



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AISI 329 PASLANMAZ ÇELİĞİN FREZELENMESİNDE CuO VE  
GRAFİT KATKILI NANOAKIŞKAN YAĞLAYICILARIN  
İŞLEME PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

**İBRAHİM DEMİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. TURGAY KIVAK**

**DÜZCE, 2022**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AISI 329 PASLANMAZ ÇELİĞİN FREZELENMESİNDE CuO VE  
GRAFİT KATKILI NANOAKIŞKAN YAĞLAYICILARIN İŞLEME  
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

İbrahim DEMİR tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Turgay KIVAK  
Düzce Üniversitesi

**Eş Danışman**

Öğr. Gör. Dr. Şenol ŞİRİN  
Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Turgay KIVAK  
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Gültekin UZUN  
Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Fuat KARA  
Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 28/09/2022

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

28 Eylül 2022

İbrahim DEMİR

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitiminin boyunca, tecrübe ve bilgisi ile birçok tecrübe edindiğim ve tez çalışmam boyunca sürekli yanında hissettiğim yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen, danışman hocam Prof. Dr. Turgay KIVAK'a en içten hislerimle şükranlarımı sunuyorum. Hayatım boyunca hatırlayacağım güzel günler için teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam esnasında ilgisini ve desteğini esirgemeyen eş danışman hocam Öğr. Gör. Dr. Şenol ŞİRİN'e teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen Oğuzhan ÖNDİN'e teşekkür ediyorum.

Ailenin bir üyesi olmaktan mutluluk duyduğum, tez çalışmalarında bana vermiş oldukları destekler için, MAS-DAF Makine Sanayi A.Ş yönetim kuruluna ve Genel Müdürü Sayın Vahdettin YIRTMAÇ'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Son olarak, hayatım boyunca desteğini her zaman yanımda hissettiğim ve hep yanımda olacağını bildiğim sevgili eşim Selda Sevim DEMİR'e ve kızım Şirin Doğa DEMİR'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi 2021.06.05.1179 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

28 Eylül 2022

İbrahim DEMİR

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR.....	xii
SİMGELER .....	xiii
ÖZET .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	4
2.1. PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	6
2.1.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler .....	7
2.1.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	8
2.1.2.1. 1. Grup Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	9
2.1.2.2. 2. Grup Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	9
2.1.2.3. 3. Grup Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	9
2.1.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler .....	9
2.1.4. Çökelme Yoluyla Sertleşen Paslanmaz Çelikler.....	10
2.1.5. Dupleks Paslanmaz Çelikler.....	10
2.2. PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ .....	11
2.2.1. Paslanmaz Çelik Malzemelerin Mekanik Özellikleri .....	11
2.2.2. Paslanmaz Çelik Malzemelerin Fiziksel Özellikleri.....	12
3. TALAŞLI İMALAT ve FREZELEME .....	14
3.1. TALAŞLI İMALAT.....	14
3.1.1. Frezeleme .....	14
4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ .....	18
4.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİ EDEN PARAMETRELER.....	19
4.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN KULLANILAN PARAMETRELER .....	20
4.2.1. Örneklem Sayısı ve Uzunluğu .....	20
4.2.2. Ortalama Çizgisi.....	20
4.2.3. Ortalama Aritmetik Yüzey Pürüzlülüğü (R <sub>a</sub> ) .....	21
4.2.4. Genlik Dağılım Eğrisi (R <sub>sk</sub> ) .....	21
5. TAGUCHI METODU .....	22

<b>5.1. ÜRETİM ESNASI VE SONRASINDAKİ SÜREÇ</b> .....	<b>23</b>
<b>5.2. ÜRETİM ÖNCESİNDEKİ SÜREÇ</b> .....	<b>23</b>
5.2.1. Sistem Tasarımı .....	23
5.2.2. Tolerans Tasarımı .....	23
5.2.3. Parametrik Tasarım Süreci.....	24
5.2.4. Sinyal-Gürültü (S/N) Oranı.....	25
5.2.5. Robust Tasarımı .....	26
5.2.6. Varyasyon Ölçümü.....	26
5.2.7. Regresyon Analizi.....	27
<b>6. SOĞUTMA TEKNİĞİ VE MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA SİSTEMİ</b> .....	<b>28</b>
<b>6.1. KESME SIVISI</b> .....	<b>28</b>
6.1.1. Kesme İşlemlerinde Kullanılan Sıvıların İnsan Sağlığına Olumsuz Etkileri.....	30
6.1.2. Kesme Sıvılarının Sınıflandırılması.....	32
6.1.2.1. Yağ Bazlı Kesme Yağları .....	33
6.1.2.2. Gaz Bazlı Kesme Sıvıları .....	33
6.1.2.3. Su Bazlı Kesme Sıvıları.....	34
<b>6.2. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MMY) SİSTEMİ</b> .....	<b>34</b>
6.2.1. Nanoakışkan Karışımlar ve Özellikleri.....	37
<b>7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>39</b>
7.1. LİTERATÜR DEĞERLENDİRİLMESİ.....	48
<b>8. MALZEME ve METOT</b> .....	<b>50</b>
8.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME.....	50
8.2. DENEYLERDE KULLANILAN TAKIM TEZGÂHI .....	51
8.3. DENEYLERDE KULLANILAN KESİCİ TAKIM .....	52
8.4. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MMY) SİSTEMİ.....	53
8.4.1. Deneylerde Kullanılan Bitkisel Esaslı Yağ .....	54
8.4.2. Deneylerde Kullanılan Nanopartikül Tozlar .....	55
8.4.3. Deneylerde Kullanılan Yüzey Aktif Maddeleri.....	56
8.4.4. Nanoakışkan Hazırlama Prosesi.....	58
8.5. DENEYSEL ÖLÇÜM VE ANALİZLERDE KULLANILAN CİHAZLAR..	59
8.5.1. Viskozite ve pH Ölçüm Cihazları .....	59
8.5.2. Termal İletkenlik Ölçüm Cihazı .....	60
8.5.3. Damlama Noktası Ölçümleri.....	61

8.5.4. Kesme Sıcaklığının Ölçümü .....	62
8.5.5. Yüzey Pürüzlülüğün Ölçülmesi .....	62
8.5.6. Kesici Takım Aşınma Ölçümleri.....	63
8.6. TAGUCHI OPTİMİZASYON YÖNTEMİ .....	64
<b>9. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>66</b>
9.1. NANOAKIŞKAN VİSKOZİTE VE pH SONUÇLARI.....	66
9.2. NANOAKIŞKAN TERMAL İLETKENLİK SONUÇLARI .....	68
9.3. NANOAKIŞKAN DAMLAMA NOKTASI SONUÇLARI .....	69
9.4. YÜZEY AKTİF MADDESİNİN OPTİMİZE EDİLMESİ.....	71
9.4.1. S/N Oranlarının Analizi.....	71
9.4.2. Varyans Analizi (ANOVA).....	74
9.4.3. Doğrulama Deneyi Sonuçları .....	75
9.4.4. Kesici Takım Ömrü ve Aşınma Sonuçları .....	78
9.4.5. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	79
9.5. NANOAKIŞKAN KARIŞIM ORANLARININ OPTİMİZE EDİLMESİ .....	83
<b>10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>87</b>
10.1. SONUÇLAR.....	87
10.2. ÖNERİLER.....	90
<b>11. KAYNAKLAR.....</b>	<b>91</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>98</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Cr~Ni katkısına göre paslanmaz çelik grupları .....	7
Şekil 3.1. Talaş kaldırma işlemlerinin kullanım sıklığı .....	15
Şekil 3.2. Talaş kaldırma operasyon sürelerinin karşılaştırılması .....	16
Şekil 4.1. Temas uçlu iğneli sistemi. ....	19
Şekil 4.2. Örnekleme sayısı ve uzunluğu kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm uzunluğu .....	20
Şekil 4.3. Profil ve genlik dağılım etkisi .....	21
Şekil 6.1. Tahriş edici dermatit .....	30
Şekil 6.2. Folliculitis cilt hastalığı .....	31
Şekil 6.3. Cilt kanseri.....	31
Şekil 6.4. MMY sistematiği .....	35
Şekil 6.5. MMY Sisteminde dıştan ve içten püskürtme .....	36
Şekil 6.6. Talaş kaldırma sistemlerinde maliyet şeması .....	37
Şekil 6.7. Nanopartikül katkılı kesme sıvılarının hazırlama aşamaları. ....	38
Şekil 8.1. Deneylerde kullanılan AISI 329 malzeme boyutları. ....	51
Şekil 8.2. DELTA SEIKI CNC 1050 A CNC freze tezgâhı ve deney seti. ....	52
Şekil 8.3. Sandvik 490R-08T308M 1130 kesici takım.....	53
Şekil 8.4. Sandvik 490-025A20-08L freze takım tutucusu. ....	53
Şekil 8.5. SKF LubriLean-Vario MMY sistemi. ....	54
Şekil 8.6. Nanopartikül SEM görüntüsü ve elemental analizleri a) CuO, b) grafit. ....	55
Şekil 8.7. Yüzey aktif madde SEM görüntüleri ve elemental analizleri a) CTAB, b) PVP ve c) SDS. ....	57
Şekil 8.8. Nanoakışkanların hazırlama aşamaları; a) Kern Pcb hassas terazi, b) Daihan HS-100D Mekanik karıştırıcı, c) Bandelin Sonoplus UW-3200 ultrasonik homojenizatör ve d) Termal N11150 manyetik karıştırıcı. ....	58
Şekil 8.9. Nanoakışkan a) Viskozite ve b) pH ölçümleri.....	60
Şekil 8.10. Termal iletkenlik ölçüm cihazı. ....	61
Şekil 8.11. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümleri. ....	61
Şekil 8.12. Kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü. ....	63
Şekil 8.13. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri. ....	64
Şekil 9.1. Nanoakışkan viskozite ve pH ölçüm sonuçları.....	67
Şekil 9.2. Nanoakışkan termal iletkenlik sonuçları. ....	68

Şekil 9.3. Temas açısı ölçümü. ....	69
Şekil 9.4. Temas açısı ölçüm sonuçları.....	70
Şekil 9.5. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama S/N oranları.....	73
Şekil 9.6. Kesme sıcaklığı için ortalama S/N oranları grafiği. ....	74
Şekil 9.7. Kesici takım ömür sonuçları.....	78
Şekil 9.8. Kesici takım serbest yüzey aşınma görüntüleri. ....	79
Şekil 9.9. Yüzey aktif madde-kesme hızı yüzey pürüzlülüğü değişimi.....	80
Şekil 9.10. Kesme hızı-ilerleme yüzey pürüzlülüğü değişimi. ....	81
Şekil 9.11. Yüzey aktif maddesi-kesme hızı kesme sıcaklığı değişimi. ....	82
Şekil 9.12. Kesme hızı-ilerleme kesme sıcaklığı değişimi. ....	83
Şekil 9.13. Soğutma koşullarının farklı kesme hızına göre yüzey pürüzlülüğü değişimi. ....	84
Şekil 9.14. Soğutma koşullarının farklı kesme hızlarına göre kesme sıcaklık değişimi. .....	86

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Piyasada sıklıkla kullanılan dubleks paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça) .....	11
Çizelge 2.2. Paslanmaz çelik malzemelerin özellikleri. ....	13
Çizelge 5.1. Taguchi dikey dizinleri ve faktörler. ....	24
Çizelge 6.1. Kesme sıvısı türlerinin avantaj ve dezavantajları .....	32
Çizelge 6.2. Kesme sıvılarının sınıflandırılması.....	33
Çizelge 8.1. Deneysel parametreler. ....	50
Çizelge 8.2. AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi. ....	51
Çizelge 8.3. AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri. ....	51
Çizelge 8.4. Deneysel kullanın tezgâhın teknik özellikleri. ....	52
Çizelge 8.5. SKF LubriLean-Vario MMY cihazı teknik özellikler. ....	54
Çizelge 8.6. Opet PlantoCut SR10 Kesme yağı özellikleri. ....	54
Çizelge 8.7. Nanopartikül özellikleri.....	55
Çizelge 8.8. Nanoakışkan karışım isimlendirme tablosu.....	59
Çizelge 8.9. L <sub>9</sub> işleme parametreleri ve seviyeleri.....	64
Çizelge 8.10. Taguchi L <sub>9</sub> dikey dizisi.....	65
Çizelge 9.1. Taguchi L <sub>9</sub> deney tasarımı ve kontrol faktörleri.....	71
Çizelge 9.2. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıkları için S/N oranları. ....	72
Çizelge 9.3. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıkları için S/N yanıt tablosu. ....	72
Çizelge 9.4. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu. ....	75
Çizelge 9.5. Kesme sıcaklığı için ANOVA tablosu.....	75
Çizelge 9.6. Deneysel değerler ve tahmini değerler tablosu.....	77

## KISALTMALAR

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum Oksit
ANOVA	Varyans Analizi / Analysis of Variance
CuO	Bakır Oksit
CBN	Cubic Bor Nitride (Kübik Bor Nitrür)
CNC	Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)
CNT	Carbon Nano Tube (Karbon Nano Tüp)
CRY	Cryogenic
CTAB	Cetil Trimetil Amonyum Bromid
CVD	Chemical Vapour Deposition (Kimyasal buhar biriktirme)
ÇDKNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
GO	Grafenoksit
Grpt	Grafit
HBN	Hegzagonal Bor Nitrür
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
KO	Konsantrasyon Oranı
KNT	Karbon Nanotüp
KRY	Kriyojenik
KT	Kesici Takım
MoS <sub>2</sub>	Molibden di sülfür
MQL / MMY	Minimum Quantity Lubrication (Minimum Miktarda Yağlama)
MWCNT	Multi Walled Carbon Nano Tube (Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp)
NC	Numeric Control (Sayısal Denetim)
NT	Nozul Tipi
PVD	Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
PVP	Poli Vinil Polipirolidon
SEM / TEM	Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
SDS	Sodyum Dodesil Sülfat
SiC	Silisyum Karbür
SiO <sub>2</sub>	Silikadioksit
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Slikon Nitrit
S/N	Signal/Noise Rate (Sinyal/Gürültü Oranı)
TiC	Titanyum Karbür
TÖ	Takım Ömrü
ZrO <sub>2</sub>	Zirkonyumoksit

## SİMGELER

a	Kesme derinliği, (mm)
C	Karbon
Cr	Krom
f	İlerleme hızı, (mm/dev)
F	Kesme kuvveti, (N)
F <sub>a</sub>	Eksenele kuvvet, (N)
F <sub>c</sub> , (F <sub>y</sub> )	Teğetsel kuvvet, (N)
Fe	Demir
F <sub>f</sub> , (F <sub>x</sub> )	İlerleme kuvveti, (N)
F <sub>r</sub> , (F <sub>z</sub> )	Radyal kuvvet, (N)
Mn	Manganez
Mo	Molibden
MPa.s	Milipaskal-Second
n	Devir sayısı, (dev/dak)
nm	Nano metre
Ni	Nikel
P	Basınç, (kg/mm <sup>2</sup> )
Pa	Pascal, (N/m <sup>2</sup> )
R <sub>a</sub>	Yüzey pürüzlülük değeri, (μm)
R <sub>aort</sub>	Ortalama Yüzey pürüzlülük değeri, (μm)
Rz	5 en yüksek, 5 en alçak noktanın ortalaması, (μm)
T	Sıcaklık
T <sub>ort</sub>	Ortalama Sıcaklık
Ti	Titanyum
V <sub>c</sub>	Kesme hızı, (m/dak)
V <sub>B</sub>	Yan kenar aşınması, (mm)
Zr	Zirkonyum
W/Mk	Termal İletim Katsayısı
μm	Mikron metre

## ÖZET

### AISI 329 PASLANMAZ ÇELİĞİN FREZELENMESİNDE CuO VE GRAFİT KATKILI NANOAKIŞKAN YAĞLAYICILARIN İŞLEME PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

İbrahim DEMİR

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Turgay KIVAK

Eylül 2022, 97 sayfa

Bu tez çalışmasında AISI 329 paslanmaz çeliği minimum miktarda yağlama (MMY) ve nanopartikül katkılı MMY (NanoMMY) koşulları altında frezelenmiştir. Bu kapsamda nanopartikül olarak bakır oksit (CuO) ve grafit (Grpt) tercih edilmiştir. Ayrıca nanopartikül karışımlar bitkisel esaslı yağın içerisine hacimce %0,6 oranında eklenerek hazırlanmıştır. Çalışma iki aşamalı olarak ele alınmıştır. İlk aşamada CuO nanoakışkan karışımlara aynı oranlarda üç farklı yüzey aktif maddesi (setil trimetil amonyum bromid-CTAB, poli vinil polipirrolidon-PVP ve sodyum dodesil sülfat- SDS) eklenerek Taguchi L<sub>9</sub> deney setine göre bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülük (R<sub>a</sub>), kesme sıcaklığı (T) ve kesici takım aşınması sonuçlarına göre tespit edilen PVP yüzey aktif maddesi çalışmanın ikinci aşamasında kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise PVP yüzey aktif maddesi eklenen farklı karışım oranlarındaki CuO ve grafit nanoakışkanlarının işlenebilirlik performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kesme koşulu (CuO, Grpt, CuO+Grpt), karışım oranı (1:1, 1:2, 2:1, 1:3 ve 3:1) ve kesme hızı (120, 160 ve 200 m/dak) deneylerde girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Çalışmada ilerleme (0,1 mm/dev) ve kesme derinliği (0,5 mm) sabit tutulmuştur. Girdi faktörlerine ait etki düzeylerinin belirlenmesinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Tez çalışmasından elde edilen sonuçlara göre; nanoakışkan hazırlamada en etkili tribolojik performansı PVP yüzey aktif maddesi göstermiştir. Ayrıca CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanı, kuru koşula göre yüzey pürüzlülüğünü ve kesme sıcaklığının sırasıyla %48,97 ve %56,57 oranında azalttığı görülmüştür.

**Anahtar sözcükler:** Frezeleme, AISI 329 paslanmaz çelik, MMY, Nanoakışkan, Yüzey aktif maddesi.

## ABSTRACT

### EFFECTS OF CuO AND GRAPHITE ADDITIVE NANOFLUID LUBRICANTS ON MACHINING PERFORMANCE IN THE MILLING OF AISI 329 STAINLESS STEEL

İbrahim DEMİR

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Manufacturing Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Turgay KIVAK

September 2022, 97 pages

In this thesis, AISI 329 stainless steel was milled under minimum quantity lubrication (MQL) and nanoparticle added MQL (NanoMQL) conditions. In this context, copper oxide (CuO) and graphite (Grpt) were preferred as nanoparticles. In addition, nanoparticle mixtures were prepared by adding 0.6% vol into the vegetable-based oil. The thesis study was handled in two stages. In the first stage, three different surfactants (cetyltrimethylammonium bromide - CTAB, polyvinylpyrrolidone - PVP and sodium dodecyl sulfate - SDS) were added to the CuO nanofluid mixtures in the same proportions and a series of experiments were carried out according to the Taguchi L<sub>9</sub> experimental setup. PVP surfactant determined according to the obtained surface roughness ( $R_a$ ), cutting temperature (T) and cutting tool wear results was used in the second stage of the thesis. In the second stage of the study, machinability performance tests of CuO and Grpt nanofluids at different mixing ratios with PVP surfactant added were carried out. In this context, cutting condition (CuO, Grpt, CuO/Grpt), mixing ratio (1:1, 1:2, 2:1, 1:3 and 3:1) and cutting speed (120, 160 and 200 m/min) were used as input parameters in experimental design. Feed rate (0.1 mm/rev) and cutting depth (0.5 mm) were kept constant in the experiments. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effect levels of the input factors. According to the results obtained from the thesis study; PVP surfactant showed the most effective tribological performance in nanofluid preparation. In addition, compared to the dry condition CuO/Grpt+PVP (1:3) hybrid nanofluid was reduced the surface roughness and cutting temperature by 48.97% and 56.57%, respectively.

