirlik süreci için yararlı olacaktır. Bütün bu durumlar göz önüne alındığında sonuç olarak, talaşlı imalat operasyonlarında genellikle minimum kesme kuvveti istenmektedir [166]. Özellikle işlenebilirliği zor olan PH grubu çeliklerin MMY ve Nano MMY koşulları altındaki performanslarının kesme kuvveti açısından incelenmesi bu çalışmanın amaçlarından birisidir. Kesme kuvveti deneyleri için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği atölyesinde bulunan Kistler 9257B piezoelektrik dinamometre ve 5070A tipi yükseltici kullanılmıştır. Dinamometre özellikleri Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Kistler 9257B Dinamometrenin teknik özellikleri

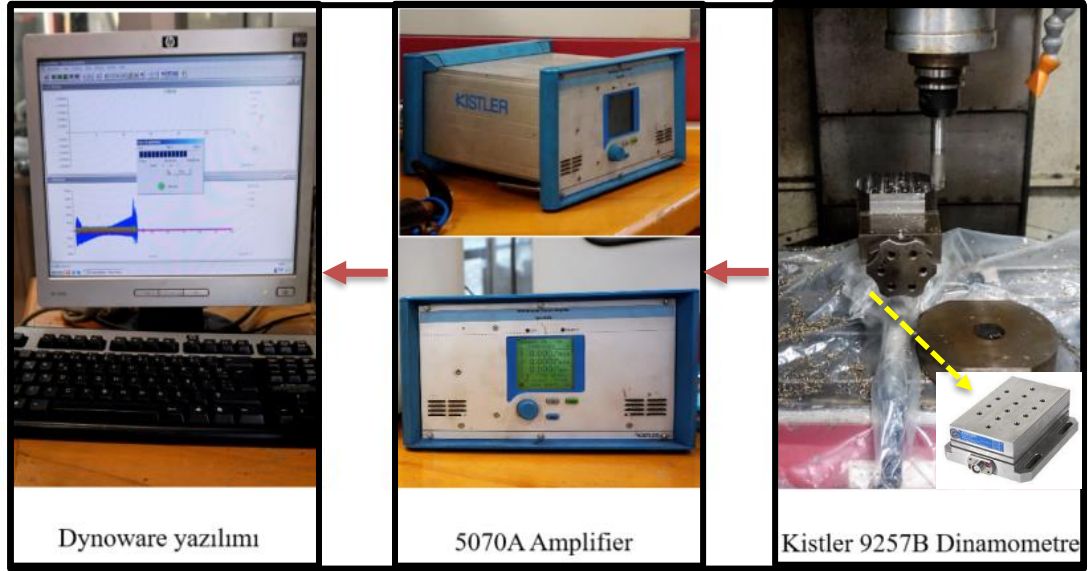
Kuvvet aralığı (Fx, Fy, Fz)	-5...10
Tepki verme (N)	<0.01
Hassasiyet Fx, Fy (pC/N)	-7,5
Fz	-3,5
Doğrusallık	%1 FSO
Histerezis	%0,5 FSO
Doğal frekans fo(x,y,z) (kHz)	3,5
Çalışma sıcaklığı (°C)	0.....70
Kapasitans (pF)	220
20 °C'daki yalıtım direnci (Ω)	> 1013
Topraklama sınıfı (Ω)	> 108
Koruma sınıfı	IP 67
Ağırlık (kg)	7,3

Kesme kuvveti verileri eş zamanlı olarak Dynoware yazılımı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Tüm frezeleme operasyonlarında kesme mekaniği eğik kesme teorisine uygundur ve doğal olarak üç kuvvet bileşeni oluşur. Bunlar Fx, Fy ve Fz ile X, Y ve Z yönlerinde meydana gelen kesme kuvveti bileşenleridir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Yukarı yönlü frezelemenin şematik gösterimi.

Değerlendirmelerde kesici uç maksimum kesilmemiş talaş kalınlığına (h_{max}) ulaştığında belirtilen üç yöndeki anlık kesme kuvvetleri kullanılmıştır. Bu nedenle, üç kuvvet bileşeninden kaynaklanan bileşke kesme kuvveti (F_r) hesaplanmıştır. Şekil 6.7'de kesme kuvvetinin belirlenmesinde kullanılan ekipmanlar gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Kesme kuvveti ölçüm ekipmanları.

6.2.3. Enerji Tüketimi Ölçümü

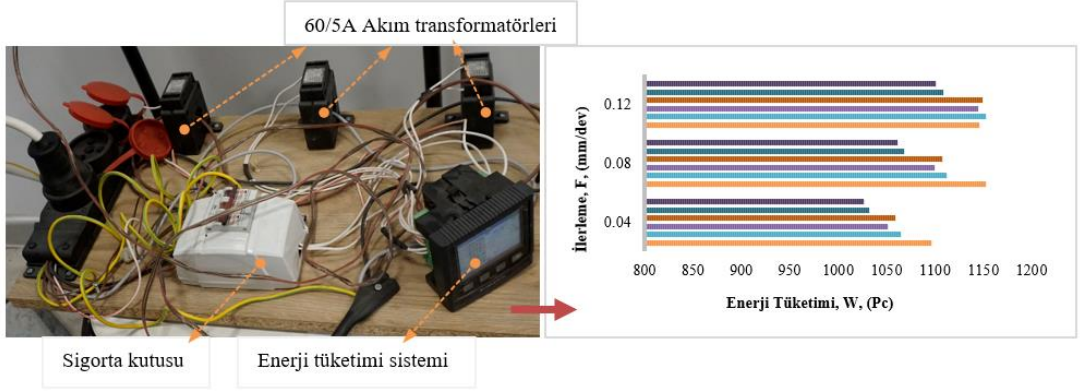
Sanayi sektörlerinin önemli bir parçası olan talaşlı imalat, dünya ekonomisinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle talaşlı imalat yapılan üretim süreçlerinde enerji ve güç tüketiminin azaltılması çevre dostu üretim açısından önemli bir konu haline gelmiştir [167]. Kesici takım kalıp endüstrileri, otomobil endüstrisi, nükleer endüstri vb., hükümet kısıtlamalarına uymayı sürdürürken aktif olarak enerji kullanımlarını azaltmanın yollarını aramaktadır. Sonuç olarak, parça imalatında işleme enerji verimliliğini artırmak için kesme enerjisi tüketimi azaltılmalıdır. Bu nedenle, enerji kullanımını azaltma yollarının analizi önemli bir ön adım olarak değerlendirilmiştir. Yeşil üretim, enerji tüketimini azaltmanın etkisine dayalı olarak farklı süreç planı seçeneklerini değerlendirmek için kullanılabilir. Bu nedenle, tüm endüstrilerin birincil hedefleri, işleme süreçlerindeki güç tüketimini izlemek ve güç tüketimini daha doğru bir şekilde tahmin etmek için deneysel bir model oluşturmaktır [168]. Yukarıda verilen bilgiler ışığında, çalışmanın bu bölümünde MMY yöntemi kullanılarak enerji tüketimini en aza indirmek planlanmıştır. PH13-8 Mo paslanmaz çeliğinin, kuru, MMY, nano-MMY ve kriyojenik işleme sistemi altında frezelenmesi sırasındaki güç tüketimi, Çizelge 6.8’de teknik özellikleri gösterilen KAEL Multiser 02-PC TFT Şebeke Analizörü (İstanbul, Türkiye) ile ölçülmüştür. Üç adet 60/5A

akım trafosu kullanılmıştır. Fazlı CNC takım tezgâhı şebekeden yaklaşık 30 A akım çekerek enerji tüketiminden tasarruf sağlamaktadır.

Çizelge 6.8. Enerji tüketimi ölçüm cihazı.

Bağlantı	var
Gerilim V1,V2,V3	1-300 Vac;0,5 class
Gerilim:V12,V23,V31	2-600 Vac; 0,5 class
Akım:I1,I2,I3,I nötr	2mA-6A;0,5 class
Aktif Güç:P1,P2,P3	1 class
Reaktif Güç:Q1,Q2,Q3	2 class
Cos1,Cos2,Cos3	[+-0.000]-[+-1.000]
Imp-exp. Aktif Enerji kWh	1 class
Imp-ex Reaktif Enerji kVARh	2 class
Demand ve Peak	var
Toplam Harmonik:THD ve THD-V	var
Gerilim Dengesizliği U%	var
Akım Dengesizliği I%	var
Osiloskop	var
Harmonikler	3-31. harmonikler
Alarmlar	var
Grafik Raporlamalar	Güç,Akım,Gerilim

Enerji tüketiminin ölçümleri kuru, MMY ve kriyojenik işleme koşullarında anlık olarak gerçekleştirilmiştir. CNC Freze tezgahının iş parçasından talaş kaldırmadığı anda kullandığı enerji ile talaş kaldırdığı anda kullandığı enerji ayrı ayrı ölçülmüştür. Talaş kaldırma esnasında harcanan enerjinin doğru olarak belirlenebilmesi için kullanılan kesici takımın iş parçasına bütünüyle ulaşması beklenmiştir. Böylece her iki kesici ucunda eşit miktarda talaş kaldırması sağlanmıştır. Enerji tüketiminin belirlenmesi için kullanılan yöntem Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Enerji tüketimi ölçüm düzeneği.

BÖLÜM 7

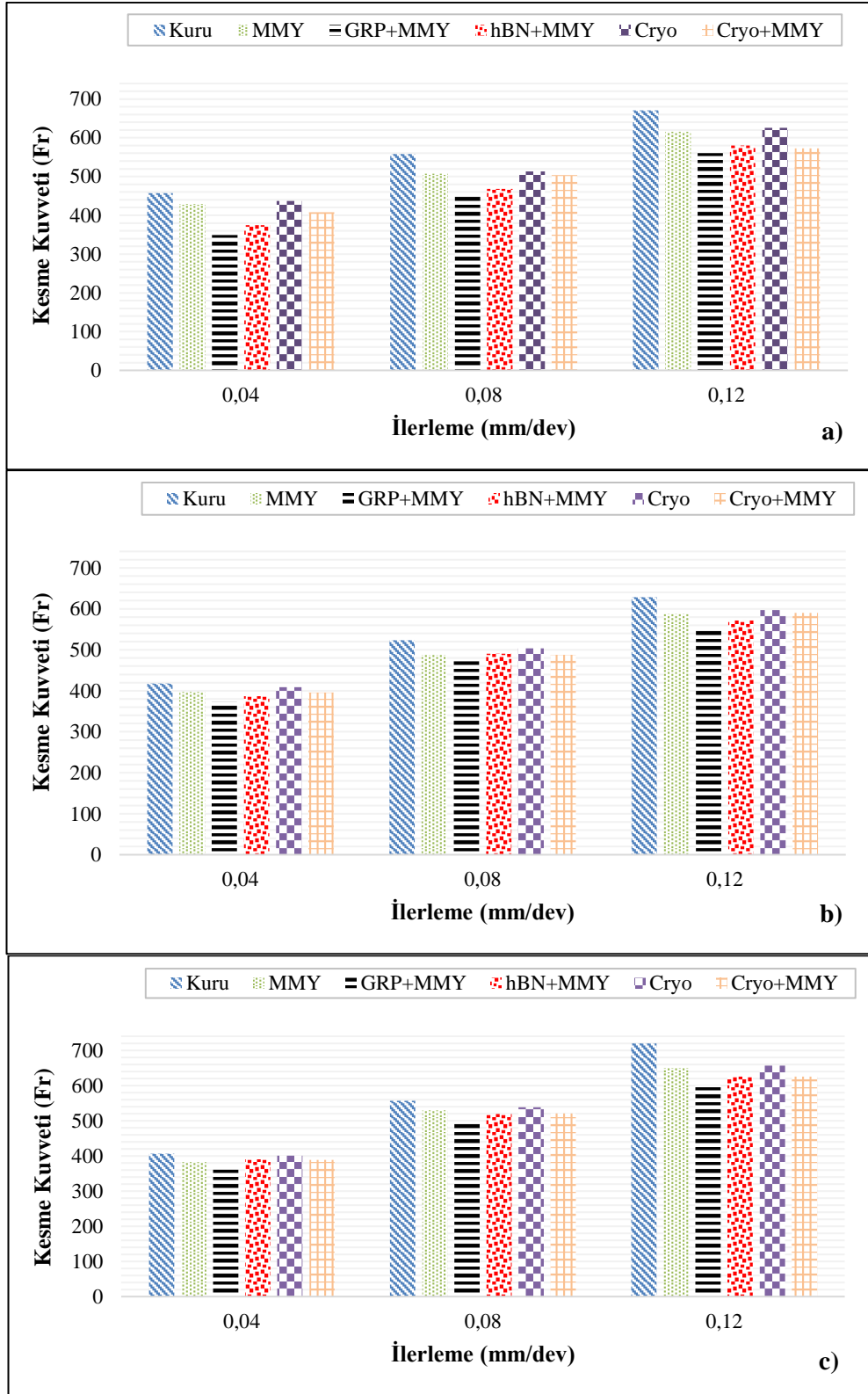
BULGULAR VE TARTIŞMA

İşlenebilirliği zor olan ve tecrübe isteyen malzemeler işleme esnasında birçok teknik adımdan geçmektedir. Özellikle kesme parametrelerinin doğru belirlenmesi işlenebilirliğin zor ya da kolay olmasında önemli bir rol oynar. Aynı zamanda işlenebilirliğin ifade edilmesinde, yüzey kalitesi, kesme sıcaklığı, kesme koşulları, kesme kuvvetleri, kesici takım ömrü gibi faktörler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, özellikle uzay, havacılık ve savunma endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip PH13-8 Mo paslanmaz çelik malzemesi frezelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma, kuru, MMY, CRYO, CRYO+MMY, GRP+MMY ve hBN olmak üzere altı farklı kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir.

7.1. KESME KUVVETİ

Kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey dokusu ile ilgili olan kesme işleminin karakterize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır [169]. CNC frezelemedeki temel tepkilerden biri olan kesme kuvveti, kesici takım/iş parçası deformasyonu, takım aşınması ve kırılma gibi CNC işleminin birçok yönünü etkilemektedir [170]. Ayrıca kesme kuvveti, önemli bir işleme kalite karakteristiği olup kesme esnasında kesici takımın maruz kaldığı yükleri ve tezgâh tarafından tüketilen gücü belirlemede kullanılmaktadır. Kesme kuvveti, kesme bölgesindeki oluşan sürtünme ve kesme sıcaklığıyla da doğrudan bağlantılıdır. Kesme kuvvetinin yüksek değerleri takım aşınmasını ve yüzey bütünlüğünü olumsuz yönde etkilemektedir [171]. Çalışmanın bu bölümünde tüm işleme koşullarında ölçülen kesme kuvveti değerleri Şekil 7.1’de incelenmiştir. Ayrıca yine tüm işleme koşullarında kesme kuvveti değerinin etki seviyeleri belirlenmiştir. Etki seviyelerinin belirlenmesi amacıyla ANOVA analiz yöntemine başvurulmuştur.

