T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK HIZ ÇELİKLERİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI NANO AKIŞKANLARIN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA ALICI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. ANIL İMAK

BİNGÖL-2026

ÖNSÖZ

Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca her zaman yardımlarını esirgemeyen, yüksek lisans tez sürecim boyunca bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle her zaman yanımda olan danışman hocam Doç. Dr. Anıl İMAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince ve özellikle deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde değerli katkılarıyla bana yol gösteren, laboratuvar çalışmalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Üsame Ali USCA'ya teşekkür ederim. Ayrıca tüm jüri üyelerime teşekkür ederim.

Tez çalışmasının grafik ve görsel düzenlemelerinin hazırlanmasında katkı sağlayan Yüksek İnşaat Mühendisi Dr. Fatih Mehmet AŞIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreç boyunca sevgisi, desteği ve varlığıyla bana güç veren, hayatımı paylaştığım Aslıhan ÖZSOY'a içtenlikle teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemde büyük emeği bulunan aileme ve eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen tüm kişi ve kurumlara teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa ALICI
Bingöl 2026

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ v
ŞEKİLLER LİSTESİ vii
TABLOLAR LİSTESİ ix
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
3. TALAŞLI İMALAT 8
3.1. İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler 8
3.1.1. Malzeme Etkisi 8
3.1.2. Tezgahların Etkisi 9
3.1.3. Kesici Takımların Etkisi 9
3.2. Frezeleme 9
3.2.1. Alın Frezeleme 10
3.2.2. Çevresel Frezeleme 10
3.2.3. Kenar Frezeleme 11
3.2.4. Yüzey Frezeleme 11
3.2.5. Profil Frezeleme 11
3.3. Freze Tezgahları 12
3.3.1. Yatay Freze Tezgahları 12
3.3.2. Düşey Frezeleme 13
3.3.3. Üniversal Freze Tezgahları 13
3.3.4. CNC Freze Tezgahları 14
4. ÇELİKLER VE KESİCİ TAKIMLAR 15
4.1. Çelikler 15
4.2. Kimyasal Bileşimine Göre Çelik Türleri 15
4.2.1. Karbon Yapılı Çelikler 15
4.2.2. Kullanım Amacına Göre Çelik Türleri 16

4.3. Yüksek Hız Çelikleri 17
4.3.1. Yüksek Hız Çeliklerin Sınıflandırılması 17
4.3.2. Tungsten Yüksek Hız Çelikleri 17
4.3.3. Molibden Yüksek Hız Çelikleri 17
4.4. Kesici Takımlar 18
4.4.1. Kesici Takım Malzemeleri 18
4.5. Frezelemede Kesme Sıvıları 19
4.5.1. Soğutma/Yağlama Sıvıları 19
4.6. İşlenebilirlik Metrikleri 22
4.6.1. Takım Aşınmaları ve Çeşitleri 22
4.6.2. Kesme Sıcaklığı 24
4.6.3. Yüzey Pürüzlülüğü 24
4.6.4. Tüketilen Enerji Miktarı 24
5. MATERYAL VE YÖNTEM 25
5.1. Çelik Seçimi 25
5.2. Kesici Takım 26
5.3. Kesme Sıvısı 27
5.4. Kesme Sıvısına Eklenen Nano Malzemeler 28
5.4.1. Graphene Nanoplatelet 29
5.4.2. Copper (Cu) Nanopowder/Nanoparticles 30
5.5. Yüzey Aktif Maddenin Eklenmesi 31
5.6. CNC Freze Tezgâhı 31
5.7. Ölçüm Prosedürleri 32
5.7.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı 32
5.7.2. Kesme Sıcaklığı Ölçüm Cihazı 33
5.7.3. Kesici Takım Aşınmasında Kullanılan Dijital Ölçüm Cihazı 34
5.7.4. pH Cihazı 35
5.7.5. Viskozite Cihazı 36
5.7.6. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi ve Ekipmanları 37
5.8. Deneysel Aşama 37
5.8.1. Deney Parametreleri 39
5.8.2. Nanoakışkan Hazırlanması 40
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 42

6.1. Nano Akışkanların Viskozite ve pH Sonuçları 42
6.2. Deney Numunelerinin Yüzey Pürüzlülükleri 46
6.3. Takım Aşınma Sonuçları 50
6.4. Kesme Sıcaklıkları 54
KAYNAKLAR 60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

HSS	: Yüksek Hız Çeliği
C	: Karbon
CuO	: Bakır oksit
m	: Metre
dk	: Dakika
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
S	: Saniye
Sa	: Saat
dev	: Devir
S/Y	: Soğutma Yağlama
µm	: Mikrometre
NF	: Nanoakışkan (Nanofluid)
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
zig-zag	: İşleme yolu
3B	: 3 boyutlu
°C	: Santigrat derece
MoS_2	: Molibden disülfür
O_2	: Oksijen gazı
AISI	: American Iron and Steel Institute standardı
TiAlN	: Titanyum Alüminyum Nitrür
TiAl	: Titanyum Alüminyum
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
Zn	: Çinko
hBN	: Hekzagonal Bor Nitrür
CTAB	: Setiltrimetilamonyum bromür
PVP	: Polivinilpirolidon
SDS	: Sodyum Dodesil Sülfat
Graphite	: Grafit
LN_2	: Sıvı azot
Kg	: Kilogram
HP	: Horse Power / Beygir gücü
HRC	: Rockwell sertliği (C ölçeği)
W/mK	: Isıl iletkenlik birimi
Si	: Silisyum

Mn	: Manganez
Cr	: Krom
r	: Yarıçap
PVD	: Physical Vapor Deposition
cSt	: santistok
Fe	: Demir
Ni	: Nikel
A	: Amper
V	: Volt
mA	: Miliamper
kV	: Kilovolt
DC	: Doğru akım
L	: Litre
W	: Watt
kW	: Kilowatt
mL	: Mililitre
GNP	: Graphene Nanoplatelet
R_a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
µm	: Mikrometre
rpm	: Dakika başına devir
Cu	: Bakır

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Çevresel frezeleme [23] 10
Şekil 3.2. Kenar frezeleme görseli [24] 11
Şekil 3.3. Yüzey frezeleme görseli [24] 11
Şekil 3.4. Profil frezeleme görseli [24] 12
Şekil 3.5. Yatay frezeleme görseli [25] 12
Şekil 3.6. Düşey frezeleme görseli [26] 13
Şekil 3.7. Üniversal freze tezgahı görseli [26] 13
Şekil 3.8. CNC freze tezgahı görüntüsü 14
Şekil 4.1. Minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemi [8] 21
Şekil 5.1. 1.2080 Hava çeliği iş parçası görseli 25
Şekil 5.2. Kesici takım ucu 27
Şekil 5.3. Kesici takım kesme sıvısı görseli [49] 28
Şekil 5.4 GNP ve Bakır nanotoz görseli 29
Şekil 5.5. Dahlıh MCV-860 CNC tezgahı 31
Şekil 5.6. Time tr-200 Yüzey pürüzlüğü ölçüm cihazı [52] 33
Şekil 5.7. Testo 885 termal ölçüm cihazı [53] 34
Şekil 5.8. Insize ISM PM200SB Dijital aşınma ölçüm cihazı [54] 35
Şekil 5.9. pH cihazı [55] 35
Şekil 5.10. Kinematik viskozite cihazı [55] 36
Şekil 5.11. MMY 37
Şekil 5.12. Nanoakışkan hazırlama aşamaları 41
Şekil 6.1. Viskozite sonuçları 44
Şekil 6.2. Deney pH değeri sonuçlar 45
Şekil 6.3. 0,08 mm/dev ilerleme hızında elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları 47
Şekil 6.4. 0,05 mm/dev ilerleme hızında elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları 48
Şekil 6.5. Takım yanak aşınma görüntüleri 50
Şekil 6.6. 0,08 mm/dev ilerleme hızında elde edilen takım aşınması sonuçları 52
Şekil 6.7. 0,05 mm/dev ilerleme hızında elde edilen takım aşınması sonuçları 53
Şekil 6.8. Termal sıcaklık ölçümleri 54

Şekil 6.9. 0,08 mm/dev ilerleme hızında elde edilen takım aşınması sonuçları 55
Şekil 6.10. 0,05 mm/dev ilerleme hızında elde edilen takım aşınması sonuçları 57

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 5.1. 1.2080 Hava çeliği deney malzemesinin özellikleri [47] 26
Tablo 5.2. 1.2080 Hava çeliğinin fiziksel özellikleri [47] 26
Tablo 5.3. Korloy marka APXT 1035 PDSR kesici uç teknik özellikleri [48]..... 27
Tablo 5.4. Kesme sıvısının özellikleri [48]..... 28
Tablo 5.5. GNP Nanotoz özellikleri [50]..... 30
Tablo 5.6. Copper (Cu) Nanopowder/Nanoparticles özellikleri [50]..... 30
Tablo 5.8. Time Tr-200 yüzey ölçüm cihazı teknik özellikleri [52]..... 33
Tablo 5.9. Kesme sıcaklığı ölçüm cihazı teknik özellikleri..... 34
Tablo 5.10. Insize ISM PM200SB cihaz teknik özellikleri [54]..... 34
Tablo 5.11. Kinematik viskozite ölçüm cihazı teknik özellikleri [55]..... 36
Tablo 5.12. Deney parametreleri..... 39

YÜKSEK HIZ ÇELİKLERİNİN FREZELENMESİNDE FARKLI NANO AKIŞKANLARIN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Hava çelikleri, savunma, uzay-havacılık ve otomotiv sektörlerinde tercih edilen, yüksek sertlik gösteren bir çelik türüdür. Yüksek sertlik özelliği sayesinde kesici takım olarak da tercih edilmektedir. Talaşlı imalatta yüzey kalitesi ve takım aşınması sürekli üretim için oldukça önemlidir. Hava çeliklerinin mukavemetli bir yapıya sahip olmaları işlenebilirlik açısından önemli zorluklar oluşturmaktadır.

Kesici takımda meydana gelen aşınmalar ve iş parçasında oluşabilecek hasarlar hem maliyet hem de kaliteli üretim açısından olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Yüksek sertliklere sahip çeliklerin işleme performansını artırmak için kesme sıvıları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 1.2080 hava çeliğinin frezeleme işlemi ele alınmıştır. Frezeleme işlemi için iki farklı kesme hızı (45-65 m/dk), iki farklı ilerleme hızı (0,05-0,08 mm/dev) ve biri kuru ortam olmak üzere 5 farklı sıvı soğutma/yağlama (S/Y) ortamı minimum miktarda yağlama (MMY) sisteminde kullanılmıştır. S/Y için; saf MMY, ağırlıkça %0,1 GNP nanotoz katkılı MMY, %0,5 GNP nanotoz katkılı MMY, %0,1 Cu nanotoz katkılı MMY ve %0,5 Cu nanotoz katkılı MMY kullanılmıştır. Frezeleme sonuçları olarak kesici takım yanak yüzey aşınması, iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım-iş parçası arasındaki kesme sıcaklığı ölçülmüştür. Ayrıca sıvılara ait reolojik özellikler (viskozite ve pH) de incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, farklı kesme parametrelerinin ve kesme sıvılarının işleme performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Frezeleme deneyleri için en ideal S/Y ortamı ağırlıkça %0,5 GNP nanotoz katkılı MMY sıvısı olmuştur. Kuru koşulda yapılan deneyler ile bu kesme sıvısı deneyleri kıyaslandığında, yüzey pürüzlülük değeri 65 m/dk kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında %42,2 iyileşmiştir. Yanak aşınma değeri kıyaslandığında 45 m/dk kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında %73,1 oranında iyileşme olmuştur. Kesme sıcaklık değeri kıyaslandığından 45 m/dk ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında %75,7 oranında sıcaklık düşmüştür. Sonuçlar GNP nanotoz katkılı sıvıların hava çeliklerinin frezelenmesinde kullanılmasıyla önemli avantajlar elde edildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelime: İşlenebilirlik, Yüksek Hız Çelikleri, Minimum Miktarda Yağlama (MMY), Frezeleme, GNP-Cu Nanotoz.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT NANOFLUIDS ON THE MILLING OF HIGH-SPEED STEELS

ABSTRACT

Aerospace steels are a type of steel with high hardness, preferred in the defence, aerospace, and automotive industries. Due to their high hardness, they are also preferred as cutting tools. In machining, surface quality and tool wear are crucial for continuous production. The high strength of aerospace steels presents significant machinability challenges. Wear on the cutting tool and potential damage to the workpiece can lead to negative consequences for both cost and production quality. Cutting fluids are used to improve the machining performance of high-hardness steels.

This study considers the milling process of 1.2080 aerospace steel. For the milling process, two different cutting speeds (45-65 m/min), two different feed rates (0.05-0.08 mm/rev), and five different liquid cooling/lubrication (C/L) environments, one of which was dry, were used in a minimum quantity lubrication (MQL) system. For C/L, Pure MMY, MMY with 0.1% by weight GNP nanopowder additive, MMY with 0.5% GNP nanopowder additive, MMY with 0.1% Cu nanopowder additive, and MMY with 0.5% Cu nanopowder additive were used. Milling results included measurement of tool flank wear, workpiece surface roughness, and cutting temperature between the tool and workpiece. Rheological properties (viscosity and pH) of the fluids were also investigated. The effects of different cutting parameters and cutting fluids on machining performance were evaluated. The most ideal dry/dry medium for milling experiments was MQL fluid with a 0.5% (by weight) GNP nanopowder additive. Compared with the dry conditions, surface roughness improved by 42.2% at a cutting speed of 65 m/min and a feed rate of 0.05 mm/rev. When comparing flank wear values, a 73.1% improvement was observed at a cutting speed of 45 m/min and a feed rate of 0.08 mm/rev. When comparing cutting temperature values, a 75.7% temperature reduction was observed at 45 m/min and a feed rate of 0.05. The results demonstrate that significant advantages are obtained by using GNP nanopowder-added fluids in the milling of air steels.

Keywords: Machinability, High-Speed Steels, Minimum Quantity Lubrication (MQL), Milling, GNP-Copper Nanopowder.

1. GİRİŞ

Yüksek hız çelikleri, takım ucunda oluşan yüksek sıcaklık seviyelerinde dahi frezeleme işleminin sürdürülebilmesini sağlayan ve özelliklerini diğer çelik gruplarına kıyasla daha iyi koruyabilen çelik türleridir. Bu malzemelerin mukavemetli olması sebebiyle yüksek sıcaklıklara ve aşınmaya karşı dirençlidir. Bu çeliklerin söz konusu özellikleri, alaşım elementlerinin ilavesi ve uygun ısıl işlem uygulanması sonucunda elde edilmektedir. Bununla birlikte yüksek sertlik özelliklere sahip olması yalnızca alaşım elementlerinden kaynaklanmamaktadır [1].

Yüksek hız çelikleri, yüksek mukavemet ve dayanım özelliklerine sahip çelik malzemelerdir. Aşınma ve yüksek sıcaklıklara karşı gösterdikleri direnç nedeniyle, ileri mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu çeliklerin kesme işlemleri, kaliteli ve verimli üretim süreçleri açısından büyük önem taşımaktadır. Zor işlenebilir özellik gösteren yüksek hız çeliklerinin işlenmesi sırasında meydana gelen aşınma ve yüksek sıcaklık gibi olumsuzluklar, kesici takım ömrünü ve elde edilen yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Kesici takım ömrünün kısalması ve yüzey pürüzlülüğünün artması, üretim maliyetlerinin yükselmesine ve parça kalitesinin olumsuz etkilenmesine neden olduğundan istenmeyen durumlardır. Farklı nanoakışkanların soğutma ve yağlama amacıyla kullanıldığı çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bununla birlikte, kesme sıvılarının uzun süreli kullanımı işleme maliyetlerinin artmasına neden olabilmektedir. Literatürde ayrıca farklı soğutma/yağlama (S/Y) koşullarının işlenen malzeme üzerindeki etkileri incelenmiş ve farklı kaplamalara sahip kesici takımlar kullanılarak yüzey kalitesi ile takım ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada, yüksek hız çeliklerinin işleme esnasında farklı nanoakışkanların etkisinin deneysel araştırmaları yapılması planlanmaktadır. Deneysel çalışmalarda, yüzey kalitesi, takım aşınması ve kesme sıcaklığı gibi önemli işlenebilirlik metrikleri tespit edilecektir. Bunun için tam faktöriyel deney tasarım sistemi kullanılacaktır. Deneylerde 2 farklı kesme hızı (45-65 m/dk), iki farklı ilerleme hızı (0,05-0,08mm/dev) ve altı farklı soğutma/yağlama koşulu (Kuru-MMY-NF1-NF-2-NF3-NF4) giriş parametreleri olarak belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Araştırmanın konusu ve benzer konular dikkate alınarak literatür taraması yapılmış ve aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Şap vd. [2] çalışmalarında, Inconel-800 Süper Alaşımlı çeliğin frezeleme işlemini araştırmışlardır. Bu araştırmada MMY yöntemi ve kriyojenik soğutma teknikleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler üç eksenli CNC freze tezgahı yapılmıştır. Deneylerde üç farklı kesme hızı (150-175-200 m/dk) ve ilerleme hızı (0,150-0175-0,200 mm/dev) değerlerini seçmişlerdir. Kesme derinliği olarak 0,5mm değeri tercih edilmiştir. Kuru ve kriyojenik koşullarda yapılan deneylerin yüzey pürüzlülük değerlerini kıyaslamışlardır. Kriyojenik kesme ile yapılan deneylerde yüzey kalitesinde iyileşme gözlemlemişlerdir. MMY koşuluyla yapılan deneylerin sonuçlarına bakıldığında, takım aşınma değerlerinde iyileşme tespit etmişlerdir. Ayrıca kriyojenik ve kuru koşullarda yapılan deneyler kıyaslandığında, kriyojenik koşulda sıcaklık değerlerinde daha çok azalma olduğunu gözlemlemişlerdir.

Uzun vd. [3] çalışmalarında, AISI 1.2080 (X210Cr12) çeliğinin frezeleme işlemini araştırmışlardır. CAM paket programlarından Trokoidal, Follow Part, Zig ve Zig-Zag ile dört farklı işleme yöntemi kullanarak takım üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Numuneler 3B modelleme ile üretmişlerdir. CNC freze tezgahında işleme yapılmıştır. Deneylerde soğuk iş takımları olarak 1.2080 çeliğinden seçmişlerdir. Karbür uçlu freze kullanmışlardır. Yapılan deneylerin sonucuna göre, takım ömrünü etkileyen takım yolu stratejilerinden en iyi model Trokoidal olduğunu tespit etmişlerdir ve uygun olmayan model ise Zig-Zag ve Zig takım yolları uygun olmadığını gözlemlemişlerdir. Trokoidal takım yolu ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerinde etkisinin başarılı olduğunu tespit etmişlerdir.

Usca vd. [4] çalışmalarında, dişli imalatında kullanılan AISI5140 çeliğinin farklı soğutma/yağlama koşulu altındaki işlenebilirliğini KT-2000 kesme sıvısı kullanarak

incelemişlerdir. Deneyler, kuru, MMY ve kriyojenik şartlara göre yapılmış olup MMY püskürtme cihazı olarak Werte STN15 kullanmışlardır. Kriyojenik soğutucu olarak azot kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, Farklı ortamlara göre en iyi yüzey kalitesi R_a=0,822 μm olduğunu tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü değeri kesme hızı ve ilerleme hızının artması ile arttığını tespit etmişlerdir. Kriyojenik koşullarda yapılan deneylerde kesme sıcaklıkları açısından olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Kriyojenik deneyinde 9,8°C olan sıcaklık MMY'de 101 °C iken, kuru koşuldaki deneyde ise 145 °C olarak tespit etmişlerdir. Kriyojenik deneylerinde, diğer koşullara göre enerji tüketiminde %15 daha tasarruf edildiğini gözlemlemişlerdir.