**Keywords:** Milling, AISI 329 stainless steel, MQL, Nanofluid, Surfactant.

# 1. GİRİŞ

Kimyasal bileşimlerinde yüksek oranda krom (Cr) bulunduran çelik türleri paslanmaz çelik olarak adlandırılmaktadır. Bir paslanmaz çeliğin oluşabilmesi için yapısında minimum %12 oranında krom elementi barındırması gerekmektedir. Paslanmaz çeliklerin yapısal özellikleri nedeniyle bileşimlerinde; Molibden (Mo), Azot (N), ve Nikel (Ni) gibi elementleri barındırmaktadır. Paslanmaz çelikler alaşım elementlerinin özellikleri ve kimyasal özelliklerine göre 5 grupta incelenmektedir. Bu 5 grup; martenzitik, ferritik, östenitik, çökelme sertleşmeli, çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler olarak adlandırılmaktadır.

Gelişen teknoloji ile birlikte yüksek korozyon ve aşınma dayanımı isteyen yerlerde dubleks paslanmaz çelikler tercih edilmeye başlanmıştır. Latince'den adlandırılan ve "iki parçadan oluşan" anlamına gelen dubleks paslanmaz çelikler yapılarında bolca Ferrit ve Östenit bulundururlar. Östenitler korozyon direncini artırırken, Ferrit ise mekanik dayanım ve korozyon çatlama karşı dayanımı arttırmaktadır. Dubleks paslanmaz çeliklerin yapılarında oluşabilecek olan termal çatlamların giderilmesi amacıyla düşük oranlarda kükürt (S) ve fosfor (P) ilave edilmektedir. Çökelme sertleşmeli çelik olarak adlandırılan bu tür, yüksek süneklik, üstün tokluk ve kaynak kabiliyetinin fazla olması sebebiyle endüstride oldukça tercih edilen bir çelik türüdür.

Yapılarında östenit ve ferrit fazlarını eşit oranlarda içeren bu çelik türü, sağlamış olduğu üstün mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımı nedeniyle günümüzde kullanımı git gide artarak, hemen hemen her endüstride karşımıza çıktığı görülmüştür [1].

Dubleks çelikler yapılarında; yüksek miktarda Cr ve az miktarda Ni bulunduran bir paslanmaz çelik türüdür. Diğer çelik türleri ile kıyaslandığında yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu görülmüş olup, bu sebeple; endüstriyel pompa millerinde, gemi pervanelerinde, tekne şaftlarında, özel hidrolik santrallerindeki özel makinalarda ve spesifik imalat alanlarında kullanımı git gide artmaktadır. AISI 2205 (EN 1.4462) olarak tanımlanan bu çelik yüksek mukavemet özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir.

Dubleks paslanmaz çelikler içerisinde yapılarında bulunan alaşım miktarları yüksek korozyon ve dayanım sağladığı için işlenmesi zor ve işleme maliyeti yüksek olan bir çelik türüdür. İşlenebilirliğin zor olması talaşlı imalat yapan işletmeler için problem oluşturmakla birlikte işleme maliyetlerini de hatırı sayılır oranlarda etkilemektedir. Yüzey kalitesi, malzemelerde imalat sonrası istenen önemli bir kalite göstergesidir. İşlem gören malzemenin operasyon esnasında öngörülen istenilen yüzey kalitesinde üretilmemesi, malzeme ömrü ile birlikte birden fazla problemi beraberinde getirebilmektedir [2].

İşletmeler işleme esnasında kesme ve ilerleme parametrelerinin işlenebilirlik optimizasyonu ile işleme maliyetlerinin minimize edilmesini esas alır. İşlenebilirlik esnasında talaş kaldırma mekaniğini etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörlerin minimize edilmesi işleme maliyetlerini düşürdüğü gibi aynı zamanda takım ve tezgâh ömrü, işlenebilirlik zamanı ve verimliliği de en üst düzeye çıkarılması için gereklidir. İşlenebilirlik performansını etkileyen en önemli parametreleri sıralamak gerekirse; soğutma, yağlama yöntemi, kesme hızı, ilerleme hızı ilk akla gelenlerdir. Doğru parametrelerle verimliliği esas alınarak istenilen kalitede malzeme işlemek için birçok sayıda deney ve denemeler yapılması gerekmektedir. İmalat sektöründe saniyelerin esas alındığı 21. Yy ilk çeyreğinde en düşük maliyetlerle istenilen ürünün elde edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple kesme performans kriterlerinin, iş parçası ve takım soğutma sıvısının iyi belirlenmesi gerekir.

Talaş kaldırma operasyonlarından biri olan frezeleme işlemidir. Bu işlemde kaliteli bir ürün elde etmek için en önemli parametrelerden biride uygun soğutma yağlama yöntemi seçip kullanmaktır. Soğutma yağlama yöntemlerinin kullanımı ile birlikte kesme esnasında, kesme bölgesinde oluşan ısıyı uzaklaştırarak istenilen yüzey kalitesinde ürün elde edilirken aynı zamanda kesici takım ömrüne olumlu yönde katkıda bulunmaktadır. Fakat tüm bunlarında yanında kesme sıvılarının kullanımı ile artan çevre kirliliği, üretim maliyetleri ve çalışan sağlığına olumsuz etkileri ile alternatif soğutma yağlama yöntemlerine yönelimler başlamıştır.

Kesme sıvılarının alternatif olarak geliştirilen çevre dostu MMY sistemi daha maliyetli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaya başlamıştır. İşleme esnasında pülverize olarak kesme bölgesine nüfuz eden MMY soğutma yağlama ile çok küçük miktarlarda kesme sıvısı kullanılmaktadır. MMY soğutma yağlama yöntemi iyi bir soğutma/yağlama

yöntemi olarak kabul görmeye başlamakla birlikte yarı kuru işleme olarak da adlandırılmaktadır. MMY sistemi, minimize edilmiş kesme sıvısının uygun nozul sistemleri ile basınçlı hava yardımıyla kesme bölgesine tahkik edilmesidir. İşleme esnasında meydana gelen yüksek ısı ile birlikte kesme sıvısı da buharlaşarak çalışan sağlığına olan olumsuz etkiyi de azaltmaktadır. MMY ve soğutma yönteminin performansını arttırmak amacıyla içerisine katılan nano katkı elementlerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıklarının pozitif yönde etkilediği bilinmektedir [5].

Bu çalışmada AISI329 dubleks paslanmaz çeliğine iki aşamalı olarak frezeleme işlemi uygulanmıştır. İlk aşamada nanoakışkanlara ilave edilen yüzey aktif maddelerinden etkili performansa sahip olanının belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk aşama elde edilen etkili yüzey aktif maddesi kullanılarak CuO ve Grpt nanopartikülleriyle mono ve hibrid nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Nanoakışkanların performanslarının test edilmesi adına MMY soğutma sistemi kullanılarak, kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı (T) ve yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ve takım aşınması üzerindeki etkileri irdelenerek, en optimum kesme koşullarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.



## 2. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çeliklere paslanmazlık özelliği veren temel alaşım kromdur (Cr). İçeriğinde minimum %12 Cr barındıran metaller, paslanmaz çelik olarak adlandırılmaktadır. Paslanmaz çelikler, temelde Fe~Cr, Fe~Cr~C ve Fe~Cr~Ni iki veya üç bileşikli sistemlere sahiptirler. Ancak içeriğinde mikro yapı ve fiziksel özelliklerine etki eden birçok alaşım elementleri de ihtiva edebilirler. Paslanmaz çeliklerin mekanik özelliğini ve korozyon dayanımı daha iyi seviyelere getirmek amacıyla kromun ile beraber, nikel ve molibden de alaşım elemanı olarak eklenebilir. Paslanmaz çelikler birden çok farklı elementlerden meydana gelmektedir. Her bir element; korozyona karşı direnç gösteren, farklı mekanik özellik sergileyen, mukavemet değerleri yüksek, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü değeri düşük olan özel ihtiyaçları karşılamak üzere farklı paslanmaz çelikler geliştirilmiştir [3].

Paslanmaz çelikler yüksek derecede korozyon dayanımları yanı sıra, farklı mekanik özelliklere sahip çeşitlerinin bulunması, değişik (yüksek-düşük) sıcaklıklarda kullanım alanları ve kolay şekil verme özelliklerine sahiptir. Dünyada paslanmaz çelik üretim miktarları son yıllarda artmıştır. Özellikle yassı mamul ürünlerde ciddi anlamda kullanılmaktadır. Yassı malzemenin dışında; boru, tel, çubuk, dövme ürünler ve döküm parça olarak piyasada ihtiyaçlara göre üretilip kullanılmaktadır. Çelikler içerisinde en pahalı ürünler paslanmaz çeliklerdir. Fakat çevre dostu ve geri dönüştürülebilir olması, kullanım alanlarında diğer çeliklere göre uzun ömürlü olmaları, kullanımı ve sonrası için büyük avantajlar sağlaması paslanmaz çeliğe ilgiyi arttırmaktadır. Paslanmaz çelikler, yüksek oranlarda Cr ve Ni ihtiva etmesi ve mukavemet arttırmak için molibden gibi elementlerin bulunması nedeniyle işlenebilirliği zor olarak bilinirler. İşlenebilirliğin artması sonucu kullanılan takım ömrü azaltmakta ve ürün üzerine düşen maliyet arttırmaktadır [6].

Endüstrideki gelişmeler ve yenilikler paslanmaz çeliklerin kullanımını arttırmaktadır. Endüstrilerde kullanılan pompa bileşenleri, ısı değiştiriciler, depolama ve basınçlı kaplar, paslanmaz borular ve levhalar gibi malzemelerin üretiminde paslanmaz çelik kullanılmaktadır. Benzer birçok alanda kullanılmaktadır. Dünya genelinde artan rekabet

şartları, kalitesi yüksek ve maliyeti düşük ürünler imal etmeye yöneltmektedir. Üretim tesislerinde talaşlı imalatta yüksek kalitede imalat yapmak için en optimum işleme şartlarının seçmesini mecbur hale getirmiştir. Optimum işleme parametrelerin uygulanmaması neticesinde; takım aşınması hızlı olmakta, takımında kalıcı ve hızlı ilerleyen deformasyonlar oluşarak, işletme ve ürün maliyetini artırmakta olup, parametrelerin yanlış seçilmesi ürün maliyeti ile birlikte parçanın yüzey kalitesini de olumsuz etkilemektedir. Günümüzde en önemli parametre olan zaman kayıplarına neden olacaktır. Tüm bu olumsuzluklar toplandığında ürün maliyeti ile birlikte ürün kalitesini de negatif yönde etkileyecektir [7].

Paslanmaz çeliklerden beklenen temel özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Korozyona karşı yüksek direnç,
- Değişken sıcaklık koşullarında (yüksek veya düşük) üstün dayanım,
- İşlenebilirlik özelliği nispeten zor,
- Üstün mekanik dayanım,
- Görşelliği yüksek ve farklı geometrili ürün eldesi,
- Gıda sektörü için üstün hijyenik ve çevreye duyarlılık,
- Kullanım alanına göre uzun ömür [4].

Paslanmaz çeliklerin içeriğinde bulunduran alaşımların özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

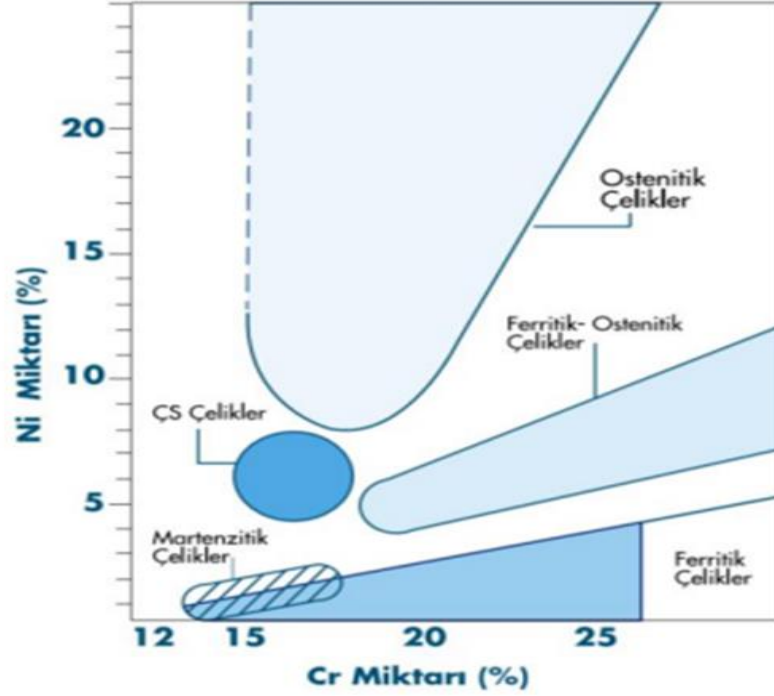
- Alüminyum; ferrit ve nitrür yapıcılığı son derece yüksektir. İçeriğinde %12 oranında Cr barındıran kaynak metaline eklenmesi sayesinde yapıyı ferritik, bir başka ifadeyle sertleşemez hale getirir.
- Krom; ağırlıkça %12 ve üzerinde Cr elementi içeren Fe~Cr alaşımları tamamen ferritik yapılıdır. Ferritik alaşımlarda Cr, malzemedeki mikroyapıyı kararlı biçimde tutan ana alaşımdır. Korozif ortamlarda direnci yüksektir. Cr, paslanmaz çelik türlerinde yüksek sıcak ve sürünme dayanımına karşı etkisi düşük seviyededir.
- Molibden; ferritik yapı oluşturan elementtir. Ferritik yapının oluşumunun yanında aynı zamanda, mikroyapının korunumunu da sağlar.

- Titanyum; karbür ve nitrür yapıcılığı ile kuvvetli ferritik yapı oluşturur. Östenitik paslanmaz çeliklerde karbür çökmesini dengelemede Cr elementi kullanılır.
- Karbon; östenit oluşturma kabiliyeti kuvvetlidir. Cr ile etkileşime girdiğinde, karbürleri oluşturur ve buda taneler arası korozyona sebep olur.
- Nikel; dengeleyici ve aynı zamanda östenit yapıcılığı yüksektir. Korozyona karşı direncin artmasına yardımcı olur. Paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirmede kullanılır.
- Bakır; korozyon direncini artırmada kullanılır. Korozif çatlak gelişimini azaltarak yaşlanma sertleşmesi oluşumunu sağlar.
- Silisyum; ferritik yapıcı özellik sağlar. Özellikle östenitik paslanmaz çeliklerde korozyon direncinin artmasında rol oynar.
- Manganez; östenitik yapıcı özellik sağlar. Oda sıcaklığında veya oda sıcaklığına yakın sıcaklık koşullarında östenitik yapının daha kararlı olmasına katkı sağlar. Ancak yüksek sıcaklık değerlerinde ferrit yapı ile manganez sülfat oluşumu gözlemlenebilir.
- Tungsten (Wolfram); ferritik yapıcı özelliği son derece yüksektir. Yüksek sıcaklık alaşımlarının bazılarında, dayanım ve sürünme direncini arttırmada tercih edilir [3].

## 2.1. PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşenlerinin oranları değiştirilerek, birbirinden çok farklı özelliklere sahip elementler elde edilebilir. İçeriğindeki krom miktarı yükseltilecek korozyon direnci artırılabilir. Aynı zamanda nikel ve molibden gibi elementleri de belirli oranlarda eklenerek korozyona karşı direnç artırılabilir. Ayrıca içeriğine katılan Cu, Ti, Al, Si, Nb, Ta, N, S ve Se gibi elementler, paslanmaz çeliklerde birtakım olumlu etkiler sağlamaktadırlar. Makina tasarımcıları ve imalatçıları uygulama alanına göre en başarılı ve uygun paslanmaz çeliği seçme şansına vardır.

Paslanmaz çelik malzemeler, ihtiva ettikleri Cr ve Ni oranına göre beş farklı şekilde gruplandırılabilirler (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Cr~Ni katkısına göre paslanmaz çelik grupları [3].

Paslanmaz çelik malzemeler, gösterdiği özellik ve ihtivaları bakımında beş temel grupta incelenirler;

- Östenitik
- Ferritik
- Martenzitik
- Dupleks
- Çökeltme Sertleşmeli

### 2.1.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Piyasada ve imalatçılarda sıklıkla tercih edilen paslanmaz çelik türüdür. Paslanmaz özellikli çelik türlerinin tümü düşünüldüğünde, kullanılan paslanmaz çeliklerin yaklaşık %65~70'ini kapsamaktadır. Paslanmaz çelikler içerisinde korozyon direnci en yüksek olan çelikler östenitik paslanmaz çeliklerdir. Östenitik paslanmaz çelikler şekil verebilme özelliği çok yüksektir. İşlenebilirliği ve kaynak edilebilirliği yüksek olan çeliklerdir. AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çelikler, piyasada ve üretim tesislerinde en fazla bilinen ve kullanılan östenitik paslanmaz çelik türleridir [8]-[9].

Östenitik paslanmaz çelikler, tavlınmış durumdayken manyetik özelliği bulunmamaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler su verme yoluyla sertleştirilemezler. Tavlınmış halde bulunan östenitik paslanmaz çeliklerin toklukları, süneklikleri ve kolay şekil alma özellikleri, düşük sıcaklıklarda dahi çok iyi seviyede olduğu bilinmektedir. Östenitik paslanmaz çelikler manyetik olmayan çeliklerdir. Manyetik özellik istenmeyen veya aranmayan tüm alanlarda rahatlıkla kullanılabilir. Tüm sıcaklık koşullarında üstün mekanik özellik sergilerler. Östenitik paslanmaz çelikler, korozif ortamlara karşı dayanıklı olup sıcaklık altında yırtılma davranışı eğiliminde olabilirler. Östenitik paslanmaz çeliklerin termal iletkenlik katsayısı diğer çeliklere göre daha düşük oranlardadır. Fakat bunun yanında termal genişleme katsayısı diğer çeliklere göre daha yüksektir. Erime sıcaklıkları daha düşüktür. Elektriksel dirence yüksek çeliklerdir. Östenitik çelikler ısıtıl işlem sıcaklıklarında yapısal değişim göstermediğinden su verilerek sertleştirilemezler. Östenitik çelikler kaynaklı birleştirmeler için en uygun çeliklerdendir [8].

Östenitik paslanmaz çelikler; petrol rafine sistemlerinde, endüstriyel pompa sistemleri, tren raylarında ve uçak parçaları gibi korozyona maruz kalınan sistemlerde uygulanmaktadır [9].

### **2.1.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler**

Ferritik paslanmaz çelikler, en yaygın kullanım alanı otomotiv endüstrisidir. Ürün farklılıkları yönünden geniş kapsamlı olan çelik türüdür. 400 kalite olarak ifade edilen bu paslanmaz çeliklerin manyetik özelliği vardır. Ferritik paslanmaz çelikler içeriğinde %11~17 oranlarında Cr elementi ihtiva etmektedirler. Bu çeliklere ısıtıl işlem gibi özellik geliştirici işlemler uygulanmazlar.

Ferritik paslanmaz çelikler orta derece korozyon özelliğine sahiptir. Kaynak edilebilirliği ve şekil alma kabiliyetleri oldukça düşük seviyelerde çeliklerdir. Bu çelikler genelde mutfak eşyalarında, dekoratif amaçlı ev uygulamalarında, otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılmaktadırlar [9].

Ferritik paslanmaz çelikler üç grupta sınıflandırılabilir.

#### 2.1.2.1. 1. Grup Ferritik Paslanmaz Çelikler

Bu çelik grubu yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı dayanıklıdır. İçeriğinde bulunan alaşım elementleri nedeniyle özellikle kaynak operasyonları sonrasında tanecik büyümesinden ve martenzitik yapının oluşmasından kaynaklı korozyona karşı direnci, süneklik ve tokluk gibi özellikleri azalma gösterir.

#### 2.1.2.2. 2. Grup Ferritik Paslanmaz Çelikler

1. Grup ferritik paslanmaz çeliklere göre daha düşük oranda C ve Cr elementi ihtiva ederler.

#### 2.1.2.3. 3. Grup Ferritik Paslanmaz Çelikler

Yüksek oranlarda Cr ve Mo elementi ihtiva eden paslanmaz çelik grubudur. Genel olarak korozyon kırılmasına karşı dayanıma sahiptirler. 3. Grup ferritik çelikler kaynak operasyonlarının ardından, sünek, tok ve korozyona dayanıklı olabilmeleri için oksijen ile malzeme yüzeyindeki karbon atomlarının gaz fazına geçirerek üretimleri sağlanır [8].