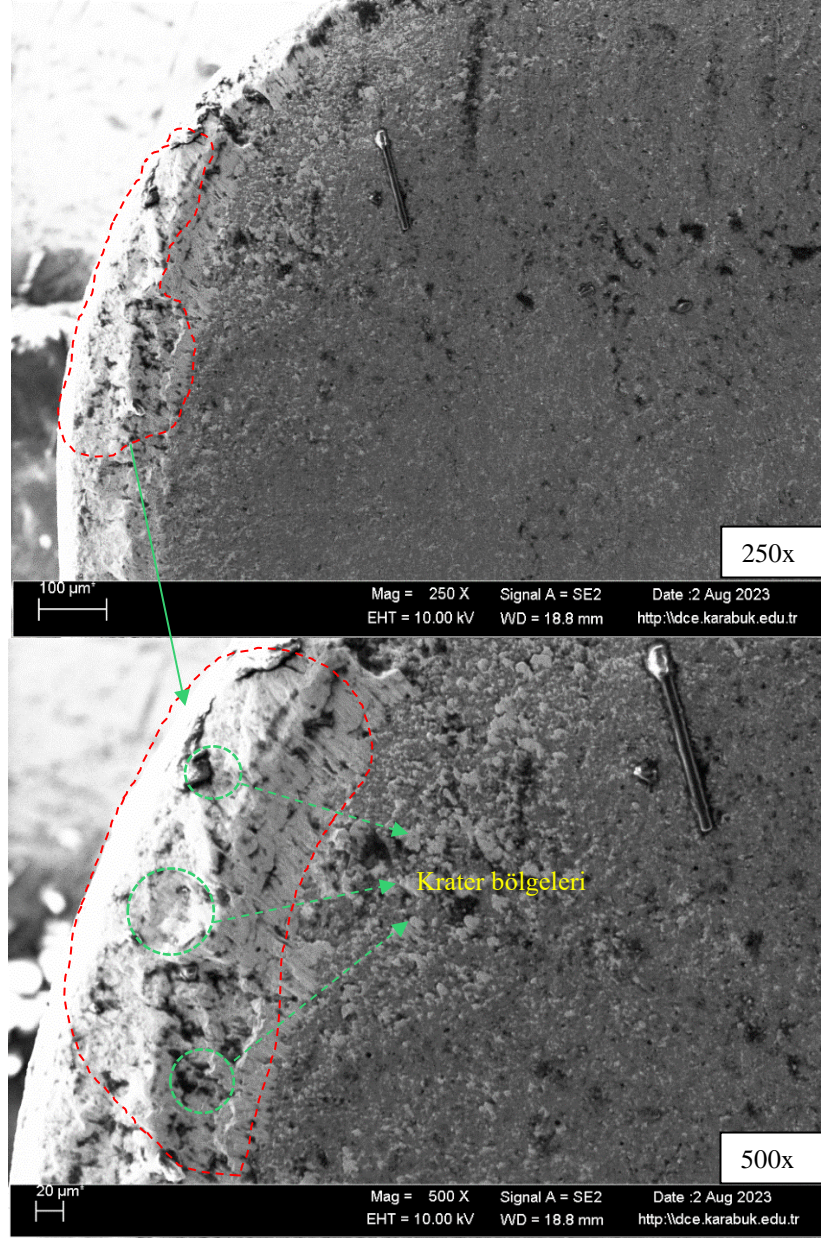
Kesme kuvvetleri, takım tezgâhları tasarımı, işleme kararlılığı, takım aşınması, enerji tüketimi ve hatta yüzey kalitesinin oluşumu gibi işleme çıktıları hakkında değerli veriler sağlar. İlave olarak, kesme kuvvetlerini etkileyen doğrudan etkileyen temel kesme parametreleri V , f , a 'dır. Sürdürülebilir işleme açısından, bu parametrelerin çevreye duyarlı kesme ortamları ile etkileşiminde kesme kuvvetlerinin analizi çok önemlidir. Bu noktada, PH13-8Mo kalite paslanmaz çeliğinin çevre dostu kesme rejimlerinde birisi olan kuru işleme ortamında frezelenmesinde oluşan bileşke kesme kuvveti (Fr) analizi önemlidir.



Şekil 7.1. Fr'nin değişimi; a)V=40 m/dak, b)V=60 m/ dak, c)V=80 m/ dak

Kuru işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek kesme kuvveti değeri 80 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 719,46 N olarak ölçülmüştür. En

düşük kesme kuvveti değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 406,43 N şeklinde ölçülmüştür. Grafikten görülebileceği gibi kuru kesmede oluşan kesme kuvvetleri daha yüksektir. Bu sonuç kesici takımın aşınma sürecine girmesiyle oluşan talaş oluşumuna atfedilebilir. Frezeleme işleminde darbeli talaş kaldırma işlemi olduğundan tornalamadaki gibi kuru işleme sırasında sürekli kesme sıcaklığı artışı görülmemektedir. Ek olarak, soğutma/yağlama eksikliği yüzünden talaş oluşumu sırasında aşırı termal-mekanik yüklenme olur ve buna bağlı olarak kesici takımlar yorulma mekanizmasına maruz kalır. Bu yüzden, talaş kaldırma sırasında malzemede ısıl yumuşa oluşmadığından, talaş oluşumu kolaylaşmayacağı gibi özellikle işlenmesi zor malzemelerde kesici kenarlarda talaş yapışma eğilimi oluşur. Kuru işlemede soğutma/yağlayıcı eksikliği yüzünden yaygın bir şekilde görülen bu fenomen [172] takım geometrisinde ve kesilmemiş talaş kalınlığında değişimlere sebep olarak işleme gücünün artmasına neden olur. Kuru kesmede koşulunda 80 m/dak kesme hızında ve 0,04 mm/dev ilerleme miktarında kullanılan kesici takımın SEM görüntüleri bu durumu açıklar niteliktedir (Şekil 7.2). Sonuç olarak, sunulan çalışmada olduğu gibi kesme kuvvetleri arttığında ve kesme işlemine devam edildiğinde takım daha hızlı aşınma sürecine girecektir.



Şekil 7.2. Kuru kesme şartlarında kullanılan kesici takım aşınma SEM görüntüleri.

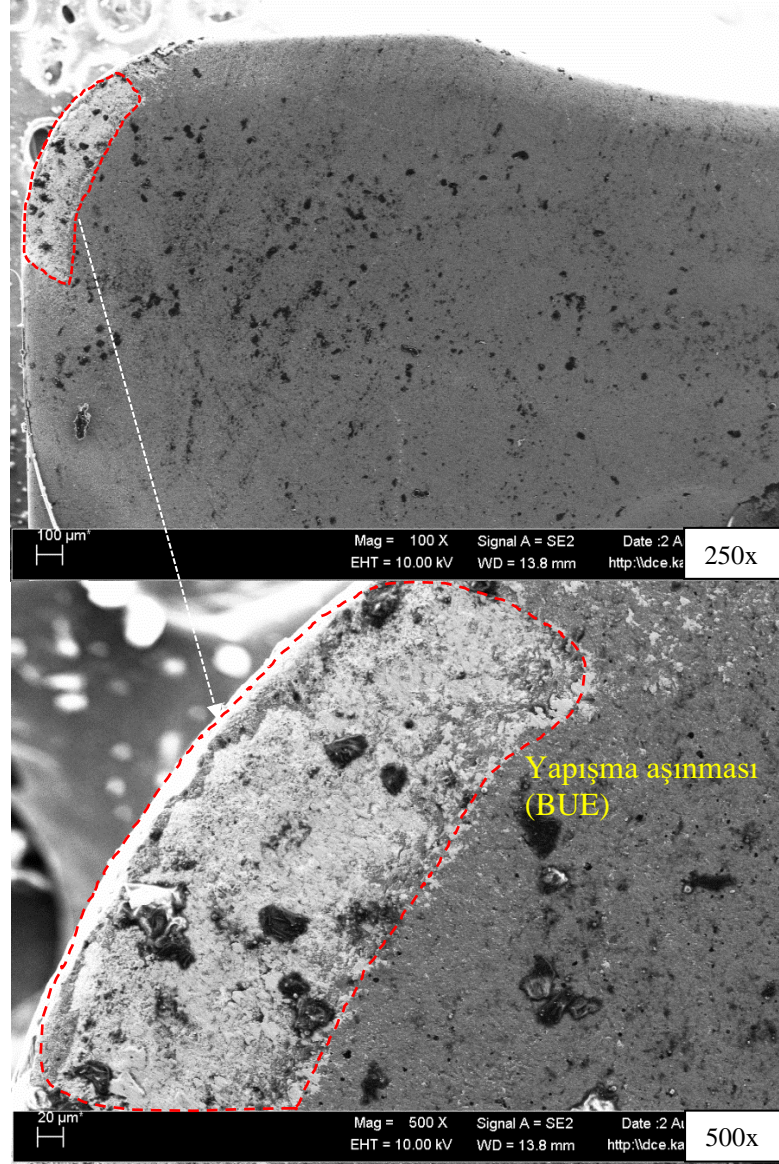
Talaşlı imalat işlemi sırasında kesme kuvvetlerinin ölçülmesi, güç gereksinimi ve takım tezgâhi elemanlarının uygun tasarımı hakkında fikir verdiği için önemli bir husustur [173]. MMY yönteminin talaşlı imalat operasyonlarında hem kesme sırasında meydana gelen ısıyı hem de oluşan kuvvetleri azaltmada önemli bir rolü vardır. MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek kesme kuvveti değeri 80 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 649,82 N olarak ölçülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 382,31 N şeklinde ölçülmüştür. Kuru işlemeye kıyasla MMY kesme rejimi

kullanıldığında kesme kuvvetlerinde ortalama %7,15 oranında iyileşme sağlanmıştır. Önceki araştırmalar, MMY'nin kesme kuvvetini azalttığını, takım ömrünü uzattığını ve işlenmiş parçanın yüzey kalitesini iyileştirdiğini belirtmektedir [174]. Elde edilen veriler bu bağlamda literatürle uyumaktadır. Yapılan bir çalışmaya [175] paralel olarak, takım-talaş ara yüzeyinde bir baz sıvısı kullanılarak ince bir yağ filmi oluşturulmasının sürtünmenin azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

MMY uygulamasında, basınçlı havayla birlikte yağlama karışımı işleme bölgesine sis halinde uygulanmaktadır. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi MMY, yağlayıcının etkili bir şekilde nüfuz etmesini sağlar, böylece işleme arayüzlerindeki sürtünmeyi azaltır ve bu da sürtünmeden kaynaklanan ısı oluşumunu engeller. Bu nedenle soğutmaya ek olarak MMY uygulaması yağlama koşullarını iyileştirmektedir [176]. Bu amaçla kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesinde MMY sistemini grafen ile birleştirerek PH grubu gibi işlenebilirliği zor ve literatürde bu konuda kısıtlı araştırmaların olduğu malzemelerin varlığı etkili olmuştur.

GRP+MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek kesme kuvveti değeri 80 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 600,71 N olarak ölçülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri ise 40 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 349,40 N şeklinde ölçülmüştür. Kuru ve MMY işlemeye kıyasla GRP+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla kesme kuvvetlerinde ortalama %14,62 ve %8,04'lük bir iyileşme görülmüştür. MMY altındaki basınçlı yağ ve Nano akışkan MMY altındaki iki boyutlu grafen levhaların kayma eğilimi, soğutma ve yağlamanın etkilerini doğrudan bir şekilde artırır ve bu da arayüz sürtünmesini azaltmaktadır. Böylece kuru işleme şartlarına kıyasla daha düşük kesme kuvveti elde edilir [177]. Grafen kullanılarak kesme kuvvetlerinin azaltılması, paylaşım davranışından dolayı grafenin takım-talaş ve takım-iş malzemesi temas alanında en iyi tribolojik davranışı gösterdiği gerçeğini güçlendirmektedir. Bu teori kesme kuvvetinin en düşük değerlerde gözlemlendiği deneyde kullanılan kesici takımın SEM görüntülerinde de desteklenmektedir. Şekil 7.3'te kesici takımın aşınma karakterizasyonu, düşük ilerleme ve kesme hızının kullanımının yanı sıra yukarıda bahsedilen tribolojik

davranışın bir göstergesi olarak diğer deneylere nazaran daha olumlu sonuçlar göstermiştir.

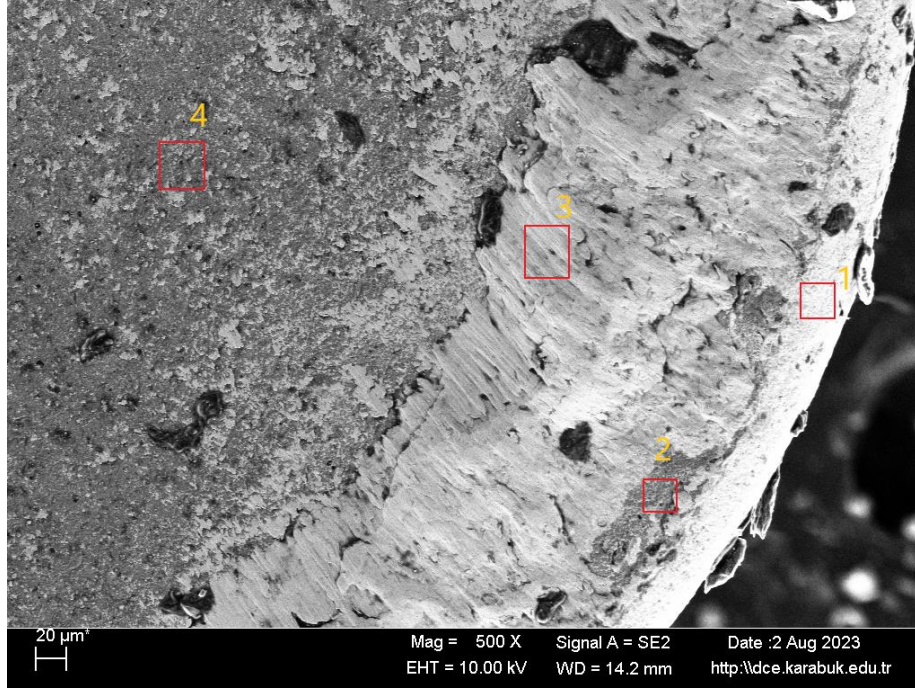


Şekil 7.3. GRP+MMY şartlarında kullanılan kesici takım aşınma SEM görüntüleri.

Kesme kuvvetlerinin grafen ortamında, çoğunlukla kullanılan en düşük ve orta hızlarda test edilen maksimum hıza göre önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum grafenin düşük ve orta kesme hızlarında geliştirilmiş yağlama sonuçlarından kaynaklanmaktadır. Bu bulgu, grafenin yağlayıcı olarak hareket etme etkisinin kesme hızının artmasıyla azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni, en yüksek kesme hızında grafenin hızla düzensiz grafitik yapıya dönüşmesi olarak açıklanabilir [178].

hBN+MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek kesme kuvveti değeri 80 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 625,49 N olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 40 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 374,85 N şeklinde ölçülmüştür. Kuru ve MMY işlemeye kıyasla hBN+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla kesme kuvvetlerinde ortalama %10,77 ve %3,89 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Fakat hBN+MMY işleme koşulunda, GRP+MMY işleme koşuluna göre kesme kuvvetlerinde %4,51 artış meydana gelmiştir. Bu durum yapılan bir çalışmanın sürtünme verileriyle birlikte ele alındığında, grafitin hBN'ye göre daha iyi tribolojik performansının kanıtı olduğu düşünülmektedir [179].

Kriyojenik işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek kesme kuvveti değeri 80 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 656,37 N olarak ölçülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 400,68 N şeklinde ölçülmüştür. Kuru işlemeye kıyasla kriyojenik kesme rejimi kullanıldığında kesme kuvvetlerinde ortalama %5,24 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Fakat MMY, GRP+MMY ve hBN+MMY işleme koşullarında kesme kuvvetlerinde sırasıyla %2,05, %10,98 ve %6,19'luk artış söz konusudur. LN₂ cryogenic soğutma ortamı için Fr değerleri MMY kesme ortamındakine göre az da olsa büyüktür. Bu sonuç, Kryo ortamın işlenen malzeme ve kesici takım davranışına bağlı gelişen talaş oluşumu ile açıklanabilir. Kriyojenik soğutma, kesme bölgesinden ısıyı etkili bir şekilde çıkarabilse de takım-iş parçası temas alanını etkin bir şekilde yağlayamadığı düşünülmektedir. Sıvı azotun kesme sırasında oluşan yüksek sıcaklığı minimum seviyeye indirmesi beklenmektedir [180–182]. Diğer bir yandan aşırı soğuyan malzemenin kırılabilirliği artmaktadır. Nitekim Şekil 7.4'te EDX verilerinden de görüleceği gibi aşınma bölgesinde en etkin element krom elementidir. Krom elementi aynı zamanda deney numunesinin kimyasal bileşiminde %12.2 ila %13.2 gibi oranlarda bulunduğundan iş parçasından kesici takım yüzeyine aşınma aracılığıyla malzeme parçacıkları aktarımı söz konusudur.