Demir vd. [5] çalışmalarında AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezelemesinde farklı surfaktan katkılı CuO nanoakışkan kullanarak frezeleme işlemi yapmışlardır. Deneylerde bitkisel esaslı yağlarla oluşturulan karışımlarda, cetiltrimetilamonyum bromid, polivinilpolipirolidon ve sodyum dodesil sülfat eklenerek nanoakışkan karışım oluşturmuşlardır. Deneylerde üçer adet kesme-ilerleme hızları (120,160,200m/dk) -0,10, 0,15, 0,20mm/dev) kullanmışlardır. Deneyler sonucuna göre, en iyi yüzey kalitesi değerlerini polivinilpolipirolidon surfaktan karışımıyla, 160 m/dk kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme hızı ile yapılan deney sonucunda tespit etmişlerdir. Kullanılan üç tip karışında en iyi yüzey kalitesi ve takım aşınasında en uygun karışımın polivinilpolipirolidon surfaktan karışımı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kaçal[6] çalışmasında DIN1.2050 çeliğini frezeleme işleme performansını incelemiştir. Yüzey kalitesi ve takım aşınmasını tespit etmek için deneyler yapmıştır. Deneylerde 4 farklı kesme hızı 50,75,100 ve 125m/dk değerlerini kullanmıştır. İlerleme hızlarında ise 0,1, 0,15 ve 0,2mm/dev değerlerini kullanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi kullanmıştır. Yapmış olduğu deneyler neticesinde, ilerleme hızının artmasıyla yüzeyde pürüzlüğün arttığını tespit etmiştir. Kesici takım aşınması olarak pul pul dökülme, yan yüzey aşınması ve kırılma olduğunu gözlemlemiştir. Kesme kuvvetinde artış olduğunda talaşlarda deformasyon oluştuğunu bahsetmişlerdir.

Uysal [7] çalışmasında AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin frezelenmesini minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemi altında incelemiştir. Deneylerinde grafen nanotozun etkisini araştırmıştır. Bitkisel yağ ile birlikte kullanılan nano grafenin kesme sıcaklığını ve

çapak oluşumunu azalttığını tespit etmiştir. Bu durumun grafenin yağlayıcı ve ısıl iletkenlik özelliği olmasından kaynaklandığını gözlemlemiştir.

Şap [8] çalışmasında ultra yüksek mukavemetli S1100 çeliğinin işlenebilirliğini frezeleme yöntemi ile incelemiştir. MMY koşullarında frezelenmesinin takım aşınması üzerindeki etkisini deneysel araştırmalar yaparak tespit etmiştir. Deneylerde kesme hızı 100-150m/dk, ilerleme hızı 0,075-0,150mm/dev ve tek derinlik olarak 0,75mm kullanmıştır. Yapmış olduğu deneylerin sonuçlarına göre MMY yöntemiyle yapılan işlemlerde kuru işlemeye kıyasla takım aşınmasında azalma olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca kesme hızının takım aşınmasını artırdığını ve ilerleme hızının da takım aşınmasında etkisinin çok az olduğunu bahsetmiştir.

Kurşuncu vd. [9] çalışmalarında, AISI O2 soğuk iş takım çeliğinin MMY yöntemi ile TiAlN kaplamalı kesici takımı birlikte kullanarak frezeleme işlemi yapmışlardır. Bu çalışmadaki amaçları sert çeliklerin daha rahat işlenebilmesi için MMY yöntemi kullanarak çevre kirliliğini azaltmışlar ayrıca takım ömrünün uzamasını sağlamışlar ve maliyeti düşürmüşlerdir. Çalışmadaki takımların aşınma dirençlerini belirlemek için kaplamasız kesici takımlara ince kaplamalı TiAlN ince sert film kaplama kullanmışlardır. Kesici takım aşınmalarını optik mikroskopta incelemişlerdir. Deneylerde yapılan her kesme işleminden hemen sonra kesici takımda oluşan aşınma miktarlarını ölçmüşlerdir. Yapılan deneyler neticesinde, MMY yöntemi ve kuru şartlar altın yapılan frezeleme işlemlerini karşılaştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmanın sonuçlarına bakıldığında en iyi takım ömrü 2,55 m değeriyle MMY yöntemi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu veriler neticesinde yüzey kalitesi ve kesme kuvveti değerlerinin kuru frezeleme değerlerine göre daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Yapılan deneyler incelendiğinde, takım çeliğinin yüzey kalitesinde olumlu sonuçlar tespit edilmişlerdir. Deneylerde kullanılan MMY yönteminde bor esaslı yağ kullanmışlardır. Bu işlem neticesinde takım ömründe %5 iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir.

Lütfü [10] çalışmasında, AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin frezelemesinde kullanılan MMY yönteminin takım ömrüne etkisini anlamak için kesme deneyleri yapmıştır. Kesme deneylerinde, robotik frezeleme kullanmıştır. Takım ömrünü belirlemek için optik mikroskop kullanmıştır. Deneyler sonucunda MMY yönteminin takım aşınmasına ve

yüzey kalitesine etkisi olduğunu gözlemlemiştir. 75 ml/sa orandaki miktar kullanılarak dk 15 adet püskürtme yaparak en düşük yüzey pürüzlülük değerine ulaşmıştır. Yapılan kesme deneylerinde en uzun takım ömrünü, MMY yöntemi koşullarında yapılan deneylerde kullanılan bitkisel yapılara sahip yağlardan elde etmiştir. Özellikle takım ömrü açısından MMY yönteminde kullanılan sentetik yağlarının, kuru kesme koşulları altında yapılan kesme işlemine kıyaslandığında daha avantaj sağladığını gözlemlemiştir.

Camcı [11] çalışmasında karbür kesici takımların minimum miktarda yağlama yöntemiyle kullanılmasının AISI D2 çeliğinin frezelenmesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmada kesici takımın frezelemede işleme özellikleri, kesici takım ömrünün ve kesici takımda meydana gelen aşınma türlerini tespit etmişlerdir. Yapılan deneylerde, kesme hızları 75-100-125 m/dk, ilerleme hızları 0,05-0,075-0,1 mm ve yağlama miktarları 50-100-150 ml/saat olarak kullanılmıştır. Tüm deneylerde 1mm kesme derinliği kullanmıştır. Kesici takımın ömrünü tamamlaması için ön görülen aşınma miktarı 0,25mm olarak belirlemiştir. Kuru şartlarda yapılan deneylerin takım ömrü ile MMY sistemi kullanılarak yapılan deneyler kıyaslandığında, MMY yöntemindeki takım ömründe yaklaşık %30 artış olduğunu belirtmiştir.

Uysal [12] AISI 430 Ferritik paslanmaz çeliğin frezelenmesinde oluşan yüzey pürüzlülük miktarlarını incelemiştir. Frezeleme deneyinde kesme sıvısı olarak nano MoS2 parçacık takviyeli kesme sıvısı kesme yöntemi olarak MMY yöntemini kullanmıştır. Deneyleri, kuru ve MMY yöntemi koşulları altında gerçekleştirmiştir. MMY yönteminin kuru koşullar altında yapılan deneylere göre daha verimli olduğunu gözlemlemiştir. MMY yöntemi ile birlikte nano akışkanın kullanılmasıyla verimlilik oranında iyileşme olduğunu tespit etmiştir. Bu verimlilik oranındaki artış miktarı nano MoS2 parçacıklarının yağlama özelliklerinden oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca nano MoS2 parçacıklarının kesme sıvısına katkı miktarının fazla attırılması ise yüzey kalitesini düştüğünü izah etmiştir.

Şirin vd. [13] yapmış oldukları çalışmalarında üç farklı ısıl işlem görmüş AISI D2 çeliklerinin farklı parametrelerde frezelenmesini araştırmışlardır. Yapılan deneylerde en iyi sonuçları iki farklı parametrede daha net tespit etmişlerdir. Deneylerde üç malzeme işlenirken düşük kesme ve ilerleme hızları uygulanmış, bu sayede yüzey kalitesinde verimlilik elde etmişlerdir ve taşlama işlemi seviyesinde verimlilik olduğunu

gözlemlemişlerdir. Yapılan diğer deneyde ise daha yüksek hızlarda takım aşınması ve yüzey kalitesinde bozukluklar tespit etmişlerdir. Çalışmada, dört farklı kesme ve üç farklı ilerleme hızları seçmişlerdir. Frezeleme deneylerinin tamamında kesme derinliği 0,5 mm olarak sabit bir değer kullanmışlardır. Deneylerde TiAl+Al2O3+ZrN kaplanmış sementit karbür kesici takım kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre en uygun yüzey pürüzlülük değerine kesme hızı 70 m/dk ve ilerleme hızı 0,05 mm/dev şartlarında yapılan deney olduğunu tespit etmişlerdir. En kötü yüzey pürüzlülük değer ise kesme hızı 130 m/dk ve ilerleme hızı 0,15 mm /dev şartlarında yapılan deneyde olduğunu tespit etmişlerdir. Takım aşınması tüm deneyler incelendiğinde sadece en sert plastik ile yapılan deney çalışmasında deformasyon olduğunu gözlemlemişlerdir.

Şahin vd. [14] çalışmalarında, yapı olarak farklı kaplamalı karbür ve sermet kesici takımlar kullanarak AISI 4140 çeliğin işlenebilirliğini araştırmışlardır. TP100, TP1000 ve sermet kesici takımlarla AISI 4140 çeliğini frezelemişlerdir. Deneyleri, ilerleme hızı ve talaş derinliğini sabit olacak şekilde farklı kesme hızlarında kuru kesme koşulunda yapmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde, kullanılan takımların hepsinde kesme hızının düşmesiyle takım ömrünün arttığını gözlemlemişlerdir. Aynı kesme şartlarında TP1000 kesici takımların, TP100 kesici takımlarına göre takım ömrüne göre daha iyi performans sağlığını ve yaklaşık olarak %38 oranında daha iyi bir performans sağlığını belirtmişlerdir.

Dikici [15] çalışmasında Inconel 718 süper alaşımını iş parçası olarak kullanmıştır. Farklı nano akışkan kullanarak yüzey frezelemede işleme parametreleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneylerde, minimum miktarda yağlama yöntemi kullanmıştır. Soğutma sıvısı olarak çeşitli nano akışkanlar hazırlamıştır. Nano akışkan olarak üç farklı akışkan hazırlamıştır. Bunlar çinko oksit, magnezyum oksit ve molibden disülfür ’dür. Deneylerinde dörder kesme ve ilerleme hızları belirlemiştir. Frezeleme işlemi sonucunda yüzey ölçümlerini üç farklı noktadan ölçüm alarak belirlemiştir. Deneylerin sonuçlarına göre kesme derinliği 0,25mm ve kesme hızı 30m/dk değerlerinde yapılan deneyde en yüksek kesme kuvvetine ulaşılmıştır. En düşük kesme hızına 0,10 mm derinliğinde ve 35m/dk ilerleme hızındaki değerlerde ulaşmıştır.

Aybars [16] Çalışmasında iş parçası malzemesi olarak Hardox 500 çeliğini kullanmış ve deneylerde delme işlemi gerçekleştirmiştir. Minimum miktarda yağlama yöntemi ile yüzey

pürüzlüğü ve kesme sıcaklıklarını incelemiştir. Deneylerde, üç farklı ilerleme ve kesme hızı değeri kullanmıştır. Yapmış olduğu deneyler neticesinde, minimum miktarda yağlama yöntemi sayesinde yüzey kalitesinin iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Kuru ve minimum miktarda yağlama yöntemi ile yapılan deneyler kıyaslandığında, minimum miktarda yağlama yönteminin daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde yaklaşık olarak %25 ile %30 arasında fark olduğunu gözlemlemiştir. Kesme sıcaklık değerinde ise yaklaşık olarak %15-35 oranlarında iyileşme olduğunu bahsetmiştir.

Şirin [17] frezeleme çalışmasında, INCONEL X-750 süper alaşımının işlenmesinde yenilikçi soğutma/yağlama tekniklerinin frezeleme performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Kuru ve MMY koşulları ile hBN, MoS2 ve grafit nano partiküllerini kullanarak deneyler yapmıştır. Yapılan bu deneylerde yüzey pürüzlülüğünün kuru ve MMY ile kıyasladığında, MMY koşuluyla yapılan deneyde %19 oranında iyileşme tespit etmiştir. Genel olarak çalışmasında, nano partiküllerin hacimce %0,50 oranının en ideal değer olduğunu ifade etmişlerdir. Nano partiküller kıyaslandığında hBN nano akışkanın en iyi performans sağladığını gözlemlemiştir.

Demir [18] çalışmasında AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğini kullanmış, nano akışkan olarak ise grafit ve CuO katkılı nano akışkanlardan yararlanmıştır. Bu nanoakışkanların işleme performansını incelemiştir. Deneylerde nanoakışkanlar ile karışım olarak CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddeleri kullanmıştır. İki aşamalı deney yapmış olup birinci deneylerde elde ettiği sıcaklık ve yüzey pürüzlülük değerlerine dikkate alarak ikinci deneyi yaptığı gözlemlenmiştir. Karışımlar kıyaslandığında en iyi tribolojik performansı PVP yüzey aktif maddesi ile olduğunu tespit etmiştir. Kuru koşul ile CuO/Grpt+PVP hibrit nanoakışkanı ile yapmış olduğu deneyi kıyaslamış ve yüzey pürüzlülük oranında %48,97 değerinde azaldığını tespit etmiştir.

3. TALAŞLI İMALAT

Talaşlı imalat yöntemleri günümüzde endüstriyel sanayide oldukça çok fazla kullanılmaktadır. Talaş kaldırarak malzemenin geometrik yapısında değişiklik yapılmaktadır. Malzemeye yeni bir kimlik ya da farklılık katmaktadır. Üç boyutlu üretim yapan yazıcılar nozül yardımıyla ileri-geri hareketleri ile püskürtme yapılarak üretim yapılmaktadır. Talaşlı imalatın üç boyutlu yazıcıların üretimden farkı ise takım ucu yardımıyla talaş kaldırılarak üretim yapılmaktadır. Günümüzde metalleri şekillendirilerek üretim yapılan en yaygın yöntem eksiltmeli yani talaşlı imalat yöntemidir [19].

Talaşlı imalat yöntemlerinin başlıca çeşitleri şunlardır;

- Tornalama
- Frezeleme
- Delik delme
- Taşlama
- Broşlama
- Honlama
- Planyalama ve Vargelleme
- Kesme

3.1. İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler

3.1.1. Malzeme Etkisi

İşlenebilirlik koşulları altında gerçekleştirilen talaşlı imalat işlemlerinde, malzemenin aşırı sert veya aşırı yumuşak olması işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir. İşleme sürecinin uygun ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için işlenecek malzemenin belirli özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu özelliklerden bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Malzemenin içyapısı
- Malzemenin sertliği

- Malzemenin ısıl işlem görmüşse değerleri
- Malzemenin sünekliği ve esnek yapısı [20].

Yukarıda belirtilen malzeme özellikleri, işlenebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilen işleme süreçleri sonucunda, elde edilen yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük seviyelere indirilmesi mümkün olmaktadır.

3.1.2. Tezgahların Etkisi

İşlenebilirlikte, tezgahların önemi oldukça fazladır. Tezgahların sağlam ve dayanaklı olmamaları durumunda, işleme sırasında meydana gelen titreşimler işlenen parçanın yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca frezeleme sırasında kesme kuvvetleri dikkate alındığında, takım ve freze tezgahı bir sistematik uyum içerisinde olmalıdır. Frezeleme sırasında meydana gelen titreşimler; yüzey pürüzlülüğünün artmasına, yüzey kalitesinin bozulmasına ve kesici takım aşınmasının hızlanmasına neden olabilmektedir. [21].

3.1.3. Kesici Takımların Etkisi

Malzemelerin sertliği, tezgahların ve kesme sıvıların etkisi işlenebilirliği etkilediği gibi, kesici takımlarda doğrudan etkilemektedir. Frezeleme işlemi esnasında kesici takımlar yüksek sıcaklıklara maruz kalabilmektedir. Takım ucunda soğutma işlemi sonucunda çok küçük yapıda çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar zamanla büyüyerek aşınmalara neden olmaktadır. Kesici takım yüzeyinde kaplama esaslı bir yapı mevcutsa, bu yapının işlevini yok etmesine sebep olabilir. Tüm bu olumsuz etkenler işlenebilirliği doğrudan etkilemektedir. Gerekli önlemler alınmaması durumunda iş parçası yüzey kalitesi, takım aşınması ve maliyet açısından olumsuz sonuçlar gösterebilir [20].

3.2. Frezeleme

Frezeleme, bir takım yardımıyla yapılan ilerleme hareketi ile talaş kaldırılarak işleme işlemidir. Frezelemede talaş kaldırma işlemi, freze tezgahında kesici takımda bulunan

uçlardaki kesici ağızlarının vasıtasıyla ileri-geri hareket yapılarak talaş kaldırma işlemi yapılmaktadır. Frezelemeyi genel olarak alın ve çevresel frezeleme olarak iki tipte inceleyebiliriz. Freze tezgahlarının günümüzde robotik ve otomasyonlu sistemlerle kullanılması pratik üretim kolaylığı sağlamaktadır. Kontrol sisteminin otomatik bir sistem vasıtasıyla olması, günümüz endüstriyel sanayisinde çok fazla kullanılmasına neden olmuştur [22].

3.2.1. Alın Frezeleme

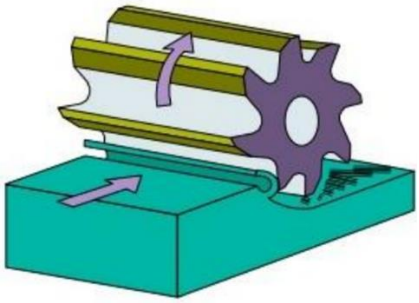
Frezeleme kesici çakısının, kendi alın yüzeyinde bulunan kesicilerle malzemeyi keserek talaş kaldırma işlemine alın frezeleme denir. Kesici takım, işlenecek malzeme ile birbirine diktir. Alın frezeleme, asimetrik ve simetrik alın frezeleme olarak ikiye ayrılır.

Asimetrik frezeleme, kesici takım ekseni ile işlenecek malzemelerin eksenlerinin paralel olmadığı veya çakışmadığı durumlarda gerçekleştirilen frezeleme yöntemidir.

Simetrik frezeleme, kesilen ve kesicinin eksenlerinin çakıştığı durumlardaki frezeleme işlemine denir [12].

3.2.2. Çevresel Frezeleme

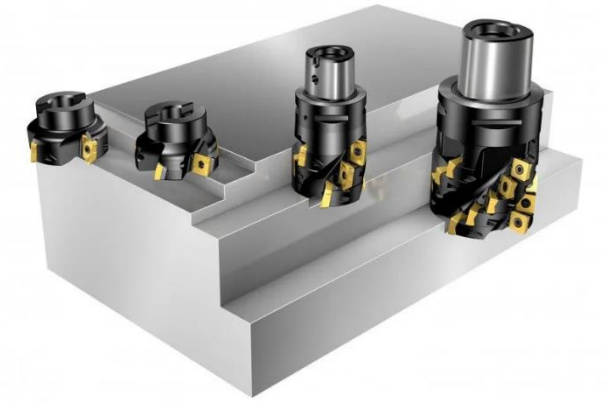
Çevresel frezeleme, yatay eksen pozisyonda bulunan silindirik yapıdaki kesici takımın dönme hareketi yaparak, çevresinde bulunan kesici dişlerle talaş kaldırma yöntemidir [12]. Çevresel frezeleme resim gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çevresel frezeleme [23]

3.2.3. Kenar Frezeleme

Kenar frezeleme (Şekil 3.2), her iki yüzeyde aynı anda frezeleme yapma işlemidir. Kenar frezelemede asıl istenilen ise 90 derecelik açılarda kesim işlemi yapılmasıdır. Bu frezeleme yöntemi ile kenar ve çevresel frezeleme aynı anda yapılabilmektedir.