### 2.1.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, %11~18 Cr elementi, %1,2'ye kadar C elementi ile az oranlarda Mn ve Ni ihtiva eden malzemelerdir. Martenzitik çelikler yüksek sıcaklıkta tavlansız olarak östenit oluştururlar. Meydana gelen östenitin soğuması sırasında martenzite geçişi ile beraber üründe sertleşme meydana gelir. Martenzitik paslanmaz çelikler; kullanım alanı geniştir. Kullanım alanlarından bazılarını şu şekilde sıralayabiliriz; valf ve bağlantı elemanlarının üretiminde, dişli, pim ile yük aktarımında kullanılan millerde, zincirlerin üretiminde, dental aletlerin üretiminde. Düşük karbon ihtiva eden türleri ise türbin kanat ve çarklarında tercih edilirler. Martenzitik paslanmaz ferromanyetik oldukları gibi aynı zamanda atmosferik korozyona karşı da dirençlidirler [10].

Bu paslanmaz çelik grubunu diğer paslanmaz çelik grubundan ayıran en önemli özellik; içeriğinde bulunan C elementinin düşük miktarlarda olmasıdır. Ayrıca bu çelik türü ısıl işlem uygulanması ile sertleştirilebilmektedir. Martenzitik çelikler karbon çeliklerindedir. Bu özelliğinden dolayı faz dönüşümü özellikle su verme işlemi sonucunda ortaya çıkarak, sert bir yapı meydana getirirler. Faz dönüşümü sonrası sertleşen çelikler Cr ve C miktarları Martenzitik bir yapı elde etmek için belirli bir dengede olması gerekmektedir [8].

#### **2.1.4. Çökeltme Yoluyla Sertleşen Paslanmaz Çelikler**

Çökeltme yoluyla sertleşme, ısıl işlem akabinde ikinci fazların ana fazların arasına düzgün bir şekilde çökeltilmesi işlemidir. Bu işlem sonrasında, paslanmaz çeliğin dayanımı ve sertliğinde artışlar meydana gelmektedir. Bu çeliklerin içyapıları östenitik, yarı östenitik veya martenzitik olabilir. Çökeltme sertleşme işleminde ilk olarak soğuk şekillendirme gerekebilir. Çökeltme oluşumunda, bu yapıdaki malzemelere Al, Ti, Nb ve Cu elementleri ile alaşımlandırma yapılabilir. Alaşımlandırma işlemi sonrasında dayanımları 1700 MPa varan paslanmaz çelik malzemeler üretilebilir. Mevcut piyasa koşullarında çözülme tavı görmüş şekilde ve yumuşak biçimde satılmaktadırlar. Bu sayede şekillendirme ve işlenebilirlik işlemleri kolaylıkla uygulanabilir. Şekillendirme işlemleri sonrasında ise düşük sıcaklık yaşlandırması sayesinde sertlik özelliği kazandırılabilir [11].

Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin daha çok önem derecesi yüksek olan alanlarda tercih edilmektedir. Bilinen en belirgin kullanım alanları ise uçak gövdelerinde, füze dış yüzeylerinde, deniz araçlarında, petro-kimya endüstrisinde, havacılık uygulamalarında, özel pompa üretiminde, bağlantı elemanlarında ve bazı kesici takımlarda kullanılmaktadır [12].

#### **2.1.5. Dupleks Paslanmaz Çelikler**

Dupleks paslanmaz çelikler, mikro yapılarına bakıldığında zaman ferritik fazı ve östenitik fazlarının birlikte oluşturduğu paslanmaz çelik çeşididir. Dupleks paslanmaz çeliklerin en elverişli ve uygun faz dengesi normal şartlarda yaklaşık bir değer olarak %50-50 kabul edilmektedir. Ferritik- Östenitik oranlarında yüzdelik birimde farklılık arttıkça ürünlerin kimyasal yapısı değiştiği için ve diğer özellikleri de değişeceği için belirli problemler meydana gelmektedir. Örnek verecek olursak, östenitik miktarındaki artış malzemenin dayanımı düşürmekte ve gerilmeli korozyon çatlamasına dayanma gücü düşmektedir. Ferritik miktarındaki artış ise malzemenin tokluk direncinin azalmasına ve malzemenin genel korozyon direncinin zayıflamasına neden olmaktadır.

Dupleks paslanmaz çelikler düşük maliyet, kaynak yapılabilme özelliği ve tokluk özellikleri ile genel olarak yüksek mukavemet ve yüksek korozyon özelliklerinin her ikisinin birden önemli olan iş alanlarında kullanılmaktadır. Piyasada kullanımı fazla olan dört dupleks paslanmaz çelik Çizelge 2.1'de verilmiştir [8].

Çizelge 2.1. Piyasada sıklıkla kullanılan dubleks paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça) [8].

Sınıf	Cr	Ni	Mo	Mn	N
2304	21,5-24,5	3,0-5,5	0,05-0,6	2,50	0,05-0,2
LDX 2101	21,50	1,5	0,3	2,0	0,22
2205	22,0-23,0	4,5-6,5	3,0-3,5	2,0	0,14-0,20
2507	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-5,0	1,20	0,24-0,32

Dubleks paslanmaz çelikler, gemi sektöründen yangın pompasına kadar kullanılan malzemeler olduğundan özellikle deniz suyu gibi tuzlu su ortamlarına karşı korozyon dayanımı ve mekanik özellikleri üst düzeyde olması gerekir. Yüksek korozyon ve mukavemet istenen benzeri uygulama alanlarında dubleks paslanmaz çelikler tercih edilmektedirler. Sac levha tipi malzemelerde ise sac kalınlık değeri düştükçe, şekil verme işlemleri, yırtılma ve buruşma gibi sorunları da beraberinde getirebilmektedir. Üreticiler, dubleks ve östenitik paslanmaz çelik levhalar gibi yüksek maliyetli levhaların şekillendirme işlerinde istenmeyen problemlerden (çizilme, yırtılma, buruşma vb.) uzak durmaya uğraşmakta ve bu kapsamda birçok incelemeler yapılmaktadır [11].

## 2.2. PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

### 2.1.6. Paslanmaz Çelik Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özellikleri diğer çelik tiplerine göre çok iyi olduğundan endüstride birçok alanda tercih edilmektedir. Tanklar, basınçlı kap ve borular, kimyasal tesisler, valfler, özel pompalar ve benzeri mekanik dayanım gerektiren kullanım alanları için paslanmaz çeliklerin kullanımı oldukça yaygındır. Yüksek dayanım gerektiren tüm uygulamalar için ve yüksek derecede tokluk ve mekanik şekillendirme özellikleri aranmaktadır. Buna benzer sanayi ve endüstriyel işletmelerde kullanılan ve piyasada bilinebilirliği en fazla paslanmaz çelikler 300 serisi östenitik çeliklerdir. Sanayide en çok ve yaygın kullanılan paslanmaz çelikler ise 304 ve 316 kalitedeki çeliklerdir. Östenitik tip paslanmaz çelikler diğer tiplere göre oranla uzama ve çekme dayanımları daha iyidir. Bu özelliklerinin dışında tam tersi olarak akma dayanımları daha düşüktür. Aynı denebilecek kadar birbirine yakın özelliği kesit daralmasıdır. Temperleme işleminde malzeme östenit oluşum sıcaklığına kadar ısıtılır ardından martenzit oluşum sıcaklığına kadar soğutularak malzemenin tokluğunu yükseltmek amacıyla uygun bir

sıcak değerine kadar tekrar ısıtmaya proseslerini içermektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerin en önemli karakteristik özelliği mükemmel tokluk değerine sahip olmasıdır. Paslanmaz çelik gruplarında düşük sıcaklıklarda dahi tokluğu en iyi derecede olan çelikler östenitik paslanmaz çeliklerdir [12].

### **2.1.7. Paslanmaz Çelik Malzemelerin Fiziksel Özellikleri**

Paslanmaz çelik malzeme gruplarının sahip oldukları fiziksel özelliklerin bulunduğu Çizelge 2.2’de verilmiştir. Çizelge de paslanmaz çeliklerin sahip olduğu tüm fiziksel özellikler önceden yapılan deneylerle tespit edilmiştir. Kaynaklar da tabloda gösterildiği gibi yerini bulmuştur. Paslanmaz ve karbon çeliklerinin ısı transfer özelliği birbirinden çok farklı çeliklerdir. Örnek verecek olursak, yapısında yüksek derecede krom içeren çeliklerin ısıyı transfer kabiliyetleri karbon çeliklerinin yapısına göre değişebilir fakat yaklaşık yarısı kadar kabul görmektedir. Östenitik paslanmaz çelik malzemeler ısı iletim özelliği daha yüksek olup, ısı transfer özelliği karbon çeliklerine göre yaklaşık üçte birine oranında düşmektedir. Kaynak esnasında ortaya çıkan sıcaklığın kaynak yapılan bölgede uzun süre kalmaktadır. Sıcaklığın kaynak bölgesinde uzun sürelerde alması sebebi ile çelikler üzerinde bazı fiziksel zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Paslanmaz çeliklerin sahip oldukları fiziksel özelliklerden dolayı kaynak akabinde, karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağından daha fazla kendini çekmeler oluşmaktadır. Kaynak bölgesinde, ürünün soğuması sırasında, kaynak yapılan bölgede meydana gelen güçlü ve şiddetli iç gerilmeler malzemedeki bazı riskleri beraberinde getirmektedir. Örneğin çatlama tehlikesine yol açar. Karbon çelikleri ve yüksek kromlu paslanmaz çelikler birbirine yakın genleşme katsayısına sahiptirler [12].

Çizelge 2.2. Paslanmaz çelik malzemelerin özellikleri.

Fiziksel Özellik	Paslanmaz Çelik Malzeme Türü			
	Östenitik	Ferritik	Martenzitik	Çökelme ile Sertleşebilen
Elastisite Modülü (GPa)	195	200	200	200
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	8	7,8	7,8	7,8
Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m°C)	16,6	10,4	10,4	10,8
Isıl İletkenlik (W/mK)	15,7	25,1	25,1	22,3
Özgül Sıcaklık (J/k°K)	500	460	460	460
Elektriksel Direnç (µΩcm)	74	61	61	80
Manyetik Geçirgenlik	1,02	600-1100	600-1100	95
Ergime Aralığı (°C)	1375-1450	1425-1530	1425-1530	1400-1440

### 3. TALAŞLI İMALAT VE FREZELEME

#### 3.1. TALAŞLI İMALAT

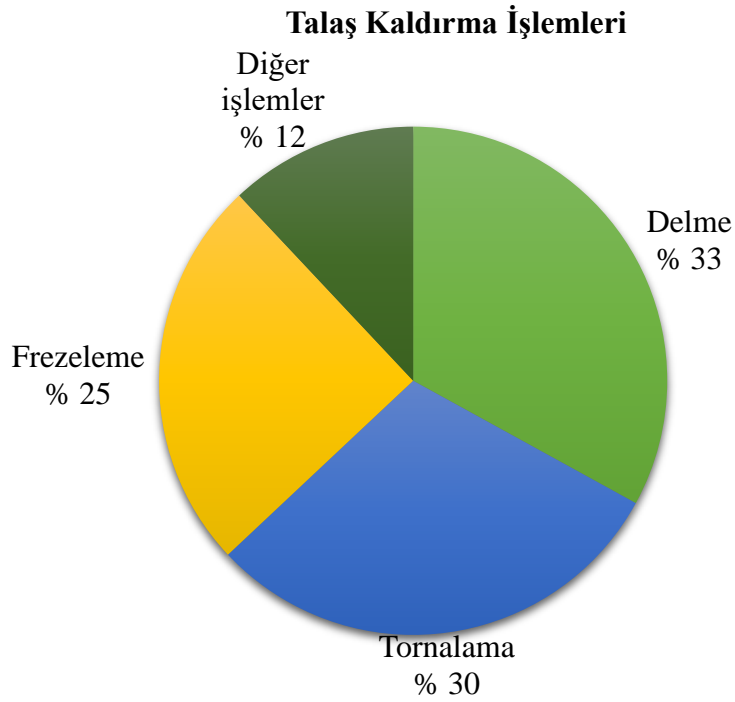
Tasarımı ve çizimleri yapılmış, teknik resimleri belirlenen bir malzemenin, iş parçası veya kesici takımın hareketi veya her ikisinin hareketi ile birlikte malzeme üzerinde talaş kaldırma işlemine talaşlı imalat denilmektedir. Talaşlı imalat endüstri ve sanayinin en önemli imalat yöntemlerindedir. İş parçasını teknik resmine uygun işleyebilmek için malzemedeki fazla talaşı, iş parçasına ve talaş kaldırma için seçilen işleme tezgâhı ve en uygun kesiciler yardımıyla fazla talaşı uzaklaştırmaktır. Sonucunda istenen resim ölçüleri ve istenen yüzey kalitesi meydana getirmektir. Talaş kaldırma işlemi, dizaynı yapılmış ve parça geometrisi belirlenmiş ürünü son haline getirecek imalatta izlenecek yolunun kullanıldığı ham malzemeye istenilen biçimde işleme olarak ifade edilebilir. Kesici takımın kesme hızı ve ilerleme parametreleri ile beraber iş parçasının talaş kaldırılacak yüzeyinden belirli oranlarla malzemeye girmesiyle talaş kaldırma işlemi meydana gelir. İşlem sonrası istenilen yeni yüzeylerin açığa çıkması sağlanır. Takım tezgâhına ve iş parçasına uygun bağlama aparatları ile tezgâha bağlanan iş parçası ve kesici takımın teknik resimlere uygun nihai parça elde etmek için iş parçası üzerinde teknik resme uygun olacak şekilde fazlalık olan talaş kaldırılması ile meydana gelmektedir. Talaşlı imalat işlemlerinde üretimi yapılacak ürünlerin ilgili teknik resme uygun imalat yapmak için dizayna uygun olarak farklı işleme operasyonları vardır. Bu işleme metotları tornalama, vargel, taşlama, frezeleme, tel erozyon, delme olarak imalat sanayinde yerini almaktadır [9].

##### 3.1.1. Frezeleme

Frezeleme operasyonu, kesicinin kendi ekseninde dönme hareketi yapması ve iş malzemesinin takım tezgâhına sabitlenerek tezgâh eksenlerinde doğrusal hareketleri sonucu meydana gelen bir talaş kaldırma işlemidir. İmalat sektöründe ilk zamanlarda üç eksen yardımıyla iş malzemesine yaklaşan kesici takım, teknolojinin ilerlemesi ile birlikte artık her açıdan işlem yapabilmektedir. Frezeleme operasyonunda kullanılan kesici takıma freze çakısı da denilmektedir. Freze çakısı birden fazla kesme kenarına sahiptir.

Freze kesici takımının her kesme kenarı her biri belli bir oranlarda işleme kapasitesine sahiptir. İş parçasının yüzey kalitesi çok iyi derecelere çıkması, ölçüsel doğruluk ve tasarlanan şeklin oluşturulması sırasındaki imalat esnekliği frezeleme operasyonunun en önemli avantajları arasında yerini almaktadır. Frezeleme operasyonu, genellikle yüzeyi düz olan parçalar, köşesi dik olan parçalar ve dizayna bağlı kanal açma işlemlerinde çoğunlukla kalıpcılık sektöründe kullanılan bir işleme yöntemidir [14].

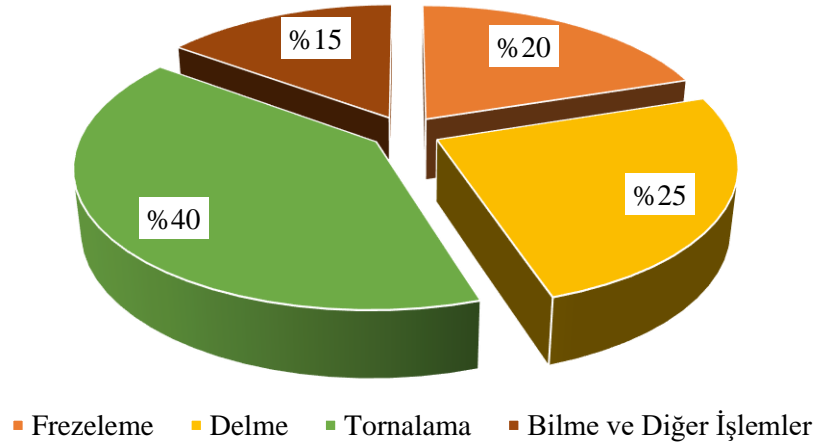
Frezeleme operasyonu diğer talaş kaldırma işlemleriyle kullanım sıklığı bakımından kıyaslandığında, frezeleme talaş kaldırma işlemlerinin %25 gibi yüksek uygulanan bir operasyon olduğu Şekil 3.1’de görülmektedir [74].



Şekil 3.1. Talaş kaldırma işlemlerinin kullanım sıklığı [74].

Talaş kaldırma operasyonlarında her bir operasyon için farklı süreler ihtiyacı duyulmaktadır. Şekil 3.2’de talaş kaldırma operasyonlarına ait süreler verilmiştir. Şekil 3.2 incelendiğinde frezeleme operasyonları talaş kaldırma sürelerinin %20’lik kısmını oluşturmaktadır.

### Talaş Kaldırma Süreleri



Şekil 3.2. Talaş kaldırma operasyon sürelerinin karşılaştırılması [74].

Frezeleme operasyonlarının avantajları sıralanacak olursa;

- İyi derecede işleme verimliliği,
- Yüksek ürün kalitesi,
- Yüzey kalitesindeki hassasiyet,
- İstenilen şeklin meydana getirmedeki esnekliktir.

Günümüzde sanayide üniversal freze tezgâhlarının dışında otomatik dediğimiz hassas işleme kapasitesine sahip CNC tezgâh kullanımı sayesinde frezeleme operasyonunun verim değeri artarak devam etmektedir. Frezeleme operasyonu; takım tezgâhları, sistem kontrol üniteleri ve kesici takımlardaki değişimler neticesinde bütün fabrika ve işletmelerde dünyanın her yerinde kabul gören bir talaşlı imalat yöntemidir. Günümüzde CNC işleme merkezleri (Yatay, dik işleme merkezi) frezeleme operasyonlarında en yaygın olarak kullanılan otomatik tezgâhlardır. CNC işleme merkezlerinde operasyon sıralamasına bağlı olarak birden çok takıma ihtiyaç vardır. Frezeleme operasyonu gerçekleştirilen işlem tipleri, tezgâh, kesici takım ve işlenen parça boyutları ve kaliteleri açısından da büyük farklılıklar oluşturmaktadır. Frezeleme türlerinden biri olan kaba frezeleme operasyonunda işletmelerde üniversal takım tezgâhlarından olan sütunlu ve konsollu freze tezgâhlarda kullanılsa da CNC tezgâhlarında işleme süreleri ve maliyetleri düşürmek adına CNC tezgâhlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. CNC veya üniversal tezgâhlar ve kullanılan iş parçasının kalite kriterleri işlem uygulanan frezeleme

operasyonunun önemli ölçüde etkileyen kriterlerdir. İşlem sırasında frezeleme operasyonu için birden fazla sınırlamaların dikkate alınması gerekir.

Herhangi bir iş parçasının frezelemesi için, işleme planı hazırlanırken atılması gereken adımlara en önemlisi iş parçasına uygun tezgâhın seçimi yapmaktır. Bu seçimi yaparken parça boyutu işleme hassasiyeti ve bağlama şekilleri dikkate alınarak yatay, dikey, universal, CNC işleme merkezlerinden biri seçilmelidir. İşlem için hangi tezgâhın işlenecek parçanın yapısına uygun, yüzey kalitesi ve ölçüsel hassasiyetlik göz önünde bulundurularak en iyi tespiti yapılır. İşlem parametrelerinin ve tezgâh kapasitesinin değerlendirilmesi aşamasında tezgâh ve iş parçasının rijitliği, hassasiyet ve işlem sonrası yüzey kalitesi gibi parametreler dikkate alınması gerekmektedir. Talaşlı imalatta işlem sonrası parçasının istenilen ölçülerde üretilmesi açısından en önemli ve düzgün ayarlanmaması halinde en büyük tehlike rijitlik eksikliğidir. Tezgâh, takım ve iş parçası rijitliği frezeleme operasyonun en önemli parametrelerdir ve eksikliği halinde istenilen sonuca almamız mümkün değildir [13].