Külte yüzdesi (%)						
1	C	N	Al	Si	P	
	18.82	0.11	0.58	8.34	0	
	S	Ti	Cr	Mn	Fe	
	0	0.16	4.68	0.72	22.73	
	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	W
4.54	3.16	0.11	0.76	0.03	35.25	
2	C	N	Al	Si	P	
	17.16	16.25	17.89	0.46	0	
	S	Ti	Cr	Mn	Fe	
	0	22.32	4.94	0.93	16.81	
	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	W
0.46	2.15	0.04	0.33	0.27	0	
3	C	N	Al	Si	P	
	17.93	0	0.83	0.09	0	
	S	Ti	Cr	Mn	Fe	
	0	0	11.51	1.54	57.45	
	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	W
0.01	8.28	0.04	0.14	2.14	0.04	
4	C	N	Al	Si	P	
	20.97	17.09	19.05	0.49	0	
	S	Ti	Cr	Mn	Fe	
	0.13	21.49	3.29	0.09	14.92	
	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	W
0.24	2.14	0	0	0.09	0	

Şekil 7.4. Kriyojenik kesme şartlarında takım aşınma SEM/EDX görüntüleri.

CRYO+MMY işleme koşullarına bakıldığında, en yüksek kesme kuvveti değeri 80 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 625,19 N olarak ölçülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 388,38 N şeklinde ölçülmüştür. Kuru, MMY ve CRYO işlemeye kıyasla CRYO+MMY işleme ortamı kullanıldığında kesme kuvvetlerinde sırasıyla %9, %2,1

ve %4'lük iyileşme görülmektedir. Diğer taraftan GRP+MMY ve hBN+MMY işleme koşullarında, CRYO+MMY kesme ortamına kıyasla kesme kuvvetlerinde sırasıyla %6,5 ve %2'lik artış görülmektedir.

Çizelge 7.1. Fr için ANOVA sonuçları.

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F Oranı	Etki Oranı (%)
Kuru					
V, m/dak	2	2900	1450	1.70	3.00
f, mm/dev	2	90684	45342.1	53.26	93.49
Hata	4	3405	851.3		3.51
Toplam	8	96989			
MMY					
V, m/dak	2	1382	691	1.08	1.93
f, mm/dev	2	67759	33789.5	53.16	94.51
Hata	4	2549	637.3		3.56
Toplam	8	71690			
GRP+MMY					
V, m/dak	2	1678	838.9	2.98	2.4392
f, mm/dev	2	65992	32995.8	117.4	95.9270
Hata	4	1124	281.1		1.6339
Toplam	8	68794.0000			
hBN+MMY					
V, m/dak	2	2316	1158	5.56	3.3929
f, mm/dev	2	65111.4	32555.7	156.27	95.3864
Hata	4	833.3	208.3		1.2208
Toplam	8	68260.7000			
CRYO					
V, m/dak	2	348.3	174.2	0.33	0.50
f, mm/dev	2	67670.8	33835.4	63.14	96.45
Hata	4	2143.4	535.9		3.05
Toplam	8	70162.6			
CRYO+MMY					
V, mm/dak	2	689.7	344.9	0.94	1.2220
f, mm/dev	2	59300.2	29650.1	80.61	96.48
Hata	4	1471.4	367.8		2.39
Toplam	8	61461.3			

%95 anlamlılık düzeyinde uygulanan ANOVA sonuçlarından görüleceği gibi, kuru kesme rejiminde bileşke kesme kuvveti (Fr) üzerinde en etkin parametre ilerleme hızıdır. Kuru kesme rejimi için f'nin etki seviyesi %93,5'tir. Ayrıca, Çizelge 7.1'den

kesme hızının Fr üzerindeki etkisinin düşük olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi frezeleme işleminde kesici takım iş parçası malzemesi ile sürekli temas halinde olmadığından, yüksek kesme hızına rağmen oluşan kesme sıcaklığı malzeme yumuşamasını sağlayacak düzeylere ulaşamaz. Bu durumda, frezelemede kesme hızının kesme kuvvetlerinin azalması için sağladığı ortam etkisinin küçük kalması doğaldır. Diğer yandan, kesme hızının çok yüksek olması takım aşınmasını hızlandıracağı mevcut çalışmada kanıtlanmış olup, özellikle ısı iletim katsayısı düşük olan paslanmaz çelik, süper alaşımlar gibi malzemelerin işlenmesinde optimal kesme hızının uygulanması çok önemlidir.

MMY kesme rejiminde kesme kuvvetleri üzerinde en etkin parametre ilerleme hızıdır. MMY işleme için f 'nin etki seviyesi %94,51'tür. Ayrıca kesme hızının kesme kuvvetleri üzerinde ortalama %1,93'lük bir etki oranına sahip olduğu görülmektedir. İlerleme değerinin artması, kesici takım üzerine daha fazla yüklerin etki etmesine ve birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasına neden olduğundan, kesme kuvveti değerleri de artış göstermiştir.

GRP+MMY kesme koşulları incelendiğinde kesme kuvvetleri üzerinde en etkin parametre diğer koşullarda olduğu gibi ilerleme hızıdır. GRP+MMY işleme için f 'nin etki seviyesi %96'dır. Ayrıca kesme hızının kesme kuvvetleri üzerinde ortalama %2,43'lük bir etki oranına sahip olduğu görülmektedir. İlerleme hızının etki oranının MMY'ye göre artış göstermesi, daha önce bahsedildiği gibi grafenin yapısal özelliklerinin kesme hızına karşı duyarlılığı ile ilişkilendirilebilir.

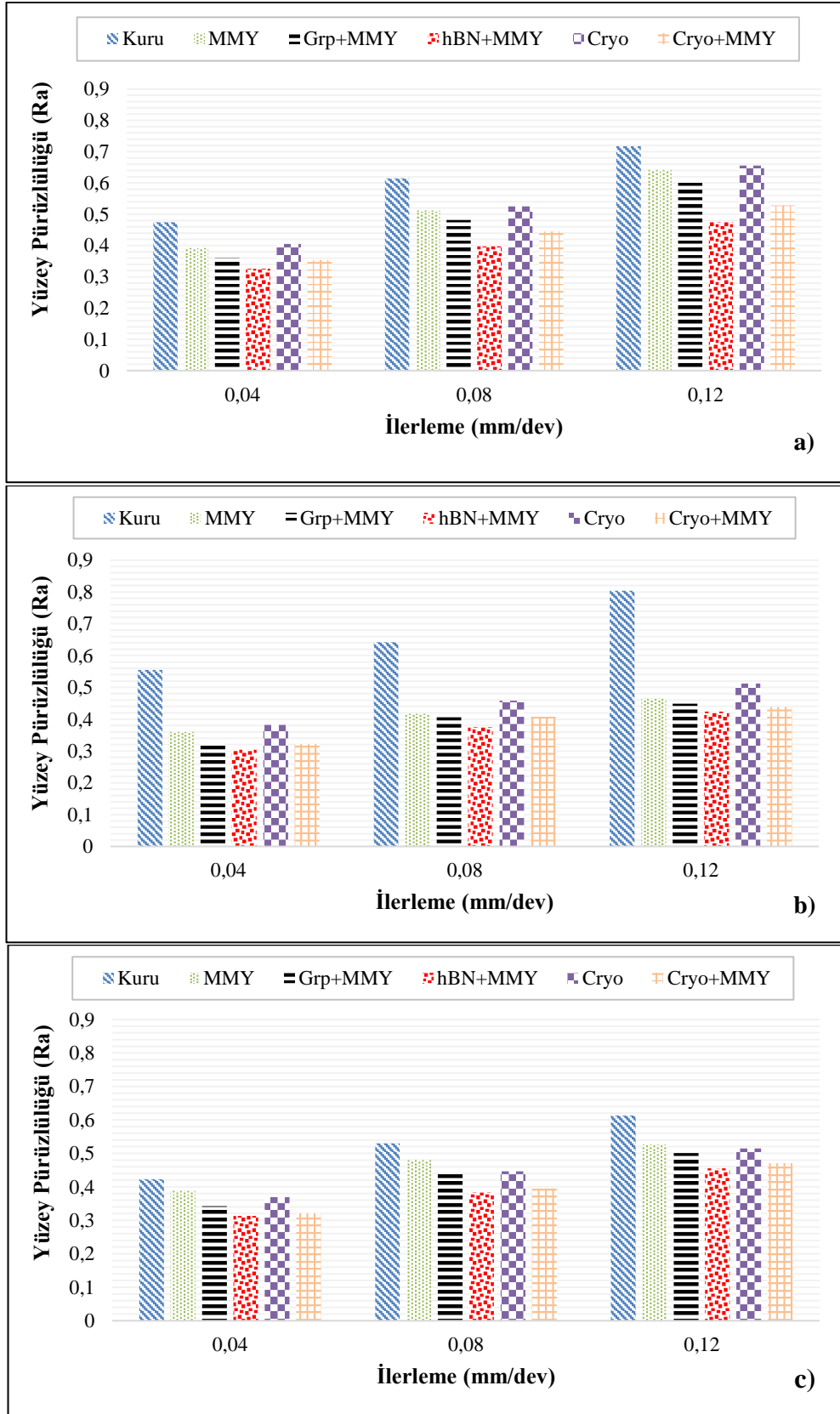
hBN+MMY kesme rejiminde kesme kuvvetleri üzerinde en etkin parametre ilerleme hızıdır. hBN+MMY işleme için f 'nin etki seviyesi %95,38'dir. Ayrıca kesme hızının kesme kuvvetleri üzerinde ortalama %3,39'lük bir etki oranına sahip olduğu görülmektedir.

Kriyojenik işleme koşulları incelendiğinde kesme kuvvetleri üzerinde en etkin parametre %96,45'le ilerleme hızıdır. Ayrıca, Çizelge 7.1'den kesme hızının Fr üzerindeki etkisinin düşük olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi frezeleme işleminde kesici takım iş parçası malzemesi ile sürekli temas halinde olmadığından, yüksek

kesme hızına rağmen oluşan kesme sıcaklığı malzeme yumuşamasını sağlayacak düzeylere ulaşamaz. Bu durumda, frezelemede kesme hızının kesme kuvvetlerinin azalması için sağladığı ortam etkisinin küçük kalması doğaldır. Son olarak CRYO+MMY kesme rejimi incelendiğinde tüm işleme şartlarında olduğu gibi ilerleme hızı en etkin parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. %96,48’lik bir etki oranına sahip olan ilerleme hızını, %1,22 ile kesme hızı izlemektedir.

7.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

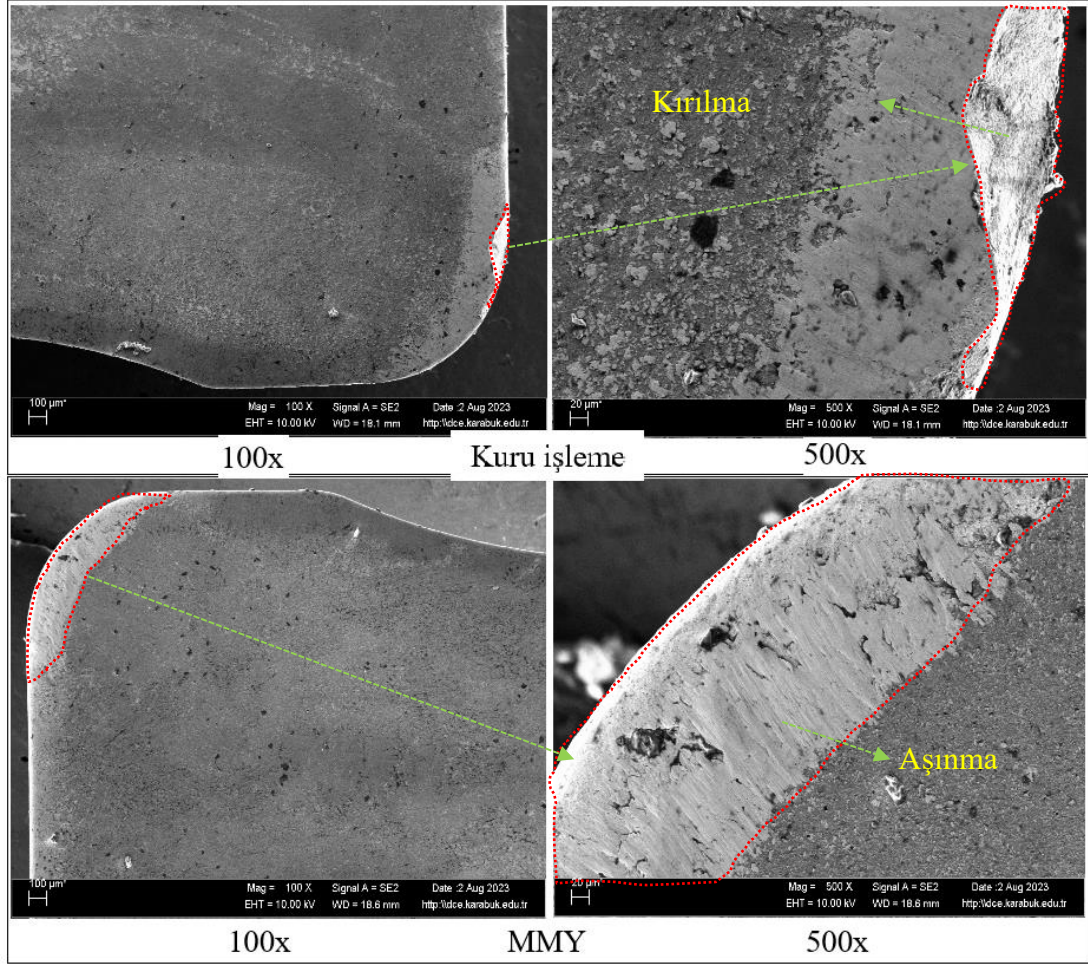
Talaşlı imalatta farklı işleme parametreleri ile elde edilen iş parçasının kalitesi de farklıdır. Frezeleme işleminde iş milinin hızı ve ilerleme miktarı bazen hızlı, bazen yavaştır. Dolayısıyla talaşın işlenmesinde, iş parçasının nihai kalitesini etkileyen birçok faktör vardır. İşlenen herhangi bir parçanın yüzeyi, farklı yüksekliklere, derinliklere ve boşluklara sahip çok sayıda sırt ve çöküntü içeren karmaşık bir yapıya sahiptir. Yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki küçük boşlukların yüksek ve alçak frekanslarda çöküntü oluşturmasını ifade etmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, diğer nesnelere birleştiğinde iş parçalarının aşınma miktarını etkiler [183,184]. Çalışmanın bu bölümünde tüm işleme koşullarında ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 7.5’te incelenmiştir. Ayrıca yine tüm işleme koşullarında yüzey pürüzlülük değerinin etki seviyeleri belirlenmiştir. Etki seviyelerinin belirlenmesi amacıyla ANOVA analiz yöntemine başvurulmuştur (Çizelge 7.2) [185]. Yüzey pürüzlülüğü, yaygın olarak kullanılan bir ürün kalitesi indeksidir ve çoğu durumda teknik bir gerekliliktir. Bir parçanın fonksiyonel davranışı için istenilen yüzey kalitesinin elde edilmesi büyük önem taşımaktadır [186]. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü oluşum mekanizmasının sürece bağlı doğası ve ilgili olayları etkileyen çok sayıda kontrol edilemeyen faktör, doğrudan bir çözümü neredeyse imkânsız hale getirmektedir. Kullanılabilecek en yaygın strateji, ne istenen yüzey kalitesinin elde edilmesini garanti etmeyen ne de yüksek talaş kaldırma oranlarına ulaşabilen ölçülü işlem parametrelerinin seçilmesini içermektedir [187]. Kuru kesme kullanılarak yapılan frezeleme işlemi, azaltılmış maliyetlerin yanı sıra makine parçaları üzerindeki artık yağlayıcının temizlenmesinden veya atılmasından kaynaklanan enerji tüketiminin azalmasını içeren avantajlara sahiptir [188].