Şekil 3.2. Kenar frezeleme görseli [24]

3.2.4. Yüzey Frezeleme

Yüzey frezeleme. 45 derecelik bir açıyla yüzeyde talaş kaldırma yöntemidir. Yüzey alanda en pratik frezeleme yöntemi olduğu için en fazla tercih edilen frezeleme yöntemidir. Yüzey frezeleme işleminin görseli Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Yüzey frezeleme görseli [24]

3.2.5. Profil Frezeleme

Profil frezeleme yönteminde, radiuslu ve yuvarlak kesici uçlara sahip olan kesiciler kullanılmaktadır. Parça yüzeyinde Şekil 3.4'te gösterildiği gibi profil yapıda kesimler

yapılır. Bu tip işlemelerde harf ve sayı gibi şekiller oluşturulabilmektedir. Bu yöntem ile en hassas parçaların üretimi ve daha ince işçilikle üretimler yapılabilmektedir [24].



Şekil 3.4. Profil frezeleme görseli [24]

3.3. Freze Tezgahları

3.3.1. Yatay Freze Tezgahları

Freze tezgahlarının tipi, işlenecek parçaya göre iş milinin yapısıyla belirlenmektedir. Kesici takımın bulunduğu iş mili ekseni, tezgah tablasına paralel bir konumda bulunan tezgahlara (Şekil 3.5) yatay freze tezgahı denir [25]. Otomatik ve manuel tabla tipleri bulunmaktadır.



Şekil 3.5. Yatay frezeleme görseli [25]

3.3.2. Düşey Frezeleme

Düşey freze tezgahları (Şekil 3.6), adından da anlaşılacağı üzere yataydaki malzemenin dik eksende talaş kaldırılarak işleme yapma yöntemine denir. Düşey freze tezgahları kullanım alanları bakımından, çok sert olmayan metaller ve plastikler üzerinde frezeleme yapılmaktadır [26].



Şekil 3.6. Düşey frezeleme görseli [26]

3.3.3. Üniversal Freze Tezgahları

Üniversal freze tezgahları, frezeleme işlemini yatay ve dikey eksenlerde frezeleme yapılabilen freze tezgahlarıdır. Freze yapılacak iş malzemesinin geometrik şeklinin karışık yapıda olması durumunda genellikle tercih edilen freze tezgahlarıdır. Örnek görsel Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Üniversal freze tezgahı görseli [26]

3.3.4. CNC Freze Tezgahları

Takım tezgahları ilk olarak NC tezgahlar olarak kullanılmıştır. Gelişen otomasyon sistemleriyle birlikte bu tezgâhların yerini CNC tezgâhlar almıştır. CNC tezgahlar, programlanabilen ve programlarını hafızasında saklayabilen tezgahlardır. CNC tezgâhlar genel olarak torna tezgahı, freze tezgahı, matkap tezgahı, borlama tezgahı ve taşlama tezgahı olarak kullanılmaktadır [27]. NC freze tezgahları, bilgisayar kontrollü, programlanabilen freze tezgah türüdür. Freze tezgahları, kesici takımlar yardımıyla talaş kaldırarak malzemelere şekil vermektedir. CNC freze tezgahlarının ana parçaları şunlardır;

- Gövde
- Araba
- Konsol paneli
- Tabla

CNC freze tazgahının görüntüsü Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8.CNC freze tezgahı görüntüsü

4. ÇELİKLER VE KESİCİ TAKIMLAR

4.1. Çelikler

Çelikler, savunma sanayii, otomotiv, demiryolu ve inşaat gibi önemli alanlarda tercih edilmektedir. Çeliklerin şekil alabilme özellikleri sayesinde her sektörde farklı geometrik yapılarda görülebilmektedir. Demiryolları, çelik köprüler ve savunma sanayisindeki tanklar bu yapılara ile araçlara örnek gösterilebilir.

Çelikler, birden fazla elementten oluşabilen ve içerisinde demir–karbon elementleri bulunduran metallerdir. Çeliklerin içyapılarında genellikle %2–2,1 oranlarında karbon bulunur. Ayrıca çelikler dövülebilme, yüksek mukavemetli olmaları ve yüksek sıcaklıklar altında işlenebilir olmaları gibi özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında kullanılan önemli alaşımlardır [28].

4.2. Kimyasal Bileşimine Göre Çelik Türleri

4.2.1. Karbon Yapılı Çelikler

Karbon yapılı çelikler, içerisindeki ana element olarak demir ve karbon elementi bulunduran çelik türüdür [28]. Karbon çelikler üç gruba ayrılmaktadır: düşük, orta ve yüksek karbonlu çelikler.

4.2.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

%0,05–%0,30 karbon içeriğine sahip çelikler, düşük karbonlu çelikler olarak sınıflandırılmaktadır. Karbon oranının düşük olması nedeniyle bu çelikler yüksek sertlik ve dayanım özellikleri göstermemektedir. İşlenebilirlik açısından elverişli çeliklerdir [29].

4.2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

Orta karbonlu çelikler, yapılarında %0,30 ile %0,60 karbon bulunduran çeliklerdir. Çelik yapısında karbon oranının fazla olması, kaynak işlemlerini ve soğuk şekillendirmeyi zorlaştırmaktadır. Ancak su verilerek sertleştirme işlemi uygulanarak sertleştirilebilmektedir. Bu özelliği sayesinde ısıl işlem uygulamalarıyla yapısal durumları değiştirilebilmektedir [30].

4.2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

Yüksek karbonlu çelikler, en az yapısında %0,60 karbon oranı bulunduran çeliklerdir. Karbon oranlarının fazla olması bu malzemelerin mukavemetlerinin yüksek olmasını sağlar. Bu malzemeler daha çok dayanıklılık ve aşınmalara karşı yüksek performans gerektiren yerlerde tercih edilmektedir [30]. Bu malzemeler yüksek yükler altında dayanıklı oldukları için pres kalıpları gibi parçalarda ve ana mekanizmalar da tercih edilebilirler.

4.2.2. Kullanım Amacına Göre Çelik Türleri

4.2.2.1. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelikler, karbon, demir ve nikel içerikli çeliklerdir. Paslanmaz özelliğine sahip olabilmesi için en az %12 krom alaşımı bulunması gerekmektedir. Krom alaşımın yapısında bulundurulmasının sebebi, yüzeyde oksitlenmeye karşı direnç sağlamasıdır. Krom çeliğin yüzeyinde, yüzey tabakası halindedir. Paslanmaz özelliği dışında krom, yüksek sıcaklıklara karşıda dayanım sağlamaktadır [31].

4.2.2.2. Yapı Çelikler

Yapı çelikleri genel olarak inşaat yapıların da kullanılan çelik türüdür. Binaların taşıyıcılarında kullanılmaktadır. Yapı çeliklerinin kullanım alanları, köprüler, prefabrik fabrikalar, elektrik nakil hatları ve yüksek yapıda binalar yapı çeliklerinin kullanım

alanlarına örnektir. St grubu çelikler yapı çelikleri grubundadır. İnşaat ve sanayi alanlarında genellikle St37, St44 ve St52 çeşitleri kullanılmaktadır [32].

4.3. Yüksek Hız Çelikleri

Yüksek hız çelikleri, takım çeliği olarak kullanılmaktadır. Talaşlı imalatta 400–600 °C sıcaklıklara kadar kullanılabilmektedir. Yüksek hız çelikleri, yüksek sertlik, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara karşı iyi mekanik özellikler gösterir. Yapısında molibden, tungsten, krom ve vanadyum elementleri bulunur. Minimum %0,65 oranında karbon içerir [33].

Yüksek hız çeliklerinden beklenen özellikler;

• İyi derecede tokluk

• Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık

• Yüksek sertlikte olmaları

• Aşınmaya karşı dayanım [34] gibi teknik özelliklere sahip olmaları tercih edilmektedir.

4.3.1. Yüksek Hız Çeliklerin Sınıflandırılması

Yüksek hız çeliklerinin içyapılarında bulunan alaşımlara göre türleri belirlenmektedir. Genellikle tungsten ve molibden olarak iki çeşitte incelenebilir.

4.3.2. Tungsten Yüksek Hız Çelikleri

Tungsten yüksek hız çeliklerinin içyapısında krom, vanadyum ve karbon elementleri bulunur. Tungsten özelliği sayesinde yüksek sıcaklıklara ve yüksek sertliklere dayanıklı olmalarından kaynaklı, genellikle kesme takım çeliği olarak tercih edilmektedir. Kobalt elementinin alaşım yapısında bulunması, çeliğin kızıl sertlik özelliğini artırmaktadır. Simgesel gösterimi T harfi ile ifade edilir [1].

4.3.3. Molibden Yüksek Hız Çelikleri

Molibdenli yüksek hız çelikleri M harfi ile gösterilmektedir. Yapısında molibden, tungsten, krom, vanadyum, kobalt ve karbon bulunur. Tungstenli çeliklere göre daha yüksek tokluk

gösterir. Sertlik özelliği yüksek sıcaklıklarda da direnç gösterebilmektedir. Genel olarak 62–65 HRC sertlik değerlerine sahiptir [33]. M1-M52 arasındaki çeşitli farklı özelliklerde molibden yüksek hız çelikleri mevcuttur.

4.4. Kesici Takımlar

4.4.1. Kesici Takım Malzemeleri

Kesici takımların malzemelerine göre sınıflandırılması;

- Yüksek hız çeliği takımları
- Seramik takımları
- Sermet takımlar
- Metal katkılı karbür takımları
- Kübik bor nitrür takımları

4.4.1.1. Yüksek Hız Çeliği Takımları

Yüksek hız takım çelikleri mukavemetli bir yapıya sahip olmaları nedeniyle sertlik ve tokluk istenen alanlarda kullanılabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde birçok frezeleme işlemlerinde kullanılabilmektedir [33].

4.4.1.2. Seramik Kesici Takımlar

Seramik kesici takımlar, yapılarında silisyum nitrik ve alüminyum oksit bulunduran malzemelerdir. Sıkıştırma işlemi uygulanmış seramik tozlar aynı zaman da yüksek ısıl işlem etkisinde bırakılarak daha dayanıklı hale getirilmektedir. En çok tercih edilen kesici takım olma sebebi ise yüksek sıcaklığa karşı dirençli olması ve yüksek sertliğe sahip bir yapıda olması işlenebilirlik açısından önemli bir yere sahiptir [35].

4.4.1.3. Sermet Takımlar

Sermet yapısında tungsten karbür olması gerekirken titanyum karbür bulunduran, titanyum karbonitrür ve titanyum nitrür gibi titanyum bazlı karbürlerin kullanıldığı sinterlenmiş

karbürlerin genel adıdır. Sermet adı, seramik ve metal bileşenlerinin birleşiminden gelir. Genellikle titanyum karbür içeren sinterlenmiş karbürler sermet olarak kabul edilir. Sermet kesici takımlar, düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle sıcaklık değişimlerinden ötürü ısıl çatlaklara karşı hassastır. Soğutma sıvısı kullanılmadığı zamanlarda iyi performans gösterirler. Ancak soğutma sıvısı kullanıldığında, sıcaklık değişimlerini önlemek için sıvının doğru şekilde ve yeterli miktarda kullanılması önemlidir [36].

4.4.1.4. Kübik Bor Nitrür Takımlar

Kübik bor nitrür takımlar, tam kapasite yoğunluğundaki bor nitrür ile miktarları az seramik ya da metal bağlayıcılar, yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında karıştırılarak üretilir. Sertlik bakımından elmas kesici takımlara en yakın kesici takımdır. Aşınmalara karşı oldukça dirençlidir. Yapısal olarak kırılgan yapıdadırlar. Fakat seramik özellikli kesici takımlara göre daha tokluk özelliklere sahiptir. Bunda dolayı seramik kesici takımlarına göre daha verimlidir [20].

4.5. Frezelemede Kesme Sıvıları

Frezeleme işlemlerinde kesme sıvıları, kesme bölgesinin uygun koşullarda yağlanması, soğutulması ve talaşların kesme bölgesinden uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır.
Kesme sıvıları sürekli akış ve manuel olarak kullanılmamaktadır. Kesme bölgelerine doğrudan basınçlı bir şekilde uygulanabilmektedir. Bu yöntem takımla birlikte bir mekanizmaya sahip olduğu gibi dış ortamdan da uygulanabilmektedir [37].

4.5.1. Soğutma/Yağlama Sıvıları

Kesme sıvıları talaşlı imalat yöntemlerinde soğutma/yağlama işlemi olarak tercih edilmektedir. Talaşlı imalat yöntemleri ve metal işleme esnasında sürtünmeden kaynaklı oluşabilecek yüksek sıcaklığı azaltmak için kullanılmaktadır. Aynı zamanda kesme sıvıları takımda aşınmaları önler ve işlenen parçanın yüzey kalitesini artırmaktadır. Genellikle su katkılı, bitkisel, sentetik veya mineral içerikli yağ tiplerinin kullanıldığı bu işlemlerde, işlenecek malzemenin yapısına en uygun soğutma sıvısının seçilmesi gerekmektedir.

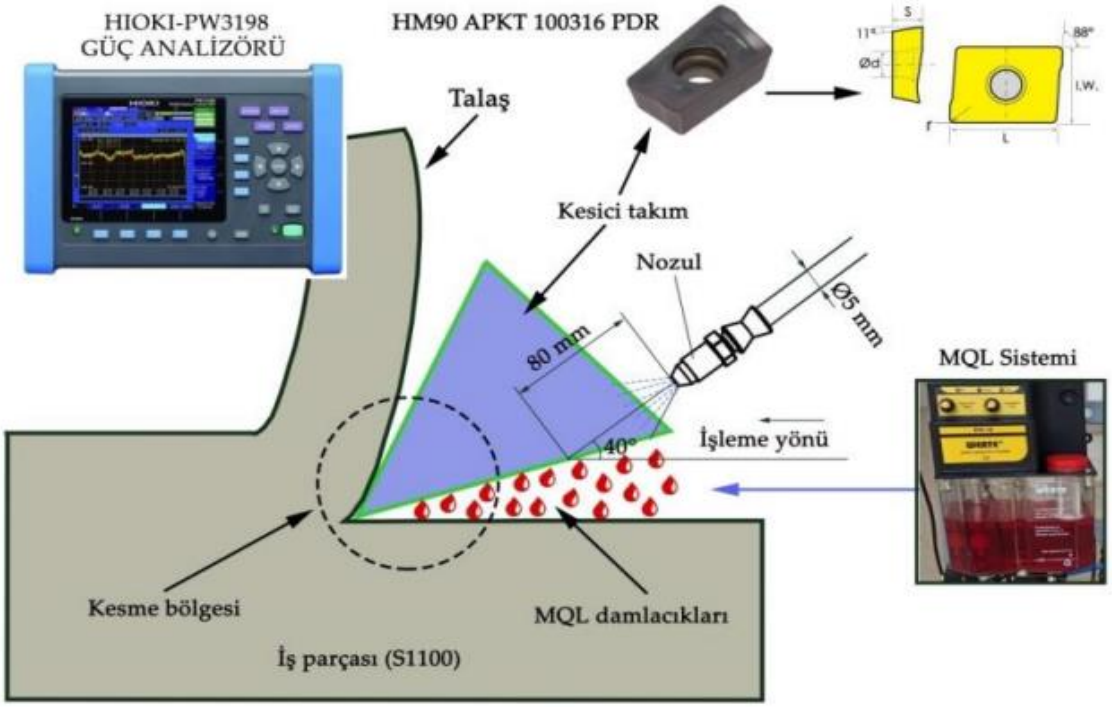
Soğutma işlemi, frezeleme işlemi yapılırken parça ve takım uçlarında oluşan yüksek ısının azalması için kullanılır. Soğutma sıvıları yalnızca sürtünmeden kaynaklı soğutma işlemeli olarak kullanılmasının yanı sıra aynı zamanda talaş uzaklaştırma işleminde de kullanılmaktadır. İşlenecek olan malzemenin yapısına göre uygun olan soğutma sıvısı tercih edilmektedir.

4.5.2. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi

Minimum miktarda yağlama, diğer bir adıyla kesme sıvısının en az miktarda kullanılmasıdır. Günümüzde gelişen teknolojilerle beraber hızlı üretim yöntemlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Seri üretimde, üretim maliyeti ve çevre kirliliği en aza indirilmesi üretim esaslarındandır. MMY tekniğinin temel amaçlarından en önemlisi, düşük miktarda kesme sıvısı kullanarak yeterli yağlama ve soğutma etkisi sağlamaktır. Basınçlı hava yardımıyla hem kesici takımda soğutma hem de talaşları uzaklaştırma konusunda işlemede pratiklik sağlamaktadır. Soğutma etkisi dışında, kesici takım ve çalışma yapılan malzemenin yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi azaltarak takım ömrünü doğrudan etkilemektedir [38].

Üretimde bir diğer esasta düşük maliyettir. Kesme işlemi yapılırken kullanılan enerji maliyeti de önemlidir. Kuru ve kesme sıvısıyla yapılan frezeleme işlemleri kıyaslandığında aralarında enerji tüketimi farkı vardır. Kesme sıvısı hem takım ucunda hem de iş parçasının yüzeyindeki sürtünmeyi azaltacaktır. Bu da freze tezgahının daha düşük güçlerde çalışmasını sağlayacaktır. Düşük güçte çalışma ise enerji kullanımını düşürerek üretim maliyetlerinin azalmasına katkıda bulunmaktadır [8].

MMY yönteminin kullanımında frezeleme işlemini etkilemektedir. Kesme sıvısının uygun basınçlar altında püskürtme yapılarak iş parçasının ve kesici takım ucuna uygulanması gerekmektedir. Basınçlı sıvının uygun mesafede püskürtülmesi, iş parçasının yüzey kalitesini de doğrudan etkilemektedir. İş parçasına uzak mesafede püskürtme yapıldığında, iş parçasının yüzey kalitesini olumlu yönde etkilemektedir. Yalnızca püskürtme mesafesi değil aynı zamanda kesme hızları da frezelemeyi doğrudan etkilemektedir [39].



Şekil 4.1. Minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemi [8]

4.5.3. Nanotoz Katkılı MMY

Nano MMY'da kullanılan karışım malzemelerinin, nanometre boyutlar haline getirilerek kesme sıvılarına karıştırılan nano parçacıklarla yapılan işlenebilirlik işlemine nano MMY denir. Kesme sıvılarına katkı maddesi olarak kullanılan bu nano parçacıklar, iş parçasını ve takımda oluşacak olan yüksek sıcaklıklara karşı önlem amaçlı kullanılmaktadır. En aktif şekilde kullanılan nano parçacıklar, molibden disülfür (MoS_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve grafen Vb. malzemelerdir [40]. Nano ölçekteki partiküller, bulunduğu akışkanın ısıl iletkenliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu parçacıkların akışkan içerisindeki düzensiz ve rastlantısal hareketleri sayesinde ısı iletimi daha etkilidir [41].

4.5.4. Yağ Bazlı Soğutma Yöntemi

İşlenecek parçanın mekanik durumlarına göre yalnız ya da karışım yapılarak kullanılmaktadır. Geleneksel yağ soğutma olarakta bilinmektedir. Bu tür soğutma yöntemlerinde, kesme bölgesine sürekli yağ akışı sağlanması gerekmektedir. Sürekli akış nedeniyle yüksek miktarda kesme sıvısı tüketilmektedir. Bu yöntem, yüzey kalitesi

açısından olumlu sonuçlar sağlarken, fazla kesme sıvısı kullanımı çevresel etkiler ve atık yönetimi açısından önemli dezavantajlar oluşturmaktadır [42].

4.5.5. Kriyojenik Soğutma

Sıvı azot (N_2, −196 °C) veya sıvı karbondioksit (CO_2, −78 °C) gibi kriyojenik akışkanların kullanıldığı soğutma yöntemi, kriyojenik soğutma olarak adlandırılmaktadır. Uygulama amacına bağlı olarak takımın, iş parçasının veya talaşın soğutulmasında kullanılmaktadır [15].