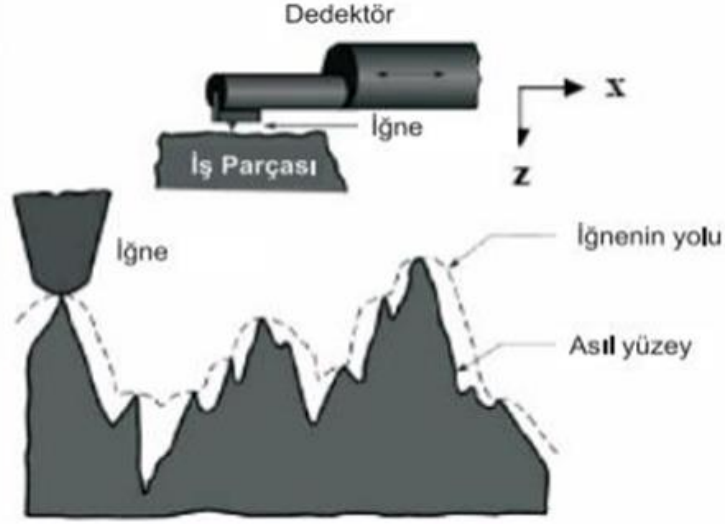
#### 4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

İşletmelerde işleme sonrası yüzeylerde birden çok nedenden ötürü yüzeylerde belirli veya belirsiz bazı istenilmeyen izler meydana gelmektedir. Talaş kaldırma ve soğutma yöntemi, istenilen şekle getirmek için kullanılan kesici takımların özelliği, iş parçasının kalite özellikleri, kesme hızı, ilerleme hızı ve iş parçası-takım arasında oluşan mekanik yer değişimlerine göre değişiklik arz eden işleme yüzeyindeki düzenli veya düzensiz istenmeyen sapmalara yüzey pürüzlülüğü denir [14]. İşlem gören malzemenin kullanılacağı yerde istenildiği gibi çalışması ve parçanın kullanım süresi, yüzey pürüzlülük değerinin belirli bir standartta olması gerekir. Talaşlı imalatı yapılan makine parçalarının yüzeylerinde işleme esnasında çeşitli nedenlerden dolayı düzensizlikler oluşmaktadır. Oluşan bu düzensizlikler diğer bir adı ile yüzey hassasiyetliği (pürüzlülüğü) talaşlı imalat operasyonlarında kullanılacağı mekanizmalara göre çok önemli diyebileceğimiz kalite kriteri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüzey pürüzlülük değerini en elverişli ve uygun noktalara çıkarmak üretici firmalar için en önemli bir hedeflerden biridir. İşlem görecekt parçanın istenilen değerlerde işlenmesi için en uygun kesme şartlarının analiz edilip veya araştırılıp belirlenmesi işleme planlamasında çok önem arz etmektedir [15].

Talaşlı imalat yöntemleriyle oluşan yüzeyler görsel muayenede pürüz olmadığı görülse de uygun şartlarda işlenmeyen parçaların yüzeyleri ölçüm cihazları sayesinde yüzey pürüzlülüğü daha net karşımıza çıkmaktadır. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün belli bir sınırı aştığı zaman (1,6  $\mu\text{m}$ ) yüzey pürüzlülüğü çıplak gözle görülebilir hale gelmektedir [14].

İmalat operasyon sonunda, yüzey pürüzlülük değerini belirlemekte kullanılan birçok ölçme yöntemi vardır. İmalatçılar tarafından en çok kullanılan ölçüm sistemi “Temas uçlu (iğneli) ölçme” yöntemidir. Bu cihazların çalışma mantığı olarak izleyici uçlu cihazlardır. Cihazın ölçme noktasında hassas izleyici ucun, ölçme işlemi uygulanan yüzey üzerinde, yüzeyde bulunan sapmaları çapraz yönde ve ölçüm yapılan malzeme yüzeyi kadar hareket etmesi, hareket yaptığı yüzey uzunluğunda sivri uçta oluşan titreşimlerin büyük bir şekilde ölçeklendirilerek, hareketli bir şerit düzlemine kayıt alınması veya dijital ekranda

aktarılması mantığı ile çalışmaktadır. İzleyici ucun ölçüm sisteminin doğru olması için uç geometrisi önemli bir parametredir. İzleyici uç geometrisinin zamanla aşınması sonucu, ucun yarıçapına bağlı olarak cihaz hassasiyetinde kayıplar oluşacaktır. Bu durumda belirli aralıklarla kullanım sıklığına göre kalibrasyon yapılmalıdır. Aynı şekilde kalibrasyon sıklığı takip edilmelidir [9].



Şekil 4.1. Temas uçlu iğneli sistemi.

#### 4.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİ EDEN PARAMETRELER

Talaş kaldırma esnasında çeşitli parametrelerden dolayı işlem yüzeyleri üzerinde düzensiz izler meydana gelir. Bir malzemeyi değişik işleme metotları ile aynı toleranslarda işleme yapmak mümkündür. Talaşlı imalat sonrası iş parçalarının sürtünmeye, korozyona, yorulmaya ve aşınmaya karşı yüzey pürüzlülük değerinin farklı olması halinde davranışlarının farklı olduğu bilinmektedir. Yüzeylerdeki pürüzlülük miktarı düzenli veya düzensiz izler kadar yüzey üzerindeki izlerin yönü de malzeme performansında için önemli bir etkidir. Talaş kaldırma operasyonunda, yüzey kalitesini etkileyen parametreler maddeler halinde aşağıdaki gibi özetlenebilir;

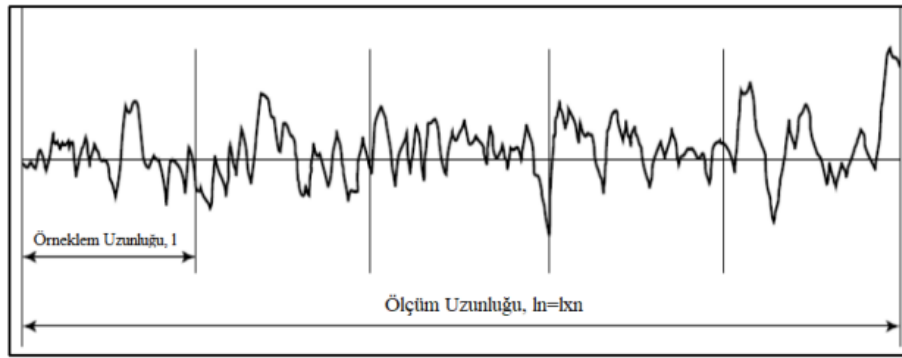
- Takım tezgâhlarının yataklama sistemlerinin doğru olmaması, tezgâh ana mili ile hareketli olan kızak yüzeylerinin paralel olmaması, tezgâh gövdesinin yeterince rijit olmaması ve çalışan parçalar arasındaki boşlukların etkisinden malzemeyi işlemek zorlaşır ve istenilen toleranslarda ürünler çıkmaz,
- Soğutma sıvısının işleme yüzeyine etkisi,

- Talaş akışının stabil olmaması, bağlı olarak oluşan talaşların takıma yapışmaması,
- İlerleme miktarı, ilerleme hızı,
- İşlenen malzemenin kimyasal analizlerinin uygun olmaması,
- İşlenen malzeme yüzeyindeki işleme esnasında oluşan yırtılmalar,
- İşlemede kullanılan takım tutucunun ve takım ucunun rijit olmaması,
- Kesici uçların işleme bölgesi uç geometrisinin doğru seçilmesi [15].

## 4.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN KULLANILAN PARAMETRELER

### 4.2.1. Örneklem Sayısı ve Uzunluğu

Ölçüm yapılacak olan yüzeyin örnek alınacak yerin uzunluğu Şekil 4.2’de verilmiştir. Burada, takımın hareket etmesi örneklem yapılan yerin yansıtabak boyutta olması gerekir. Ölçüm yapmak için seçilmiş mesafenin üzerinde değerlendirmesi yapılan bütün örneklem bütün olarak toplanmasıyla Şekil 4.2’de “ln” ile ifade edilen ölçüm uzunluğu meydana gelmektedir.  $n \geq 5$  olmak kaydıyla “ln” örneklem uzunluğu ve n’nin çarpımıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 4.2. Örneklem sayısı ve uzunluğu kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm uzunluğu [14].

### 4.2.2. Ortalama Çizgisi

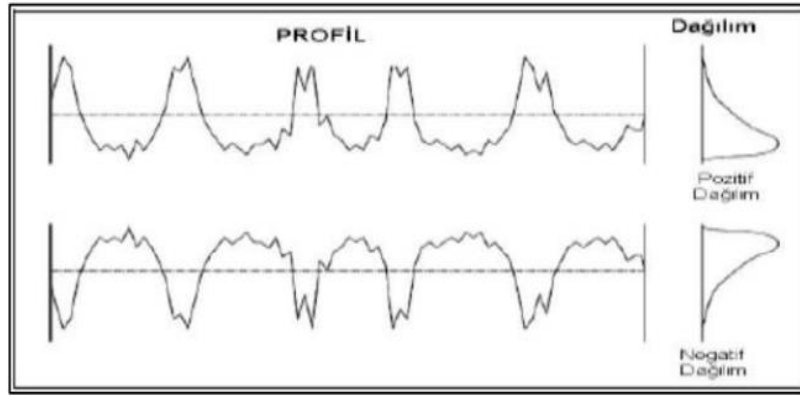
Malzemenin yüzey pürüzlülük ölçme işlemi yapılırken, yüzey pürüzlülükleri farklı yönlerde seyir etmektedir. Yüzey pürüzlülük değerinin alttaki ve üstteki oluşan alanlarının eşit olarak birbirinden ayrışmasını karşılayan doğru için tanımlamadır. Şekil 3.2’de ortalama çizgisinin örnek bir şematik görünüşü gösterilmiştir.

#### 4.2.3. Ortalama Aritmetik Yüzey Pürüzlülüğü ( $R_a$ )

Yüzey pürüzlülük ölçme işlemi, parça yüzeyinde oluşan çukurları, yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçme işlemi yapılır. Ortalama çizgisinin üstünde veya altında kalan çukurlukların aritmetik ortalama değerlerin gösteren bir analizdir. Yüzey pürüzlülük ölçümü dünyanın her yerinde bu şekilde hesaplanmaktadır ve aynı adlandırma yapılarak kullanılmaktadır, yani evrenseldir. Uygulanması ve tanımlanması kolay bir değerdir [14].

#### 4.2.4. Genlik Dağılım Eğrisi ( $R_{sk}$ )

Ölçüm noktalarının yoğunluğu ortalama çizgiye göre simetrisini belirleyen dağılım eğrisine genlik dağılım eğrisi. Aynı miktarda  $R_a$  ve  $f$  değerine sahip yüzey şekillerini birbirinden ayırmakta kullanılan bir dağılım eğrisidir.



Şekil 4.3. Profil ve genlik dağılım etkisi [14].

## 5. TAGUCHI METODU

Taguchi metodu, imalat sektöründe kaliteli ürün dizaynlarının meydana getirilmesi için oluşturulan bir analiz tekniğidir. Taguchi yöntemi ile beraber birden fazla üretim alanında, yüksek kaliteli üretim için harcanan tüm değerlerin optimize edilmiş ürünlerin üretiminde pozitif ve olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Taguchi yönteminde kullanılan parametrelerin birçoğu literatürde kabul edilmiş ve Ar-Ge çalışmalarında kullanılmaya devam etmektedir [16].

Dr. Genichi Taguchi'nin yapmış olduğu optimizasyon deney ve çalışmaları sonrası, yöntemin adı Taguchi olarak tanımlanmış ve bütün bilimsel çalışma ve araştırmalarda, literatürde de bu şekilde yerini almıştır. Taguchi yönteminin, kalite süreçlerinde kullanılarak bu süreçlerin gelişmesinde oldukça önemli katkılar sağladığı görülmüştür. Taguchi yönteminde deneysel çalışmalar ve deneyler sonrası çalışmalarda hedeflenen amaca ulaşmada, yüksek kalite ölçütlerine ulaştıran tüm dünyada kabul edilmiştir [17].

Dr. Taguchi, zamanına göre yeni bir teknoloji olarak ifade edilen telefon sistematiğinde yaklaşık 20 yıla yakın sürmesi beklenen çalışmayı, Taguchi yöntemini kullanarak 4 yıla yakın çok kısa sürede tamamlamıştır. Böylece Taguchi yönteminin adını tüm dünyaya yaymayı başarmıştır. Çalışmalar sonrasında pozitif neticeler alınması ile beraber geleneksel yöntemlere alternatif olarak Taguchi yönteminin temelleri atılmış oldu [18].

Taguchi metodu kalite mühendisliği kavramıyla birlikte çokça ilişkilendirilmektedir. Taguchi metodu ayrıca tasarlanan ve üretimi hedeflenen ürünlerin maliyet analizinde ve kalitesini kontrol etmede tüm aşamalarında kullanılmaktadır. Taguchi yöntemleri prototip dizaynın, doğru verileri toplayarak toplanan verileri bilgilere dönüştürme uygulaması olmayıp bunun yanında istatistiksel deney tasarımı ciddi bir mühendislik aracı olarak ta kullanılmaktadır [17].

Taguchi, kalite sistematiğini aşağıdaki gibi iki bölüme ayırmıştır;

1. Üretim esnası ve sonrasındaki süreç (On-line kalite kontrol),
2. Üretim öncesindeki süreç (Off-line kalite kontrol).

## 5.1. ÜRETİM ESNASI VE SONRASINDAKİ SÜREÇ

Tasarımı yapılmış bir ürünün, imalat süreçlerinde ve sonrasında belirlenen kriterlere göre imalatının yapılabilirliğidir. Son tüketiciden kullanımı esnasında gelecek olan her türlü geri bildirimlere karşı ürünün performansının iyi seviyelere çıkarmak, istatistiksel analizler yaparak, analiz sonucunda ürün özelinde geliştirmeler yapmak ve kullanılabilirlik oranını artırılması sağlamaktır.

## 5.2. ÜRETİM ÖNCESİNDEKİ SÜREÇ

Projesi yapılıp tasarlanan ürünün üretim aşamasına geçilmeden, hedef kitleye göre pazar araştırılması yapılarak tüketici ürün hakkındaki geri bildirimleri alarak, tüketiciden gelen taleplerini karşılayacak ürünün minimum maliyetlerde ve ekonomik bir şekilde üretilme aşamalarıdır. Tüketiciden gelen bildirimler dikkate alınarak ürün dizaynı ve üretim sırasında istenilen kriterlere uygun ve en iyi kalitede ürün meydana gelmesi sağlayabilir. Dr. Taguchi yüksek kalitede ürün elde edebilmek için, “Off-line” kontrolün dizayn ve üretim aşamasını;

- Sistem tasarımı (Kavram oluşturma)
- Tolerans tasarımı (Elde edilen ürünün yeninden muayene edilmesi)
- Parametre Tasarımı (Ürün süreç için hedef oluşturma)

Olmak üzere üç grupta değerlendirmiştir [19].

### 5.2.1. Sistem Tasarımı

Ürünün üretim prosesine geçilmeden önce, tasarım aşamasında ürünün minimum maliyetle maksimum kalitede ürün üretimi için gerekli tüm süreçlerin tanımlanıp tasarlandığı kısımdır.

### 5.2.2. Tolerans Tasarımı

Üretim aşamasında meydana gelen ürünün son tüketicinin istediği ve ihtiyaçlarını karşıladığı veya karşılamaması olarak analizleri yapılmaktadır.

### 5.2.3. Parametrik Tasarım Süreci

Taguchi yöntemi ürün kalitesine doğrudan etki eden faktörlerin oluşturulduğu en kritik önemli basamaktır. Bu seviyede deneysel tasarım faktörlerin optimizasyonu yapılarak maliyetleri düşürülen istenilen ürünlerin elde edilmesi için ürünün tipik özelliklerini istenilen düzeyde kalmasını sağlamaktır [20].

Taguchi dikey dizinleri ve dizinlere ait faktörler, Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Taguchi dikey dizinleri ve faktörler.

Seviyeler				
Seviye 2		Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
P=2, S=2		P=2, S=3	P=2, S=4	P=2, S=5
P=3, S=2	L <sub>4</sub>	P=3, S=3	P=3, S=4	P=3, S=5
P=4, S=2		P=4, S=3	P=4, S=4	P=4, S=5
P=5, S=2		P=5, S=3	P=5, S=4	P=5, S=5
P=6, S=2	L <sub>8</sub>	P=6, S=3	P=6, S=4	P=6, S=4
P=7, S=2		P=7, S=3	P=7, S=4	P=7, S=4
P=8, S=2		P=8, S=3	P=8, S=4	P=8, S=4
P=9, S=2		P=9, S=2	P=9, S=4	P=9, S=4
P=10, S=2	L <sub>11</sub>	P=10, S=2	P=10, S=4	P=10, S=4
P=11, S=2		P=11, S=2		P=11, S=4
P=12, S=2		P=12, S=2		P=12, S=4
P=13, S=2		P=13, S=2		
P=14, S=2	L <sub>16</sub>	P=14, S=3		
P=15, S=2		P=15, S=3		
P=16, S=2		P=16, S=3		
P=17, S=2		P=17, S=3		
P=18, S=2		P=18, S=3		
P=19, S=2		P=19, S=3	L <sub>36</sub>	
P=20, S=2		P=20, S=3		
P=21, S=2		P=21, S=3		
P=22, S=2		P=22, S=3		
P=23, S=2		P=23, S=3		
P=24, S=2	L <sub>32</sub>			
P=25, S=2				
P=26, S=2				
P=27, S=2				
P=28, S=2				
P=29, S=2				
P=30, S=2				
P=31, S=2				

Parametre tasarımını aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür;

- Kalite özelliklerin tespiti ve parametrelerin belirlenmesi,
- Seviye sayılarının ve tasarımsal parametreler arasındaki ilişkilerin tespit edilmesi,
- Deneysel tasarımda dikey dizinlerin belirlenmesi ve tasarım parametrelerinin tayini,
- Deneysel tasarımın gerçekleştirilmesi,
- Deney sonuçlarının S/N oranları ve ANOVA yardımıyla analiz edilmesi,
- Son aşamada doğrulama deneylerinin yaparak ve elde edilen sonuçlarla tasarım parametrelerinin değerlendirilmesini yapmak.

Taguchi yönteminin parametre tasarımı ile;

- Üretimi yapılacak ürünün ve işlem basamakları için en optimum dizayn parametresinin belirlenmesi,
- Tasarım parametrelerinin ürün kalitesine katma değer özelliklerinin tahmini,
- En uygun tasarım değerlerine göre kriterlerin tahmini [21].

#### **5.2.4. Sinyal-Gürültü (S/N) Oranı**

Taguchi yöntemi, üründe gürültüye bağlı oluşan değişiklikler en az seviyeye indirgenirken, sinyale bağlı değişiklikler en üst seviyeye çıkarılır. İzlenen bu yol ile hedeflenen çıktı değerlerinin logaritmik fonksiyon değerlerini, sinyal/gürültü (S/N) oran değerleri olarak tanımlanan  $\eta$  istatistiksel katsayı olarak sağlar. Analizi nihai ürün özelliklerin üzerindeki etkisine S/N oranları ile izin verir. Taguchi yöntemi, istatistiksel olarak önemli noktaları içeren bilgileri sağlamaktadır. Sinyal ve gürültü (S/N) oranı analizi parametrelerin en yüksek düzeyde yakalamış olur. Taguchi yönteminde 3 farklı optimizasyon yaklaşımı vardır. Bunlar;

- En küçük en iyidir,
- En büyük en iyidir,
- Nominal en iyidir yaklaşımlarıdır.

Aşağıda hedeflenen optimizasyon yaklaşımlara ait sinyal-gürültü oranları bulunmaktadır.

En küçük en iyidir;

$$n = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.1)$$

En büyük en iyidir;

$$n = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.2)$$

Nominal en iyidir;

$$n = \log_{10} \left( \frac{\bar{y}_i^2}{\sigma^2} \right) \quad (5.3)$$

Yukarıda denklemlerde bulunan; “yi” sinyallere karşı oluşan ilk tepkidir, η her bir deneye ait tekrar sayısıdır ve σ2 standart sapmayı ifade etmektedir [22].