Şekil 7.5. Ra'nın değişimi; a)V=40 m/dak, b)V=60 m/ dak, c)V=80 m/ dak

Kuru işlemede en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 60 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,804 µm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,423 µm şeklinde ölçülmüştür. Literatürde de belirtildiği gibi [189] frezeleme işlemlerinde Ra değeri ilerleme ile doğru orantılı olarak değişir. Sonuç olarak, $Ra=0.0321f^2/r$ denklemi gereği f'nin artmasıyla Ra'nın artması kaçınılmazdır.

Günümüzde birçok hükümet, çevre düzenlemesi adına, metal kesme endüstrilerini geleneksel soğutma tekniğinin sonuçları olan, kimyasal olarak kirlenmiş kesme soğutma sıvılarının atılması açısından sınırlandırmaktadır. Minimum Miktarla Yağlama (MMY), geleneksel soğutma tekniğine etkili alternatif soğutma tekniklerinden biridir ve sıkı çevre bilinci düzenlemelerini karşılamak için çevre dostu bir yöntemdir [190,191]. Ticari bir MMY sistemi, hava kompresörü, kesme sıvısı deposu, borular, akış kontrol sistemi ve püskürtme nozulu olmak üzere genellikle beş ana parçadan oluşur [145]. MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 40 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,642 µm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 60 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,360 µm şeklinde ölçülmüştür. Kuru işlemeye kıyasla MMY kesme rejimi kullanıldığında yüzey pürüzlülüğünde ortalama %22,03 oranında iyileşme sağlanmıştır. MMY kesme ortamın sağladığı bu iyileşme, takım-talaş arayüzüne belirli bir basınçta verilen kesme yağının sürtünmesiz bir ortam sağlaması ile açıklanabilir [175]. Dolayısıyla MMY ile sağlanan düşük sürtünme hem talaşın takıma yapışmasını engeller hem de takım-talaş temas alanını minimize ederek kesme kuvvetlerini azaltır. Bu durum, daha kararlı bir talaş oluşumu sağlayarak Ra değerlerinin azalması yönünde bir katkı sağlamıştır. Bu azalma Şekil 7.6.'da verilen SEM görüntülerinde de net bir şekilde görülmektedir. Seçilen SEM görüntülerinde hem kuru işlemede hem de MMY yönteminde kesme hızı 60 m/dak, ilerleme miktarı 0,08 mm/dev'dir.



Şekil 7.6. Kuru kesme ve MMY işlemede takım SEM görüntüleri

Grafen, sentetik grafit tozundan sentezlenen en son iki boyutlu malzemedir. Grafen, grafit ile aynı katmanlı bir yapıya sahiptir, çok katmanlı grafenin yüksek termal iletimi ve kesme sıvılarında olağanüstü soğutma etkisinden dolayı diğer yöntemleri geride bırakmıştır. Grafen nanopartiküllerin en yüksek termal iletkenliği 5500 W/m-K'ye kadardır. Bu nedenle grafen, işlenmesi zor malzemelerin kesilmesinde metal işleme sıvıları olarak kullanılabilen bir ısı transferi aracı olarak kabul edilir. Bitkisel yağ esaslı kesme sıvılarıyla karıştırılan grafen nanoparçacıkları, iyi biyolojik bozunabilirliği, yağlama performansı ve daha düşük üretim maliyetinden dolayı iyi bir alternatif çözümdür [192]. GRP+MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 40 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,605 μm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 60 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,326 μm şeklinde ölçülmüştür. Kuru ve MMY işlemeye kıyasla GRP+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla yüzey

pürüzlülüğünde ortalama %27,11 ve %6,45 oranında iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşmenin, kesici takım-iş parçası arayüzüne mükemmel bir şekilde nüfuz etmeye yardımcı olan nano grafen parçacıklarının nano ölçekli yapısından (trombosit) ve iyi yağlama özelliklerinden kaynaklandığına inanılmaktadır [193]. Bitkisel esaslı yağa grafen nanopartiküller eklenerek kesme sıvısının ısı emilimi ve yağlaması önemli ölçüde artırılabilir [194].

Son zamanlarda nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan hBN nanoparçacıkları, tribolojik özelliklerinin yanı sıra yüksek termal iletkenliği ve kimyasal inertliği nedeniyle katı yağlayıcı olarak ilginç bir malzemedir [165]. hBN (beyaz grafit olarak da bilinir), kimyasal stabilitesi ve yüksek erime sıcaklığından dolayı kesme sırasında metalin erimesinden etkilenmeyen altıgen kristal bir yapıya sahiptir. Bu kristal yapı, düşük sürtünme katsayısı ile mükemmel yağlama özellikleri sağlar. Bu özelliklerinden dolayı daha iyi yağlama ve ısı iletimi olması dolayısıyla ağır işleme koşullarında üstün performans vermesi beklenmektedir [195]. hBN katkı maddelerinin MMY ile talaş kaldırma operasyonlarında performans artırıcı etkilere sahip olduğu bazı çalışmalarda vurgulanmıştır [196,197]. hBN+MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 40 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,476 µm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 60 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,304 µm şeklinde ölçülmüştür. Kuru, MMY, GRP+MMY işlemeye kıyasla hBN+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla yüzey pürüzlülüğünde ortalama %35,5, %17,4 ve %11,6 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Bu durum hBN nano akışkanların viskozite değerlerinin diğer nano akışkanlardan daha düşük ölçülmesine [198] ve kesme bölgesine MMY yöntemiyle basınçlı olarak gönderilen nano akışkan buharın takım/talaş ara yüzeyine daha iyi nüfuz etmesi şeklinde açıklanabilir. Bu sayede yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma görüldüğü düşünülmektedir.

Son on yılda yapılan en son araştırmalar, takımı yumuşama sıcaklığının çok altında tuttuğu için iyileştirilmiş takım ömrü ve yüzey bütünlüğü açısından kriyojenik soğutmanın taşmalı soğutma ve diğer kuru ve kuruya yakın işleme tekniklerine göre üstünlüğünü göstermektedir. Kriyojenik soğutmanın maksimum verimliliği için, kesme arayüzlerinde kriyojenin doğru şekilde nüfuz etmesi gerekmektedir.

Kriyojenik akışkanların, özellikle sıvı nitrojen (LN₂) ve sıvı karbon dioksitin (LCO₂) kullanılmasının ana avantajı, kesme bölgesinden ısı çekerek atmosferik koşullarda buharlaşma eğilimleridir. Bu sıvılar inert yapıları nedeniyle herhangi bir zararlı duman çıkarmazlar. Kriyojenik bilim, malzemelerin ve süreçlerin ultra düşük sıcaklıklardaki davranışlarıyla ilgilenmektedir. Literatürde kriyojenik, -153 °C'nin altında meydana gelen süreç olarak tanımlanabilir [199]. Kriyojenik işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 40 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,656 µm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,369 µm şeklinde ölçülmüştür. Kuru, işlemeye kıyasla kriyojenik kesme rejimi kullanıldığında yüzey pürüzlülüğünde ortalama %20,59 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Fakat MMY, GRP+MMY ve hBN+MMY işleme koşullarında ortalama yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla %2,03, %9,07 ve %23,56'lık artış söz konusudur. Kriyojenik ortamın Ra üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık MMY kesme rejimi kadar olumlu yönde iyileştiği söylenebilir. Benzer şekilde, kriyojenik kesme ortamı takım ve talaş arasındaki sürtünme direncini azaltarak talaş oluşumunu kolaylaştırır ve sonuç olarak pürüzlülükte azalma olur. Ayrıca, bu ortam kesme ortamında oluşan ısıyı uzaklaştırarak iş parçası malzemesinin düşük ısı iletim katsayısından kaynaklı dezavantajını giderir ve takım aşınması kuru kesmeye göre azalır. Literatürde belirtildiği gibi [200], bu süreç takım aşınmasına bağlı artan kesme titreşimlerini azalması ve dolayısıyla pürüzlülüğün azalmasını sağlar. Diğer yandan, kriyojenik işlemede verilen LN₂ gazının aşırı soğuk olmasından kaynaklı frezeleme işleminde kesici takımda termal yorulma çatlakları ve/veya talaşlanma oluşmuştur. MMY ortamında oluşan yüzey pürüzlülüğünde ortalama %2,18'lik bir artış bu duruma atfedilmiştir.

Çalışmanın bazı aşamalarında belirtildiği gibi MMY, geleneksel taşmalı soğutmaya etkili bir alternatif olarak kabul edilmiştir. Çok az miktarda (6–100 ml/h) mineral veya bitkisel yağın sis formunda basınçlı hava akımıyla (normalde 5–7 bar) kesme bölgesine doğru püskürtülmesini içerir. Ayrıca MMY, basınçlı havanın soğutma etkisi ve yağlayıcının buharlaşmasıyla kesme bölgesi sıcaklığını tatmin edici bir şekilde azaltabilir. Kriyojenik soğutma ise kesme bölgesindeki sıcaklığı kesici takım malzemelerinin yumuşama sıcaklığı aralığının çok altında tutmak için etkili bir

yaklaşım olarak kabul edilmektedir [158]. CRYO+MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 40 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,529 μm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri hem 60 m/dak ve 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,321 μm şeklinde ölçülmüştür. Kuru, MMY, GRP+MMY ve kriyojenik işlemeye kıyasla CRYO+MMY kesme rejimi kullanıldığında yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla ortalama %31,49, %11,97, %5,90 ve %13,73 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. hBN+MMY işleme rejiminde ise, CRYO+MMY işleme koşullarına göre ortalama yüzey pürüzlülüğünde %6,60'lık bir artış görülmektedir. Sonuçlar genel olarak eşzamanlı soğutma ve yağlama stratejisinin işlenmiş yüzeyin üstünlüğü üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bir hibrit ortam kullanıldığında, CRYO ortam işleme bölgesinin sıcaklığını düşürmektedir. MMY ortamı ise eşleşen yüzeylerin sürtünmesini azaltmak için yeterli yağlama sağlamaktadır. Bununla birlikte, CRYO ve MMY stratejisine ilişkin göreceli bir çalışma yaptığımızda, bitkisel yağın sıvı nitrojenden daha iyi sonuçlar verdiği fark edilmektedir. Bunun nedeni, MMY sisteminde kullanılan bitkisel yağın işlenmiş yüzey üzerinde koruyucu bir film oluşturmasıdır. Ayrıca bitkisel yağdaki yağ asidi bileşenleri, sürtünme aşınmasını en aza indirmede aktif rol oynayan ve sonuç olarak yüzey kalitesini iyileştiren metalik bir köpük oluşturmak için kesme malzemesiyle reaksiyona girmektedir [201].

ANOVA sonuçlarından görüleceği gibi, kuru kesme rejimlerinde yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerinde en etkin parametre ilerleme hızıdır. Kuru, kesme rejimleri için f 'nin etki seviyesi %69.53'tür. Diğer yandan, kesme hızının R_a üzerindeki etkisinin F_r 'ye oranla önemli miktarda yüksek olduğu görülmektedir. Kuru kesme koşullarında kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde %27.48'lik bir etki oranına sahip olduğu belirlenmiştir. İlerleme değerinin artması takıma etki eden kesme kuvveti değerlerinin artmasına neden olmaktadır. İlerlemedeki artış, kesici takımın iş parçasından birim zamanda daha fazla ilerlemesine ve işleme izlerinin artması neticesinde yüzey pürüzlülük değerlerinin de artmasına neden olmuştur [202]. MMY kesme rejiminde yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerinde en etkin parametre ilerleme hızıdır. MMY kesme rejimleri için f 'nin etki seviyesi %65.33'tür. Ayrıca kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde ortalama %24,88'lik bir etki oranına sahip olduğu görülmektedir. Ancak, yüksek kesme hızının takım aşınmasının hızlanacağı

göz ardı edilemeyeceği için özellikle paslanmaz çelik gibi malzemelerin frezelenmesinde kesme ortamına göre optimal kesme hızının uygulanması çok önemlidir.

Çizelge 7.2. Ra için ANOVA sonuçları.

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F Oranı	Etki Oranı (%)
Kuru					
V, m/dak	2	0.031671	0.015835	27.48	28.40
f, mm/dev	2	0.077532	0.038766	67.27	69.53
Hata	4	0.002305	0.000576		2.07
Toplam	8	0.111508			
MMY					
V, m/dak	2	0.015403	0.007701	5.08	24.88
f, mm/dev	2	0.040452	0.020226	13.34	65.33
Hata	4	0.006063	0.001516		9.79
Toplam	8	0.061918			
Grp+MMY					
V, m/dak	2	0.012088	0.0060	5.9900	19.32
f, mm/dev	2	0.046417	0.023208	22.99	74.21
Hata	4	0.004038	0.0010		6.45
Toplam	8	0.062544			
hBN+MMY					
V, m/dak	2	0.001536	0.0008	9.5500	5.0928
f, mm/dev	2	0.028302	0.0142	175.9100	93.8395
Hata	4	0.000322	0.0001		1.0676
Toplam	8	0.03016			
CRYO					
V, m/dak	2	0.01342	0.00671	6.08	20.92
f, mm/dev	2	0.046308	0.023154	20.99	72.20
Hata	4	0.004412	0.001103		6.88
Toplam	8	0.06414			
CRYO+MMY					
V, m/dak	2	0.005134	0.002567	8.68	13.1335
f, mm/dev	2	0.032774	0.016387	55.4	83.8403
Hata	4	0.001183	0.000296		3.0263
Toplam	8	0.039091			

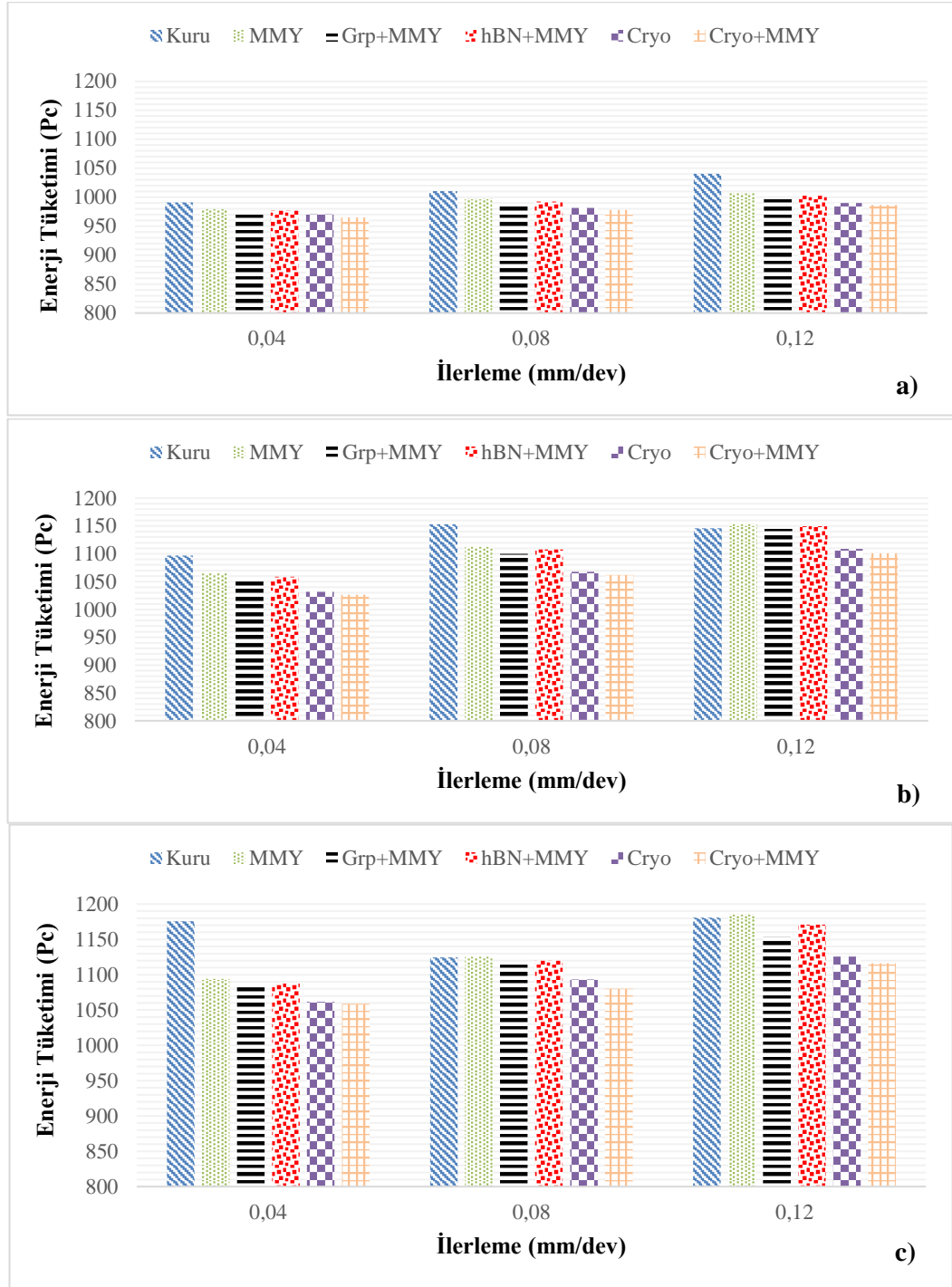
GRP+MMY kesme rejiminde yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde en etkin parametre diğer işleme koşullarında olduğu gibi ilerleme hızıdır. GRP+MMY kesme rejimleri için f'nin etki seviyesi %74.21'dir. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde ortalama %19.32'lik bir etki oranına sahip olduğu görülmektedir. Grafen nano