4.5.6. Su-Alkol Bazlı Soğutma Yöntemi

Su-alkol bazlı soğutma yöntemlerinde, su ve alkol karışımı kullanılmaktadır. Alkolün buharlaşması sudan daha önce olduğu için daha erken ısı kaybı oluşturabilmektedir. Su içerisindeki alkol karışımı işlenen parça yüzeyinde ve takım ucundaki oluşan ısıyı hızlı bir şekilde uzaklaştırabilmektedir. Isı transferini hızlı şekilde yaparken aynı zamanda karışımdaki su ile oluşan talaş daha rahat uzaklaştırılır. Yalnız saf su kullanımda korozyon riski artmaktadır. Alkol karışımlı saf su kullanımında korozyon riski azalmaktadır. Avantajları olduğu gibi dezavantajlarıda vardır. Alkolün yanıcı özelliği bakımından dikkat edilmesi gerekir. Alkolün saf suya oranla buharlaşması hızlı olmaktadır. Buda daha fazla soğutma sıvısına ihtiyaç demektir. İşleme maliyetinde artış olmasına neden olabilir [43].

4.6. İşlenebilirlik Metrikleri

4.6.1. Takım Aşınmaları ve Çeşitleri

Sürtünmeden kaynaklı, kesici takımlarda oluşan yüksek sıcaklıklar ve fiziksel aşınmalar oluşmaktadır. Kesici takımlar Seri ve kaliteli üretim açısında oldukça önemlidir. Kesici takım ve parça yüzeyinin temas etmesi sonucu oluşan sürtünmeden kaynaklı hem parçada hem de takımda aşınma oluşabilir. Sürtünme takım aşınmasını doğrudan etkilediğinden dolayı maliyeti de artırmaktadır. Daha kaliteli ve düşük maliyetler üretim yapılması için kesme sıvıları kullanılması gerekmektedir. Takım aşınmasını önlemek için dikkat edilmesi gerekenler şunlardır;

- Uygun kesme parametrelerinin seçimi
- İşlenecek malzemeye uygun kesici takım
- Uygun yağlama/soğutma sıvıları

4.6.1.1. Serbest Yüzey Aşınması

Takımında işlene iş parçasıyla direk doğrudan temas halinde olan yüzeye serbest yüzey adı verilmektedir. Serbest yüzeyde oluşan aşınma bölgesinin, işlenen iş parçası ve takım ucunun yüzeyle sürtünmesi sonucu deformasyonlar ve yüzey bütünlüğünü bozucu etkiler gözlenebilir. Bu durum, işleme kalitesini olumsuz yönde etkiler [44].

4.6.1.2. Krater Aşınması

Krater aşınması, kesici takımın oluşan talaş yüzeyinde oluşan sürtünmelerin derinleşerek çukur halini alması durumuna krater aşınma denir. Bu aşınmanın asıl nedeni, kesici takımlar ve oluşan talaşlar arasında çok fazla mekanik gerilmeler oluşabilir. Bu nedenle sıcaklık seviyesi en üst seviyelere ulaşması krater aşınmayı oluşturur [36].

4.6.1.3. Plastik Deformasyon

Plastik deformasyon, kesici uç tarafından yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalması sonucunda görülen deformasyon tipidir. Kesme ve ilerleme hızlarının fazla olması sıcaklık ve basıncın artışına neden olmaktadır. Buda talaş kaldırma kritik sıcaklık sevilerinin fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu tip sorunların yaşanmaması için kenar uç yarıçapının ve takımın geometrik yapısının uygun seçilmesi gerekmektedir [22].

4.6.1.4. Takım Kırılması

CNC işlemede takım aşınmalarında yanlış kesme parametreleri, uygun olmayan takım seçimi, yetersiz soğutma ve yağlama, hatalı montaj ve makine bakım eksiklikleri gibi faktörlerden kaynaklanmakta, bu durum takımın erken aşınmasına veya kırılmasına yol açabilmektedir.

4.6.2. Kesme Sıcaklığı

İşleme esnasında oluşan sıcaklık, malzeme kalitesini ve takım ucunu etkilemektedir. Kesme sıcaklığını etkileyen unsurlar şunlardır;

- Kesici takımda kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaması
- Kesme işlemine uygun parametrelerin (kesme-ilerleme hızları Vb.) seçilmemesi
- Kesici takımın uygun tipte seçilmemesi
- Uygun yağlama/soğutma sıvıların kullanmaması

4.6.3. Yüzey Pürüzlülüğü

İşlenebilirlikte yüzey pürüzlülüğü, malzemelerin işlenmesi sırasında yüzeyinde oluşan işleme deformasyonunu ifade eder. İşlenen malzemenin üretim kalitesini doğrudan etkilemektedir. İşleme parametreleri uygun seçilmezse yüzey bozukluklarına sebep olabilir ve ilave işlemler gerektirebilir [45]. Kesme parametreleri, kesme sıvısı ve kesici takımlar yüzey kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir.

4.6.4. Tüketilen Enerji Miktarı

Frezeleme işleminde kullanılan enerji tüketimini belirlenmesinde freze tezgahının türü, iş parçası, kesici takım ve ucu, kullanılan kesme sıvısı ve kesme parametreleri doğrudan etkilediği literatür taramaları sonucunda tespit edilmiştir. Kesme sıvısının uygun kullanılması frezeleme işleminde sürtünmeyi azaltacaktır. Bu durumda tezgahın daha düşük güçlerde çalışmasına sebep olacaktır. Frezeleme işleminde gücü doğrudan etkileyen bir diğer faktör ise ilerleme – kesme hızının miktarı da doğrudan etkilemektedir [46].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Çelik Seçimi

Bu çalışma kapsamında yapılan frezeleme deneylerinde, 1.2080 hava çeliği (Şekil 5.1) malzemesi iş parçası olarak seçilmiştir. Boyutları 250 × 150 × 20 mm olan bu çelik, genellikle yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip olmasıyla bilinmektedir.

Hava çeliği, ileri mühendislik gerektiren endüstriyel sanayilerde tercih edilmektedir. Mukavemetli yapısı sayesinde kalıplama olarakta kullanılmaktadır. Aşınmaya karşı dirençli olan bu çelikler, şaft ve dişli gibi haraketli kullanılan malzemelerde tercih edilebilir. Karbon oranı fazla olan çelik türlerindendir. Malzeme içyapısı olarak karbon, silisyum, mangan ve krom gibi elementleri bulundurur.1.2080 hava çeliğinin içyapısında %2 karbon ve %11 krom elementleri bulunmaktadır. Sert yapıda olan hava çelikleri, genellikle freze kesici takımlarında, kılavuzlar ve matkaplarda uç malzemeleri olarak kullanılmaktadır [47].

Freze terzgahında işleme koşullarımıza göre dikdörtgen şeklinde çelik malzeme türü tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan 1.2080 hava çeliğinin teknik özellikleri Tablo 5.1’de ve fiziksel özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. 1.2080 Hava çeliği iş parçası görseli

Tablo 5.1. 1.2080 Hava çeliği deney malzemesinin özellikleri [47]

Malzeme Türü	1.2080 Hava Çeliği
Malzeme eni	200 mm
Malzeme boyu	200 mm
Malzemenin kalınlığı	15 mm
Malzemenin ağırlığı	8 kg
Malzemenin geometrik yapısı	Dikdörtgen

Tablo 5.2. 1.2080 Hava çeliğinin fiziksel özellikleri [47]

Yumuşatma Tavlaması	200-260 HP
Sertlik	54-62 HRC
Isıl İletkenlik (20 °C)	16,7 W/m.K
Yoğunluk	7,85 gr/cm³

Yüksek sertlik özelliğine sahip olan 2080 hava çeliğinin içyapısında C, Si, Mn ve Cr elementleri bulunmaktadır. Sertlik 63-65HRC aralığındadır.

5.2. Kesici Takım

Malzeme olarak seçmiş olduğumuz 1.2080 Hava çeliği yüksek sertlik özelliğine sahiptir. Kesme işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklık ve sürtünme kuvvetleri, takım ömrü ve iş parçası yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğundan, uygun kesici takım seçimi kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda, deneylerde Korloy marka APXT 1035 PDSR tipi, yüksek sıcaklık ve sürtünmeye dayanıklı, sert kaplamalı kesici uçlar kullanılmıştır. Deneylerde, kesici uçların kesme performansını artırmak ve tutarlı sonuçlar elde etmek için 90° kesme açısında kullanımı önerilen, tek ağızlı ve değiştirilebilir uçlu takımlar tercih edilmiştir. Deneylerde Şekil 5.2'de gösterilen 12 mm çapında kesici takım kullanılmış olup, her deneyde yeni bir kesici uç tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan kesici takım ucu malzemesinin teknik özellikleri Tablo 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Kesici takım ucu

Tablo 5.3. Korloy marka APXT 1035 PDSR kesici uç teknik özellikleri [48]

Ürün Kodu	APXT 1035 PDSR
Marka	Korloy
Malzeme	Karbür
Kalınlık	1/8”
Kaplama	PVD

5.3. Kesme Sıvısı

Deneylerde KT-2000 (Şekil 5.3) kesme sıvısı kullanılmıştır. Kt-2000 kesme sıvısı çeliklerin işlenebilirliğinde soğutma/yağlama sıvısı olarak kullanılmaktadır. Yüksek soğutma/yağlama özelliğinden dolayı korozyon oluşumuna ve yüzey kalitesinden bozulmaları önlemektedir. Biyolojik olarak ayrışabilen bu sıvılar çevre dostu sıvılardır [49]. Deneylerde kullanılan kesme sıvısının özellikleri Tablo 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kesici takım kesme sıvısı görseli [49]

Tablo 5.4. Kesme sıvısının özellikleri [48]

Ürün Adı	KT-2000 Kesme Sıvısı
Yoğunluk (20 ºC)	0,85/cm^3
Viskozite (40 ºC)	12 cSt
Parlama Noktası	>175 ºC
Görünüş	Açık Kırmızı
Klorin İçeriği	İçermez
Ürün Adı	KT-2000 Kesme Sıvısı

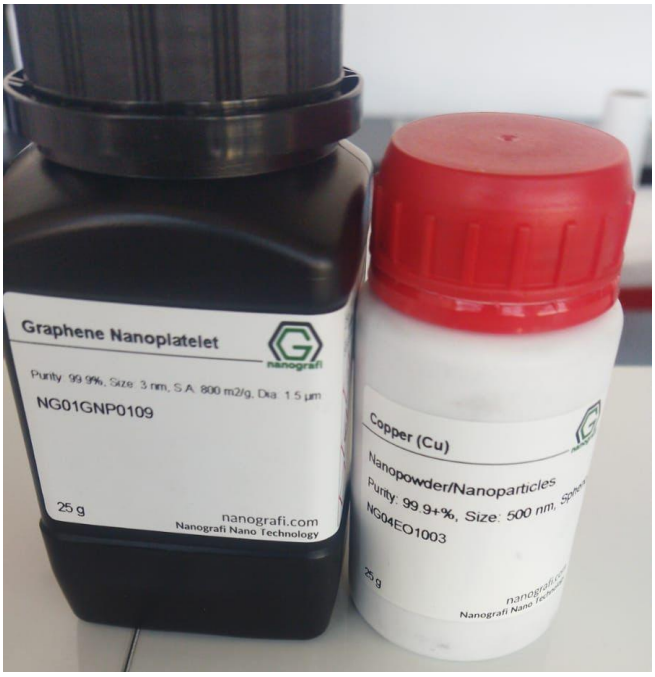
5.4. Kesme Sıvısına Eklenen Nano Malzemeler

Kesme sıvıları tek başına kullanıldığında etkisi istenilen seviyelerde olamayabilir. Kesme sıvılarının içlerine eklenen katkı malzemeleriyle kendi özellikleri artırılarak istenilen seviyelere getirilebilir ya da farklı karışımlar oluşturularak yeni bir özellik kazandırılabilir. Bu çalışmada kullanılan KT-2000 kesme sıvısına ilave olarak eklenen nanotozlar;

- Graphene Nanoplatelet
- Copper (Cu) Nanopowder/Nanoparticles

Farklı oranlarda eklenen nano parçacıklar ile oluşturulan kesme sıvılarıyla sürtünmeden kaynaklı yüzeyde oluşacak yüksek ısının azaltılması sağlanmaktadır. Isı seviyesinin azalmasıyla parça yüzeyinde oluşacak pürüzlülük azalacaktır. Sürtünmenin azalmasıyla aynı zamanda da takım ömründe iyileşme olacaktır. Kesme sıvılarının frezeleme işleminde

etkisi kaliteli üretim ve üretim maliyeti üzerinde etkisi çok fazladır [50]. Nanotozların görseli Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 GNP ve Bakır nanotoz görseli

5.4.1. Graphene Nanoplatelet

Grafen yapısının tamamının hidrojelenmiş yapıda olup ve kalınlık olarak nanometre boyutunda olan nanotoz grubu malzemelerdir. Elektriksel iletkenlikleri yoktur ve yalıtkan malzemelerdir. Genel olarak kompozit malzemelerde ilave katkı maddesi olarak kullanılır. Bu çalışmada, yağlayıcı yüzeylerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Kesme sıvısının, sürtünmeye karşı direncini artırmak için ilave katkı maddesi olarak kullanılmıştır [49]. Deneylerde kullanılan kesme sıvısının özellikleri Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5. GNP Nanotoz özellikleri [50]

Malzeme	GNP Nanotoz
Saflık	99.9+%
Kalınlık (nm)	3
Çap (um)	45778
Belirli Yüzey Alanı (m^2/g)	320
İletkenlik (S/m)	1400-1900
Renk	Siyah

5.4.2. Copper (Cu) Nanopowder/Nanoparticles

Bakır içerikli nanopartiküller frezelemede kullanılmasının asıl amacı, bakırların ısı iletimi yüksek olmasıdır. Bu özelliği sayesinde iş parçasının işlem gören bölgesinde oluşacak olan yüksek sıcaklıkları hızlı ve etkili şekilde azaltmaktadır. Bakır parçacıklarının sürtünmeyi azaltma özelliği sayesinde, iş parçasının ve takım uçunda oluşacak olumsuzlukları en aza indirmektedir. Daha kaliteli ve pürüzsüz üretime katkı sağlamaktadır [50]. Deneylerde kullanılan kesme sıvısının özellikleri Tablo 5.6'de verilmiştir.

Tablo 5.6. Copper (Cu) Nanopowder/Nanoparticles [50]

Yığın Yoğunluğu (g/cm^3)	0,7-1,1
Gerçek Yoğunluk (g/cm^3)	8,9
Renk	Kırmızımsı Kahverengi
Şekil	Küresel
Kristal Yapı	Kübik
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	500
Özgül Yüzey alanı (m^2/g)	4,6
Elemental Analiz – Cu (%)	≥ 99,95
Elemental Analiz – Fe (%)	≤ 0,02
Elemental Analiz – Ni (%)	≤ 0,01
Elemental Analiz Diğerleri	≤ 0,01

5.5. Yüzey Aktif Maddenin Eklenmesi

Baz sıvı içerisine eklenen nano tozların daha iyi dağılması ve homojen bir karışım elde edilmesi amacıyla, nano tozların ağırlığının %0,1'i oranında yüzey aktif madde (SDS) ilave edilmiştir.

5.6. CNC Freze Tezgâhı

CNC Freze tezgahı (Şekil 5.5) Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan tezmaksan Dahlıh MCV-860 marka kullanılmıştır. CNC Freze tezgahı dik işlemelidir. Freze tezgahının max hızı 10.000 rpm'dir. Motor gücü 7, 5kW'tır.CNC freze tezgahının özellikleri Tablo 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Dahlıh MCV-860 CNC tezgahı

Tablo 5.7.Dahlıh MCV-860 CNC tezgahı teknik özellikleri [51]

Dahlih MCV-860 CNC	Dikey İşleme
Maksimum Tabla Yükü	800 kg
Tabla Yüzey Konfigürasyonu	3x18x150
Tabla İş Mili Mesafesi	15-700 mm
İş Tablası Ebatları	950 mm x 550 mm
Tabla Yükü	800 kg
X eksen Hareketi	860 mm
Y Eksen Hareketi	550 mm
Z Eksen Hareketi	550 mm
Maksimum Takım Boyu	300 mm
Maksimum Takım Ağırlığı	7 kg

5.7. Ölçüm Prosedürleri

5.7.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı

Her deney işlemi sonunda yüzey pürüzlülüğü kontrolleri yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü kontrolleri, Şekil 5.6'te gösterilen Time TR-200 (3200) yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taşınabilir yapıda olmasıyla kullanımı rahat bir cihazdır. Mikro yapıdaki yüzey pürüzlülüklerini gösterebilmektedir. Cihazın uç kısmında bulunan stylus'un iş parçası üzerinde hareketiyle ölçüm yapılmaktadır. Yapılan ölçümler neticesinde, kullanılan parçanın yüzeyindeki ortalama pürüzlük değeri (Ra) tespit edilmektedir. Bu ölçüm parametreleri sayesinde işlenen iş parçasının, yüzey kalitesini ve standartlara uygun olup olmadığı tespit edilebilmektedir. Tablo 5.8'de Time TR-200 yüzey ölçüm cihazı teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.8. Time Tr-200 yüzey ölçüm cihazı teknik özellikleri [52]

Marka/Model	Time tr-200 (3200)
Ekran	LCD
PC Bağlama	Evet
Ekran Boyutu	50x30 mm
Güç Kaynağı	Li-Ion Batarya Şarj Edilebilen
Maksimum Ölçme Boyu	17,5 mm
Minimum Ölçme Boyu	1,3 mm
Minimum Delik İç Çapı Ölçümü	TS100 Prob ile 6 mm
Minimum Delik İç Derinlik Ölçümü	TS100 Prob ile ilerleme hızı 1,0 mm/s'de 15mm
Ağırlık	480 gr



Şekil 5.6. Time tr-200 Yüzey pürüzlüğü ölçüm cihazı [52]

5.7.2. Kesme Sıcaklığı Ölçüm Cihazı

Bu çalışmanın deneysel aşamasında, yüzeydeki oluşan sıcaklıkları analiz edebilmek için şekil 5.7'de gösterilen testo markasının 885 model termal görüntüleme cihazı kullanılmıştır. Teknik özellikleri tablo 5.9'da verilen testo 885 cihazının, 640x480 piksele kadar görüntüleme özelliği bulunmaktadır. Dijital kamerası sayesinde kaliteli bir analiz sağlamaktadır. Testo 885 Cihazı, 76.800 ayrı sıcaklık ölçüm noktasına sahip olması sayesinde, hedeflenen yüzeyleri yüksek çözünürlükte ve büyük bir hassasiyetle görüntüleyebilmektedir. Görüntüleme standart sıcaklık algılama aralığı 30–100 °C olup, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak 0–350 °C ve 0–650 °C şeklinde kon figüre edilebilmektedir. Termal kamera, kesme bölgesine olan yaklaşık 500 mm mesafeye konumlandırılmış ve bu mesafe hem görüntü netliği hem de sıcaklık ölçüm doğruluğunu optimize edecek şekilde belirlenmiştir [53].

Tablo 5.9. Kesme sıcaklığı ölçüm cihazı teknik özellikleri

Dedektör Çözünürlüğü	320x240 Piksel (76.800 nokta); opsiyonel 640x280 SR
Termal Duyarlılık	<30 mK
Sıcaklık Aralığı	-20…. 350 °C
Görüntü Yenileme Hızı	33 Hz
Lensler	Standart 30 °; Opsiyonel telefoto 11°



Şekil 5.7. Testo 885 termal ölçüm cihazı [53]

5.7.3. Kesici Takım Aşınmasında Kullanılan Dijital Ölçüm Cihazı

Kesici takım aşınmalarının görüntülemesi, Şekil 5.8'de gösterilen dijital ölçüm kamerası olan Insize ISM PM200SB marka kamerası ile gerçekleştirilmiştir. Her deney tamamlandığında kesici takımdan görüntü alınmıştır. Bu görüntüler neticesinde, deneyler sonuçlarına göre maksimum yan aşınma miktarı (V_b max) belirlenmiştir. Insize ISM PM200SB cihazının teknik özellikleri Tablo 5.10'da gösterilmiştir.