### 5.2.5. Robust Tasarımı

Taguchi'nin Robust tasarımına bakışı, malzeme karakteristik özelliğinin değişkenliğe neden olarak minimum maliyetli ürün girdisinin meydana gelmesidir. Üretilecek olan ürünün tüketici görüşlerini arka plana atmadan, maliyetlerin en düşük seviyede kalmasını sağlamaktır. Bütün ürünlerin istenilen daha önce belirlenmiş maliyetlerde üretilmesi gerekliliğine göstermekte, istenilen değerlerdeki sapmalarla beraber kayıplarının da başladığını ve tüm olumsuzlukları sadece uygun bir dizayn ile yok edileceği ifade edilmiştir [23].

### 5.2.6. Varyasyon Ölçümü

Örnek bir L değerinde aşağıdaki denklemsel ifadeler kullanılabilir;

L = Gözlemlenen en büyük değer – gözlemlenen en küçük değer

L, en büyük ve en küçük değerlerden etkilendiğinden, varyasyon ölçütü için L değeri yerine S standart sapma değeri tercih edilebilir [24].

S Standart sapma, örneklem varyansı S<sup>2</sup>'nin pozitif karekökü olmakla birlikte, formülü Denklem 5.4'de verilmiştir,

$$S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum (Y - \bar{Y})^2 \quad (5.4)$$

$\bar{Y}$  = Gözlemlenen değer

$Y =$  Gözlemlenen değerin aritmetik ortalaması

$n =$  Gözlemeleme sayısı

### **5.2.7. Regresyon Analizi**

Regresyon analizi, neden-sonuç bağlantısı olan iki veya daha fazla değer arasındaki bağlantıyı, tahminler yapabilmek amacıyla matematiksel formüllerle modellemeye yapan veri analizi ve tablolar oluşturan bir sistemidir. Alınan noktalardan oluşabilecek en iyi eğriyi bulma işleminde genel olarak en küçük kareleri yöntemi tercih edilmektedir. Hataların toplamında en düşük seviye olacak şekilde bir denklem eğrisi bulma esasına dayanmakta olan bir yaklaşım verilmiştir [25].



## 6. SOĞUTMA TEKNİĞİ VE MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA SİSTEMİ

### 6.1. KESME SIVISI

Talaşlı imalat operasyonlarında, iş parçasının talaş kaldırma esnasında, kesici takım-ışlem gören malzeme arasındaki oluşan sürtünme nedeniyle yüksek derecelerde sıcaklık oluşmaktadır. Malzemedeki talaş kaldırma anında meydana gelen ısı işlem sonrası üretilen malzemenin kalitesini (yüzey pürüzlülük, mikro yapı özelliklerini) olumsuz yönde etkilediği gibi, kesici takım ömrünü de kısaltmaktadır. Operasyon esnasında plastik deformasyonun etkisi ile oluşan ısının, iş parçasının kalitesi arttırmak ve kesici takım maliyetlerinin azaltmak için kritik öneme sahiptir. Bu bilgiler doğrultusunda, operasyon sırasında meydana gelen ısının etkin bir şekilde kontrol altında tutulması gerekmektedir [4].

Soğutma sıvılarının kullanım amacı, talaşlı imalatı yapılan metallerin takım ile iş malzemesi arasındaki sürtünme sonucunda oluşan ısıyı minimum seviyelere çekip şartları sabit tutmaya çalışmaktır. Soğutma sıvısının birçok avantajının yanında kısmen dezavantajı da bulunmaktadır. Talaşlı imalat operasyonlarının kesme sıvıları önemli diyebileceğimiz bir kısmın oluşturmaktadır. Bu çerçevede kesme sıvılarının kullanımının minimum seviyelere indirilmesi maliyetler açısından önemli avantaj sağlayacaktır. Çevre ve insan sağlığı düşünüldüğünde soğutma sıvısının kullanım miktarlarının düşürülmesi için yeni teknolojik ürün arayışları doğurmuştur. Bu anlamda birçok çalışmalar ve geliştirmeler yapılmaktadır. Kuru kesme çevre dostu bir işleme yöntemidir. Fakat operasyonlar sonrası malzemenin yüzey kalitesinin daha yüksek olma beklentisi kuru kesmenin verimli olmadığı sonucunu doğurmuştur. Diğer bir konu ise kesme koşullarının ağır olduğu işlemlerde verimli olamadıkları tespit edilmiştir [20].

Üretim teknolojilerinin son zamanlarda zamanının büyük bir yoğunluğunu kaliteyi arttırmak için harcamakta ve bu amaca yönelik birçok çalışmalar yapılarak farklı yöntemler geliştirmişlerdir. Ürünlerdeki istenilen yüzey kalitesi ürün maliyeti arttıran önemli kalemlerden biridir. İşlem gören malzemenin yüzey kalitesi ürünün birçok özelliğine

etkisi vardır. Maliyeti düşük optimum seviyede yüzey kalitesi hedefleyen firmalar, üretim proseslerinde soğutucu sıvının kullanımının iş parçası işlem gören yüzey kalitesi ve kesici takımların ömründe pozitif yönde değer kattığını görülmüştür. Kesme operasyonu esnasında kesme bölgesinde oluşan yüksek ısıyı malzemeden çıkan talaş ile birlikte uzaklaştırması ile beraber ısının kontrol altına alınmasına yardımcı olmaktadır. Kesme sıvıları performans ve üretim maliyetini düşürmek için önemli parametrelerdendir.

Sanayide kullanılan kesme sıvılarının kullanımında son yıllarda büyük artışlar görülmektedir. Oluşan çevresel atıkların bertarafı için ve çevre kirliliğinin azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Kesme sıvılarının içeriğindeki kimyasal maddeler iş parçasının işlenmesi sırasında insan tenine teması sonucunda sağlığı riske atacak etkileri olmaktadır. İnsan sağlığına etkilerinin getirdiği olumsuzluk yanında, kimyasal malzeme olması sebebiyle oluşan atıkları imha etme veya geri dönüşüm maliyetleri de eklenmesi ile farklı arayışlara yönelmektedir [9].

19. yüzyılın sonlarında F.W. Taylor takım çelikleriyle yaptığı deneylerde, düşük oranlarda su kullanmanın, takım ömründe pozitif etkisi olduğunu gözlemlemiştir. Kesme sıvılarının kullanımı tüm işletmelerde çok yararlı sonuçlar alınmıştır. Ürün maliyetine etkisi başta olmak üzere kesme takımlarının ömrünü artırmak, yüzey kalitesini arttırmak, verimliliği optimum seviyeye getirmek için kesme sıvıları kullanılmaktadır [19].

Kesme sıvılarının belirli bir süre ömrü vardır. Yani kullanım yoğunluğu bağlı olarak ömrünü tamamlayan ürünlerde üretim kalitesinin düşmesine sebebiyet vermektedir. Kesme sıvıları zaman içinde yabancı maddelerle de kullanılamaz hale gelebilir. Bu maddeler yabancı yağlar (makine yağı, hidrolik sıvısı, vs.), çöp (sigara izmariti, yiyecek, vs.), küçük talaşlar, mantarlar ve bakteriler olabilmektedir. Kullanım alanında oluşan bu kirlilik, koku oluşumuna ve insan sağlığı tehdit eden durumlara neden olabilir. Tüm bu olumsuz koşulların yanında kesme sıvısının yağlayıcılık özelliğini kaybetmesine de yol açar. Kesme sıvısı işlevini kaybettiği zaman atık haline gelir ve bertaraf edilmesi gerekir. Kesme sıvılarında yaşanan bu olumsuz durumları kontrol altına almanın yolları aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür;

- Kesme sıvısının kalite ölçümlerini yaparak, düzenli aralıklarla yenilenmesi
- Sürekli ve periyodik olarak sıvının temizlenmesi için bir filtreleme sisteminin kullanımı,

- Kesme sıvısı kullanmadan parça işleme (kuru kesme) [19].

### 6.1.1. Kesme İşlemlerinde Kullanılan Sıvıların İnsan Sağlığına Olumsuz Etkileri

Kesme işlemlerinde kullanılan sıvılar, talaş kaldırma operasyonlarını kolaylaştırmak için kullanılan sıvılardır. Önemli olacak seviyelerde de bunu başarmaktadır. Ancak kesme sıvılarının olumlu yönlerinin yanında olumsuz da birçok yönleri bulunmaktadır. Bu kesme sıvıları kimyasal içerikli olduğu için insan sağlığına ve çevreye zarar verebilmektedir. Temas sonrası insanda oluşan sağlık sorunlarının şiddeti; maruz kalma süresi ve seviyesi insan sağlığı açısından iyi değerlendirilmektedir. İnsan sağlığına zararın minimum seviyelere almak için gerekli tedbirlerin alınması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Çevre kirliliğinin çeşidi, derecesi ve kesme sıvısının özelliği gibi çeşitli değişkenlere bağlı olup atıkların belirli alanlarda toplanması ve yetkili kurumlarca bertarafı kanunlar ile koruma altına alınmıştır. Kesme sıvılarının fazla kullanımı nedeniyle meydana gelen başlıca sağlık sorunları aşağıda verilmiştir.

- **Dermatit hastalığı;** Metal işlemede kullanılan, sıvıların içerdiği kimyasal maddeler derinin dış katmanındaki proteinlere zarar vermektedir. İnsan cildinde bulunan koruyucu yağ katmanını kaldırır. Temas esnasında kesme sıvısının yoğunluğu yüksek olması ve cildin maruz kaldığı sürenin cildi tahriş edecek kadar uzun olması halinde görülmektedir. Dermatitis hastalığı özellikle avuç içlerinde kuru ve pul döküntülü bir cilde sebebiyet vermektedir. Bu hastalık kesme sıvısının kullanıldığı işletmelerde maalesef en yaygın cilt hastalıklarındandır [23].



Şekil 6.1. Tahriş edici dermatit [23].

- **Folliculitis (Kıl köklerinin iltihaplanması);** Saf işleme sıvılarının meydana getirdiği bir cilt tahrişidir. Operasyon esnasında kesme sıvıları kıyafet üzerine gelmemesi

kaçınılmazdır. Yoğunlukla yağlı elbiselerin cilt ile temas ettiği noktalarda bu hastalık belirtileri gözlemlenir. Kesme sıvısı ve içine karışan zararlı maddeler, deri gözeneklerin tıkanması ile bu hastalık oluşmaktadır.



Şekil 6.2. Folliculitis cilt hastalığı [23].

- **Cilt kanseri;** Metal işleme ve kesme konsantrasyonları ile oluşan cilt hastalıklarının çok ilerlemiş seviyesi cilt kanseridir. Proses esnasında kesme yağları giysilerin üzerine gelmektedir, ayrıca kesme yağı ile ıslanmış bez ve üstüğü parçaları ile uzun süre teması ileri seviyelerde cilt kanseri olma riskini arttırmaktadır.



Şekil 6.3. Cilt kanseri [23].

- **Solunum rahatsızlığı;** Talaşlı imalat esnasında kesici takım ve parça yüzeyinde oluşan ısının etkisi ile kesme sıvıları buharlaşmaktadır. Ortaya çıkan buharlar ortamda bulunan insanlar tarafından, solunum yoluyla vücuda alınarak birbirinde farklı solunum problemleri meydana gelmektedir. Solunum probleminin yanında birçok sağlık problemleri yaşamaktadır. Bu rahatsızlıklardan bazılarında, boğaz bölgesinde ağrı, öksürük, burun boşluğunun dolması ve kanama, balgam üretiminde aşırı artış gibi sıralanabilir. Bu semptomlar ileriki safhalarında ciddi solunum rahatsızlıklarına neden olabilmektedir [24].

### 6.1.2. Kesme Sıvılarının Sınıflandırılması

Talaşlı imalatta kesici takım ile iş parçası arasındaki ısının giderilmesi için kullanılan soğutucuları ilk kez Taylor 1907 yılındaki çalışmalarda, soğutma sıvılarının kullanılmasının işleme operasyonlarında kuru işlemeye göre kesme hızına %40 oranındaki artış gösterdiğini ifade etmiştir. Su, çok iyi bir soğutma özelliği olmasına rağmen yağlama özelliği olmadığı için kullanıldığı alandaki makine parçası ve bileşenlerinde korozyona uğramasına ve sonrasında kullanım ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Soğutma ve aynı zamanda yağlayıcı özelliği olan soğutma özelliği olan karışımların oluşumu ve takım ömrünü uzatmak ve maliyetleri düşürmek için özel karışımlar geliştirilmeye başlanmıştır [4], [9].

Kesme sıvılarının kullanım alanlarına göre birçok çeşidi vardır. Farklı tipte kullanılan kesme sıvılarının kullanılmasının avantaj ve dezavantajlarını Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kesme sıvısı türlerinin avantaj ve dezavantajları [25].

Kesme Sıvısı Tipi	Avantajları	Dezavantajları
Düz yağlar	Mükemmel kayganlık Pas Kontrolü	Düşük soğutma, yangın tehlikesi Sis veya duman oluşumu, Düşük hız sınırlayıcı ve ağır kesme işlemleri, Pas kontrol problemleri,
Çözünebilen yağlar	İyi derecede soğutma ve yağlama	Kullanımı esnasında bakteri üremesi, Buharlaşma kayıpları
Yarı sentetik yağlar	Mikrobiyal kontrol Pas kontrolü İyi soğutma, Çok iyi derecede soğutma, Mikrobiyal kontrol, Yanıcılık özelliğinin olmaması	Kolay köpük oluşumu, Su sertliğine etki eder Kolayca diğer makine akışkanları tarafından kirlenme,
Sentetik yağlar	İndirgenmiş buğulanma, Köpük sorunlarının oluşmaması	Kötü kayganlık Kolayca makine yağ veya sıvılarına tarafından kirlenme,

Kesme sıvılarının içerikleri ve özelliklerine göre Çizelge 6.2. sınıflandırılmıştır.

Çizelge 6.2. Kesme sıvılarının sınıflandırılması [26].

Yağ Bazlı		Su Bazlı	
Su ile Karışmayan		Su ile Karışabilen	
Saf Yağlar (%100 Yağ)	Çözünebilen Yağlar (%60-90 Yağ)	Yarı Sentetik Sıvılar (%2-30 yağ)	Sentetik Yağlar (%0 Yağ)
Mineral Yağlar Hayvansal yağlar Bitkisel Yağlar	Mineral Yağ+Emülsiyonlar	Çözülebilir Yağlar +Sentetik Yağlar	Su+Organik Kimyasallar

#### 6.1.2.1. Yağ Bazlı Kesme Yağları

Yağ esaslı kesme yağı su esaslı yağlara nazaran çok iyi bir yağlama özelliğine sahiptir. Yağlama özelliğinden dolayı malzeme ve kullanım alanındaki kullanılan metal ekipmanların korozyonuna karşı çok iyi bir koruma sağlar. Bunun yanında yağ bazı kesme sıvıları su bazlı kesme sıvılar kadar iyi soğutma sağlayamazlar.

Mineral esaslı yağlayıcılar, operasyon esnasında çıkan talaş ile kesici takım ara yüzeyini yağlamak için kullanılır. Bu kesme sıvısı yağlama özelliğinden dolayı kesme bölgesinde oluşan sürtünme kaynaklı ortaya çıkan ısının azaltılmasını sağlamaktadır. Kesme bölgesindeki sürtünmeden kaynaklanan ısıyı minimuma indirmek için kullanılırlar. Operasyon esnasında etkili bir yağlama sistemi kullanılırsa iş parçası ve kesici takım arasındaki sürtünmede azalma, daha az kesme kuvvetleri ile devam etme ve takım aşınmasını azaltmada takım ömrünü artırmada çok önemli rol oynayarak operasyon maliyetleri ciddi miktarlarda azaltmaktadır [4], [9].

Organik yağlar ise, bitkisel ve hayvansal yağlardır. Organik yağların içeriğindeki yağ oranı diğer yağlara göre daha fazladır. Yağ miktarının fazlalığı kesme işlemlerinde yağlama fonksiyonunu artırır. Organik tip yağlar çevre ve atık konularında ciddi anlamda katkı sağlar ve sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturduğu için sanayilerde tercih edilmektedir. Bitkisel yağlardan üretilen kesme yağları, konvansiyonel kesme yağlarına nispeten daha yüksek viskozite değerine sahiptir [4].

#### 6.1.2.2. Gaz Bazlı Kesme Sıvıları

Gaz bazlı kesme sıvıları normal koşullarda oda sıcaklığında gaz halinde bulunmaktadır. Atık oranlarının çok az olması sebebiyle çevre dostu kesme yağları olarak kabul görmektedir. Hava, N, Ar, He veya CO<sub>2</sub> gaz bazlı soğutucu yağlayıcılara örnek olarak

verilebilir. Operasyon bölgesine basınçlı bir şekilde uygulama yapılarak soğutma işlemi yapmaktadır [4].

### 6.1.2.3. Su Bazlı Kesme Sıvıları

Su bazlı kesme sıvıları konsantre halde bulunurlar. Belirli bir standartta su ile konsantre edilerek bu emülsiyon hazırlanır. Hazırlanan su bazlı yağın korozyon önleyici ve yağlama özelliğiyle, içinde bulunan suyun iyi bir soğutma özelliğine sahip kesme yağları oluşmaktadır. Su bazlı yağlar içeriğinde soğutma sıvısının özellikleri iyileştiren katkı maddelerini içermektedir. Kesme sıvısının uygun olması ve soğutma işlemini istenilen düzeyde yapabilmesi için hazırlanan yağ emülsiyonu doğru değerlerde yapılması çok önem arz etmektedir [4].

Bu yağların en büyük dezavantajları aşağıda maddeler halinde yazılmıştır;

- Kullanım esnasında oluşan basınç kontrol altına almakta zorlanma,
- Su bazlı kesme yağlarında durgun olmasından kaynaklı bakteri oluşumu ile makine yağlarından gelen döküntü yağlarda oluşan karışımdan dolayı bir süre sonra özelliğini kaybetme,
- Operasyonda ortaya çıkan ısının etkisi ile buharlaşmakta ve kayıplar oluşmaktadır.

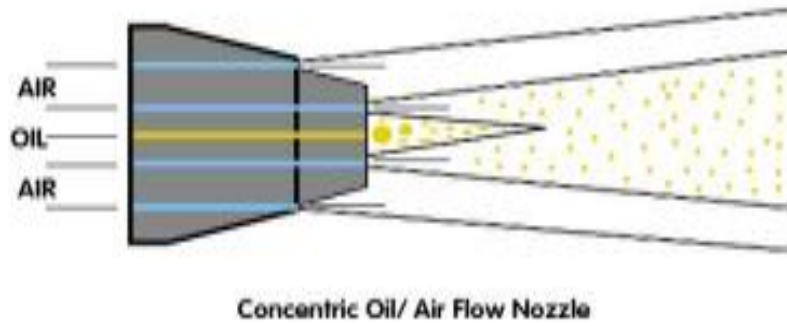
## 6.2. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MMY) SİSTEMİ

Minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi diğer soğutma sistemlerinin aksine tüketimi en az miktarda yaparak az miktarda yağ damlacıklarını bu iş için özel tasarlanmış yağlama sistemi üzerinde dışarıdan tatbik edilen hava ile karışmasıyla birlikte, sıcaklığın en fazla olduğu kesici takım ve iş parçası arasında basınçlı bir şekilde püskürtülerek işlemini tamamlamaktadır. Basınçlı bir şekilde püskürtülen kısımda çok küçük bir yağ kalınlığı oluşturarak sürtünmeyi ve ısınmayı seviyede tutmaktadır. Bu şekilde kesici takımın ömrün arttırmış ve maliyetleri en aza indirmiş oluruz. Teknolojik bir yağlama sistemi olan MMY ile işlenmiş parça sayılarını arttırmış oluruz. Aynı oranda maliyetleri de azalmış olur. Teknik olarak yüksek ısınmaya ne kadar az maruz kalınırsa takım ömrü o kadar artmaktadır. Operasyon sırasında kullanım alanına bağlı olarak en az miktarda yağ kullanıldığından çok fazla bir yağ atığı oluşturmaz. Diğer soğutma türlerine göre atık

bertaraf bedellerinde tasarruf edilir ve bu durumda maliyetlere direk etkisi olmaktadır [20].