partiküllerinin işleme koşullarını iyileştirdiği etki seviye oranlarından görülmektedir. hBN+MMY kesme rejiminde yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde en etkin parametre diğer işleme koşullarında olduğu gibi ilerleme hızıdır. hBN+MMY kesme rejimleri için f 'nin etki seviyesi %93.83'tür. Ayrıca kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde ortalama %5.09'luk bir etki oranına sahip olduğu görülmektedir. Yapılan bir çalışmada [203] sürtünme katsayısının hBN konsantrasyonu ile önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Yine aynı çalışmaya göre bu durum, bir dereceye kadar, hBN nanoparçacıklarının etkili bir şekilde bilyalı yatak rolü oynadığını göstermektedir. Oluşan kayma sürtünmesi, sürtünme çifti arasında yuvarlanma sürtünmesine dönüşerek sürtünme yüzeyleri arasındaki temas alanının azalmasına neden olmuştur. Azalan temas alanı kesici takımın daha elverişli bir kesme işlemi gerçekleştirerek yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği düşünülmektedir. Kriyojenik kesme rejiminde yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde en etkin parametre diğer işleme koşullarında olduğu gibi ilerleme hızıdır. Kriyojenik işleme için f 'nin etki seviyesi %72.20'dir. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde ortalama %20.92'lik bir etki oranına sahip olduğu görülmektedir. CRYO+MMY kesme rejiminde yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde en etkin parametre diğer işleme koşullarında olduğu gibi ilerleme hızıdır. CRYO+MMY işleme için f 'nin etki seviyesi %83,84'tür. Ayrıca kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde ortalama %13,13'lük bir etki oranına sahip olduğu görülmektedir.

7.3. ENERJİ TÜKETİMİ

Demir çelik endüstrisi yüksek enerji tüketimi ve yüksek CO₂ salınımına sahip sektörlerden birisidir [204]. Dolayısıyla bu endüstrilerin temiz bir çevre açısından geleceği uygun yeşil üretim (daha az emisyon, çevreci soğutma sistemleri v.s.) proseslerine bağlıdır. Sürdürülebilir üretim, imalat endüstrilerinin karbon emisyonlarını, enerji tüketimini ve emülsiyon bazlı soğutucuların yaygın kullanımını azaltmasını gerektiren katı düzenlemelerin bir sonucu olarak popülerlik kazanmaktadır [205]. Sadece ekonomik yönleri değil, aynı zamanda potansiyel çevresel etkiyi de en aza indirmek için yeşil ve sürdürülebilir üretimin uygulanması giderek daha fazla tercih edilmektedir. Enerji tüketimi, çevreyi etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Takım tezgahlarının kinematiği ve dinamiğine dayalı enerji

modelleri oluşturularak hem malzeme akışı hem de takım akışı ile ilgili hususlar karşılıklı olarak birleştirilir. Böylece enerji tüketimleri ile üretim süreçlerinin karar değişkenleri arasındaki doğrudan ilişki tanımlanmış olacaktır [206]. Çalışmanın bu aşamasında farklı kesme hızı ve ilerleme miktarlarının yanında farklı soğutma koşulları kullanılarak enerji tüketimi deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.2. Enerji tüketimi değişimi; a)V=40 m/dak, b)V=60 m/ dak, c)V=80 m/ dak

Karmaşık kesme mekaniğine sahip frezeleme tekniklerinde parametre-güç tüketimi etkileşimleri daha da önemli hale gelir. Bu bağlamda çevre dostu kesme ortamlarında işleme parametrelerine göre enerji tüketimi değişimleri Şekil 7.3'te gösterilmektedir. Şekil 7.3'ten görülebileceği gibi kesme hızı sabit iken ilerleme hızı arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Tüm kesme ortamlarında ilerleme hızı 0,04 mm/dev'den 0,08 mm/dev'e çıktığında enerji tüketimi ortalama %3,14 artmıştır. Ayrıca ilerleme hızı 0,08 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e çıktığında bu artış oranı %2,46 olarak görülmektedir. Bu sonuç, ilerleme hızının artmasıyla artan talaş hacmini malzemeden uzaklaştırmak için gereken gücün artmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan kuru kesme dışında uygulanan sürdürülebilir kesme ortamlarının etkisiyle takım-talaş ara yüzeyi sürtünme kuvvetlerinin azalması kesme gücünü olumlu yönde etkilemektedir. Nitekim ilerleme miktarındaki artışına rağmen kriyojenik kesme ortamına doğru kesme gücünün azalma eğilimi bulunmaktadır. Kuru kesime göre enerji tüketimindeki bu azalma MMY, GRP+MMY, HBN+MMY, CRYO ve CRYO+MMY ortamları için sırasıyla ortalama %2,2, %3,17, %2,57, %4,88 ve %5,45 olarak hesaplanmıştır. MMY, GRP+MMY ve HBN+MMY ortamlarının sağladığı yağlama etkisinden dolayı takım-talaş temas alanının azalması nedeniyle enerji tüketimi azalmıştır. En düşük enerji tüketimi, CRYO+MMY ortamında elde edilmiştir ve bu sonuç, söz konusu ortamın sağladığı yağlama+soğutma kombinasyonu sayesinde ikinci deformasyon bölgesindeki sürtünme ve basıncın azalmasına bağlanabilir. Kriyojenik sıcaklık, iş malzemesinin yumuşamasını önleyip plastik deformasyonu zorlaştırırsa da [207], literatürde de belirtildiği gibi [208] talaş eğrilik yarıçapını azaltarak talaş basıncından dolayı kesme gücünün azalmasına katkıda bulunur. Öte yandan kesme hızının artmasıyla artan kesme sıcaklığı işlenen malzemeyi yumuşatarak kesme gücünün ve dolayısıyla enerji tüketiminin azalmasına neden olur. Deneylerde ise kesme hızının artmasıyla birlikte güç tüketiminin de arttığı görülmektedir (Şekil 7.3). Tüm kesme ortamlarında elde edilen bu durum iki nedene bağlanabilir. Birincisi, frezeleme işleminin aralıklı olarak talaş kaldırma işlemi yapması nedeniyle kesme sıcaklığının kesme hızının artmasıyla orantılı olarak artmamasıdır [208], [209]. Bu durumda kesme sıcaklığının malzeme yumuşatma etkisi azalacağından kesme gücünde beklenen azalma gerçekleşmemiştir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PH13-8 Mo çeliğinin frezelenmesinde ekolojik kesme koşullarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimi etkileri araştırılmıştır. Deneyler kuru, MMY, GRP+MMY, CRYO, CRYO+MMY ve hBN işleme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler optimize edilerek en uygun kesme koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyler, değişken kesme hızı (40-60-80 m/dak), ilerleme (0,04-0,08-0,12 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,8 mm) gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

8.1. KESME KUVVETİ SONUÇLARI

- Kuru işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek kesme kuvveti değeri 80 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 719,46 N olarak ölçülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 406,43 N şeklinde ölçülmüştür.
- MMY koşullarında ise yapılan deneylerde en yüksek kesme kuvveti değeri 80 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 649,82 N olarak ölçülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 382,31 N şeklinde ölçülmüştür. Kuru işlemeye kıyasla MMY kesme rejimi kullanıldığında kesme kuvvetlerinde ortalama %7,15 oranında iyileşme sağlanmıştır.
- Kuru ve MMY işlemeye kıyasla GRP+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla kesme kuvvetlerinde ortalama %14,62 ve %8,04'lük bir iyileşme görülmüştür.

- Kuru ve MMY işlemeye kıyasla hBN+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla kesme kuvvetlerinde ortalama %10,77 ve %3,89 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Fakat hBN+MMY işleme koşulunda, GRP+MMY işleme koşuluna göre kesme kuvvetlerinde %4,51 artış meydana gelmiştir.
- CRYO soğutma yönteminde, MMY, GRP+MMY ve hBN+MMY işleme koşullarında ortalama yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla %2,05, %10,98 ve %6,19'luk artış söz konusudur.
- Kuru, MMY ve CRYO işlemeye kıyasla CRYO+MMY işleme ortamı kullanıldığında kesme kuvvetlerinde sırasıyla %9, %2,1 ve %4'lük iyileşme görülmektedir. Diğer taraftan GRP+MMY ve hBN+MMY işleme koşullarında, CRYO+MMY kesme ortamına kıyasla kesme kuvvetlerinde sırasıyla %6,5 ve %2'lik artış görülmektedir.
- Tüm kesme koşulları incelendiğinde en düşük kesme kuvveti değerine (349,4 N) GRP+MMY kesme koşulunda ulaşılmıştır. En yüksek kesme kuvveti değeri ise (719,46 N) kuru kesme koşulunda görülmüştür.
- ANOVA sonuçları değerlendirildiğinde tüm kesme koşullarında ilerleme hızı kesme kuvveti üzerinde en etkin parametre olarak belirlenmiştir.

8.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ SONUÇLARI

- Kuru işlemede en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 60 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,804 µm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,423 µm şeklinde ölçülmüştür.
- Kuru işlemeye kıyasla MMY kesme rejimi kullanıldığında yüzey pürüzlülüğünde ortalama %22,03 oranında iyileşme sağlanmıştır.
- Kuru ve MMY işlemeye kıyasla GRP+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla yüzey pürüzlülüğünde ortalama %27,11 ve %6,45 oranında iyileşme sağlanmıştır.
- hBN+MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 40 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,476

μm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 60 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,304 μm şeklinde ölçülmüştür.

- Kuru, MMY, GRP+MMY işleme kiyasla hBN+MMY kesme rejimi kullanıldığında sırasıyla yüzey pürüzlülüğünde ortalama %35,5, %17,4 ve %11,6 oranlarında iyileşme sağlanmıştır.
- Kuru işleme kiyasla CRYO kesme rejimi kullanıldığında yüzey pürüzlülüğünde ortalama %20,59 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Fakat MMY, GRP+MMY ve hBN+MMY işleme koşullarında ortalama yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla %2,03, %9,07 ve %23,56'lık artış söz konusudur.
- CRYO+MMY işleme şartlarında yapılan deneylerde en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 40 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerlemede 0,529 μm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri hem 60 m/dak ve 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/dev ilerlemede 0,321 μm şeklinde ölçülmüştür.
- Tüm kesme koşulları incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değerine (0,304 μm) hBN+MMY kesme koşulunda ulaşılmıştır. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ise (0,804 μm) kuru kesme koşulunda görülmüştür.
- İlerleme hızı ANOVA sonuçları değerlendirildiğinde tüm kesme koşullarında yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkin parametre olarak belirlenmiştir.

8.3. ENERJİ TÜKETİMİ SONUÇLARI

- Tüm kesme ortamlarında ilerleme hızı 0,04 mm/dev'den 0,08 mm/dev'e çıktığında enerji tüketimi ortalama %3,14 artmıştır. Ayrıca ilerleme hızı 0,08 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e çıktığında bu artış oranı %2,46 olarak görülmektedir.
- En düşük enerji tüketimi, CRYO+MMY ortamında elde edilmiştir ve bu sonuç, söz konusu ortamın sağladığı yağlama+soğutma kombinasyonu sayesinde ikinci deformasyon bölgesindeki sürtünme ve basıncın azalmasına bağlanabilir.
- Yapılan deneylerde kesme hızının artmasıyla birlikte güç tüketiminin de arttığı görülmektedir.

- İlerleme miktarındaki artışına rağmen CRYO kesme ortamına doğru kesme gücünün azalma eğilimi bulunmaktadır.

Tüm sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; PH13-8 Mo çeliğinin Hibrid Nano MMY kesme koşulları altında frezelenmesinde, işleme verimliliği açısından olumlu sonuçların elde edildiği görülmüştür.

8.4. ÖNERİLER

- PH13-8Mo çeliğinin frezelenmesinde MMY yönteminin kullanılması önerilmektedir.
- Kesme sıvısı kullanımında MMY sisteminde biyolojik olarak parçalanabilen bitkisel esaslı yağ tercih edilmelidir.
- PH13-8Mo çeliğinin işlenmesinde iyi bir yüzey kalitesi ve temiz bir işleme süreci için Nano MMY olarak Grafen ve hBN kullanılması tavsiye edilmektedir.
- Enerji tüketiminin optimize edilebilmesi için soğutma stratejisi olarak CRYO+MMY yönteminin kullanılması önerilmektedir.
- Farklı geometrilere sahip kaplamalı takımlar kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Nano akışkan hazırlamada literatür verilerinden yararlanılarak farklı kombinasyonlar düzenlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Andersen, P. J., "1.3.3B - Stainless Steels", *Academic Press*, 249–255 (2020).
2. Singh, R., "Chapter 8 - Stainless Steels", *Butterworth-Heinemann*, Boston, 65–73 (2012).
3. Campanile, G., Prisco, A., Squillace, A., Bitondo, C., Dionoro, G., Buonadonna, P., Tronci, A., Fratini, L., and Palmeri, D., "FSW of AA2139-T8 Butt joints for aeronautical applications", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal Of Materials: Design And Applications*, 225 (2): 87–101 (2011).
4. Dursun, T. and Soutis, C., "Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys", *Materials & Design (1980-2015)*, 56: 862–871 (2014).
5. Campbell, F. C., "Chapter 5 - High Strength Steels", *Elsevier Science*, Oxford, 175–209 (2006).
6. Sha, W., Leitner, H., Guo, Z., and Xu, W., "11 - Phase transformations in maraging steels", Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, *Woodhead Publishing*, 332–362 (2012).
7. Gupta, M. K., Niesłony, P., Sarikaya, M., Korkmaz, M. E., Kuntoğlu, M., Królczyk, G. M., and Jamil, M., "Tool wear patterns and their promoting mechanisms in hybrid cooling assisted machining of titanium Ti-3Al-2.5V/grade 9 alloy", *Tribology International*, 174: 107773 (2022).
8. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Boy, M., Yaşar, N., Krolczyk, G. M., and Günay, M., "Influence of duplex jets MQL and nano-MQL cooling system on machining performance of Nimonic 80A", *Journal Of Manufacturing Processes*, 69 (July): 112–124 (2021).
9. Günay, M., Korkmaz, M. E., and Yaşar, N., "Performance analysis of coated carbide tool in turning of Nimonic 80A superalloy under different cutting environments", *Journal Of Manufacturing Processes*, 56 (May): 678–687 (2020)
10. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Singh, G., Kuntoğlu, M., Patange, A., Demirsoz, R., Ross, N. S., and Prasad, B., "Machine learning models for online detection of wear and friction behaviour of biomedical graded stainless steel 316L under lubricating conditions", *The International*

Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 128 (5–6): 2671–2688 (2023).