Tablo 5.10. Insize ISM PM200SB Cihaz teknik özellikleri [54]

Gerçek Görüş Açısı	45 °
Maksimum Büyütme	200 Kat
Ürün Ağırlığı	1,94 kg
Gerilim	3 V
Güç Kaynağı	AC/DC
Piksel	Çözünürlük 1600x1200
Aydınlatma	Dahili ayarlanabilir LED



Şekil 5.8. Insize ISM PM200SB Dijital aşınma ölçüm cihazı [54]

5.7.4. pH Cihazı

Bu çalışmada pH cihazı (Şekil 5.9), kesme sıvılarının pH değerin, tespit etmek için kullanılmaktadır. Kesme sıvısının asidik veya bazik olduğunu tespit eder ve bu da işlem performansını, takım ömrünü ve iş parçası yüzeyinin kalitesini etkiler. Eğer pH değeri doğru seviyede tutulmazsa, sıvı ya takımın aşınmasını hızlandırabilir ya da iş parçasının yüzeyinde bozulmalara neden olabilir. Bu yüzden pH cihazı, kesme sıvılarının doğru pH seviyelerine sahip olmasını sağlar, böylece işlem verimliliği artar, takım ömrü uzar ve daha kaliteli yüzeyler elde edilir.



Şekil 5.9. pH cihazı [55]

5.7.5. Viskozite Cihazı

Kinematik viskozite, bir sıvının yerçekimi etkisi altında akışına karşı gösterdiği iç direnç ölçüsüdür. KT-2000 sentetik yağı kullanılarak, sabit bir hacme sahip sıvının, kalibre edilmiş bir viskozitemetre içindeki kılcal bir damardan belirli bir mesafeyi, kontrol edilen bir sıcaklıkta geçmesi için geçen süre saniye cinsinden ölçülerek kinematik viskozite belirlenir [55]. Kinematik viskozite cihazının görüntüsü şekil 5.10'te ve teknik özellikleri Tablo 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.10. Kinematik viskozite cihazı [55]

Tablo 5.11. Kinematik Viskozite Ölçüm Cihazı Teknik Özellikleri [55]

Ölçüm Aralığı	10.000 mm^2/s Otomatik Ölçüm
Süre	0,00-999,99 Saniye
Havuz Hacmi	18 L
Isıtıcı	Kılıflı Isıtıcı
Aydınlatma	Floresan Lamba, 6 W
Havuz Sıcaklık Ayarı	20 – 100 °C arasında
Havuz Temizlik ve Kurutma	Toulen ve Hava ile kurutma
Havuz Malzeme Yapısı	Drenajlı Paslanmaz Çelik

5.7.6. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi ve Ekipmanları

Bu çalışmanın deneysel aşamalarında, Şekil 5.11'de gösterilen Werte markasına ait STN15 model Minimum miktarda yağlama ekipmanları kullanılmıştır.



Şekil 5.11. MMY

5.8. Deneysel Aşama

Bu çalışmada gerçekleştirilen frezeleme deneyleri, Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan 3 eksenli CNC dik işleme tezgahı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan işleme tezgahı, Dahlih MCV-860 model olup, maksimum 10.000 dev/dk mil dönüş hızına ve 7,5 kW mil gücüne sahiptir. Tezgâh, FANUC Series Oi–MD kontrol ünitesi ile donatılmıştır ve hem yarı otomatik hem de tam otomatik işleme yöntemine olanak tanımaktadır.

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak yüksek dayanım, sertlik özelliklerine sahip 1.2080 hava çeliği kullanılmıştır. Kesme işlemlerinde, hava çeliğinin mekanik özelliklerine uygun olarak Korloy firmasına ait APXT 1035 PDSR kodlu karbür esaslı kesici uçlar tercih edilmiştir. Bu uçlar, yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direnci sayesinde, özellikle zorlu

işleme koşullarında boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi açısından başarılı sonuçlar vermektedir. Frezeleme işlemleri sırasında "Zig" takım yolu stratejisi uygulanmış dikey frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, kesme kuvvetlerinin takım ve iş parçası üzerinde daha kontrollü dağılmasını sağladığı için tercih edilmiştir.

Kesme işlemlerinden önce her bir numunenin yüzeyinde yer alabilecek oksitlenmiş tabakaların, cüruf kalıntılarının ve gömülü sert parçacıkların kesici takım üzerinde olumsuz etkiler yaratmasını engellemek amacıyla, işleme başlamadan önce yüzeylerden ortalama 0,5 mm kalınlığında bir talaş kaldırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem hem takım ömrünü uzatmak hem de tekrarlanabilir ölçüm sonuçları elde etmek adına kritik öneme sahiptir. Soğutma ve yağlama amacıyla işleme süresince KT-2000 tipi kesme sıvısı kullanılmıştır. Bu sıvı, işleme esnasında oluşan ısının kontrol altına alınması, takım aşınmasının azaltılması ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi açısından etkili bir katkı sağlamaktadır.

Yapılan frezeleme deneylerinde, Werte Micro STN15 minimum miktarda yağlama cihazı kullanılmıştır. MMY yöntemi ile altı farklı deney yapılmıştır. MMY yönteminden yağ olarak MMY yağı kullanılmıştır. Yağ akış hızı 50 mL/h olarak kullanılmıştır. Deneyde yapılan frezeleme işleminin tamamı 5 bar olarak yapılmıştır. Kesme sıvısı haznesi her deney için temizlenerek yeniden doldurulmuştur. Nüzul açısı 35 derece olup çapı 3 mm'dir. Nozul ile iş parçasına uzaklığı 100 mm olarak ayarlanmıştır.

Deneysel çalışmanın bir diğer önemli bileşeni ise, kesme sıvısına ilave edilen nano parçacıklardır. Bu kapsamda, kesme ortamına performans artırıcı katkı maddesi olarak Graphene Nanoplatelet (GNP) ve Copper (Cu) nanopowder/nanoparticles (nano toz bakır) ilave edilmiştir.

Kesme parametreleri, kesici takım üreticisinin kataloğunda önerilen kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Her deney öncesinde iş parçası yüzeyi basınçlı hava ile temizlenmiş, yüzeydeki kir, toz ve yağ kalıntıları giderilerek işleme koşullarının tekrarlanabilirliği sağlanmıştır. Deneysel aşamaların görseli Şekil 5.12'de verilmiştir.

5.8.1. Deney Parametreleri

Frezeleme deneylerinde iki farklı kesme hızı (45 ve 65 m/dk) ve iki farklı ilerleme hızı (0,05 ve 0,08 mm/dev) kullanılmıştır. Kesme parametreleri literatür araştırmaları dikkate alınarak seçilmiştir. Beş farklı [kuru, MMY-Sentetik yağ, N1-MMY Emülsiyon, N2-MMY Emülsiyon ve MMY-Emülsiyon (sentetik yağ + su)] soğutma ve yağlama ortamı ve sabit kesme derinliği (0,6 mm) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılması planlanan parametrelere karşılık gelecek şekilde her deney için geçerli olacak değişkenler Tablo 5.12'te verilmiştir.

Tablo 5.12. Deney Parametreleri

Deney No	Kesme Sıvısı	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Hızı (mm/dev)	Soğutma/Yağlama
1	-	45	0,05	Kuru
2	-	45	0,08	Kuru
3	-	65	0,05	Kuru
4	-	65	0,08	Kuru
5	Sentetik Yağ	45	0,05	SAF
6	Sentetik Yağ	45	0,08	SAF
7	Sentetik Yağ	65	0,05	SAF
8	Sentetik Yağ	65	0,08	SAF
9	Sentetik yağ+Graphen 0,1%	45	0,05	N1-MMY(NF1)
10	Sentetik yağ+Graphen 0,1%	45	0,08	N1-MMY(NF1)
11	Sentetik yağ+Graphen 0,1%	65	0,05	N1-MMY(NF1)
12	Sentetik yağ+Graphen 0,1%	65	0,08	N1-MMY(NF1)
13	Sentetik yağ+Graphen 0,5%	45	0,05	N1-MMY(NF2)
14	Sentetik yağ+Graphen 0,5%	45	0,08	N1-MMY(NF2)
15	Sentetik yağ+Graphen 0,5%	65	0,05	N1-MMY(NF2)
16	Sentetik yağ+Graphen 0,5%	65	0,08	N1-MMY(NF2)
17	Sentetik yağ+Cu %0,1	45	0,05	N1-MMY(NF3)
18	Sentetik yağ+Cu %0,1	45	0,08	N1-MMY(NF3)
19	Sentetik yağ+Cu %0,1	65	0,05	N1-MMY(NF3)
20	Sentetik yağ+Cu %0,1	65	0,08	N1-MMY(NF3)
21	Sentetik yağ+Cu %0,5	45	0,05	N1-MMY(NF4)
22	Sentetik yağ+Cu %0,5	45	0,08	N1-MMY(NF4)
23	Sentetik yağ+Cu %0,5	65	0,05	N1-MMY(NF4)
24	Sentetik yağ+Cu %0,5	65	0,05	N1-MMY(NF4)

5.8.2. Nanoakışkan Hazırlanması

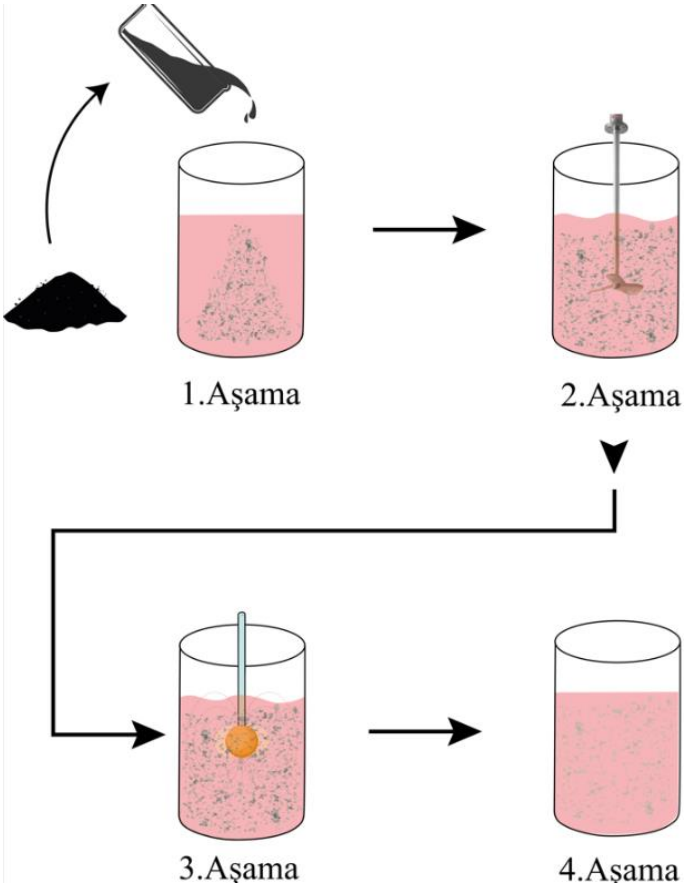
Deneylerde kullanılacak nanoakışkanlar, normal ortam sıcaklığındaki ortam koşullarında oluşturulacak olan sentetik kesme sıvısına %0,1-%0,5 oranında Graphene Nanoplatelet (GNP) ve %0,1-%0,5 bakır (Cu) nanopartikül ilave katkı malzemeleri ilave edilerek hazırlanmıştır. Deney hazırlama koşulunda, elde etmemiz gereken homojen karışımı dört ana işlem sırasına göre hazırlanmıştır.

• Birinci aşamada, deney sıvı kabına ilk olarak 500 ml sentetik esaslı yağ eklenmiştir. Daha sonra GNP ve Cu nanopartiküller istenilen miktarda ayarlanmıştır. Sentetik esaslı yağ ve nanopartiküller Şekil 5.12'de gösterildiği gibi aynı kabın içerisine konulmuştur.

• İkinci aşamada, kap içerisinde bulunan deney sıvısı karışımı, homojen bir karışım elde etmek amacıyla mekanik karıştırıcı ile yaklaşık 45 dk karıştırılmıştır.

• Üçüncü aşamada, manyetik bir karıştırıcı ile yaklaşık 45 dk karıştırılmıştır.

• Dördüncü aşamada, kesme sıvısı olarak kullanılacak nanoakışkanların homojen dağılımını sağlamak ve topaklanmayı önlemek amacıyla ultrasonik homojenizatör kullanılmıştır. Hazırlanan GNP ve Cu bazlı nanoakışkanlar 5000 dev/dk dönme hızında bir saat karıştırılarak MMY yöntemiyle frezeleme deneylerinde kullanılmıştır. Yapılan tüm bu işlemler sonucunda oluşan karışım bir gün boyunca normal oda sıcaklığında bırakılmıştır. Bu işlemin amacı ise karışımda çökelme vb. durumları gözlemlemek içindir. Yapılan bu gözlem neticesinde karışımın homojenlik açısından elverişli olup olmadığı tespit edilmektedir.



Şekil 5.12. Nanoakışkan hazırlama aşamaları

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, sert yapıya sahip olmasından dolayı yükseksek sertlik ve sıcaklığa maruz kalan yerlerde çok fazla tercih edilen 1.2080 hava çeliği incelenmiştir. Yapılan deneylerde iki farklı kesme hızı(45-65m/dk), ilerleme hızı(0,05-0,08mm/dev) değerleri belirlenmiştir. Altı adet soğutma yağlama koşulu (Kuru-MMY-NF1-NF-2-NF3-NF4) giriş parametreleri olarak belirlenmiştir. Her deneyde sabit olarak kesme derinliği olarak 0,6mm değeri kullanılmıştır.

Deneyler frezeleme işlemi sırasıyla kuru, MMY yöntemi (sentetik yağ), ağırlıkça %0,1-%0,5 GNP katkılı nanoakışkan ve ağırlıkça %0,1-%0,5 Cu katkılı nanoakışkan kullanılarak minimum miktarda yağlama yöntemi ile altı farklı deney koşuluyla yapılmıştır.

6.1. Nano Akışkanların Viskozite ve pH Sonuçları

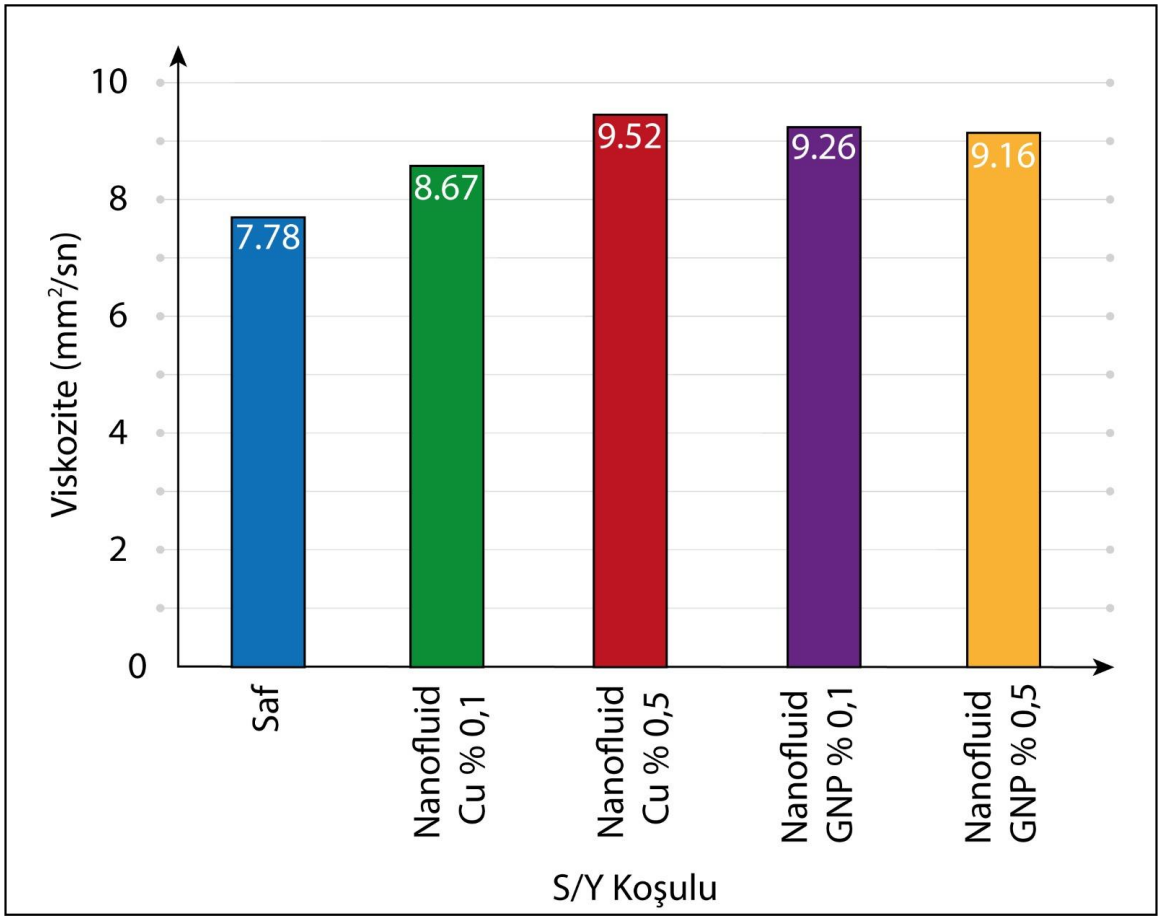
İşlenebilirlikte sıvıların reolojik özellikleri kesme performansını doğrudan etkiler. Bu reolojik özelliklerin başında sıvı viskozitesi ve sıvının pH değeri gelmektedir [56]. Viskozite değeri, kesici takım ile iş parçası arasındaki yağlama olgusunu, sıvının yüzeyde kalıcılığını, enerji tüketimini ve sıcaklık direncini doğrudan etkileyerek işlenebilirlik sonuçlarını doğrudan etkileyebilir. [57,58]. Bu çalışmada, minimum miktarda yağlama yöntemi kullanılmıştır. Nanoparçacık katkılı nanofluidler için belirlenmiş oranlarda Cu ve GNP eklenerek hazırlanmıştır. nanoparçacık katkılı nanofluidlerin kinematik viskozite ve pH değerleri incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, nanoparçacık ilavesinin akışkanın hem kinematik viskozitesi hemde pH değerlerini doğrudan etkilediği görülmektedir. (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2)

Yapılan ölçüm değerlerine göre, MMY referans değerleri kinematik viskozite için 7,782 mm^2/s, pH değeri için 8,138 olarak belirlenmiştir. Nanofluid ilavesi olarak bakır (Cu) nanoparçacıkları eklendiğinde, viskozite değerinde eklenen nanoparçacık miktarı oranlarına göre yükselmeler görülmektedir. %0,1 oranında Cu nanoparçacık ilavesinde viskozite değeri 8,676 mm^2/s'ye yükselmiştir. Cu nanoparçacık ilavesi %0,5 oranında

eklendiğinde 9,522 mm²/s'ye değerine kadar yükselmiştir. Nanofluid ilavesi olarak bakır (Cu) nanoparçacıkları eklendiği miktar arttıkça viskozitesi artmasına karşılık pH değerlerinde tam tersi düşmüştür.