Çevre ve kimyasal atıklar konusunda sürekli artan pozitif toplumsal ilgi, endüstrilerin kuruluşlarının çevreye duyarlı üretim süreçlerinin arttırılması, kesme sıvılarının minimum miktarda kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Geleneksel kullanılan soğutma sistemlerine alternatif olarak kullanılmaya başlanan minimum miktarda yağlama (Minimum Quantity Lubrication) sistemi çevreci ve minimum atık oluşturan çok az olduğu bir sistemdir. Yenilikçi bir sistem olan MMY sistemi ile operasyon esnasında kesme yağının, kesici takım ile iş parçası arasında oluşan ısı ile buharlaşmaktadır. Bu yenilikçi sistem ile birlikte geri dönüşüm ve bertaraf etme maliyetlerini de minimuma indirmektedir. MMY sistemi ve kesici takım ile iş parçası arasında oluşan ısının azaltmada çok iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Aynı zamanda kesme işlemi sonrası meydana gelen yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım ömrü açısından da iyileştirmeler ve geliştirmeler görülmekte ve alınan sonuçlara göre yeni araştırmalar yapılmaktadır [9].

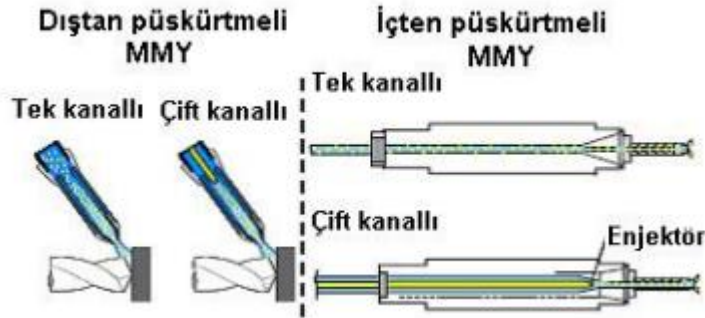
MMY ve sistematik gösterimi Şekil 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.4. MMY sistematığı [9].

Bitkisel yağ kullanıldığı yonteme minimum miktarda yağlama denilmektedir. MMY sistemi sabit nozulla basınçlı hava ile püskürtme veya kesici takım içine açılmış kanal vasıtasıyla püskürtülerek soğutma işlemi yapılabilir. Takım içine açılan bu kanallar tek kanal veya çift kanal şeklinde de olabilir. Tek kanallı takımlarda, dışarıdan ayrı bir üniteye yağ ve hava karışımı hazırlanarak basınçlı hava ile gönderilir. Çift kanala sahip takımlarda ise yağ ile hava ayrı nozul içine ve nozul ucunda orada karıştırılarak uygulama yapılır. Kesici takım dışında dıştan ayrı bir sistem ile püskürtme tercih edilen işlemlerde

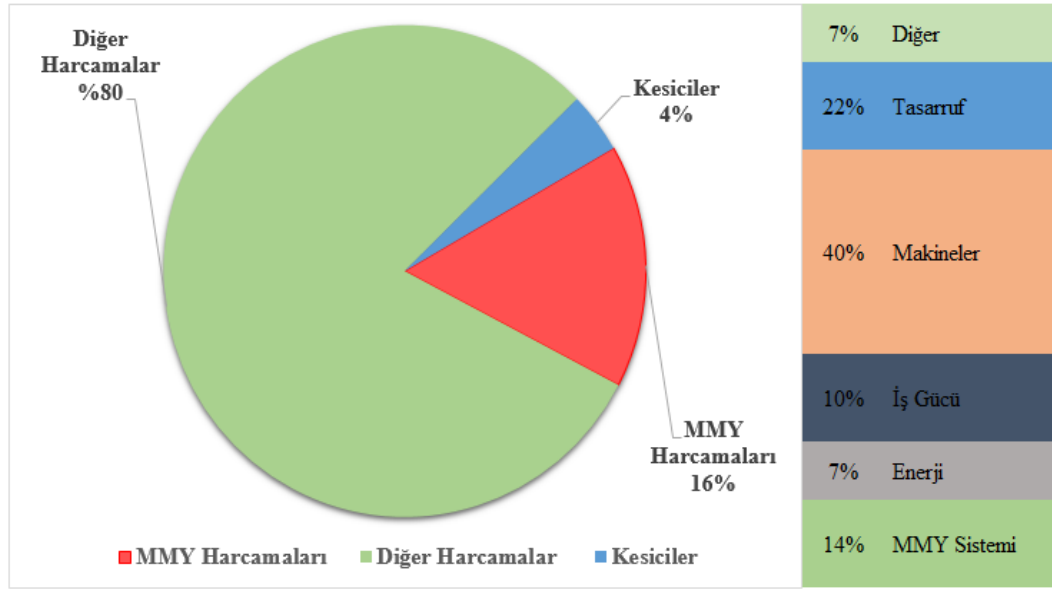
aerosol kesici uca dışarıdan nozulla getirilir. Dışarıdan püskürtme yönteminde kullanılan nozul sayısı, yönü ve yerleşimi belirlemek önemlidir. Seçilen yöntemler kesme işlemlerinde, frezeleme ve tornalama operasyonlarında kullanılmaktadır [19].



Şekil 6.5. MMY Sisteminde dıştan ve içten püskürtme [9].

MMY sisteminden birden fazla operasyonlarda kullanılabilir. Bu operasyonları kendi içinde sıralama yapacak olursak en iyi sonucu kesme işlemlerinde, tornalama, frezeleme ve delik delme işlemleri olarak sıralayabiliriz. Lepleme, taşlama ve honlama işlemlerinde ortaya çıkan talaşlar çok küçük ve ince tanecikli olduğu için yıkanması gereklidir. Bu nedenden dolayı MMY bu operasyonlar etkili bir yöntem değildir. Geleneksel soğutma yağları kullanımı daha etkilidir [4].

MMY sisteminin uygulanmasıyla yağlama oranı ve performansında ciddi avantajları olduğu görülmüştür. MMY operasyonunda basınçlı havanın görevi burada damlalar halinde bulunan yağı sadece püskürtmek değildir. Operasyon esnasında, kesici takım ile iş parçası arasında kalan talaşı da uzaklaştırmakta, talaşın uzaklaşması ile parça yüzeyinde daha temiz bir yüzey elde edilmesini sağlamaktadır.



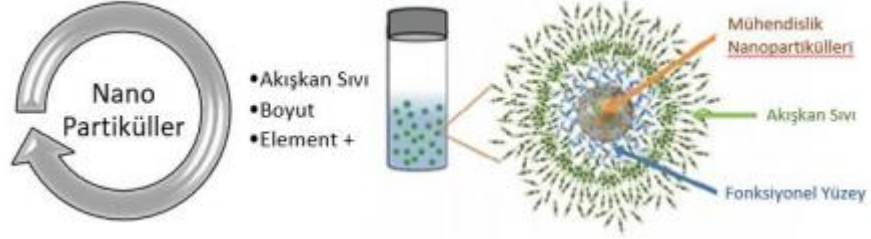
Şekil 6.6. Talaş kaldırma sistemlerinde maliyet şeması [21].

### 6.2.1. Nanoakışkan Karışımlar ve Özellikleri

Nanoakışkanlar, 100 nm'ye kadar boyutu olan parçacıkların karışım yapılan yağ içerisinde çözünmeden oluşturdukları heterojen karışımlardır. Nanoakışkanlar içerisinde çok sayıda nano boyutlu parçacıklar bulunmaktadır. (29) Nano teknolojisi günümüzde iyileştirme yöntemi olarak çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Nano teknolojisindeki gelişmeler sayesinde araştırmacılar imalat sektöründe bu teknolojiyi kullanmak için araştırmalar artmakta ve başarılı sonuçlar alınmaya başlanmıştır. Yapılan deneylerde ve bütün araştırmaların merkezinde kesme sıvısının içerisine eklenecek nanoparçacıklar ve kullanılacak miktarları ile oluşan nanopartikül vardır. Oluşan sıvının karışımındaki amaç üretim esnasında soğutma ve yağlama özelliklerinin iyileştirilmesini sağlamak olarak amaçlanmıştır. Özellikle, kesme sıvısının nano teknolojik yağlama sayesinde tribolojik ve termo fiziksel özelliklerinin geliştirilebilir olması sayesinde, bu alanda yapılan tüm araştırmalara yoğunlaşmasını sağlamaktadır. Yapılan araştırmalar ve geliştirmeler ile birlikte, kesme sıvılarının soğutma-yaglama özelliklerinin performansı arttırmak ve maliyetlerin azaltılması hedeflenmektedir. Tüm bu iyileştirmeler sonrası üretime katma değer sağlamak pozitif etki sağlayacaktır.

Nanoakışkan adı verilen kesme sıvıları, kesme sıvısının içerisine farklı miktarlarda nano katkı maddeleri karıştırılarak oluşturulan karışımlardır. Nano katkı maddeleri soğutucu sıvı, etilen glikol veya su içerisine katılmaktadır [27].

Nanoakışkanlar kesme sıvısının birçok özelliğini etkilemektedir. Isıl iletkenliği, akışkanın viskozitesini [21], talaşın ısı çekmesi ve kesme yağının ısı çekme kapasitesini, arttırmaktadır. Nanopartiküllü kesme sıvılarının Şekil 6.7’deki hazırlanmaktadır.



Şekil 6.7. Nanopartikül katkılı kesme sıvılarının hazırlama aşamaları.

Yaygın manada kullanılan nanopartiküller; grafitler,  $CAF_2$ ,  $MoS_2$ , [21] Au, Cu, C, CuO,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ , CNT (karbon nano tüpler) olup, iş parçası kimyasal analizi, kesici takım ve işleme performans değerlerine göre kesme yağlarına eklenerek kullanımı sağlanmaktadır [28]. MMY yönteminde nano ölçekli partiküller kesme yağlarına belirli oranlarda eklendiğinde işlem gören parça ile kesici takım arasında meydana gelen yüksek kesme sıcaklıklarında, kesme sıvısının sürekliliğini arttırıp yüzeye stabil kalmasını sağlayarak yağlayıcılık özelliğini artırır. Kesici takım yüzeyinde oluşabilecek çentik oluşumunu azaltarak kesici takımın uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır [29].

## 7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yıldırım ve ark., Waspaloy süper alaşımının frezelenmesi esnasında MMY sistemine nanoakışkan ilave ederek soğutma/yağlama performansını irdelemişlerdir. Deneyler esnasında üç farklı (kuru, MMY ve NanoMMY (hacimce %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) soğutma/yağlama yöntemi kullanmışlardır. Yapılan deneylerde üç farklı kesme hızı (20, 40, 60 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0,05-0,10 ve 0,15 mm/dev) parametre olarak belirlenmiş, işleme çıktısı olarak takım aşınmasını incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre optimum aşınma değerini 20 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/dev ilerleme ve NanoMMY şartları altında olduğunu ifade etmişlerdir [30].

Şirin ve ark., nano grafitlerin yüksek termal iletkenlik, ısı transfer katsayısı ve viskozite gibi özelliklerini incelemek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde bitkisel esaslı kesme sıvısına dört farklı oranlarda (hacimce %0,25-0,50-0,75 ve 1) nano grafit ilave edilmiştir. Nanoakışkanlar hazırlanırken öncelikle mekanik karıştırıcı ardından ultrasonik homojenizatör ve son olarak manyetik karıştırıcıyla karışımı tamamladıklarını ifade etmişlerdir. Farklı karışımı oranlarında hazırlanan grafit katkılı nanoakışkanların, viskozite ve termal iletkenlikleri incelendiğinde bitkisel esaslı yağa eklenen katı haldeki grafitlerin termal iletkenliğinde artışa neden olduğunu, katkı oranının artmasıyla ise çok fazla bir artışın olmadığını da iddia etmişlerdir [31].

Çelik ve ark., MMY, kriyojenik ve hibrid (Kry+MMY) AISI 2507 dubleks paslanmaz çeliğinin tornalayarak, soğutma yağlama yöntemlerinin performanslarını incelemek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda tornalanan yüzeylerin yüzey pürüzlülük (R<sub>a</sub>), iki boyutlu yüzey görüntüleri ve üç boyutlu yüzey topografyaları kullanmışlardır. Deneyler üç farklı kesme hızında (80, 120 ve 160 m/dak), üç farklı ilerlemede (0,16-0,20-0,24 mm/dev) ve üç farklı soğutma/yağlama koşulunda (MMY, Kry ve Kry+MMY) gerçekleştirilmiştir. Optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi için Taguchi L<sub>27</sub> tasarımını kullanmışlardır. Sonuçlara etki eden faktörler ve faktörlerin etkilerinin belirlemek için ise varyans analizi (ANOVA) tercih edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre optimum R<sub>a</sub> değeri için 160 m/dak kesme hızı ve 0,16 mm/dev ilerleme hızı ve Kry+MMY hibrid soğutma/yağlama koşulu olarak ifade etmişlerdir. En iyi R<sub>a</sub>

değeri ise (1,151  $\mu\text{m}$ )  $A_3$ ,  $B_3$ ,  $C_1$  koşulunda tespit edildiğini bildirmişlerdir [32]. Rasheed ve ark., yapmış olduğu çalışmada grafen bazlı nanoakışkan ve nano yağlayıcıların ısı iletkenlikleri, viskozitesi, termal iletkenliği, aşınma önleyici davranışı, mükemmel termofiziksel ve tribolojik özelliklerinden dolayı soğutucu ve yağlayıcılar için alternatif bir katkı maddesi olarak geliştirildiğinden bahsetmiştir [33].

Yi ve Ark. Ti-6Al-4V'nin tornalanmasında baz akışkanlara karıştırılmış olan Grafen Oksit nanoakışkanları kullanarak bir dizi deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler FEA ile modellenmiş, nanoakışkanların ısı iletkenliği ve özgül ısı ile birlikte ısı transfer katsayısı ve sürtünme katsayısı dikkate alınarak deney optimizasyonunu belirlemişlerdir. FEA modelleri ile hesaplanan kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti sonuçlarının deneysel ölçümlerle yakın olduğunu bildirmişlerdir. Grafen Oksit ilaveli soğutma sıvısı kullanımında hem simülasyon hem de gerçekleştirilen deneylerde daha düşük kesme sıcaklığı ve kesme kuvvetinin benzerliğini vurgulamışlardır. Ayrıca Grafen oksit nanoakışkanların iş parçası kesici arasında yağlamayı arttırdığını ve buna bağlı olarak sürtünme kuvvetini azalttığını iddia etmişlerdir. Ağırlıkça %0,1, ağırlıkça %0,3 ve ağırlıkça %0,5 GO nanoakışkanları uygulandığında, sürtünmede yaklaşık %4,01, %5,36 ve %3,37 oranında azalma elde edildiğini bildirmişlerdir. Grafen Oksit nanoakışkanlarının konsantrasyonundaki artışın kesme sıcaklığı ve kesme kuvvetini düşürdüğünü, bununla birlikte konsantrasyon ağırlıkça %0,5 olduğunda kesme kuvvetinin ağırlıkça %0,3'ten daha düşük olduğunu ifade etmiştir [34].

Sharma ve ark., AISI 304 çeliğinin tornalanmasında, NanoMMY ve hibrid NanoMMY kesme koşullarının, kesme bölgesindeki sıcaklık ve kesici takım aşınması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nanoakışkan karışımlar, kesme yağına  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ +grafen nanopartikülleri, farklı oranlarda (hacimce %0,25-0,75 ve 1,25) eklenerek hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı kesme hızında (60, 90 ve 120 m/dak), üç farklı ilerlemede (0,08-0,12-0,16 mm/dev) ve üç farklı kesme derinliğinde (0,6-0,9-1,2 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonunda, hibrid NanoMMY koşulunun, NanoMMY koşuluna göre takım aşınmasını %12,29 kesme sıcaklığını %5,79 azaltarak daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [35].

Kumar ve ark., EN-31 çeliğinin tornalanması esnasında üç farklı kesme hızı, ilerleme hızı nozzle mesafesi ile dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Soğutma yöntemi olarak bitkisel esaslı kesme yağına MMY'nin kesme sıcaklıkları üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Deney sonuçlarını ANOVA ile analiz ederek kesme hızının %68,44 nozul mesafesinin ise %30,75 ile kesme sıcaklığına etkisini bulmuşlardır. Ayrıca MMY sistemi ile kullanılan bitkisel esaslı yağların çevre kirliliğini önlediği, işleme esnasında oluşan duman, buğu ve oksit miktarının ise minimize edilerek operatör sağlık tehlikesinin en aza indiğini bildirmişlerdir [36].

Thakur ve ark., kesme sıvılarının imalat sanayisinde üretim maliyetlerinin %7 ila 17'si kadar olduğunu, bununla birlikte sağlık tehlikesinin yanı sıra birçok çevre sorununa neden olduğunu ifade etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada geleneksel olan soğutma yağlama sistemlerine karşı yeni bir yöntem olan MMY sistemini kullandıklarını bildirmişlerdir. Bu araştırma da EN-24 çeliğinin tornalanması esnasında MMY sistemine ağırlıkça üç farklı karışım oranına (%0,5 wt., %1 wt., %1,5 wt.) sahip SiC nanoakışkanları ilave etmişlerdir. Sonuçları incelediklerinde SiC bazlı nanoakışkanların MMY sisteminde yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti açısından daha etkili performans gösterdiği iddia edilmiştir [37].

Singh ve ark., AISI 304 paslanmaz çeliğinin tornalanması esnasında MMY ve soğutma sisteminin yüzey kalitesi ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Bu çalışmada kesme yağına üç farklı hacimde karıştırılmış olan hibrid nanoakışkan (NF) ve alümina bazlı  $Al_2O_3$  performanslarını karşılaştırmışlardır. Hibrid nanoakışkanların konsantrasyonlarındaki artışın termal iletkenliği ve viskoziteyi arttırdığını ifade etmişlerdir. Tribolojik test ise nanoakışkan konsantrasyonunun artmasıyla aşınmanın azaldığını ve hibrid nanoakışkanın ise en az aşınma ürettiğini deney sonuçlarıyla doğrulamışlardır. Hibrid nanoakışkanların işleme esnasında alümina nanoakışkanlara kıyasla daha iyi performans gösterdiğini %20,28 kesme kuvvetini, itme kuvvetini ve ilerleme kuvvetini sırasıyla %9,94, %17,38 ve %7,25 oranında önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca yapılan çalışma ile birlikte GnP'nin alümina ile harmanlanmasının hibrid nanoakışkanların performansını arttırdığını iddia etmişlerdir [38].

Rahmeti ve ark., alüminyum 6061-T6, alaşımının frezelenmesi esnasında soğutma yağlama yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde MMY ve soğutma sistemine  $MoS_2$  ilaveli nanoakışkan ilave edilerek nanoakışkan konsantrasyonlarını karşılaştırmışlardır. Deney dizini Taguchi  $L_{16}$  metodu ile optimizasyonu sağlamışlardır. En az kesme kuvvetini %1 nanoakışkan konsantrasyonu, 4 bar hava basıncı ve  $30^\circ$  nozul

açısında bulmuşlardır. Minimum kesme sıcaklığı %0,5 nanoakışkan konsantrasyonunda 4 bar hava basıncı ve 30° nozul açısında, en iyi yüzey pürüzlülüğünü ise %0,5 akışkan konsantrasyonu, 4 bar hava basıncı ve 60° nozul açısında elde ettiklerini bildirmişlerdir [39].

Khan ve ark., AISI 9310 çeliğinin tornalanmasında bitkisel esaslı kesme sıvısı ile MMY ve tamamen kuru soğutma yöntemini karşılaştırarak deney parametrelerinin üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. MMY soğutma yönteminin kuru ve konvansiyonel soğutma yöntemine kıyasla uygun talaş oluşumu ve talaş-takım etkileşimi sağlayan kesme bölgesi sıcaklığındaki önemli azalmalar meydana geldiğini ve işlenebilirlik performansının çok daha üstün olduğuna görmüşlerdir. MMY soğutma yönteminin takım aşınması, takım ömrü ve yüzey kalitesinin arttığını da deney sonuçlarıyla ifade etmişlerdir. Ayrıca MMY soğutma yönteminin üstün işlenebilirlik performansı yanı sıra, çevre dostu (düzenli, temiz ve kuru çalışma alanı sağlamak, ısı, duman, gazlar vb. kaynaklı rahatsızlık, çevre kirliliğini önlemek ve sağlık tehlikelerinden kaçınmak) olduğuna değinmişlerdir [40].