11. Shokrani, A., Betts, J., and Jawahir, I. S., "Improved performance and surface integrity in finish machining of Inconel 718 with electrically charged tungsten disulphide MQL", *CIRP Annals*, (2022).
12. Jyothish, P., Vasu, V., and Kashinath, D., "Experimental investigation study on enhancing the thermal and rheological properties of sunflower vegetable oil with ZnTiO₃, BN, CuO nanofluid for machining of Inconel-718 under minimum quantity lubrication (MQL)", *Materials Today: Proceedings*, 59: 1599–1607 (2022).
13. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Kuntoğlu, M., Patange, A. D., Ross, N. S., Yılmaz, H., Chauhan, S., and Vashishtha, G., "Prediction and classification of tool wear and its state in sustainable machining of Bohler steel with different machine learning models", *Measurement*, 223: 113825 (2023).
14. Rowe, G. W., "Some observations on the frictional behaviour of boron nitride and of graphite", *Wear*, 3 (4): 274–285 (1960).
15. Thachnatharen, N., Khalid, M., Arulraj, A., and Sridewi, N., "Tribological performance of hexagonal boron nitride (hBN) as nano-additives in military grade diesel engine oil", *Materials Today: Proceedings*, 50: 70–73 (2022).
16. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Boy, M., Yaşar, N., Krolczyk, G. M., and Günay, M., "Influence of duplex jets MQL and nano-MQL cooling system on machining performance of Nimonic 80A", *Journal Of Manufacturing Processes*, 69 (June): 112–124 (2021).
17. Palanisamy, D. and Senthil, P., "Machinability Study of Laser Surface Treated 15-5 PH Stainless Steel", *Materials And Manufacturing Processes*, 31 (13): 1755–1762 (2016).
18. Das, A., Pradhan, O., Patel, S. K., Das, S. R., and Biswal, B. B., "Performance appraisal of various nanofluids during hard machining of AISI 4340 steel", *Journal Of Manufacturing Processes*, 46 (September): 248–270 (2019).
19. Muaz, M. and Choudhury, S. K., "Experimental investigations and multi-objective optimization of MQL-assisted milling process for finishing of AISI 4340 steel", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 138: 557–569 (2019).
20. Öndin, O., Kıvık, T., Sarıkaya, M., and Yıldırım, Ç. V., "Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel", *Tribology International*, 148 (February): (2020).

21. da Silva, L. C., da Mota, P. R., da Silva, M. B., Ezugwu, E. O., and Machado, Á. R., "Study of burr height in face milling of PH 13-8 Mo stainless steel--Transition from primary to secondary burr and benefits of deburring between passes", *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 10: 61–67 (2014).
22. Venkata Subbaiah, K., Raju, C., Pawade, R. S., and Suresh, C., "Machinability investigation with wiper ceramic insert and optimization during the hard turning of AISI 4340 steel", *Materials Today: Proceedings*, 18: 445–454 (2019).
23. Taylor, C. M., Díaz, F., Alegre, R., Khan, T., Arrazola, P., Griffin, J., and Turner, S., "Investigating the performance of 410, PH13-8Mo and 300M steels in a turning process with a focus on surface finish", *Materials And Design*, 195: (2020).
24. Khanna, N., Shah, P., Maruda, R. W., Krolczyk, G. M., and Hegab, H., "Experimental investigation and sustainability assessment to evaluate environmentally clean machining of 15-5 PH stainless steel", *Journal Of Manufacturing Processes*, 56: 1027–1038 (2020).
25. Palanisamy, D., Devaraju, A., Harikrishnan, S., and Manikandan, N., "Machinability Studies on CNC Turning of PH Stainless Steel with Coated Inserts", *Materials Today: Proceedings*, 5 (6, Part 2): 14520–14525 (2018).
26. Sivaiah, P. and Chakradhar, D., "Modeling and optimization of sustainable manufacturing process in machining of 17-4 PH stainless steel", *Measurement*, 134: 142–152 (2019).
27. Kumar Gupta, M., Boy, M., Erdi Korkmaz, M., Yaşar, N., Günay, M., and Krolczyk, G. M., "Measurement and analysis of machining induced tribological characteristics in dual jet minimum quantity lubrication assisted turning of duplex stainless steel", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 187 (October 2021): (2022).
28. Singh, G., Kumar, A., Aggarwal, V., and Singh, S., "Experimental investigations and optimization of machining performance during turning of EN-31 steel using TOPSIS approach", *Materials Today: Proceedings*, 48: 1089–1094 (2021).
29. Jiang, H., Wang, C., Ren, Z., and He, L., "Comparative Analysis of Residual Stress and Dislocation Density of Machined Surface during Turning of High Strength Steel", *Procedia CIRP*, 101: 38–41 (2021).
30. Sivaiah, P. and Chakradhar, D., "Performance improvement of cryogenic turning process during machining of 17-4 PH stainless steel using multi

- objective optimization techniques", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 136: 326–336 (2019).
31. J, R. and N, A., "A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 276 (March 2019): 116417 (2020).
 32. Sivaiah, P. and Chakradhar, D., "Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel: A comparison with MQL, wet, dry machining", *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 21: 86–96 (2018).
 33. Khanna, N., Shah, P., and Chetan, "Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO2 techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy", *Tribology International*, 146 (January): 106196 (2020).
 34. Gурpur Vignesh, K., Achar, B. P., and Hebbale, A. M., "Correlation analysis of Machining parameters against cutting forces during Machining of 17–4 PHSS using cryogenic treated and untreated WC insert", *Materials Today: Proceedings*, 52 (3): 1639–1643 (2022).
 35. Clavier, F., Valiorgue, F., Courbon, C., Dumas, M., Rech, J., Robaeys, A. Van, Lefebvre, F., Brosse, A., and Karaouni, H., "Impact of cutting tool wear on residual stresses induced during turning of a 15-5 PH stainless steel", *Procedia CIRP*, 87: 107–112 (2020).
 36. Patel, U., Rawal, S., Bose, B., Arif, A. F. M., and Veldhuis, S., "Performance evaluations of Ti-based PVD coatings deposited on cermet tools for high-speed dry finish turning of AISI 304 stainless steel", *Wear*, 492–493 (September 2021): 204214 (2022).
 37. Agrawal, S. M. and Patil, N. G., "Experimental study of non edible vegetable oil as a cutting fluid in machining of M2 Steel using MQL", *Procedia Manufacturing*, 20: 207–212 (2018).
 38. Yıldırım, Ç. V., Şirin, Ş., Kıvık, T., and Sarıkaya, M., "A comparative study on the tribological behavior of mono&proportional hybrid nanofluids for sustainable turning of AISI 420 hardened steel with cermet tools", *Journal Of Manufacturing Processes*, 73 (December 2021): 695–714 (2022).
 39. Wang, B. and Liu, Z., "Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 55: 24–32 (2016).
 40. Kazeem, R. A., Fadare, D. A., Abutu, J., Lawal, S. A., and Adesina, O. S., "Performance evaluation of jatropa oil-based cutting fluid in turning AISI

- 1525 steel alloy", *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 31: 418–430 (2020).
41. Tanmai Sai Geetha, C. H., Dash, A. K., Kavya, B., and Amrita, M., "Analysis of hybrid nanofluids in machining AISI 4340 using minimum quantity lubrication", *Materials Today: Proceedings*, 43: 579–586 (2020).
 42. Santosh, Riyaz Ahmed, M., Loksha, M., and Manjunath, L. H., "Investigating the Impact of Deep Cryogenic Treatment on Surface Roughness and Cutting Force in Turning C45 Steel", *Materials Today: Proceedings*, 24: 1190–1198 (2020).
 43. Amaro, P., Ferreira, P., and Simões, F., "Comparative analysis of different cutting milling strategies applied in duplex stainless steel", *Procedia Manufacturing*, 47 (2019): 517–524 (2020).
 44. Pal, A., Chatha, S. S., and Sidhu, H. S., "Performance evaluation of the minimum quantity lubrication with Al₂O₃- mixed vegetable-oil-based cutting fluid in drilling of AISI 321 stainless steel", *Journal Of Manufacturing Processes*, 66 (November 2019): 238–249 (2021).
 45. Das, A., Patel, S. K., Biswal, B. B., Sahoo, N., and Pradhan, A., "Performance evaluation of various cutting fluids using MQL technique in hard turning of AISI 4340 alloy steel", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 150: 107079 (2020).
 46. Roy, S. and Ghosh, A., "High-speed turning of AISI 4140 steel by multi-layered TiN top-coated insert with minimum quantity lubrication technology and assessment of near tool-tip temperature using infrared thermography", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 228 (9): 1058–1067 (2014).
 47. Gajrani, K. K., Suvin, P. S., Kailas, S. V., and Sankar, M. R., "Hard machining performance of indigenously developed green cutting fluid using flood cooling and minimum quantity cutting fluid", *Journal Of Cleaner Production*, 206: 108–123 (2019).
 48. Amini, S., Khakbaz, H., and Barani, A., "Improvement of near-dry machining and its effect on tool wear in turning of AISI 4142", *Materials And Manufacturing Processes*, 30 (2): 241–247 (2015).
 49. Su, Y., Gong, L., Li, B., Liu, Z., and Chen, D., "Performance evaluation of nanofluid MQL with vegetable-based oil and ester oil as base fluids in turning", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (9–12): 2083–2089 (2016).
 50. Das, A., Tirkey, N., Patel, S. K., Das, S. R., and Biswal, B. B., "A Comparison of Machinability in Hard Turning of EN-24 Alloy Steel Under

Mist Cooled and Dry Cutting Environments with a Coated Cermet Tool", *Journal Of Failure Analysis And Prevention*, 19 (1): 115–130 (2019).

51. Korkmaz, M. E., Yaşar, N., and Günay, M., "Numerical and experimental investigation of cutting forces in turning of Nimonic 80A superalloy", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 23 (3): 664–673 (2020).
52. Chetan, Behera, B. C., Ghosh, S., and Rao, P. V., "Wear behavior of PVD TiN coated carbide inserts during machining of Nimonic 90 and Ti6Al4V superalloys under dry and MQL conditions", *Ceramics International*, 42 (13): 14873–14885 (2016).
53. Jagatheesan, K., Babu, K., and Madhesh, D., "Experimental investigation of machining parameter in MQL turning operation using AISI 4320 alloy steel", *Materials Today: Proceedings*, 46: 4331–4335 (2020).
54. Gupta, A., Kumar, R., Kumar, H., and Garg, H., "Comparative performance of pure vegetable oil and Al₂O₃ based vegetable oil during MQL turning of AISI 4130", *Materials Today: Proceedings*, 28: 1662–1666 (2020).
55. An, Q., Cai, C., Zou, F., Liang, X., and Chen, M., "Tool wear and machined surface characteristics in side milling Ti6Al4V under dry and supercritical CO₂ with MQL conditions", *Tribology International*, 151 (May): 106511 (2020).
56. Houchuan, Y., Zhitong, C., and ZiTong, Z., "Influence of cutting speed and tool wear on the surface integrity of the titanium alloy Ti-1023 during milling", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 78 (5–8): 1113–1126 (2015).
57. Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., and 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).
58. Khan, M. M. A., Mithu, M. A. H., and Dhar, N. R., "Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (15–16): 5573–5583 (2009).
59. Chinchankar, S. and Choudhury, S. K., "Hard turning using HiPIMS-coated carbide tools: Wear behavior under dry and minimum quantity lubrication (MQL)", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 55: 536–548 (2014).
60. Dhar, N. R., Islam, M. W., Islam, S., and Mithu, M. A. H., "The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip

- and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 171 (1): 93–99 (2006).
61. Gajrani, K. K., Ram, D., and Ravi Sankar, M., "Biodegradation and hard machining performance comparison of eco-friendly cutting fluid and mineral oil using flood cooling and minimum quantity cutting fluid techniques", *Journal Of Cleaner Production*, 165: 1420–1435 (2017).
 62. Durga Prasad Rao, V., Mahaboob Ali, S. R. S., Saqheed Ali, S. M. Z. M., and Navya Geethika, V., "Multi-objective optimization of cutting parameters in CNC turning of stainless steel 304 with TiAlN nano coated tool", *Materials Today: Proceedings*, 5 (12): 25789–25797 (2018).
 63. Dhananchezian, M., Priyan, M. R., Rajashekar, G., and Narayanan, S. S., "Study the Effect of Cryogenic Cooling on Machinability Characteristics during Turning Duplex Stainless Steel 2205", *Materials Today: Proceedings*, 5 (5): 12062–12070 (2018).
 64. Günay, M., Meral, T., and Korkmaz, M. E., "Drillability Analysis of AISI 420 Martensitic Stainless Steel by Finite Element Method", *Gazi Journal Of Engineering Sciences*, 4 (3): 223–229 (2018).
 65. Bhadeshia, H., Honeycombe, R., Bhadeshia, H., and Honeycombe, R., "Chapter 12 – Stainless Steel", *Steels: Microstructure and Properties*, 4. Ed., *Elsevier Ltd*, 343–376 (2017).
 66. Krolczyk, J. B., Maruda, R. W., Krolczyk, G. M., Wojciechowski, S., Gupta, M. K., and Korkmaz, M. E., "Investigations on surface induced tribological characteristics in MQCL assisted machining of duplex stainless steel", *Journal Of Materials Research And Technology*, 18: 2754–2769 (2022).
 67. Fernández-Abia, A. I., García, J. B., and López de Lacalle, L. N., "High-Performance Machining of Austenitic Stainless Steels", *Machining and Machine-Tools*, *Woodhead Publishing Limited*, 29–90 (2013).
 68. Singh, B., Reddy, D., Chowdary, S., Sravan Sashank, S., and Karthikeyan, R., "Dissimilar joining of different grades of ferritic stainless steel: A review", *Materials Today: Proceedings*, (2022).
 69. Korkmaz, M. E., "Determination and Verification of Johnson--Cook Parameters for 430 Ferritic Steels via Different Gage Lengths", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 72: 2663–2672 (2019).
 70. Korkmaz, M. E., "Verification of Johnson-Cook parameters of ferritic stainless steel by drilling process: Experimental and finite element simulations", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (3): 6322–6330 (2020).

71. Kumar Gupta, M., Boy, M., Erdi Korkmaz, M., Yaşar, N., Günay, M., and Krolczyk, G. M., "Measurement and analysis of machining induced tribological characteristics in dual jet minimum quantity lubrication assisted turning of duplex stainless steel", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 187: (2022).
72. Demirsoz, R., Uğur, A., Erdoğan, A. E., Korkmaz, M. E., and Gupta, M. K., "Abrasive Wear Behavior of Nano-Sized Steel Scale on Soft CuZn35Ni2 Material", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, (2022).
73. Suzanne Degallaix-Moreuil, I. A.-A., "Duplex Stainless Steels", *Wiley-ISTE*, 447 (2009).
74. Sonawane, G. D. and Sargade, V. G., "Machinability Study of Duplex Stainless Steel 2205 During Dry Turning", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 21 (5): 969–981 (2020).
75. Erbing, M. L. and Groth, H. L., "Duplex stainless steels—weight saving in structural applications", *New Steel Construction*, 1 (4): 30–31 (1993).
76. Snis, M. and Olsson, J., "Reduce costs for storage and distribution of desalted water—Use duplex stainless steel", *Desalination*, 223 (1–3): 476–486 (2008).
77. Murakami, Y., "17 - Martensitic stainless steels", *Academic Press*, 431–451 (2019).
78. Niessen, F., Apel, D., Danoix, F., Hald, J., and Somers, M. A. J., "Evolution of substructure in low-interstitial martensitic stainless steel during tempering", *Materials Characterization*, 167: 110494 (2020).
79. Dourandish, S., Jahazi, M., Ebrahimi, G. R., and Ebacher, L., "Influence of eutectic phase precipitation on cracking susceptibility during forging of a martensitic stainless steel for turbine shaft applications", *Journal Of Materials Research And Technology*, 13: 260–270 (2021).
80. Ranaware, P. G., "Effect of severe plastic deformation on aging kinetics of precipitation hardening 17–4 stainless steel", *Materials Today: Proceedings*, (2022).
81. Sun, H., Li, D., Diao, Y., He, Y., Yan, L., Pang, X., and Gao, K., "Nanoscale Cu particle evolution and its impact on the mechanical properties and strengthening mechanism in precipitation-hardening stainless steel", *Materials Characterization*, 188: 111885 (2022).
82. Anoop, C. R., Prakash, A., Giri, S. K., Narayana Murty, S. V. S., and Samajdar, I., "Optimization of hot workability and microstructure control

in a 12Cr-10Ni precipitation hardenable stainless steel: An approach using processing maps", *Materials Characterization*, 141: 97–107 (2018).