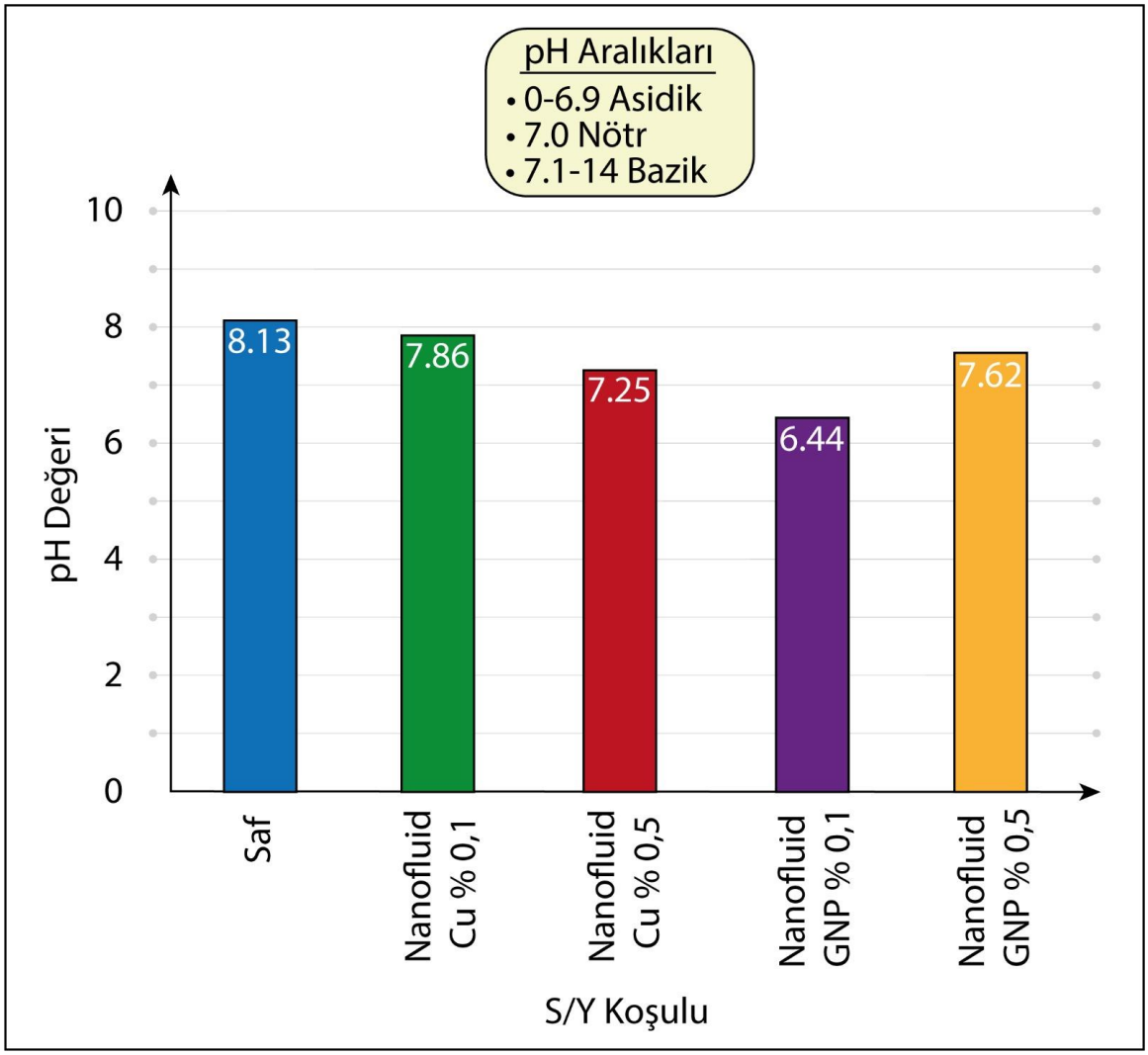
Nanofluid ilavesi olarak GNP nanoparçacıkları eklendiğinde, bakırda olduğu gibi grafende de viskozite artışı görülmüştür. %0,1 Gr oranında nanoparçacık ilavesinde viskozite 9,266 mm²/s yükselmiştir. GNP nanoparçacık ilavesi %0,5 oranında eklendiğinde, viskozite değeri 9,168 mm²/s olarak görülmüştür. Böylece bakır nanofluid ilavesin eklendiğinde, eklenen miktar oranında viskozite de yükselmeler görünmüştür. Fakat GNP'de ise ilk başta küçük miktarda eklendiğinde bir viskozitede belirgin bir artış olmuştur. Kesme sıvısındaki GNP miktarı arttıkça viskozite değerinin düştüğü görülmüştür. Bu durumun, GNP nanotozun yağ içerisinde yeterli düzeyde homojen dağılım sağlayamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Literatürde, viskozite değerindeki artışın yağlayıcının akış davranışını doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Viskozite değerinin yükselmesi ile artan yağlayıcı özellik sayesinde iş parçasının yüzeyi ile takım ucu arasındaki sürtünmeyi azaltmaktadır [59].



Şekil 6.1. Viskozite sonuçları

Akışkan hazırlanma sürecinden viskozite değerlerine dikkat edilirken aynı zamanda pH değerlerinde dikkat edilmesi gerekmektedir. Minimum miktarda yağlama koşullarında gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde, kesme sıvılarının kararlılığı ve ısıl özellikleri açısından pH değeri büyük önem taşımaktadır [60]. Akışkanların pH değerleri incelendiğinde (Şekil 6.2), ağırlıkça %0,1 GNP'nin karışımlı kesme sıvılarında en düşük pH değeri tespit edilmiştir. En yüksek pH değeri saf kesme sıvısında olduğu gözlemlenmiştir. Takım aşınması ve yüzey kalitesi açısından yüksek pH değerleri tercih edilmelidir. Literatürde, bazik yapıdaki sıvıların daha kararlı olduğu ve daha iyi ısı iletimi sağladığı belirtilmektedir [60].

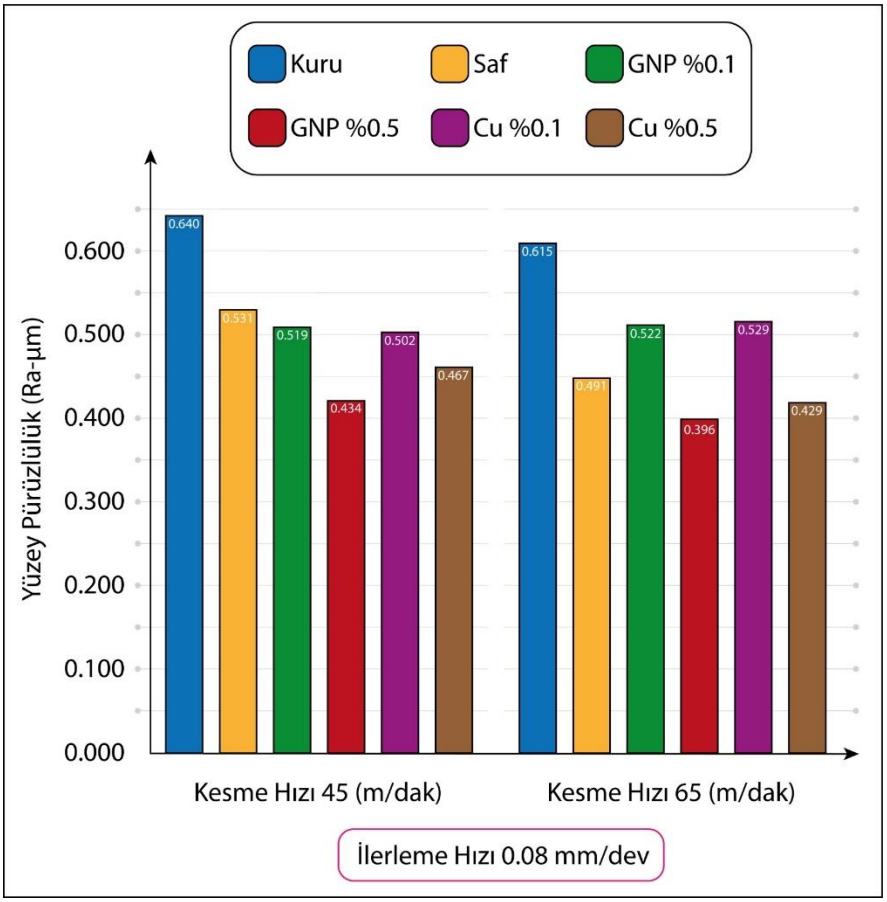


Şekil 6.2. Deney pH değeri sonuçlar

6.2. Deney Numunelerinin Yüzey Pürüzlülükleri

Talaşlı imalatta yüzey pürüzlülüğü, üretilen parçanın kalitesini belirlemek için en temel kriterlerden biridir. Özellikle hareketli aksamlarda ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçalarda yüzey pürüzlülüğü oldukça önemlidir. Yüzey kalitesi, dayanım ve korozyon direncini etkilemektedir [61] .

Yüzey pürüzlülüğü, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme sıvısı gibi frezeleme parametrelerinden doğrudan etkilenmektedir. Kesme derinliğinin fazla olmasının, kesici takımın yüksek sıcaklık ve basınç yüklerine maruz kalmasına sebep olur [62]. Buna göre artan sıcaklık ve gerilmeler, kesici takım ucunda deformasyonlara sebep olabilir. Bu durum, kesici takımın yanı sıra iş parçası yüzeyinde de yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır [62]. 1.2080 hava çeliğinin frezelenmesi esnasında uygulanan farklı soğutma/yağlama stratejilerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla altı farklı proses koşulunda deneysel çalışmalar yürütülmüştür. İşlem sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de detaylı biçimde sunulmuştur.



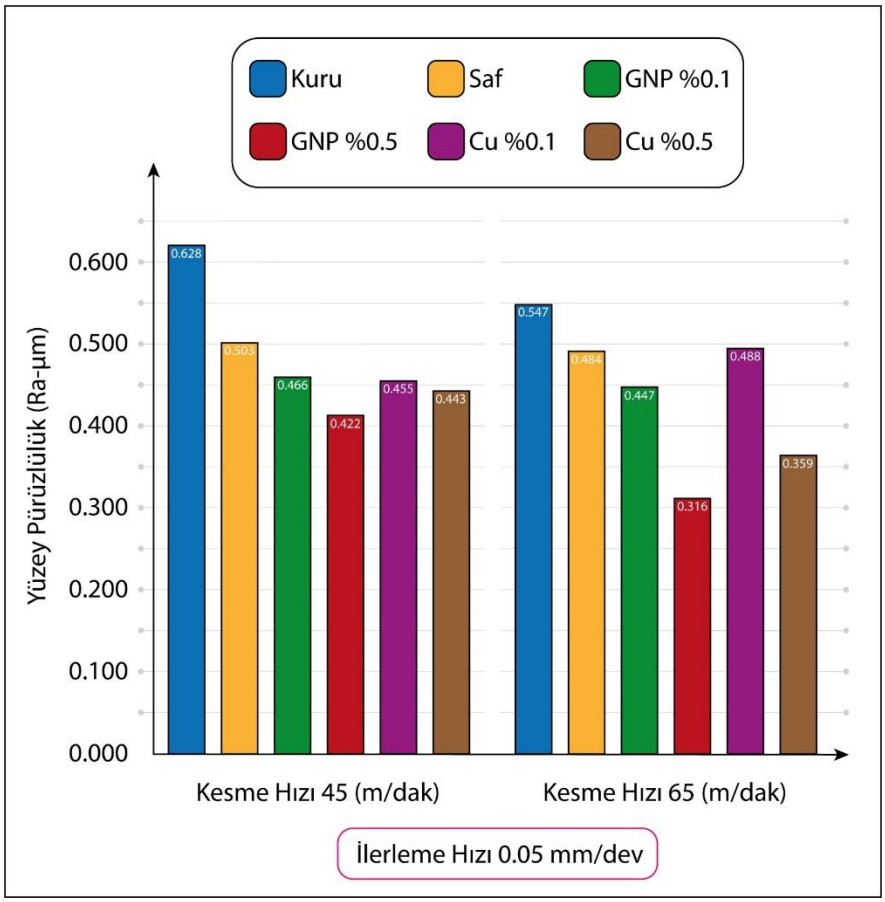
Şekil 6.3. 0,08 mm/dev ilerleme hızında elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Kesme hızı (45-65 m/dk) ilerleme hızı 0,08 mm/dev olup kuru koşullarda yapılan deney ile sırasıyla saf ve nanotoz katkılı (GNP %0,1, GNP %0,5, Cu %0,1 ve Cu %0,5) koşullarında yapılan deneyler incelendiğinde,

İlerleme hızının 0,08 mm/dev sabit tutulduğu deneylerde, 45 ve 65 m/dk kesme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri kıyaslandığında, saf koşulun kuru işleme koşuluna göre sırasıyla %17 ve %20 oranında iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %0,1 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında olarak sırasıyla %18,9-%15,1 yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %0,5 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından incelendiğinde sırasıyla %32,1-%35,6 yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme görülmüştür. GNP miktarının artışı takım aşınmasında etkili tespit edilmiştir. Kuru koşullar ile Cu nanotoz karışımları açısından incelendiğinde, ağırlıkça %0,1 Cu nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deneylere göre

kıyaslandığında sırasıyla %21,5-%14,4 yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme olmuştur. Ağırlıkça %0,5 Cu nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kıyaslandığında sırasıyla %27-%30,2 yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme gözlemlenmiştir.

Kesme hızı (45-65 m/dk) ilerleme hızı 0,08 mm/dev parametrelerinde yapılan deneyler incelendiğinde, en iyi yüzey pürüzlülüğü değerinin ağırlıkça %0,5 GNP nanotoz karışımı kullanılan deneyde elde edilmiştir. GNP'nin hem bakır hem de kuru işleme koşullarına göre daha iyi sonuç vermesi; grafenin yüksek yağlayıcı özelliği sayesinde, iş parçası ile kesici takım ucu arasındaki sürtünmenin azalması sonucu olduğu düşünülmektedir [63]. Goti vd. yaptığı bir çalışma bu kanıyı desteklemektedir [63].



Şekil 6.4. 0,05 mm/dev ilerleme hızında elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Kesme hızı (0,45-0,65 m/dk) ilerleme hızı 0,05 mm/dev olup kuru koşullarda yapılan deney ile sırasıyla saf ve nanotoz katkılı (GNP %0,1, GNP %0,5, Cu %0,1 ve Cu %0,5) koşullarında yapılan deneyler incelendiğinde,

Saf koşulda gerçekleştirilen frezeleme deneyleri ile kuru koşulda yapılan deneyler karşılaştırıldığında, yüzey pürüzlülüğü değerlerinde 45 ve 65 m/dk kesme hızları için sırasıyla %19,9 ve %11,5 oranında iyileşme tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0,1 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında sırasıyla %25,7-%18,2 yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme görülmüştür. Ağırlıkça %0,5 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında sırasıyla %32,8-%42,2 yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme tespit edilmiştir. GNP miktarının artışı yüzey pürüzlülük değerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, grafenin çok katmanlı yapısının yüksek termal iletkenlik sağlaması sonucunda kesme bölgesinde etkin bir soğutma oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [64].

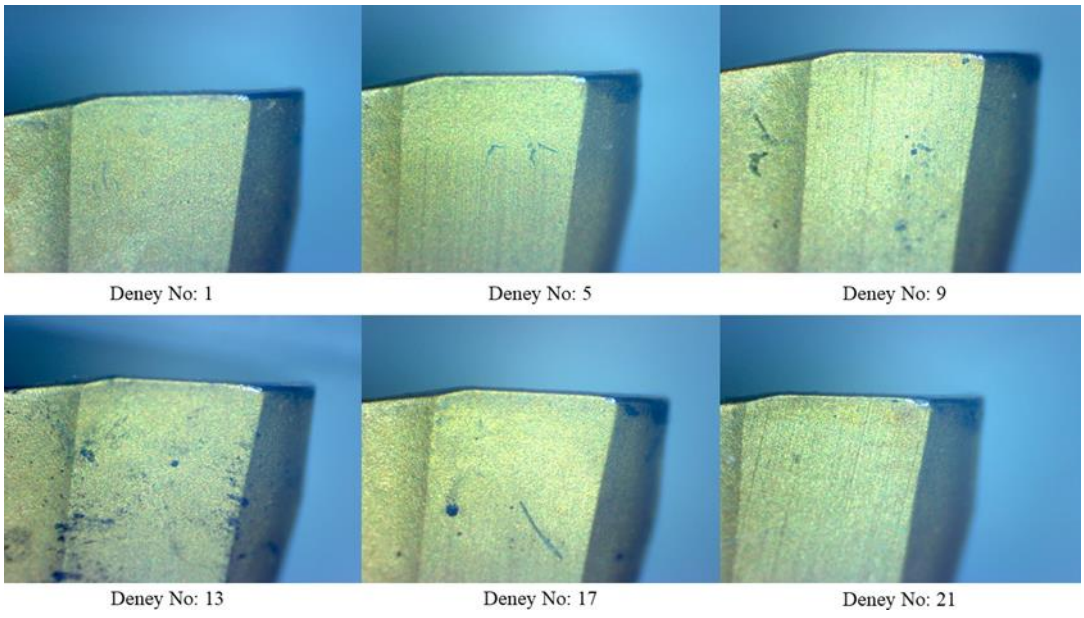
Ağırlıkça %0,1 Cu ve %0,5 Cu nanoparçacık ilaveli kesme sıvıları ile gerçekleştirilen deneyler, kuru işleme koşulları ile kesme hızları açısından karşılaştırıldığında, ağırlıkça %0,1 Cu nanoparçacık ilaveli karışımda 45 ve 65 m/dk kesme hızlarında sırasıyla %27,5 ve %10,7 oranında yüzey pürüzlülüğü değerlerinde iyileşme görülmüştür. Ağırlıkça %0,5 Cu nanoparçacık ilaveli karışımda ise aynı kesme hızlarında sırasıyla %29,4 ve %34,3 oranında yüzey pürüzlülüğü değerlerinde iyileşme tespit edilmiştir.

Yüzey kalitesi açısından en kötü sonuç; kuru kesme koşulunda, kesme hızı 45 m/dk, ilerleme hızı 0,08mm/dev parametrelerinde yapılan deneyde tespit edilmiştir. Bu durum yağlayıcı/soğutma sıvısı kullanılmaması ile birlikte ilerleme hızının da artmasıyla açıklanabilir. Yüzey kalitesi açısından en iyi sonuç; ağırlıkça %0,5 GNP katkılı kesme sıvısında, kesme ve ilerleme hızları sırasıyla 65 m/dk – 0,5mm/dev olan kesme parametrelerinde elde edilmiştir. GNP katkılı kesme sıvısının, bakır katkılı kesme sıvısına göre daha iyi yüzey kalitesi sonucu vermiştir. Bu durumun, GNP katkılı kesme sıvısının takım ile iş parçası arasında koruyucu bir film tabakası oluşturması ve böylece temas yüzeyindeki sürtünmeyi azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde yapılan bu araştırma bu kanıyı desteklemektedir. [62]. Söz konusu film tabakası, takım ucu

ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak yüzeyde meydana gelen deformasyon miktarını en aza indirdiği görülmüştür.