Uysal ve ark., AISI420 martenzitik çeliğinin frezelenmesi esnasında MMY sistemine bitkisel esaslı kesme yağına molibden disülfid ( $MoS_2$ ) nanopartikülleri ilave ederek bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği sabit tutulup, beş farklı soğutma sistemi (kuru, MMY (20 mL/saat), MMY (40 mL/saat), NanoMoS<sub>2</sub> MMY (20 mL/saat), NanoMoS<sub>2</sub> MMY (40 mL/saat) kullanmışlardır. Frezeleme işlemleri sonucunda soğutma-yağlama sisteminin kesici takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre MMY sistemi kullanıldığında kesici takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünde azalmalar tespit etmişlerdir. AISI 420 çeliğinin frezelenmesinde en iyi yüzey kalitesi ve takım aşınması değerini NanoMoS<sub>2</sub> MMY (40 mL/saat) olarak ifade etmiştir [41].

Hegab ve ark., Ti-6Al-4V alaşımının tornalanması esnasında MMY ve soğutma sisteminde ÇDKNT ilaveli kesme sıvısının işleme performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada kesme hızı, ilerleme hızı ve nano katkı yüzdeleri (% ağırlıkça) deney parametresi olarak belirlemişlerdir. Araştırmacılar deney tasarımı olarak varyans analizini (ANOVA) uygulamışlardır. Çalışmalar sonucunda ÇDKNT'lerin işleme performansını olumlu yönde etkilediği, pürüzlülüğünü %38 azalttığı, %2 ÇDKNT ilaveli nanoakışkanının ise yüzey kalitesini %50 oranında iyileştirdiğini ifade etmişlerdir [42].

Anandan ve ark., M 42 çeliğinin tornalanması esnasında soğutma-yağlama yöntemlerinin yüzey kalitesi, takım aşınması ve kesme bölgesindeki sıcaklık gibi parametreler üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada MMY ve soğutma sisteminde kuru, bitkisel esaslı kesme yağı ve nanoakışkan ilaveli bitkisel esaslı kesme yağını kullandıklarını bildirmişlerdir. Ayrıca üstün termal iletkenlik ve tribolojik gibi özelliklerinden dolayı nanoakışkan olarak grafen seçtiklerine değinmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneylerde üç farklı hızda kesme ve ilerleme oranları kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre grafen nanoakışkanların yüzey pürüzlülüğünü %91, takım aşınmasını %95 ve kesme sıcaklığını %82 gibi önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir [43].

Duc ve ark., 90CrSi çeliğinin (60~62 HRC) sert tornalanması esnasında MMY ve soğutma sisteminde su bazlı emülsiyon ve bitkisel esaslı kesme yağına  $Al_2O_3$  ve  $MoS_2$  nanoakışkan ilavesinin işleme performansına etkilerini araştırmışlardır. Deney optimizasyonu için varyans analizi (ANOVA) kullandıklarını belirtmişlerdir.  $Al_2O_3$  ve  $MoS_2$  nanoakışkanların MMY sistemi ile kaplanmış karbür kesici takımlarda daha iyi bir performansın sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca akışkan türünün ve konsantrasyon oranının işleme parametreleri üzerinde doğrudan etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir [44].

Prasad ve Srikant, AISI 1040 çeliğinin tornalanması esnasında MMY ve soğutma sisteminde kullanılan nanoakışkanların yüzey kalitesi, yan yüzey aşınması, kesme bölgesindeki sıcaklıkları ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde sementit karbür ve HSS takımlarla yapılmış olup, nanoakışkan olarak 80 nm partikül boyuna sahip nano grafit tozu kullanmışlardır. Nanoakışkanlar ağırlıkça %0,0-%0,1-%0,3-%0,5 oranlarında karıştırılmış olup, 5 mL/dak 10 mL/dak ve 15 mL/dak gibi farklı akış hızlarında uygulandığını ifade etmişlerdir. Deneysel sonuçlarını incelediklerinde, nanoakışkan inklüzyonları olan akışkanlarda yüzey pürüzlülüğü, takım yatak aşınması, kesme sıcaklıkları ve kesme kuvvetleri üzerinde çok fazla azalma olduğunu iddia etmişlerdir [45].

Patole ve Kulkarni, AISI 4340 çeliğinin tornalanması esnasına MMY sistemine nanoakışkanlar ilave ederek işleme parametrelerinin optimizasyonunu amaçlamışlardır. Yapılan deneylerde iki farklı nanoakışkan türü (ÇDKNT, Etilen Glikol), dört farklı basınç ve debi değeri parametre olarak seçilmiştir. MMY parametrelerinin optimizasyonu için

Taguchi Metodu L<sub>16</sub> ortogonal dizini kullanılmış olup, deney sonuçları Varyans Analizi (ANOVA) ile analiz etmişlerdir. Deney sonuçlarına tüm parametreler arasında basıncın yüzey pürüzlülüğü üzerinde en az etkiye sahip olduğu verisine ulaşmışlardır. Optimum işleme parametresi olarak basınç (5 bar), akış hızı (140 mL/saat) ve Etilen Glikollü nanoakışkanlı kesme sıvısı sonucuna ulaşmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün akışkanın türü olduğunu ve Etilen Glikolün, ÇDKNT'e göre daha iyi performans sergilediğini iddia etmişlerdir [46].

Öndin ve ark., PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğinin tornalanması esnasında MMY ve soğutma sistemine ÇDKNT ilavesinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıklarını incelemek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde deney optimizasyonu Taguchi L<sub>27</sub> tasarımı ile yapılmış olup, üç farklı (120, 180 ve 240 m/dak) kesme hızı, (0,1-0,15-0,2 mm/dev) üç farklı ilerleme ve üç farklı soğutma-yağlama koşulunu (kuru, saf-MMY ve NanoMMY % hacimce) işleme parametreleri olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde saf-MMY ve ÇDKNT-MMY ile sırasıyla yaklaşık %5 ve %12 daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edildiği bildirmişlerdir. Yanak aşınmasında ise saf-MMY ve ÇDKNT-MMY %40,2 ve %69 daha iyi performans sergilediğini ifade etmişlerdir [47].

Yıldırım ve ark., Inconel 625 nikel esaslı alaşımının tornalanması esnasında MMY ve soğutma sisteminde hBN nanoakışkanlar ekleyerek MMY sisteminin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Yapmış oldukları çalışmada dört farklı soğutma yöntemi (kuru, saf, %0,5 hBN nanoakışkan ve %1 hBN nanoakışkan) kullanarak kesici takım ömrü, yüzey kalitesi, takım aşınması ve kesme sıcaklıklarını incelemişlerdir. Kesici takımda oluşan aşınma mekanizmalarını SEM ve EDX ile değerlendirdiklerini bildirmişlerdir. Ayrıca optimum takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü için nanoakışkan konsantrasyonunun hacimce %0,5 hBN olduğunu ifade etmişlerdir [48].

Jamil ve ark., kriyojenik soğutma ile hibrid nanoakışkan ilaveli minimum miktar yağlama (MQL) olmak üzere iki soğutma ve yağlama tekniğinin performansını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada Ti-6Al-4V'yi tornalanması esnasında kriyojenik CO<sub>2</sub> ve hibrid nanoakışkan esaslı MQL soğutma sıvısının etkisini karşılaştırmışlardır. Optimizasyon parametreleri olarak kesme hızı, ilerleme hızı ve soğutma tekniği, deney tasarımı olarak ise Taguchi Metodu L<sub>9</sub> Ortogonal dizisi belirlemişlerdir. Kullanılan hibrid nanoakışkan bitkisel esaslı kesme sıvısına ÇDKNT ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> homojen olarak karıştırmışlardır.

Sonuçlar incelendiğinde, hibrid nano katkıların, kriyojenik soğutmaya kıyasla ortalama yüzey pürüzlülüğünü %8,72, kesme kuvvetini %11,8 azalttığını ve takım ömrünü %23 artırdığını tespit etmişlerdir. Kriyojenik soğutmanın MMY Hibrid nanoakışkanlara kıyasla kesme sıcaklığında %11,2 daha iyi olduğunu performans sergilediğini gözlemlemişlerdir [49].

Li ve ark., nikel esaslı alaşımın yüzey taşlanması MMY sisteminde nanoakışkan ilavesinin işleme esnasında oluşan sıcaklıklarla ilgili bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde altı tip nanoakışkan türü; molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ), zirkonyum dioksit ( $\text{ZrO}_2$ ), karbon nanotüp (CNT), polikristal elmas, alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve silika dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) belirlemişlerdir. Nanoakışkanların hazırlanması esnasında bitkisel esaslı palmiye yağına ilave edildiğini ve homojen karıştırma yapıldığını belirtmişlerdir. KNT nanoakışkanın, 110,7 °C'lik en düşük taşlama sıcaklığı ve %40,1'lik ilgili enerji orantı katsayısı ile en iyi sonucu verdiğini iddia etmişlerdir. Ayrıca, nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısı, viskozite, yüzey gerilimi ve damlacıklar ile iş parçası yüzeyi arasındaki yağlama gibi ilgili fiziksel özellikleri karşılaştırılarak soğutma performansı üzerindeki etkilerini de karşılaştırdıklarına değinmişlerdir [50].

Hegab ve ark., Ti-6Al-4V alaşımının tornalanması esnasında MMY sisteminin soğutma verimliliğini arttırmak amacıyla ÇDKNT nanoakışkan ilaveli kesme yağının performansını incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada bitkisel esaslı kesme yağına ağırlıkça ilave edilen ÇDKNT'lerin farklı konsantrasyon oranlarını parametre seçerek MMY'nin ısı kapasitesini irdelemişlerdir. Farklı kesme parametrelerinde gerçekleştirilen deneylerde kesme hızı, ilerleme ve nanopartikül konsantrasyon oranı belirlenmiştir. Ağırlıkça %2 ÇDKNT'lerin kesme kuvvetini %11,5 oranında azalttığını, takım yanak aşınmasını ise %45 oranında engellediğini ifade etmişlerdir [51].

Khan ve ark., kesme sıvılarının kullanımıyla birlikte ortaya çıkan küresel karbon emisyonunun azaltılmasına ilişkin bir dizi araştırma yapmışlar. Bu çalışmada Haynes 25 alaşımının tornalanmasında MMY ve soğutma sisteminde nanoakışkan ilave edilerek deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Al-GnP hibrid nanoakışkanlar üç farklı hacimde hazırlanarak performansları gözlemlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde ilerleme hızının enerji tüketimi üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca toplam enerji tüketimi, karbon emisyonu ve toplam maliyette iş malzemesi seçiminin payları %93,7, %66,8, %56,2 olarak ifade etmişlerdir [52].

Sarhan ve ark., AA6061-T6 alaşımının tornalanmasında mineral esaslı yağa SiO<sub>2</sub> nanoakışkan ilavesinin kesme parametreleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nanoakışkanların geleneksel kesme sıvılarına kıyasla işleme esnasında gerekli olan tezgâh gücünü azalttığını, takım-talaş ara yüzündeki yuvarlama hareketi sayesinde yağlamanın daha iyi gerçekleştiğini iddia etmişlerdir. Ek olarak nano yağların çevresel kirliliği de azalttığını bildirmişlerdir. Deney sonuçları kıyaslandığında geleneksel kesme sıvılarına karşın SiO<sub>2</sub> nanoakışkanları ağırlıkça %0,2 konsantrasyon oranında işleme sonrası daha az güç tasarrufu, daha az yağ tüketimi ve daha az kirlilik elde edildiğini vurgulamışlardır [53].

Shokrani ve ark., Ti6Al4V malzemeyi ıslak, kriyojenik, MMY ve hibrid soğutma/yağlama koşulları altında frezelenmesinde, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük, takım ömrü ve aşınması üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Hibrid soğutma/yağlama koşulunun yüzey pürüzlülük ve takım ömründe daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [54].

Sivaiah ve Chakradhar, 17-4 PH çeliğinin kuru, ıslak, MMY ve kriyojenik soğutma/yağlama koşulları altında tornalanmasında, kesme parametrelerinin takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve talaş geometrisi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda kriyojenik soğutma/yağlama koşulunun diğer koşullara göre daha iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir [55].

Kıvak ve ark., Ni-hard çeliğinin tornalanması esnasında farklı soğutma/yağlama koşulları kullanarak kesme parametrelerinin takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyleri kuru, saf MMY ve Nano MMY (ÇDKNT ve grafen) kesme şartlarında gerçeletirmişlerdir. İşleme esnasında soğutma/yağlama sisteminin takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kesme parametreleri sabit tutulup bir dizi deney yaptıklarını ifade etmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde saf-MMY sisteminde kuru işlemeye kıyasla burun aşınmasında yaklaşık %69 oranında azalma tespit edilirken, grafenlere dayalı NanoMMY sisteminde ise yüzey pürüzlülüğünde %19,42 oranında iyileşme gerçekleştiğini bildirmişlerdir [56].

Günan ve ark., Hastelloy C276 çeliğinin frezelenmesi esnasında MMY ve soğutma sisteminde bitkisel esaslı kesme yağına Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoakışkan ilave ederek farklı hacimlerde hazırlanmış Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün işleme parametreleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu

amaçla yapmış oldukları çalışmada üç farklı kesme hızı (60, 75 ve 90 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0,10-0,15-0,20 mm/dev) ve üç farklı hacimsel konsantrasyonlarda hazırlanmış (%0,5-1,0-1,5) nanoakışkanları deney parametresi olarak belirlemişlerdir. Tüm kesme koşullarında kesici takımlarda kırılma, aşınma gözlemlenirken, hacimde %1 ve %1,5 konsantrasyonlarda kesici takımlarda malzeme yapışmasının olmadığını iddia etmişlerdir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyelerin, kesme hızı için 90 m/dak, ilerleme hızı için 0,10 mm ve nanoakışkan konsantrasyonu için %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olarak ifade etmişlerdir [57].

Gupta ve ark., Inconel-800 alaşımının tornalanması esnasında MMY ve soğutma sistemine ilave edilen nanoakışkanların performanslarını incelemişlerdir. Araştırmacılar nikel bazı alaşımların işlenmesinde nanoakışkanların üstün termal iletkenlik, viskozite ve tribolojik özellikler dahil olmak üzere kesme parametrelerini iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, grafit ve MoS<sub>2</sub> nanoakışkanların soğutma yağlama sisteminde özelliklerini irdelemişlerdir. Deney parametreleri olarak nanoakışkan performansı, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve takım aşınmasını ele almışlardır. Yapmış oldukları deneylerden elde edilen verileri ise Box Cox dönüşümü, normal olasılık çizimleri ve Varyans analizi (ANOVA) ile matematiksel olarak da karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak MoS<sub>2</sub> ve grafit bazlı nanoakışkanların yüksek kesme hızı altında daha başarılı olduğunu, grafit bazlı nanoakışkanların ise genel işleme performansının diğerlerinden daha üstün olduğunu ifade etmişlerdir [58].

Rapeti ve ark., AISI 1040 çeliğinin tornalanması esnasında üç farklı bitkisel esaslı kesme yağına MoS<sub>2</sub> nanoakışkan ilave ederek MMY sisteminde performanslarını incelemişlerdir. Deney tasarımı olarak Taguchi Metodu L<sub>27</sub> Ortogonal dizisi kullanılmış olup, deney parametrelerini nanoakışkan konsantrasyonu, kesme hızı ve ilerleme hızı olarak belirtmişlerdir. İşlenebilirlik üzerindeki etkilerini görmek amacıyla kesme kuvveti, kesme sıcaklıkları, takım yanak aşınması ve yüzey pürüzlülüğünü ele almışlardır. Yapılan çalışma sonucunda hindistan cevizi yağına %0,5 MoS<sub>2</sub> 40 m/dak kesme hızı, 0,14 mm/dev ilerleme hızı en iyi sonucu verdiğini ifade etmişlerdir [59].

Said ve ark., son on yıldaki nano teknolojideki hızlı gelişmelerin geleneksel ısı transfer akışkanlarına göre önemli avantajlar sağladığını bilmişlerdir. Nanoakışkanların su, yağ, etilen glikol, vb. gibi geleneksel soğutma sıvılarına ortalama boyutları 100 nm'nin altında olan nanoakışkanların karıştırılmasıyla tasarlandığını ifade etmişlerdir. Nanoakışkanların

stabilitesi, kararlılığı, viskozite ve termal iletkenliği gibi üstün tribolojik özelliklerinden dolayı önümüzdeki yıllarda endüstri ve akademide potansiyeli yüksek bir güç olarak yaygın kullanılacağını iddia etmişlerdir [60].

Najiha ve ark., AA6061 alüminyum alaşımının frezelenmesi esnasında MMY ve soğutma sisteminde su bazlı TiO<sub>2</sub> nanoakışkan kullanarak kesme parametrelerinin aşınma mekanizmaları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Üç farklı kesme hızı (5200, 5400 ve 5600 dev/dak), iki farklı MMY akış hızı (0,65 mL/dak ve 1,0 mL/dak) ve üç farklı konsantrasyonda (hacimce %0,5-2,5-4,5) TiO<sub>2</sub> deney parametresi olarak belirlemişlerdir. İşleme esnasında kesici takımında oluşan aşınmaların, yapışmaların ve kırılmaların etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu hasarların sebebini ise kesme bölgesinde işleme esnasında oluşan sıcaklıkların soğutma sıvısını gizli buharlaşmasına neden olduğuna atfetmişlerdir. %2,5 TiO<sub>2</sub> nanoakışkan hacim oranı diğer oranlara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Aynı zaman da nanoakışkanların yağlama özellikleri ile bütünleşen suyun daha yüksek soğutma hızlarında faydalı olduğunu ifade etmişlerdir [61].

## 7.1. LİTERATÜR DEĞERLENDİRİLMESİ

AISI329 dubleks paslanmaz çeliği ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, yüksek sertlik ve iyi korozyon direnci kombinasyonu nedeniyle AISI 329 dubleks paslanmaz çelikleri; korozyon, çukurluk, aralık korozyonuna karşı yüksek direnç, iyi kaynak yapılabilirlik, yüksek mekanik mukavemeti ve tasarım avantajları nedeniyle özel olarak geliştirilmiş fakat işlenebilirlik performansı hakkında çalışmaların yetersiz geldiği görülmüştür. Pompa, şaft, türbin gibi yüksek dayanım ve korozyon istenen yerlerde yaygın olarak kullanılan bu çeliğin, bu çalışma ile birlikte ortaya çıkan problemlerin kaldırılması ve daha düşük maliyetlerle işlenebilmesi için işlenebilirliği etkileyen parametrelerin optimizasyonu sağlanacaktır.

MMY sistemi gelişen teknoloji ile birlikte son yıllarda oldukça yeni ve popüler bir soğutma sistemi olarak karşımıza çıkmaktadır. MMY sistemini getirmiş olduğu yenilikler, geleneksel soğutma yöntemlerine kıyasla üstün özellikleri nedeniyle araştırmacılar bu sistemi daha etkin kılabilmek ve performanslarını geliştirmek amacıyla kesme sıvısının içerisine nanopartikül ilave etmiştir. Yapılan bu çalışma da CuO

nanopartikül katkılı bitkisel esaslı yağın içerisine farklı oranlarda cetiltrimetilamonyum bromid (CTAB), polivinilpolipirrolidon (PVP) ve sodyum dodesil sülfat (SDS) eklenerek nanoakışkanlar mukayese edilmiştir. Taguchi metodu gibi optimizasyon yöntemleri ile çok sayıda deney yapmadan zaman ve maliyetin düşürülmesinin yanı sıra ürün kalitesi ve işleme verimliliğinin arttırıldığı tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, AISI329 dubleks paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde kesme parametrelerinin ve kesme şartlarının yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme sıcaklıkları üzerindeki etkileri deneysel ve istatistiksel olarak değerlendirilerek optimal işleme koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak Taguchi tekniği kullanılarak deney tasarımı yapılmasına karar verilmiştir.