83. Yurtkuran, H., Boy, M., and Günay, M., "Investigation of machinability indicators during sustainable milling of 17-4PH stainless steel under dry and MQL environments", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, (2023).
84. Al Dawood, M., El Mahallawi, I. S., Abd El Azim, M. E., and El Koussy, M. R., "Thermal aging of 16Cr–5Ni–1Mo stainless steel Part 1–Microstructural analysis", *Materials Science And Technology*, 20 (3): 363–369 (2004).
85. Öndin, O., Kıvak, T., Sarıkaya, M., and Yıldırım, Ç. V., "Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel", *Tribology International*, 148: 106323 (2020).
86. Nimel Sworna Ross, K., G, M., Anwar, S., Rahman, M. A., Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Alfaify, A., and Mia, M., "Investigation of surface modification and tool wear on milling Nimonic 80A under hybrid lubrication", *Tribology International*, 155: 106762 (2021).
87. Ross, N. S., Gopinath, C., Nagarajan, S., Gupta, M. K., Shanmugam, R., Kumar, M. S., Boy, M., and Korkmaz, M. E., "Impact of hybrid cooling approach on milling and surface morphological characteristics of Nimonic 80A alloy", *Journal Of Manufacturing Processes*, 73: 428–439 (2022).
88. Mikell P. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems Seventh Edition", *Journal of Chemical Information and Modeling*, 21–25 (2020).
89. Morelli, L., Grossi, N., Campatelli, G., and Scippa, A., "Surface location error prediction in 2.5-axis peripheral milling considering tool dynamic stiffness variation", *Precision Engineering*, 76: 95–109 (2022).
90. Ekici, E., Motorcu, A. R., and Uzun, G., "An investigation of the effects of cutting parameters and graphite reinforcement on quality characteristics during the drilling of Al/10B4C composites", *Measurement*, 95: 395–404 (2017).
91. Sandvik, "AB Sandvik Coromant", SE-811 81. Ed., *Sandviken*, Sweden, (2012).
92. Korkmaz, M. E. and Nafiz Yaşar, "FEM modelling of turning of AA6061-T6: Investigation of chip morphology, chip thickness and shear angle", *Journal Of Production Systems And Manufacturing Science*, 2 (1): 50–58 (2021).

93. Korkmaz, M. E., Yaşar, N., and Günay, M., "Numerical and experimental investigation of cutting forces in turning of Nimonic 80A superalloy", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 23 (3): 664–673 (2020).
94. Korkmaz, M. E. and Günay, M., "Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 43 (9): 4863–4870 (2018).
95. KORKMAZ, M. E., "Nikel Esaslı Süper Alaşımın (Nimonic 80A) Malzeme Yapısal Denklem Parametrelerinin Belirlenmesi ve Uygulanabilirliğinin Araştırılması", *Karabük Üniversitesi Doktora Tezi*, (2018).
96. Kumar Gupta, M., Korkmaz, M. E., Sarıkaya, M., Krolczyk, G. M., and Günay, M., "In-process detection of cutting forces and cutting temperature signals in cryogenic assisted turning of titanium alloys: An analytical approach and experimental study", *Mechanical Systems And Signal Processing*, 169: 108772 (2022).
97. Şirin, Ş., "Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments", *Journal Of Manufacturing Processes*, 76: 428–443 (2022).
98. Kivak, T., Uzun, G., and Ekici, E., "An experimental and statistical evaluation of the cutting parameters on the machinability of hadfield steel", *Gazi University Journal Of Science*, 29 (1): 9–17 (2016).
99. Yilmaz, B., Uzun, G., and Güllü, A., "The Effects of Cutting Parameters on the Thrust Force, Cutting Moment and Cutting Temperature in Drilling Process Applied to Ti6Al4V Material", *Manufacturing Technologies And Applications*, 1 (3): 1–8 (2020).
100. Mavi, A. and Uzun, G., "The Effect of Cutting Parameters on Machinability in Turning of Duplex 1.4462 Stainless Steels", *GU J Sci, Part C*, 5 (3): 177–184 (2017).
101. Bhushan, B., "Surface roughness analysis and measurement techniques", *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles Of Tribology*, 49–119 (2000).
102. Ghazali, M. F., Abdullah, M. M., Abd Rahim, S. Z., Gondro, J., Pietrusiewicz, P., Garus, S., Stachowiak, T., Sandu, A. V, Mohd Tahir, M. F., Korkmaz, M. E., and Osman, M. S., "Tool Wear and Surface Evaluation in Drilling Fly Ash Geopolymer Using HSS, HSS-Co, and HSS-TiN Cutting Tools", *Materials*, 14 (7): 1628 (2021).

103. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Demirsöz, R., Boy, M., Yaşar, N., Günay, M., and Ross, N. S., "On tribological characteristics of TiC rollers machined under hybrid lubrication/cooling conditions", *Tribology International*, 174: 107745 (2022).
104. Erden, M. A., Yaşar, N., Korkmaz, M. E., Ayvaci, B., Nimel Sworna Ross, K., and Mia, M., "Investigation of microstructure, mechanical and machinability properties of Mo-added steel produced by powder metallurgy method", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 114: 2811–2827 (2021).
105. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Li, Z., Krolczyk, G. M., Kuntoğlu, M., Binali, R., Yaşar, N., and Pimenov, D. Yu., "Indirect monitoring of machining characteristics via advanced sensor systems: a critical review", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 120 (11–12): 7043–7078 (2022).
106. Binali, R., Kuntoğlu, M., Yu. Pimenov, D., Ali Usca, Ü., Kumar Gupta, M., and Erdi Korkmaz, M., "Advance monitoring of hole machining operations via intelligent measurement systems: A critical review and future trends", *Measurement*, 201: 111757 (2022).
107. Uzun, M., Usca, Ü. A., Kuntoğlu, M., and Gupta, M. K., "Influence of tool path strategies on machining time, tool wear, and surface roughness during milling of AISI X210Cr12 steel", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, (2022).
108. Jackson, R. L., "Lubrication", *Handbook Of Lubrication And Tribology, Volume II: Theory And Design, Second Edition*, 123: 14-1-14–14 (2012).
109. Günay, M. and Korkmaz, M. E., "Optimization of honing parameters for renewal of cylinder liners", *Gazi University Journal Of Science*, 30 (1): (2017).
110. Çakıroğlu, R. and Günay, M., "Analysis of surface roughness and energy consumption in turning of C17500 copper alloy under different machining environments and modellings with response surface method", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, 095440892211013 (2022).
111. Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., Sarıkaya, M., and Şirin, Ş., "Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (2): 2079–2092 (2020).
112. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Günay, M., Boy, M., Yaşar, N., Demirsöz, R., Ross, K. N. S., and Abbas, Y., "Comprehensive analysis of tool wear,

- surface roughness and chip morphology in sustainable turning of Inconel-601 alloy", *Journal Of Manufacturing Processes*, 103: 156–167 (2023).
113. Yurtkuran, H., Korkmaz, M. E., and Günay, M., "Modelling and optimization of the surface roughness in high speed hard turning with coated and uncoated CBN insert", *Gazi University Journal Of Science*, 29 (4) (4): 987–995 (2016).
 114. Yaşar, N., Korkmaz, M. E., and Günay, M., "Investigation on hole quality of cutting conditions in drilling of CFRP composite", (2017).
 115. Uslu, G., Demirhan, M., Yaşar, N., and Korkmaz, M. E., "Influence of Glass Fiber Ratio on Machining Characteristics of PA66 Polymer for Aerospace Applications", *Manufacturing Technologies And Applications*, 3 (1): 59–66 (2022).
 116. Korkmaz, M. E., Çakıroğlu, R., Yaşar, N., Özmen, R., and Günay, M., "Finite Element Analysis of Thrust Force in Drilling of Al2014 Aluminum Alloy", *El-Cezerî Journal Of Science And Engineering*, 6 (1): 193–199 (2019).
 117. Yaşar, N., Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Boy, M., and Günay, M., "A novel method for improving drilling performance of CFRP/Ti6AL4V stacked materials", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 117 (1): 653–673 (2021).
 118. Gupta, M. K., Niesłony, P., Korkmaz, M. E., Kuntoğlu, M., Królczyk, G. M., Günay, M., and Sarikaya, M., "Comparison of Tool Wear, Surface Morphology, Specific Cutting Energy and Cutting Temperature in Machining of Titanium Alloys Under Hybrid and Green Cooling Strategies", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology*, (2023).
 119. Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., Yılmaz, H., Şirin, Ş., Ross, N. S., Jamil, M., Królczyk, G. M., and Sharma, V. S., "Real-time monitoring and measurement of energy characteristics in sustainable machining of titanium alloys", *Measurement*, 224: 113937 (2024).
 120. Sharma, S., Singh, J., Gupta, M. K., Mia, M., Dwivedi, S. P., Saxena, A., Chattopadhyaya, S., Singh, R., Pimenov, D. Y., and Korkmaz, M. E., "Investigation on mechanical, tribological and microstructural properties of Al–Mg–Si–T6/SiC/muscovite-hybrid metal-matrix composites for high strength applications", *Journal Of Materials Research And Technology*, 12: 1564–1581 (2021).
 121. Zhao, G. Y., Liu, Z. Y., He, Y., Cao, H. J., and Guo, Y. B., "Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy", *Energy*, 133: 142–157 (2017).

122. Liu, Z. Y., Sealy, M. P., Li, W., Zhang, D., Fang, X. Y., Guo, Y. B., and Liu, Z. Q., "Energy consumption characteristics in finish hard milling", *Journal Of Manufacturing Processes*, 35 (August): 500–507 (2018).
123. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Çelik, E., Ross, N. S., and Günay, M., "Tool wear and its mechanism in turning aluminum alloys with image processing and machine learning methods", *Tribology International*, 191: 109207 (2024).
124. Sivalingam, V., Liu, H., Selvam, B., Kai, G., Kumar, P. G., Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., and Sun, J., "Towards sustainability assessment, energy consumption, and carbon emissions in cryogenic drilling of Alloy 20: a new approach towards sustainable future and challenges", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 131 (3–4): 1151–1165 (2024).
125. Günen, A., Döleker, K. M., Korkmaz, M. E., Gök, M. S., and Erdogan, A., "Characteristics, high temperature wear and oxidation behavior of boride layer grown on nimonic 80A Ni-based superalloy", *Surface And Coatings Technology*, 409: 126906 (2021).
126. Erdogan, A., Yener, T., Doleker, K. M., Korkmaz, M. E., and Gök, M. S., "Low-temperature aluminizing influence on degradation of nimonic 80A surface: Microstructure, wear and high temperature oxidation behaviors", *Surfaces And Interfaces*, 25: 101240 (2021).
127. Grzesik, W., "Tool Wear and Damage", *Advanced Machining Processes Of Metallic Materials*, 215–239 (2017).
128. Chinchankar, S., Kore, S. S., and Hujare, P., "A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining", *Journal Of Manufacturing Processes*, 68 (PA): 56–70 (2021).
129. Nazma Sultana, Mst., Ranjan Dhar, N., and Binte Zaman, P., "A Review on Different Cooling/Lubrication Techniques in Metal Cutting", *American Journal Of Mechanics And Applications*, 7 (4): 71 (2019).
130. Grzesik, W. and Grzesik, W., "Chapter Ten – Cutting Fluids", *Advanced Machining Processes Of Metallic Materials*, 183–195 (2017).
131. Şirin, Ş. and Kıvak, T., "Effects of hybrid nanofluids on machining performance in MQL-milling of Inconel X-750 superalloy", *Journal Of Manufacturing Processes*, 70: 163–176 (2021).
132. Şirin, Ş. and Kıvak, T., "Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy", *Tribology International*, 137: 180–192 (2019).

133. Şirin, Ş. and Kıvak, T., "Effects of hybrid nanofluids on machining performance in MQL-milling of Inconel X-750 superalloy", *Journal Of Manufacturing Processes*, 70 (June): 163–176 (2021).
134. Sharma, V. S., Dogra, M., and Suri, N. M., "Cooling techniques for improved productivity in turning", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 49 (6): 435–453 (2009).
135. Korkmaz, M. E. and Günay, M., "Experimental and Statistical Analysis on Machinability of Nimonic80A Superalloy with PVD Coated Carbide", *Sigma Journal Of Engineering And Natural Sciences*, 36 (4): 1141–1152 (2018).
136. Günay, M., Korkmaz, M. E., and Yaşar, N., "Performance analysis of coated carbide tool in turning of Nimonic 80A superalloy under different cutting environments", *Journal Of Manufacturing Processes*, 56: 678–687 (2020).
137. Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., Shibi, C. S., Ross, N. S., Singh, G., Demirsöz, R., Jamil, M., and Królczyk, G. M., "Tribological characteristics of additively manufactured 316 stainless steel against 100 cr6 alloy using deep learning", *Tribology International*, 188: 108893 (2023).
138. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., and Demirsöz, R., "Understanding the lubrication regime phenomenon and its influence on tribological characteristics of additively manufactured 316 Steel under novel lubrication environment", *Tribology International*, 173: 107686 (2022).
139. Gupta, M. K., Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., and Ross, N. S., "Wear and Friction Mechanism of Stainless Steel 420 Under Various Lubrication Conditions: A Tribological Assessment With Ball on Flat Test", *Journal Of Tribology*, 145 (4): (2023).
140. Singh, G., Aggarwal, V., and Singh, S., "Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining", *Journal Of Cleaner Production*, 271: 122185 (2020).
141. Ross, N. S., Ganesh, M., Srinivasan, D., Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., and Krolczyk, J. B., "Role of sustainable cooling/lubrication conditions in improving the tribological and machining characteristics of Monel-400 alloy", *Tribology International*, 176: 107880 (2022).
142. Ross, N. S., Srinivasan, N., Amutha, P., Gupta, M. K., and Korkmaz, M. E., "Thermo-physical, tribological and machining characteristics of Hastelloy C276 under sustainable cooling/lubrication conditions", *Journal Of Manufacturing Processes*, 80: 397–413 (2022).

143. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Ross, N. S., and Sivalingam, V., "Implementation of green cooling/lubrication strategies in metal cutting industries: A state of the art towards sustainable future and challenges", *Sustainable Materials And Technologies*, e00641 (2023).
144. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Krolczyk, G. M., Maruda, R. W., and Li, Z., "Effect of nanoparticles as a lubricants in nano-MQL machining of metallic materials: A review", *2021 6th International Conference On Nanotechnology For Instrumentation And Measurement, NanofIM 2021*, (2021).
145. Hamran, N. N. N., Ghani, J. A., Ramli, R., and Haron, C. H. C., "A review on recent development of minimum quantity lubrication for sustainable machining", *Journal Of Cleaner Production*, 268: 122165 (2020).
146. Sidabutar, R. A., Ginting, A., and Sutarman, "System Design and Development of MQL Unit for Hard Machining Application: A Review", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1003 (1): (2020).
147. Tai, B. L., Stephenson, D. A., Furness, R. J., and Shih, A. J., "Minimum quantity lubrication (MQL) in automotive powertrain machining", *Procedia CIRP*, 14: 523–528 (2014).
148. Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, A. M., Jamil, M., and Bellos, E., "A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 105 (5–6): 2057–2086 (2019).
149. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Boy, M., Yaşar, N., Krolczyk, G. M., and Günay, M., "Influence of duplex jets MQL and nano-MQL cooling system on machining performance of Nimonic 80A", *Journal Of Manufacturing Processes*, 69: 112–124 (2021).
150. Hemmat Esfe, M., Bahiraei, M., and Mir, A., "Application of conventional and hybrid nanofluids in different machining processes: A critical review", *Advances In Colloid And Interface Science*, 282: 102199 (2020).
151. Korkmaz, M. E., "Impact of Nanoparticles on the Tribological Behavior of Cutting Fluids in Machining", *Nanomaterials in Manufacturing Processes, CRC Press, Taylor & Francis Group*, (2022).
152. Uysal, C. and Korkmaz, M. E., "Estimation of Entropy Generation for Ag-MgO/Water Hybrid Nanofluid Flow through Rectangular Minichannel by Using Artificial Neural Network", *Journal Of Polytechnic*, 22 (1): 41–51 (2019).