6.3. Takım Aşınma Sonuçları

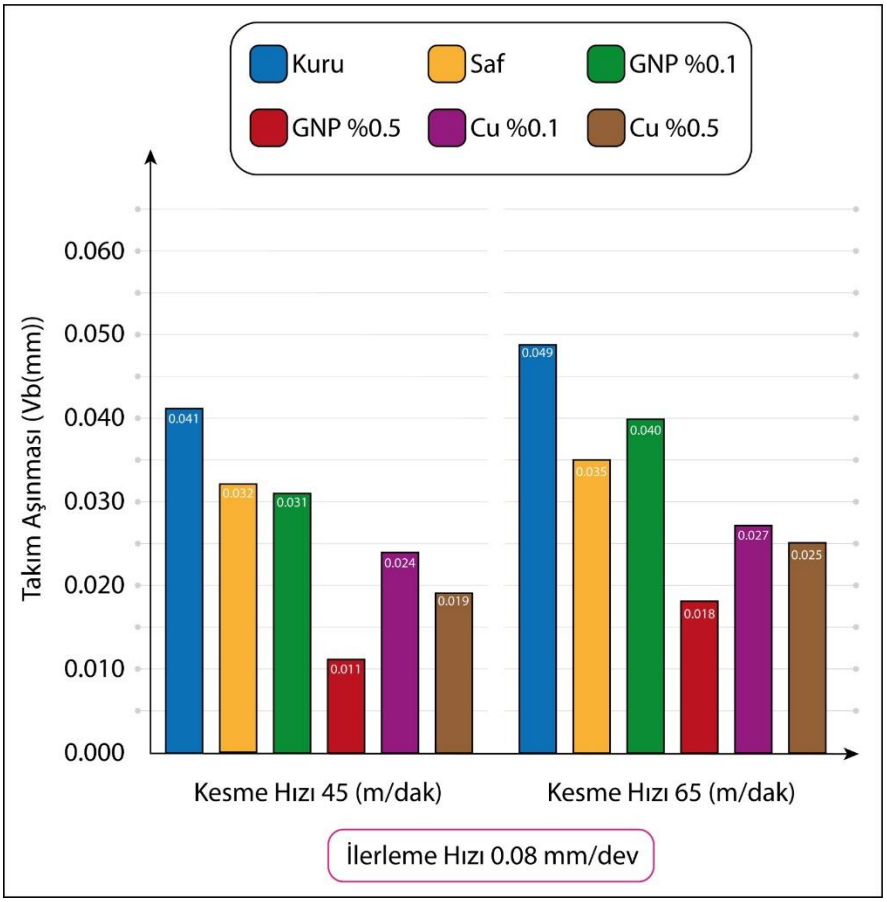
Takım aşınması, talaşlı imalat işlemlerinde en sık karşılaşılan sorunlardandır. Frezeleme işleminin genelinde, kesici takım ile iş parçasının yüzeyi sürekli temas halindedir. Yüzeylerin temas etmesinden dolayı, kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklar, mekanik gerilmeler ve kimyasal değişimler görülebilmektedir. Bu durumların oluşması kesici takım aşınmalarını oluşturmaktadır [3]. Talaş oluşumu esnasında oluşan yüksek basınç, takım yüzeyinde sürtünmeye bağlı olarak yüksek ısı oluşmasına neden olabilmektedir. Sert malzemelerde yüksek kesme ve ilerleme hızlarında yapılan frezeleme deneylerinde, yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle kesici takımda deformasyon oluşabilmektedir. Literatürde bu deformasyonlar genelde plastik deformasyon aşınması olarakta bilinmektedir [65]. Şekil 6.5'de takım yanak aşınmasının görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.5. Takım yanak aşınma görüntüleri

Kesme hızları (45 ve 65 m/dk) ve ilerleme hızı sabit (0,8 mm/dev) tututularak yapılan deneysel çalışmada, farklı kesme koşulları altında takım aşınmaları incelenmiştir ve Şekil 6.6'da yapılan deney sonuçlarına göre verilmiştir.

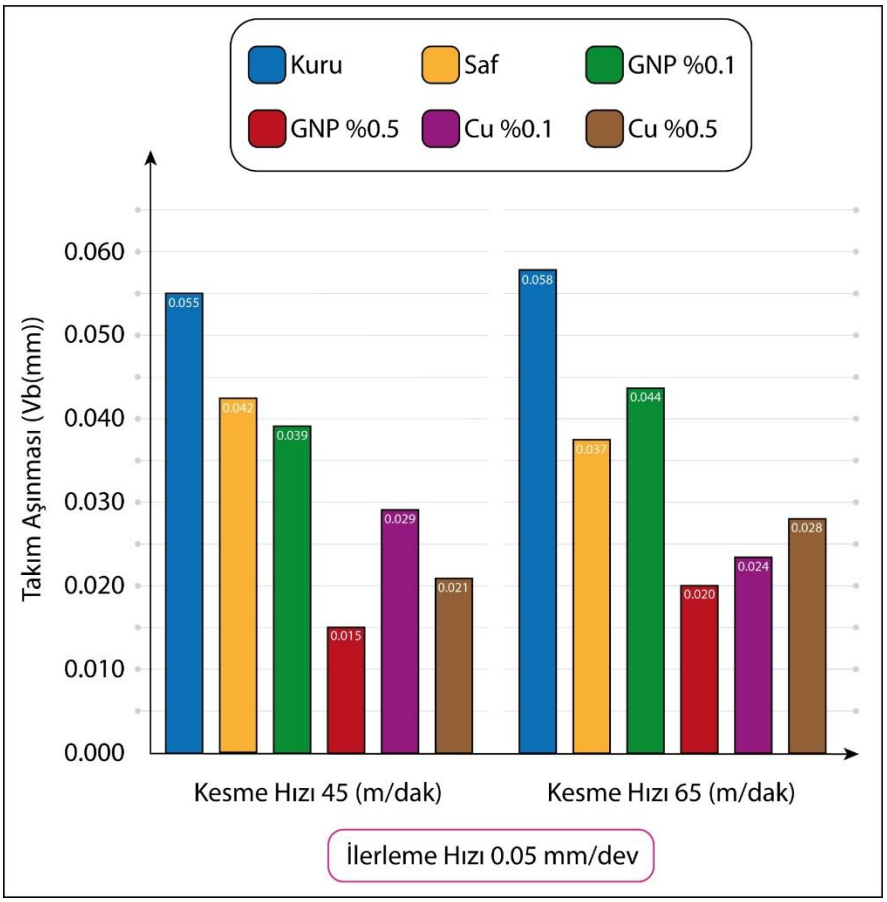
Kesme hızı (45-65 m/dk) ilerleme hızı 0,08 mm/dev olup kuru koşullarda yapılan deney ile sırasıyla saf ve nano toz katkılı (GNP %0,1, GNP %0,5, Cu %0,1 ve Cu %0,5) koşullarında yapılan deneyler incelendiğinde, takım aşınması miktarı en fazla kuru kesme koşullarında olduğu görülmüştür. Kuru kesme koşulları, soğutma/yağlama koşullarıyla kıyaslandığında herhangi bir sıvı olmadığından kesici takım ile iş parçası arasında daha fazla sürtünme oluşturabilir. Kuru kesme koşullarında yapılan deneylere bakıldığında ise kesme hızı arttıkça takım aşınmasının arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış miktarı %19,5 değerindedir. Saf koşulda yapılan deneyin takım aşınma değeri kuru koşulda yapılan deneye göre kesme hızları açısında sırasıyla %21,9-%28,5 değerlerinde iyileşme olmuştur. Ağırlıkça %0,1 GNP nanotoz katkılı kesme sıvısı ile gerçekleştirilen deney ile kuru kesme koşulunda gerçekleştirilen deneyler kesme hızları açısından karşılaştırıldığında, takım aşınması değerlerinde sırasıyla %24,3 ve %18,3 oranında iyileşme elde edilmiştir. Ağırlıkça %0,5 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından incelendiğinde sırasıyla %73,1-%63,2 takım aşınma değerlerinde iyileşme görülmüştür. Grafen miktarının artışı takım aşınmasında olumlu etki sağladığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0,1 Cu nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında sırasıyla %41,4-%44,89 takım aşınma değerlerinde iyileşme olmuştur. Kesme hızındaki artışın takım aşınması üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %0,5 Cu nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından incelendiğinde sırasıyla %53,6-%48,97 takım aşınma değerlerinde iyileşme görülmüştür. Bakır katkı oranı ve kesme hızındaki artışın, takım aşınmasını azalttığı tespit edilmiştir. Cu nanotoz miktarındaki artışın, kesme sıvısına daha iyi yağlayıcılık özelliği kazandırarak sürtünmeyi azalttığı düşünülmektedir. Cu nanotozunun kesici takımda yapışmayı ve aşınmayı engelleyici bir özellik gösterdiği literatürde bilinmektedir [66]. GNP'nin etkin yağlayıcılık özelliği sayesinde kesici takımların daha uzun süre kullanılmasına olanak sağlanmaktadır. Kesme hızı (0,45-0,65 m/dk) ilerleme hızı 0,08 mm/dev şartlarında yapılan deneyler incelendiğinde, en iyi iki takım aşınma değerleri sırasıyla (V_b=0,011mm, V_b=0,018mm) olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerin her ikisi de GNP katkılı soğutma/yağlama sıvısı kullanılarak yapılan deneylerdedir. En düşük takım aşınma değeri, 45 m/dk kesme hızı koşulunda gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir.



Şekil 6.6. 0,08 mm/dev ilerleme hızında elde edilen takım aşınması sonuçları

Kesme hızı (0,45-0,65 m/dk) ilerleme hızı 0,05 mm/dev olup kuru koşullarda yapılan deney (Şekil 6.7) ile sırasıyla saf ve nanotoz katkılı (GNP %0,1, GNP %0,5, Cu %0,1 ve Cu %0,5) koşullarında yapılan deneyler incelendiğinde, Saf koşulda yapılan deneyin takım aşınma değeri kuru koşulda yapılan deneye göre kesme hızları açısında sırasıyla yaklaşık olarak %23,6-%36,2 değerinde iyileşme olmuştur. Ağırlıkça %0,1 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında sırasıyla %29-%24,1 takım aşınma değerlerinde olumlu sonuç vermişti. Ağırlıkça %0,5 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %72,7-%65,5 takım aşınma değerlerinde iyileşme görülmüştür. Kuru koşulda gerçekleştirilen deneylerle karşılaştırıldığında, ağırlıkça Cu %0,1 nanotoz katkılı kesme sıvısı kullanılan deneylerde kesme hızlarına bağlı olarak yaklaşık %47,2–%58,6 oranında, ağırlıkça Cu %0,5 nanotoz katkılı deneylerde ise yaklaşık %61,8–%51,7 oranında takım aşınma değerlerinde iyileşme görülmüş

Kesme hızı (0,45-0,65 m/dk) ilerleme hızı 0,05 mm/dev şartlarında yapılan deneyler incelendiğinde, en iyi iki takım aşınma değerleri sırasıyla (V_b=0,015mm, Vb=0,020mm) olarak GNP katkılı kesme sıvıları kullanılan deneylerde tespit edilmiştir. Takım aşınma deneyleri incelendiğinde, nanotozların miktarının ve kesme-ilerleme hızlarının etkilerinin olduğu takım aşınma deneyleri sonuçlarında görülmüştür. En fazla takım aşınma değerleri kuru koşullarda olmuştur. Bu durum yağlayıcı/soğutucu sıvıların kullanılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük takım aşınma değerleri ağırlıkça %0,5 oranında GNP katkılı kesme sıvısı kullanılan deneylerde tespit edilmiştir. GNP nano toz katkılı kesme sıvıları, bakır nanotoz katkılı kesme sıvılarına göre daha iyi sonuç vermiştir. Ruitao vd. grafenin takım–iş parçası ara yüzünde koruyucu bir film oluşturarak metal-metal temasını azalttığını, böylece sürtünme ve takım aşınmasını düşürdüğünü belirtmiştir [67].

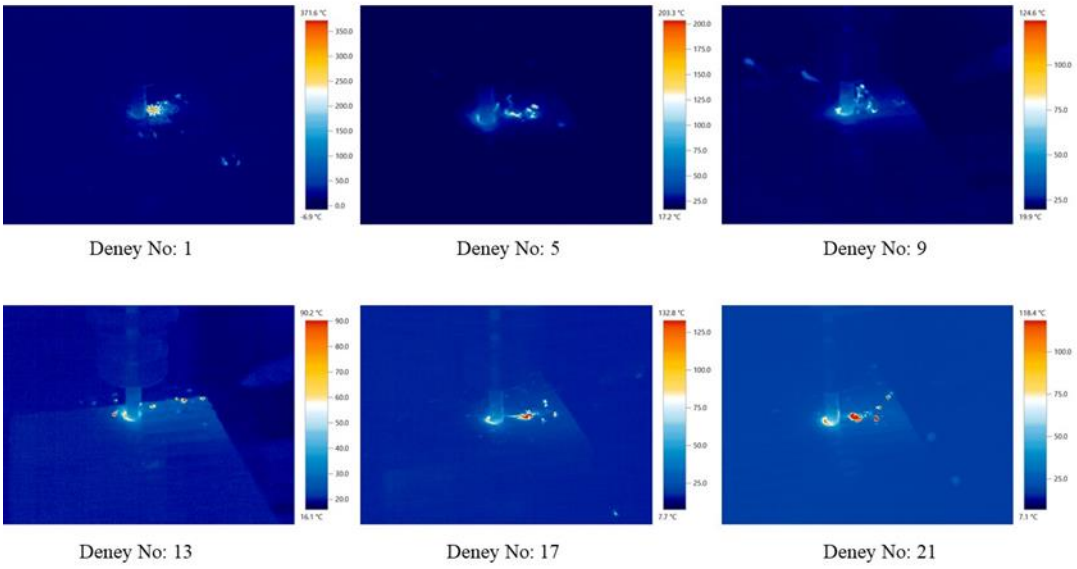


Şekil 6.7. 0,05 mm/dev ilerleme hızında elde edilen takım aşınması sonuçları

6.4. Kesme Sıcaklıkları

İşlenebilirlikte istenilmeyen durumlardan biride kesme bölgesinde ve kesici takımda oluşacak yüksek sıcaklıklardır. Kesme bölgesi ve kesici takımda oluşan yüksek sıcaklık takım aşınmalarına da neden olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda adhezyon aşınması olabileceğinden dolayı takım ucuna yapışan parçalar yeni bir geometrik bir yapı oluşturabilir [68]. Bu da işlenebilir metriklerinde istenmeyen sonuçlara yol açabilir.

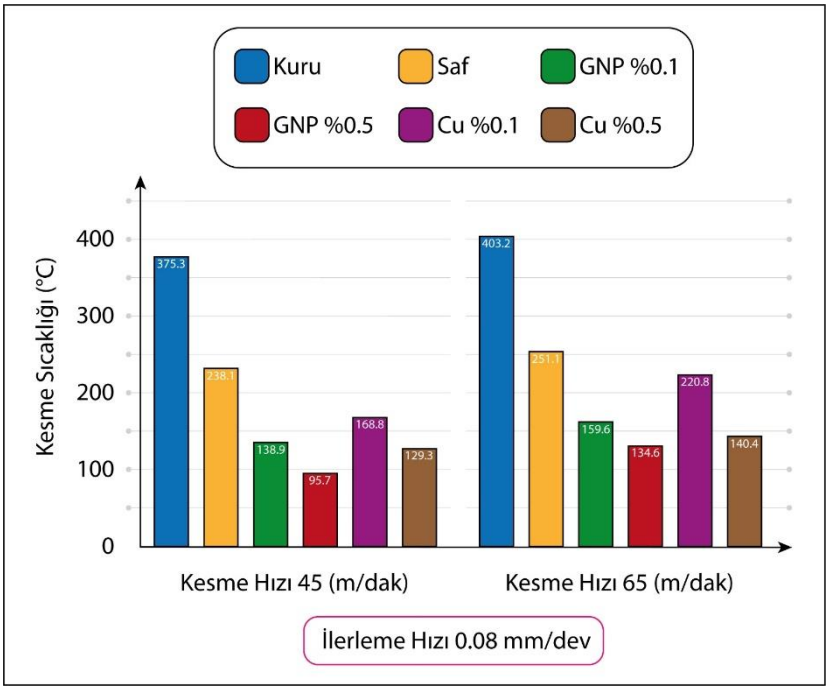
Kesme sıcaklıklarının oluşumu kesme parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Aynı zamanda kesici takımın yapısı da kesme sıcaklığını etkileyebilmektedir. Kesici takım kaplanmasının, kesme sıcaklıklarının düşürülmesinde olumlu rol oynadığı bildirilmiştir [69]. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde, farklı kesme parametreleri altında oluşan termal sıcaklıklar ölçülmüştür. Ölçüm görüntüleri Şekil 6.8 verilişitir. Ayrıca Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da sıcaklık değerleri verilmiştir.



Şekil 6.8. Termal sıcaklık ölçümleri

Kesme hızı (45-65 m/dk) ilerleme hızı 0,08 mm/dev olup kuru koşullarda yapılan deney ile sırasıyla saf ve nanotoz katkılı (GNP %0,1, GNP %0,5, Cu %0,1 ve Cu %0,5) koşullarında yapılan deneyler incelendiğinde, Kesme sıcaklık değerleri açısından, saf ve kuru koşullarda gerçekleştirilen deneyler kesme hızlarına göre karşılaştırılmıştır. Saf

koşulda gerçekleştirilen deneylerde, kuru koşullara kıyasla 45 m/dk kesme hızında kesme bölgesi sıcaklığında %36,55, 65 m/dk kesme hızında ise %37,72°C azalma tespit edilmiştir. Bu durum soğutma/yağlayıcı sıvısının kesme bölgesindeki sürtünmeyi azaltması ile yorumlanabilir. Ağırlıkça %0,1 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında sırasıyla %62,98-%60,41 değerlerinde kesme bölgesinde sıcaklık değerlerinde azalma olmuştur. Ağırlıkça %0,5 GNP nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından incelendiğinde sırasıyla %74,50- %66,61 değerlerinde kesme bölgesinde sıcaklık değerlerinde azalma görülmüştür. Ağırlıkça %0,1 ve %0,5 Cu nanotoz katkılı kesme sıvıları ile gerçekleştirilen deneyler, kuru koşullarda yapılan deneylerle kesme hızları açısından karşılaştırıldığında, kesme bölgesi sıcaklık değerlerinde sırasıyla %0,1 Cu katkılı deneylerde %55,02 ve %45,23 %0,5 Cu katkılı deneylerde ise %65,54 ve %65,17 azalma tespit edilmiştir. Kesme hızları (45–65 m/dk) ve ilerleme hızı 0,08 mm/dev koşullarında gerçekleştirilen deneyler incelendiğinde, kesme bölgesinde oluşan en düşük sıcaklık değerinin, ağırlıkça %0,5 oranında GNP nanotoz içeren yağlayıcı/soğutucu sıvının kullanıldığı deney koşullarında elde edildiği belirlenmiştir.

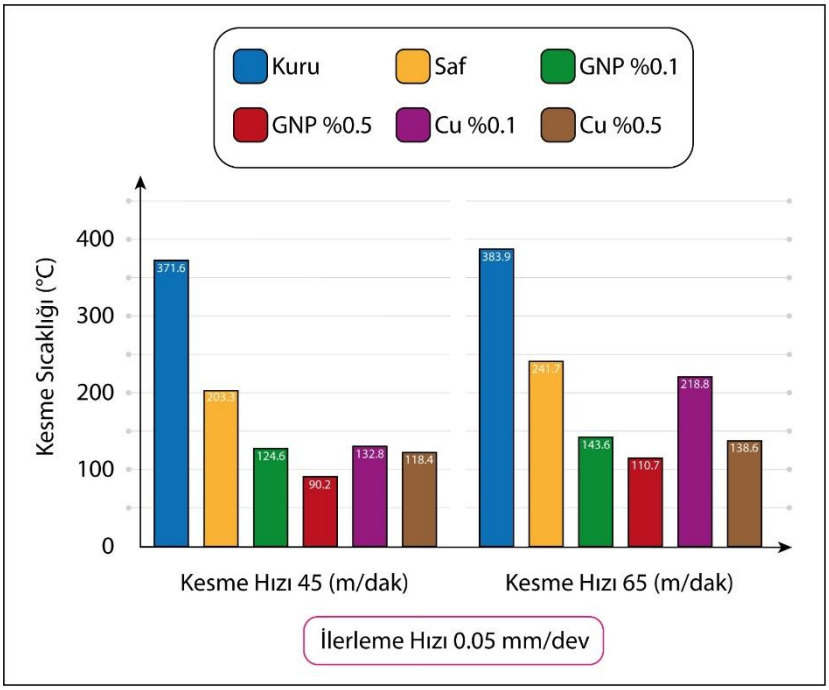


Şekil 6.9. 0,08 mm/dev ilerleme hızında elde edilen takım aşınması sonuçları

Kesme hızı (0,45-0,65 m/dk) ilerleme hızı 0,05 mm/dev olup kuru koşullarda yapılan deney ile sırasıyla saf ve nanotoz katkılı (GNP %0,1, GNP %0,5, Cu %0,1 ve Cu %0,5) koşullarında yapılan deneyler incelendiğinde,

Saf koşulda yapılan deneyin kesme sıcaklık değeri kuru koşulda yapılan deneye göre kesme hızları açısında sırasıyla %45,29- %37,04 değerlerinde azalma elde edilmiştir. Ağırlıkça %0,1 ve %0,5 GNP nanotoz katkılı deneyler ile kuru koşullar altında gerçekleştirilen deneyler kesme hızları açısından karşılaştırıldığında, kesme bölgesi sıcaklık değerlerinde sırasıyla %0,1 GNP için %66,46 – %62,59, %0,5 GNP için ise %75,72 – %71,16 azalma tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0,1 Cu nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında sırasıyla %64,26-%43 değerlerinde kesme bölgesinde sıcaklık değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Cu %0,5 nanotoz karışımlı yapılan deneyin kuru koşulda yapılan deney ile kesme hızları açısından kıyaslandığında sırasıyla %68,13- %63,89 değerlerinde sıcaklık düşmüştür. Kesme sıcaklığı açısından yapılan deneyler incelendiğinde; En iyi sonuç, 0,65 m/dk kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı koşullarında gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir. Bu koşullarda kesme bölgesinde ölçülen en düşük sıcaklık değeri, ağırlıkça %0,5 oranında GNP nanotoz içeren yağlayıcı/soğutucu sıvı kullanımıyla belirlenmiştir. En yüksek kesme sıcaklıkları kuru koşulda yapılan deneylerde elde edilmiştir. Bu durum saf ve nanotoz katkılı karışımlar ile gerçekleştirilen kesme işlemlerinde, basınçlı olarak aktarılan aerosol-buhar karışımının kesme bölgesinde ince bir film tabakası oluşturduğu ve bu tabakanın talaş tahliyesini hızlandırdığı şeklinde açıklanmaktadır. Talaş tahliyesinin hızlanması ise kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkların dikkate değer ölçüde azalmasına katkı sağlamıştır. Yapılan bir çalışma bu durumu desteklemektedir [17].