153. Ross, N. S., Ganesh, M., Ananth, M. B. J., Kumar, M., Rai, R., Gupta, M. K., and Korkmaz, M. E., "Development and potential use of MWCNT suspended in vegetable oil as a cutting fluid in machining of Monel 400", *Journal Of Molecular Liquids*, 382: 121853 (2023).
154. Yıldırım, Ç. V., "Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL", *Tribology International*, 144: 106127 (2020).
155. Etri, H. E. L., Singla, A. K., Özdemir, M. T., Korkmaz, M. E., Demirsöz, R., Gupta, M. K., Krolczyk, J. B., and Ross, N. S., "Wear performance of Ti-6Al-4 V titanium alloy through nano-doped lubricants", *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 23 (3): 147 (2023).
156. Çamlı, K. Y., Demirsöz, R., Boy, M., Korkmaz, M. E., Yaşar, N., Giasin, K., and Pimenov, D. Y., "Performance of MQL and Nano-MQL Lubrication in Machining ER7 Steel for Train Wheel Applications", *Lubricants*, 10 (4): 48 (2022).
157. Li, M., Yu, T., Zhang, R., Yang, L., Li, H., and Wang, W., "MQL milling of TC4 alloy by dispersing graphene into vegetable oil-based cutting fluid", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 99 (5–8): 1735–1753 (2018).
158. Shokrani, A., Al-Samarrai, I., and Newman, S. T., "Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy", *Journal Of Manufacturing Processes*, 43: 229–243 (2019).
159. Junankar, A. A., Parate, S. R., Dethé, P. K., Dhote, N. R., Gadkar, D. G., Gadkar, D. D., and Gajbhiye, S. A., "A Review: Enhancement of turning process performance by effective utilization of hybrid nanofluid and MQL", *Materials Today: Proceedings*, 38: 44–47 (2021).
160. Syafiq, A. M., Redhwan, A. A. M., Hazim, A. A., Aminullah, A. R. M., Zainal Ariffin, S., Nughoro, W., Arifuddin, A., and Hawa, A. B. S., "An Experimental Evaluation of SiO₂ nano cutting fluids in CNC Turning of Aluminium Alloy AL319 via MQL Technique.", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1068 (1): 012009 (2021).
161. Shukla, R., Tiwari, A. K., and Agarawal, S., "Effects of surfactant and MoO₃ nanofluid on tribological and machining characteristics in minimum quantity lubrication (MQL)-turning of AISI 304 steel", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, 09544089221105928 (2022).
162. Mahboob Ali, M. A., Azmi, A. I., Mohd Khalil, A. N., and Leong, K. W., "Experimental study on minimal nanolubrication with surfactant in the turning of titanium alloys", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 92 (1): 117–127 (2017).

163. Şirin, E., Kıvık, T., and Yıldırım, Ç. V., "Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X", *Tribology International*, 157 (November 2020): 106894 (2021).
164. Airao, J., Nirala, C. K., Bertolini, R., Krolczyk, G. M., and Khanna, N., "Sustainable cooling strategies to reduce tool wear, power consumption and surface roughness during ultrasonic assisted turning of Ti-6Al-4V", *Tribology International*, 169: 107494 (2022).
165. Şirin, Ş., Sarıkaya, M., Yıldırım, Ç. V., and Kıvık, T., "Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL", *Tribology International*, 153: 106673 (2021).
166. Kumar Gupta, M., Korkmaz, M. E., Sarıkaya, M., Krolczyk, G. M., and Günay, M., "In-process detection of cutting forces and cutting temperature signals in cryogenic assisted turning of titanium alloys: An analytical approach and experimental study", *Mechanical Systems And Signal Processing*, 169: 108772 (2022).
167. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Boy, M., Yaşar, N., Krolczyk, G. M., and Günay, M., "Influence of duplex jets MQL and nano-MQL cooling system on machining performance of Nimonic 80A", *Journal Of Manufacturing Processes*, 69: 112–124 (2021).
168. Nieslony, P., Wojciechowski, S., Gupta, M. K., Chudy, R., Krolczyk, J. B., Maruda, R., and Krolczyk, G. M., "Relationship between energy consumption and surface integrity aspects in electrical discharge machining of hot work die steel", *Sustainable Materials And Technologies*, 36: e00623 (2023).
169. Song, Y., Cao, H., Zheng, W., Qu, D., Liu, L., and Yan, C., "Cutting force modeling of machining carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites: A review", *Composite Structures*, 299: 116096 (2022).
170. Xie, J., Hu, P., Chen, J., Han, W., and Wang, R., "Deep learning-based instantaneous cutting force modeling of three-axis CNC milling", *International Journal Of Mechanical Sciences*, 246: 108153 (2023).
171. Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., Sarıkaya, M., Krolczyk, G. M., Günay, M., and Wojciechowski, S., "Cutting forces and temperature measurements in cryogenic assisted turning of AA2024-T351 alloy: An experimentally validated simulation approach", *Measurement*, 188: 110594 (2022).
172. Akhtar, W., Sun, J., and Chen, W., "Effect of Machining Parameters on Surface Integrity in High Speed Milling of Super Alloy GH4169/Inconel 718", *Materials And Manufacturing Processes*, 31 (5): 620–627 (2016).

173. Singh, A., Ghosh, S., and Aravindan, S., "State of art for sustainable machining of nickel-based alloys using coated and uncoated tools and machining of high strength materials using surface modified cutting tools", *Tribology International*, 170: 107517 (2022).
174. Sultan, A. A. and Okafor, A. C., "Effects of geometric parameters of wavy-edge bull-nose helical end-mill on cutting force prediction in end-milling of Inconel 718 under MQL cooling strategy", *Journal Of Manufacturing Processes*, 23: 102–114 (2016).
175. Şirin, Ş. and Kıvık, T., "Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy", *Tribology International*, 137 (April): 180–192 (2019).
176. Makhesana, M. A., Patel, K. M., Krolczyk, G. M., Danish, M., Singla, A. K., and Khanna, N., "Influence of MoS₂ and graphite-reinforced nanofluid-MQL on surface roughness, tool wear, cutting temperature and microhardness in machining of Inconel 625", *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 41: 225–238 (2023).
177. Sahoo, S. P. and Datta, S., "Dry, MQL, and Nanofluid MQL Machining of Ti–6Al–4V Using Uncoated WC–Co Insert: Application of Jatropha Oil as Base Cutting Fluid and Graphene Nanoplatelets as Additives", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 45 (11): 9599–9618 (2020).
178. Singh, R., Dureja, J. S., Dogra, M., Gupta, M. K., and Mia, M., "Influence of graphene-enriched nanofluids and textured tool on machining behavior of Ti-6Al-4V alloy", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 105 (1–4): 1685–1697 (2019).
179. Torres, H., Podgornik, B., Jovičević-Klug, M., and Rodríguez Ripoll, M., "Compatibility of graphite, hBN and graphene with self-lubricating coatings and tool steel for high temperature aluminium forming", *Wear*, 490–491: 204187 (2022).
180. Danish, M., Gupta, M. K., Rubaiee, S., Ahmed, A., and Korkmaz, M. E., "Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718", *Tribology International*, 163: 107178 (2021).
181. Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., and Gupta, M. K., "A novel use of hybrid Cryo-MQL system in improving the tribological characteristics of additively manufactured 316 stainless steel against 100 Cr6 alloy", *Tribology International*, 173: 107613 (2022).
182. Gupta, M. K., Niesłony, P., Korkmaz, M. E., Królczyk, G. M., Kuntoğlu, M., Pawlus, P., Jamil, M., and Sarıkaya, M., "Potential use of cryogenic cooling for improving the tribological and tool wear characteristics while

- machining aluminum alloys", *Tribology International*, 183: 108434 (2023).
183. Gupta, M. K., Etri, H. El, Korkmaz, M. E., Ross, N. S., Krolczyk, G. M., Gawlik, J., Yaşar, N., and Pimenov, D. Y., "Tribological and surface morphological characteristics of titanium alloys: a review", *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 22 (2): (2022).
 184. Ross, N. S., Sherin Shibi, C., Sithara, M., Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., Sharma, V. S., and Li, Z., "Measuring Surface Characteristics in Sustainable Machining of Titanium Alloys using Deep Learning based Image Processing", *IEEE Sensors Journal*, 1–1 (2023).
 185. Günay, M., Korkmaz, M. E., and Yaşar, N., "Finite element modeling of tool stresses on ceramic tools in hard turning", *Mechanika*, 23 (3): 432–440 (2017).
 186. Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Collado, A. G., and Krolczyk, G. M., "Erosion characteristics on surface texture of additively manufactured AlSi10Mg alloy in SiO₂ quartz added slurry environment", *Rapid Prototyping Journal*, 28 (5): 916–932 (2022).
 187. Benardos, P. G. and Vosniakos, G.-C., "Predicting surface roughness in machining: a review", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 43 (8): 833–844 (2003).
 188. Park, E., Kim, D. M., Park, H. W., Park, Y.-B., and Kim, N., "Evaluation of Tool Life in the Dry Machining of Inconel 718 Parts from Additive Manufacturing (AM)", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 21 (1): 57–65 (2020).
 189. Ross, N. S., Srinivasan, N., Amutha, P., Gupta, M. K., and Korkmaz, M. E., "Thermo-physical, tribological and machining characteristics of Hastelloy C276 under sustainable cooling/lubrication conditions", *Journal Of Manufacturing Processes*, 80 (June): 397–413 (2022).
 190. Sivaiah, P., Guru Prasad, M., Singh M, M., and Uma, B., "Machinability evaluation during machining of AISI 52100 steel with textured tools under Minimum Quantity Lubrication – A comparative study", *Materials And Manufacturing Processes*, 35 (15): 1761–1768 (2020).
 191. Ibrahim, A. M. M., Omer, M. A. E., Das, S. R., Li, W., Alsoufi, M. S., and Elsheikh, A., "Evaluating the effect of minimum quantity lubrication during hard turning of AISI D3 steel using vegetable oil enriched with nano-additives", *Alexandria Engineering Journal*, 61 (12): 10925–10938 (2022).
 192. Pal, A., Chatha, S. S., and 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 (June): 106508 (2020).
193. Touggui, Y., Uysal, A., Emiroglu, U., Belhadi, S., and Temmar, M., "Evaluation of MQL performances using various nanofluids in turning of AISI 304 stainless steel", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 115 (11): 3983–3997 (2021).
 194. Wang, B., Yang, Q., Deng, J., Hou, N., Wang, X., and Wang, M., "Effect of graphene nanoparticles and sulfurized additives to MQL for the machining of Ti-6Al-4 V", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 119 (5): 2911–2921 (2022).
 195. Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Kıvak, T., and Şirin, Ş., "The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625", *Tribology International*, 134 (February): 443–456 (2019).
 196. Sarıkaya, M., Şirin, Ş., Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., and Gupta, M. K., "Performance evaluation of whisker-reinforced ceramic tools under nano-sized solid lubricants assisted MQL turning of Co-based Haynes 25 superalloy", *Ceramics International*, 47 (11): 15542–15560 (2021).
 197. K, V., "Machining of different superalloys under MQL using hBN nanofluids", *Advances In Materials And Processing Technologies*, 1–36 (2022).
 198. Gupta, M. K. and Korkmaz, M. E., "A conceptual framework for sustainability impact assessment in machining bohrer tool steel under hBN-enriched nano cutting fluids environment", *Sustainable Materials And Technologies*, 37: e00669 (2023).
 199. Khanna, N., Agrawal, C., Pimenov, D. Y., Singla, A. K., Machado, A. R., da Silva, L. R. R., Gupta, M. K., Sarıkaya, M., and Krolczyk, G. M., "Review on design and development of cryogenic machining setups for heat resistant alloys and composites", *Journal Of Manufacturing Processes*, 68: 398–422 (2021).
 200. Rao, K. V., Kumar, Y. P., Singh, V. K., Raju, L. S., and Ranganayakulu, J., "Vibration-based tool condition monitoring in milling of Ti-6Al-4V using an optimization model of GM(1,N) and SVM", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 115 (5): 1931–1941 (2021).
 201. Danish, M., Gupta, M. K., Rubaiee, S., Ahmed, A., and Korkmaz, M. E., "Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718", *Tribology International*, 163: 107178 (2021).

202. Korkmaz, M. E. and Gupta, M. K., "A State of the Art on Simulation and Modelling Methods in Machining: Future Prospects and Challenges", *Archives Of Computational Methods In Engineering*, (2022).
203. Abdullah, M. I. H. C., Abdollah, M. F. Bin, Amiruddin, H., Tamaldin, N., and Nuri, N. R. M., "Optimization of tribological performance of hBN/AL₂O₃ nanoparticles as engine oil additives", *Procedia Engineering*, 68: 313–319 (2013).
204. Yang, Y., Zhang, L., Yuan, Y., Sun, J., Che, Z., Qiu, Z., Du, T., Na, H., and Shuai Che, "Multi-objective optimization on energy consumption, CO₂ emission and production cost for iron and steel industry", *Journal Of Environmental Management*, 347: (2023).
205. Jamil, M., He, N., Wei, Z., Gupta, M. K., and Khan, A. M., "A novel quantifiable approach of estimating energy consumption, carbon emissions and cost factors in manufacturing of bearing steel based on triple bottom-line approach", *Sustainable Materials And Technologies*, 36: e00593 (2023).
206. Bi, Z. M. and Wang, L., "Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study", *Journal Of Manufacturing Systems*, 31 (4): 420–428 (2012).
207. Chaabani, S., Arrazola, P. J., Ayed, Y., Madariaga, A., Tidu, A., and Germain, G., "Comparison between cryogenic coolants effect on tool wear and surface integrity in finishing turning of Inconel 718", *Journal Of Materials Processing Technology*, 285: 116780 (2020).
208. Yurtkuran, H., Boy, M., and Günay, M., "Investigation of machinability indicators during sustainable milling of 17-4PH stainless steel under dry and MQL environments", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, 09544089231189640 (2023).
209. Liang, J., Gao, H., Li, D., Lei, Y., Li, S., Guo, L., Chen, L., Leng, Z., Sun, Y., and Li, C., "Study on milling tool wear morphology and mechanism during machining superalloy GH4169 with PVD-TiAlN coated carbide tool", *Tribology International*, 182: 108298 (2023).

ÖZGEÇMİŞ

Hakan YURTKURAN; Gazi Üniversitesi Atatürk Meslek Yüksekokulu, Endüstriyel Kalıpcılık bölümünden mezun oldu. Lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği Bölümünde fakülte ikincisi olarak dereceyle tamamladı. Dönemim Rektörü tarafından kendisine plaket ve ödül takdim edildi. Aynı üniversite de Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansını tamamladı. 2013 yılında Yozgat Bozok Üniversitesi Akdağmadeni Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi unvanıyla çalışmaya başladı. Doktora eğitimi süresince Karabük Üniversitesinde Mühendislik Tamamlama programına katılıp, Makine Mühendisi unvanı aldı. Doktora eğitimine Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde devam eden yazar, çalışmaya hayatına ise Yozgat Bozok Üniversitesinde devam etmektedir.

Yayınlar

1. Yurtkuran H., Gunay M., Rai R., "A state of the art on sustainable metal working fluids in machining applications", Journal Of Molecular And Engineering Materials , cilt.0, 2024 (ESCI).
2. M. Günay And H. Yurtkuran, "Taguchi Yöntemi Esaslı PH13-8 Mo Paslanmaz Çeliğin Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü Optimizasyonu," 3rd International Black Sea Modern Scientific Research Congress , no.3, Samsun, Turkey, pp.283-291, 2023.