GNP katkılı kesme sıvılarının, bakır katkılı kesme sıvılarına kıyasla daha düşük kesme sıcaklıkları sağladığı belirlenmiştir. Bu durum, grafenin yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması ile açıklanabilir [7]. Mehrali vd., grafenin yüksek ısıl iletkenliği sayesinde soğutma sıvısına katkı maddesi olarak kullanıldığında, kesme bölgesindeki ısı transferini iyileştirebileceğini ve buna bağlı olarak kesme sıcaklığının düşürülmesine katkı sağlayabileceğini savunmuşlardır [70]. Ayrıca, GNP miktarının artışı da kesme sıcaklığının azalmasına katkı sağlamıştır.



Şekil 6.10. 0,05 mm/dev ilerleme hızında elde edilen takım aşınması sonuçları

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 1.2080 hava çeliğinin işlenebilirliği; kuru kesme, saf, GNP ve bakır katkılı nanotoz içeren akışkan koşulları altında deneysel olarak incelenmiş ve farklı kesme parametrelerinin işleme performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Nano Akışkanların Viskozite Sonucu: En iyi viskozite değeri, kesme sıvısı olarak ağırlıkça %0,5 oranında bakır karışımı ile yapılan deneyde elde edilmiştir. Bu değer 9,52 mm^2/sn'dir.

Nano Akışkanların pH Sonucu: En iyi pH değeri referans değerimiz 8 değeri istenmiştir. Bu değere en yakın deney sonucu 8,544 olarak bulunmuştur.

Yüzey Pürüzlülük Sonucu: En düşük yüzey pürüzlülük değeri, 0,65 m/dk kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, hacimce %0,5 oranında GNP katkılı yağlayıcı/soğutucu sıvı kullanımıyla elde edilmiş olup bu değer 0,316 µm olarak ölçülmüştür. Elde edilen yüzey pürüzlülüklere göre endüstriyel olarak kullanımı için ek bir yüzey işlemine (parlatma, taşlama gibi) gerek duyulmamaktadır.

Takım Aşınma Sonucu: En düşük takım aşınma değeri hacimce %0,5 oranında GNP katkılı kesme sıvısının kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Ölçülen en düşük aşınma değeri V_b = 0,011 mm olup, bu değer %0,5 GNP katkılı kesme sıvısı kullanılan deney koşullarında tespit edilmiştir.

Kesme Sıcaklığı Sonucu: Kesme bölgesinde oluşan en düşük sıcaklık, 0,65 m/dk kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı koşullarında gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir. Bu parametreler altında kesme bölgesinde ölçülen en düşük sıcaklık değeri, ağırlıkça %0,5 oranında GNP nanotoz içeren yağlayıcı/soğutucu sıvı kullanımıyla 90,2 °C olarak belirlenmiştir.

Deneyler incelendiğinde, hem yüksek kesme ve ilerleme hızında hem de düşük kesme ve yüksek ilerleme hızında en ideal soğutucunun, hacimce %0,5 GNP nanotoz içeren karışmalarda olduğu tespit edilmiştir.

*Elde edilen en iyi soğutma sıvısı için bu malzeme ile birlikte farklı malzemeye sahip iş parçaları üzerindeki etkileri incelenebilir.

*Farklı bir çalışmada farklı parametreler ile bu tez kapsamında olmayan sürdürülebilir işlenebilirlik metrikleri (Karbon emisyonu, maliyet analizi ve enerji tüketimi) incelenebilir.

*Bu tez kapsamı frezeleme ile sınırlı olduğundan, oluşturulan soğutma sıvılarını etkinlikleri tornalama, delme ve taşlama ile de incelenebilir.

*Daha etkin bir soğutma/yağlama sıvısı elde edilmesi için farklı oranlarda nanatoz karışımı denenebilir. Ayrıca elde edilen sıvıların karakteristik özellikleri (ısı iletkenliği, özgül ısı, temas açısı Vb gibi) incelenebilir.

*MMY sıvıları için farklı püskürtme açıları ve farklı püskürtme debileri incelenebilir.

*Takım aşınmasının oluşum nedenleri detaylı incelenebilir.

* Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, makine öğrenmesi yöntemleri aracılığıyla modellenip değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Tayanç, M. ve Zeytin, G. (2000). Yüksek hız çeliklerinin içyapısı ve ısıl işlem özellikleri. *BAÜ Fen Bilimleri Enstütisi Dergisi, 2(1*), 1-20.

[2] Şap, E., Usca, Ü.A., and Şap, S. (2024). Impacts of environmentally friendly milling of Inconel-800 superalloy on machinability parameters and energy consumption. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 11(3),* 781–797.

[3] Uzun, M., Usca, Ü.A., Kuntoğlu, M. ve Gupta, M.K. (2022). AISIX210Cr12 Çeliğinin frezelenmesi sırasında takım yolu stratejilerinin işleme süresi, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, *Uluslararası İleri İmalat Teknolojisi Dergisi, 119,* 2709-2720.

[4] Usca, Ü.A, Uzun, M., Şap, S., Giasin, K. ve Daniel B. (2022). Farklı soğutma / yağlama koşulları kullanılarak dişli imalatı için AISI 5140 çeliğinin işlenebilirlik ölçütlerinin belirlenmesi, *Malzeme Araştırma ve Teknolojisi Dergisi, 2(1),* 893-904.

[5] Demir, İ., Kıvak, T., ve Şirin, Ş. (2022). AISI 329 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde farklı surfaktan katkılı CuO nano akışkanların performans değerlendirmesi, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 3(2),* 9-21.

[6] Kaçal, A. (2022). Sertleştirilmiş DIN 1.2550 çeliğinin frezelenme performansının araştırılması, *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitim Dergisi, 1(1),* 8-14.

[7] Uysal, A. (2017). An experimental study on cutting temperature and burr in milling of ferritic stainless steel under MQL using nano graphene reinforced cutting fluid. *Advanced Materials Proceedings, 2(9),* 560–563.

[8] Şap, S. (2022). S1100 çeliğinin frezelenmesinde minimum miktarda yağlama stratejisinin ve kesme parametrelerinin güç tüketimi üzerindeki etkisi. *1st International Conference on Scientific and Academic Research (ICSAR 2022),* Konya, Türkiye.

[9] Kurşuncu, B.,Yaraş, A. (2017). AISI O2 Çeliğinin Frezelenmesinde Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Sisteminin Kesme Performansına Etkisi, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, 5 (2),* 125-128.

[10] Tunç, L.T. (2019). AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin frezelenmesinde MQL şartlarının takım ömrüne etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(4),* 1665-1677.

[11] Camcı, H. (2020). AISI D2 çeliğinin minimum miktarda yağlama yöntemi (MQL) kullanılarak frezelenmesinde işlenebilirliğin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi.

[12] Uysal, A., (2016). Ferritik paslanmaz çeliğin nano MoS2 parçacık takviyeli kesme sıvısı kullanılarak MQL yöntemi ile frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendis Dergisi, 7(1),* 151-158.

[13] Şirin, Ş., Şirin, E., Turgut, Y. ve Korkut, İ. (2018). AISI soğuk iş takım çeliğinin farklı geometriye sahip kesici takımlarla frezelenme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisinin araştırılması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(3),* 660-668.

[14] Motorcu, A.R. ve Şahin, Y. (2004). AISI 4140 Çeliğinin farklı kaplamalı karbür ve sermet kesici takımlarla işlenebilirliği, *On Birinci Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi,* 1-10.

[15] Dikici, T. (2024). Inconel 718 Super Alaşımın Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Yöntemi Kullanılarak Frezelenmesinde Farklı Nano Akışkanların İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi.

[16] Mahmat, A. (2024). Hardox 500 Çeliğinin Delinmesinde Minimum Miktarda Yağlama Yönteminin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığına Olan Etkisinin İncelenmesi, *International Journal of Pure and Applied Sciences, 10(2),* 407417.

[17] Şirin, Ş. (2020). Sürdürülebilir imalat için INCONEL X-750 süper alaşımının frezelenmesinde yenilikçi soğutma / yağlama tekniklerinin işleme performansı üzerindeki etkileri, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi.

[18] Demir, İ. (2022). AISI 329 paslanmaz çeliğin frezelenmesinde CuO ve grafit katkılı nanoakışkan yağlayıcıların işleme performansı üzerindeki etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi.

[19] Tezel, T., Topal, E.S. ve Kovan, V. (2018). Hibrit imalat: Eklemeli imalat ile talaşlı imalat yöntemlerinin incelenmesi, Erciyes Üniversitesi *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 30(4),* 220-226.

[20] İşlenebilirlikte kesici takım etkileri. (2026). Uslularhadde web sitesi. https://www.uslularhadde.com/frezeleme-yonteminde-kullanilan-kesici-takimlar.

[21] Yılmaz, V., Dilipak, H, Sarıkaya M.,Yılmaz, C.Y. ve Özdemir, M. (2014). Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi, *Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi, 2(3),* 60-65.

[22] Yürekli, Y. (2012). Frezeleme işleminde eş yönlü ve ters yönlü talaş kaldırmanın CVD/PVD kaplanmış sert metal uçların ömrüne etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

[23] Çevresel frezeleme. (b.t.) Düzce Üniversitesi makine teçhizat dersi 2. Hafta ders notu pdf. https://ebs.duzce.edu.tr/Uploads/DersMateryal/Maktec%202.%20hafta.pdf.

[24] Frezeleme yöntem ve çeşitleri. (b.t) Ürün katalog. https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/milling/face-milling.

[25] Millî Eğitim Bakanlığı. (2012). Makine teknolojisi: Temel frezeleme işlemleri (No:521MMI535). https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Temel%20Frezeleme%20%C4%B0%C5%9Flemleri.pdf.

[26] Freze tezgah çeşitleri. (b.t.). Aran Makina freze tezgahları teknik bilgi sayfası. https://aranmakina.com/tr/urunlerimiz/kategori/freze-tezgahlari.

[27] Büyükşahin, U. (2005). 3 eksenli CNC tezgâh tasarımı ve uygulaması, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

[28] Alnak, Y. (2020). Farklı Standartlardaki Paslanmaz Çelik ve Sade Karbonlu Çelik Çiftlerinin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi, Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.

[29] Yalçın, E. Ö. (2025). Farklı ısıl işlemler uygulanmış düşük alaşımlı dökme çeliklerin frezelenme işleminde kesici takımın aşınma performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.

[30] Gürol, U. (2014). G18NiMoCr3-6 çeliğinin mikro yapı ve mekanik özelliklerine farklı ısıl işlem koşullarının etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.

[31] Bakırcıoğlu, B. (2013). Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği üzerinde farklı kenar formlarının etkisinin karşılaştırmalı olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
[32] Doğdu, S. (2021). Çelik malzemelerde kimyasal bileşimin kaplamaya ve korozyona etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi.

[33] Bostan, B. (2015). Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[34] Yüce, H. (2022). Takım çeliğinin Krtd-Bor yöntemi ile borlanması ve süreçlerinin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[35] Seramik kesici takımlar (b.t.). Seramik kesici takımlar ürün bilgisi https://www.kesicitakimtr.com/seramik-kesici-takimlar/.

[36] Çakır, G. (b.t). Kesici Takım Teknolojisi Ders Sunumu pdf. https://ebs.duzce.edu.tr/Uploads/DersMateryal/10699-e9e718c1-ff17-4b5b-9774-db0842d37f190.pdf.

[37] Kılınçarslan, E., (2020). Nano gümüş katkılı bitkisel esaslı kesme sıvısının frezeleme performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.

[38] Gürbüz, H., Baday, Ş. ve Gönülaçar, Y.E. (2017). Minimum miktarda yağlamanın frezeleme işlemleri üzerine etkisinin araştırılması: Derleme, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 7(2),* 59-79.

[39] Usca, Ü.A. (2023). Interdisciplinary studies on contemporary research practices in engineering in the 21st century-III, 285–297. Özgür Publications.

[40] Gülseren,C. (2024). Soğuk iş takım çeliklerinin frezelenmesinde çözünebilir SiO2 katkılı nano akışkanların işlenebilirlik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi.

[41] Şahin, B. (2008). Nanoakışkanların hazırlanması ve ısıl iletkenliklerinin belirlenmesi, Atatürk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.

[42] Açıkgöz, R., C., (2026). Plastik kalıp çeliğinin çevresel frezelenmesinde işleme şartlarının deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.

[43] Ata teknik (b.t.) Alüminyum İşleme: Soğutucu Olarak Alkol Kullanmanın Faydaları, https://atateknik.com.tr/blog/aluminyum-isleme-sogutucu-olarak-alkol-kullanmanin-faydalari/.

[44] Özdemir, U. ve Erten, M. (2003). Talaşlı imalat sırasında kesici takımda meydana gelen hasar mekanizmaları ve hasar azalatma yöntemleri, *Havaclık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 1(1),* 37-50.

[45] Sarıgül, E. (2022). Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde farklı soğutma tekniklerinin işleme performansına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.

[46] Şap S. (2023). AISI 5140 Çeliğinin farklı soğutma teknikleri kullanılarak frezelenmesinin güç tüketimi üzerine etkileri, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 35(1),* 313-320.

[47] Hava Çeliğinin Özellikleri. (b.t.). 1.2080 hava çeliğinin teknik özellikleri pdf. https://www.saglammetal.com/templates/uploads/files/files/data_sheet/TR/takim_celikleri/soguk_is_celikleri/1_2080_TR_Bilgi_Sayfas%C4%B1.pdf.

[48] APXT 1035 PDSR takım ucu. (b.t.). APXT 1035 PDSR takım ucu ürün kataloğu. https://www.cnctakim.com/urun/apkt-1035-pdsr-kp1315-apkt-1003/2829.

[49] Kesme sıvısı teknik özellikleri. (b.t). Kar Tes KT-2000 ürün kataloğu. https://kartes.com.tr/urunlerimiz/kesme-sivisi/kt-2000/.

[50] Kesme sıvısına eklenen nano malzemeler. (b.t). Nanografi Shop ürün katalog. https://shop.nanografi.com.tr.

[51] Dahlıh MCV-860 CNC tezgâhı teknik özellikleri. (b.t). Tezmaksan CNC ürün kataloğu. https://tezmaksan.com/tr/urunler/cnc.

[52] Time TR-200 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı. (b.t). Teskon ürün kataloğu. https://www.teskon.com/yuzey-puruzluluk-olcum-cihazlari-hID22.html.

[53] Kesme sıcaklığı ölçüm cihazı. (b.t). Testo 885 tanıtım katalog pdf. https://testteknik.com/wp-content/uploads/2019/03/Test-Teknik-testo-885.pdf.

[54] Kesici takım aşınmasında kullanılan dijital ölçüm cihazı. (b.t). Insize ISM PM200SB dijital ölçüm mikroskobu ürün kataloğu. https://insize.com.tr/wp-content/uploads/2022/10/ISM-PM200SA-ISM-PM200SB.pdf.

[55] Bingöl Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı. (2025). Bingöl Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı uygulama ve araştırma merkezi (bumblab) kataloğu pdf. https://bumlab.bingol.edu.tr/media/37025/2025-bumlab-katalog.pdf.

[56] Şirin, E., Kıvak, T. and Yıldırım, Ç.V. (2021). Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X. *Tribology International, 157,* 106894.

[57] Jyothish, P., Vasu, V. and Kashinath, D. (2022). 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.

[58] Sun, Q., Zhang, N., Liu, W., Li, B., Li, S., Bhusal, A., Wang, S. and Li, Z. (2023). Insights into enhanced oil recovery by thermochemical fluid flooding for ultra-heavy reservoirs*:* An experimental study. *Fuel, 331,* 125651.

[59] Fidan A. T. ve Seydibeyoğlu, A.E. (2022). Farklı özgül yüzey alanlarına sahip grafen nanoplakalar içeren su bazlı nanoakışkanların termofiziksel ve reolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37(1),* 389–398.

[60] Chinchanikar, S., Kore, S. S. and Hujare, P. (2021). A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining. *Journal of Manufacturing Processes, 68,* 56–70.

[61] Gemci, A. (2025). Hastelloy X süper alaşımının frezelenmesinde farklı soğutma/yağlama rejimlerinin işlenebilirlik özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi.

[62] Ay, E. B. ve Madenci, B. (2024). S355J2+N çeliğinin karbür takımla frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 12(4),* 603-615.

[63] Goti, E., Mura, A., Wang, H., Ji, X. and Kong, J. (2023). Comparison of the tribological behaviour of various graphene nano-coatings as a solid lubricant for copper. *Applied Sciences, 13(13),* 8540.

[63] Baldin, V., Silva, L. R. R. Da, Houck, C. F., Gelamo, R. V. and Machado, Á. R. (2020). Effect of graphene addition in cutting fluids applied by MQL in end milling of AISI 1045 steel. *Journal of Materials Research and Technology, 9(6),* 15615–15627.

[64] Yurtkuran H. (2024). PH13-8Mo çeliğinin frezelenmesinde farkli işleme şartlarının işlenebilirliğe etkisi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi.

[65] Şirin, E., Turgut, Y. ve Korkut, İ. (2012). Farklı Sertlikteki AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınmasına Etkisi, *Poli Teknik Dergisi 15(1),* 9-14.

[66] Wang, H., Bai, Q., Chen, S., Dou, Y., Guo, W. and Wang, T. (2023). Performance evaluation of graphene nanofluid to mitigate the wear of a diamond tool in micro-machining of Ti6Al4V alloy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7(4),* 131.

[67] Peng, R., Shen, J., Tang, X., Zhao, L., and Gao, J. (2025). Performances of a tailored vegetable oil-based graphene nanofluid in the MQL internal cooling milling. *Journal of Manufacturing Processes, 134,* 814–831.

[68] Usca, Ü. A., Değirmenci, Ü. and Şap, S. (2024). Investigation the effects of sustainable cooling/lubrication conditions on the machinability of Al-3Gr based hybrid composites. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3),* 688–705.

[69] Düzce, R., Samtaş, G. (2021) GG25 Dökme Demirin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Sıcaklığı Üzerine Etkisi ve Optimizasyonu, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları 2(3),* 20-33.

[70] Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S. T., Kazi, S. N., Mehrali, M., Zubir, M. N. B. M. and Metselaar, H.S.C. (2014). Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets, *Nanoscale Research Letters, 9:15.*