## 8. MALZEME VE METOT

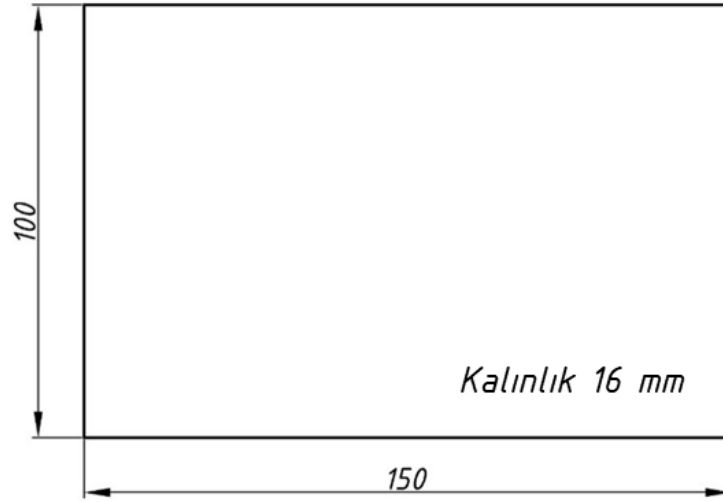
Bu çalışmada, AISI329 dubleks paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde, kesme parametrelerinin ve kesme şartlarının, kesme sıcaklığı (T), yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ve takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiş olup, ilk aşamada nanoakışkanlara eklenen yüzey aktif maddelerin performansı değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise bitkisel esaslı kesme yağına farklı oranlarda (1:1, 1:2, 2:1, 1:3 ve 3:1) hacimce %0,6 eklenen CuO ve grafit nanopartiküllerin farklı kesme hızlarında işlenebilirlik performansları incelenmiştir. Deney tasarımlarının oluşturulmasında ve optimizasyonlarda Taguchi kullanılmıştır. Girdi parametrelerinin etki düzeylerinin belirlenmesinde ise varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır.

Çizelge 8.1. Deneysel parametreler.

Parametreler	1. Aşama Deneyleri	2. Aşama Deneyleri
<b>Koşullar</b>	CTAB, PVP ve SDS	Kuru, MMY, CuO, Grpt, CuO+Grpt (1/1, 1/2, 2/1, 1/3 ve 3/1)
<b>Kesme Hızı</b>	120,160 ve 200 m/dak	120, 160 ve 200 m/dak
<b>İlerleme</b>	0,1, 0,15 ve 0,20 mm/dev	0,10 mm/dev
<b>Kesme Derinliği</b>	Tüm deneylerde kesme derinliği 0,5 mm sabit tutulmuştur.	
<b>Radyal Kesme Derinliği</b>	Tüm deneylerde radyal kesme derinliği, kesici takım çapının %60'ı (ISO 8688-1 standardına göre) olan 15 mm sabit ( $\varnothing 25 \times 0,60 = 15$ mm) tutulmuştur.	

### 8.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Frezeleme deneylerinde herhangi bir kimyasal ve ısıl işlem uygulanmamış olan ticari halde bulunan  $100 \times 150 \times 16$  mm ölçülerinde (Şekil 8.1) AISI 329 dubleks paslanmaz çeliği (1.4460, SS2324, UNS S32900) numune olarak kullanılmıştır.



Şekil 8.1. Deneylerde kullanılan AISI 329 malzeme boyutları.

Deney numunelerine ait kimyasal bileşim Çizelge 8.'de mekanik özellikleri ise Çizelge 8.3'de verilmiştir.

Çizelge 8.2. AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi.

Element (% ağırlıkça)							
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
0,10	2	1	25-30	3-6	0,045	0,03	1-2

Çizelge 8.3. AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.

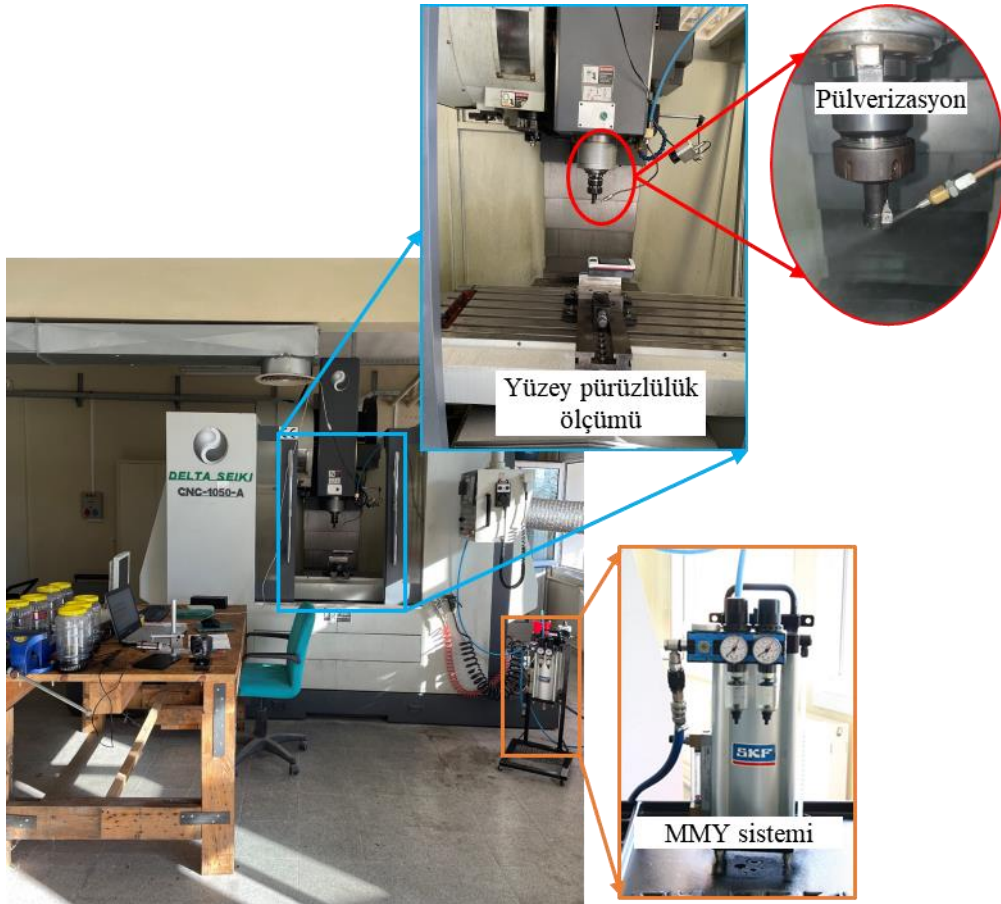
Yoğunluk	Poisson Oranı	Elastikiyet Modülü	Gerilme Direnci	Akma Dayanımı	Uzama
(kg/m <sup>3</sup> )		(GPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
7,8	0,27-0,30	1920-210	724	550	25

## 8.2. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı

Frezeleme deneyleri, Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan maksimum devri 10000 dev/dak olan DELTA SEIKI marka CNC 1050 A model CNC freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Tezgâh teknik özellikleri ise Çizelge 8.'de, görseli ve deney seti ise Şekil 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.4. Deneylerde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri.

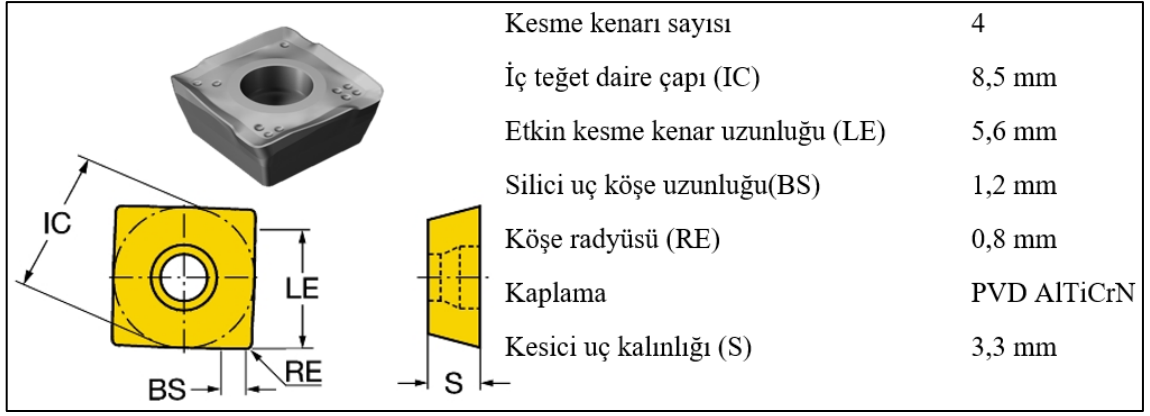
<b>Tabla Ölçüleri (mm)</b>	1270×400
<b>Azami İş Parçası Ağırlığı (kg)</b>	500
<b>Azami devri (dev/dk)</b>	10000
<b>İşletim sistemi</b>	Fanuc OT
<b>Magazin Kapasitesi (adet)</b>	24
<b>İş Mili Motor Gücü (kW)</b>	11
<b>Ölçü Hassasiyeti</b>	0,001 mm



Şekil 8.2. DELTA SEIKI CNC 1050 A CNC freze tezgâhı ve deney seti.

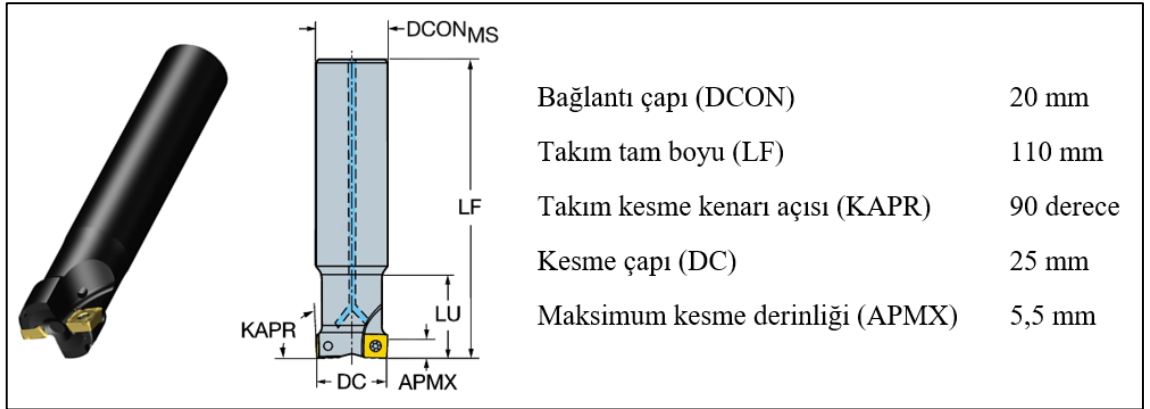
### 8.3. Deneylerde Kullanılan Kesici Takım

Frezeleme deneylerinde, Sandvik Coromant firması tarafından imal edilen PVD AlTiCrN kaplamalı 1130 kalite Sandvik 490R-08T308M karbür takımlar kullanılmıştır. Kesici takıma ait teknik özellikler ve görseller Şekil 8.'de verilmiştir.



Şekil 8.3. Sandvik 490R-08T308M 1130 kesici takım.

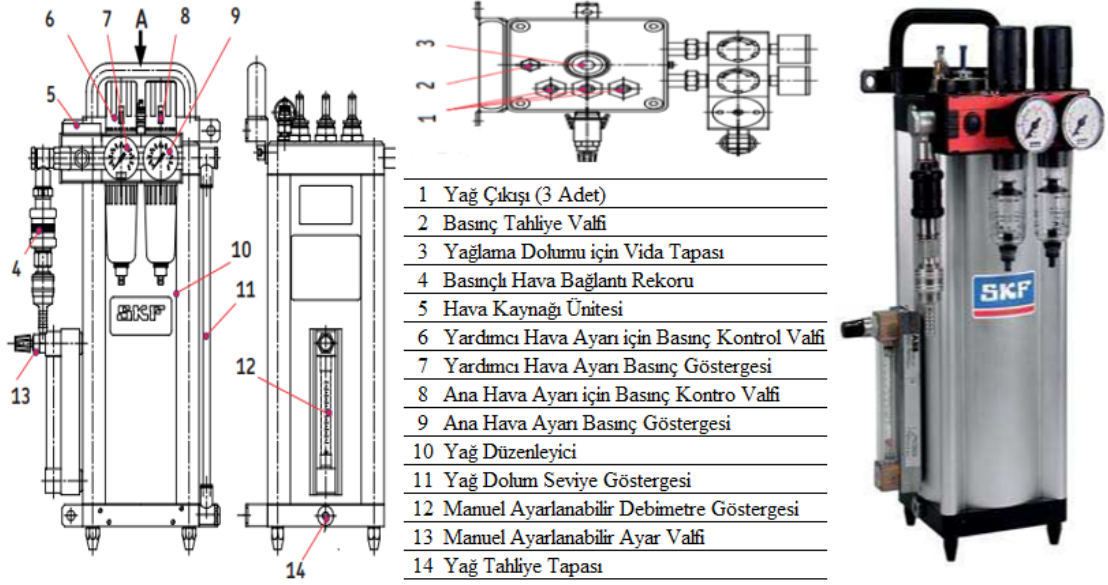
Kesici takımların frezeleme tezgâhına bağlanması için Sandvik Coromant firmasının, 490-025A20-08L frezeleme tutucusu kullanılmıştır. Her bir deney parametresinde takım tutucusuna bir adet takım rijit bir şekilde bağlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.'te tutucuya ait boyutsal ölçüler verilmiştir.



Şekil 8.4. Sandvik 490-025A20-08L freze takım tutucusu.

#### 8.4. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Sistemi

Deneylerde, SKF marka LubriLean-Vario model minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi kullanılmıştır, MMY sistemi Şekil 8.5'de, teknik özellikleri ise Çizelge 8.5'te verilmiştir. MMY sistemindeki kesme yağı, kesme bölgesine 2 mm çapındaki nozul vasıtasıyla dışarıdan tatbik edilmiştir. İşleme deneylerinde sistem basıncı 8 bar, debi 75 mL/saat, nozul mesafesi 20 mm ve nozul açısı 30° olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 8.5. SKF LubriLean-Vario MMY sistemi.

Çizelge 8.5. SKF LubriLean-Vario MMY cihazı teknik özellikleri.

<b>İşleme Metotları</b>	Tornalama, Frezeleme, Delme
<b>Tatbik Şekli</b>	İç veya Dış
<b>Kapasite</b>	1,8 Litre
<b>Çalışma Basıncı</b>	4-10 Bar
<b>Yağ Miktarı</b>	1-150 ml/saat
<b>Hava Tüketimi</b>	15-300 Nl/dak
<b>Çıkış Bağlantı Nokta Sayısı</b>	1-3

#### 8.4.1. Deneylerde Kullanılan Bitkisel Esaslı Yağ

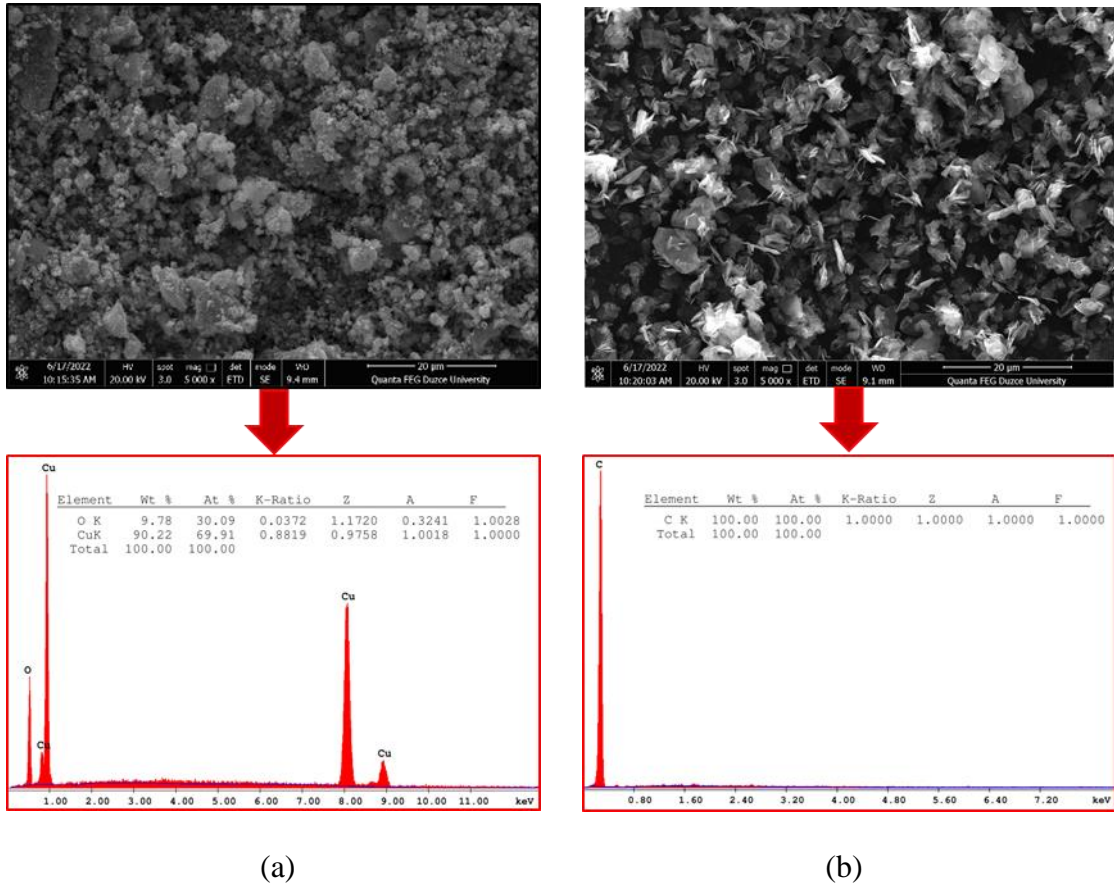
Bu çalışmada nanoakışkanlar için kesme yağı (baz sıvı) olarak, Opet Fuch PlantoCut SR10 bitkisel esaslı yağ kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme yağı, yüksek ısı taşıma kapasitesi ve üstün yağlama gibi, klor ve ağır metalleri barındırmayan, biyolojik olarak ise doğada çözülebilen çevre dostu bir kesme sıvısıdır. Kesme yağına ait teknik özellikler Çizelge 8.6'da verilmiştir.

Çizelge 8.6. Opet PlantoCut SR10 Kesme yağı özellikleri.

<b>Kinematik Viskozite (40°C, cSt)</b>	10,0
<b>Parlama Noktası (°C, min)</b>	206
<b>Yoğunluk (g/mL 15°C)</b>	0,86
<b>Kesme Yağı Cinsi</b>	Bitkisel

### 8.4.2. Deneylerde Kullanılan Nanopartikül Tozlar

Kesme yağının işleme esnasında performansını geliştirmek amacıyla, hacimce %0,6 oranında CuO ve grafit nanopartiküller eklenmiştir. Nanopartiküller eklendikleri karışımın termal iletim özelliklerini artırmakla kalmayıp aynı zamanda yağlayıcılık performansına son derece önemli katkılar sunmaktadırlar. Bu çalışmada nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan CuO ve grafit katı partiküllere ait SEM görüntüleri Şekil 8.6'da ve özellikler ise Çizelge 8.7'de verilmiştir.



Şekil 8.6. Nanopartikül SEM görüntüsü ve elemental analizleri a) CuO, b) grafit.

Çizelge 8.7. Nanopartikül özellikleri.

Nanopartikül	Boyut (nm)	Safılık (%)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Şekil	Görünüş
CuO	38	99,99	6,50	küresel	beyaz
Grafit	80	99,90	2,26	katmanlı	siyah

### 8.4.3. Deneyleerde Kullanılan Yüzey Aktif Maddeleri

Nanoakışkanlarla yapılan çalışmalarda en büyük sorunların başında raf ömrü, topaklanma ve çökelme gibi sorunları sayabiliriz. Nanoakışkanlar kolloidal karışım olup, nanopartiküller sıvı içerisinde askıda durmaktadırlar. Van der Waals bağlarının güçlü olması veya Brownian etkisi yüzünden nanopartiküller karışım içerisinde birbirine yaklaşarak kümelenme oluşturmaktadırlar. Oluşan nanopartikül kümelenmesi karışımın stabilitesini bozmakta heterojen bir karışım meydana getirmektedir. Nanoakışkan karışımlara zararlarına (köpük oluşumu, termal iletim katsayısında azalma, viskozitenin artışı vb.) rağmen yüzey aktif maddeleri eklenerek nispeten homojen bir karışım elde edilmektedir.

Bu çalışmada, nanoakışkanların hazırlanmasında CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddeleri tercih edilmiştir. CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddeleri çalışmalarda araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddelere ait SEM görüntüleri ve elemental analizleri Şekil 8.'de verilmiştir.

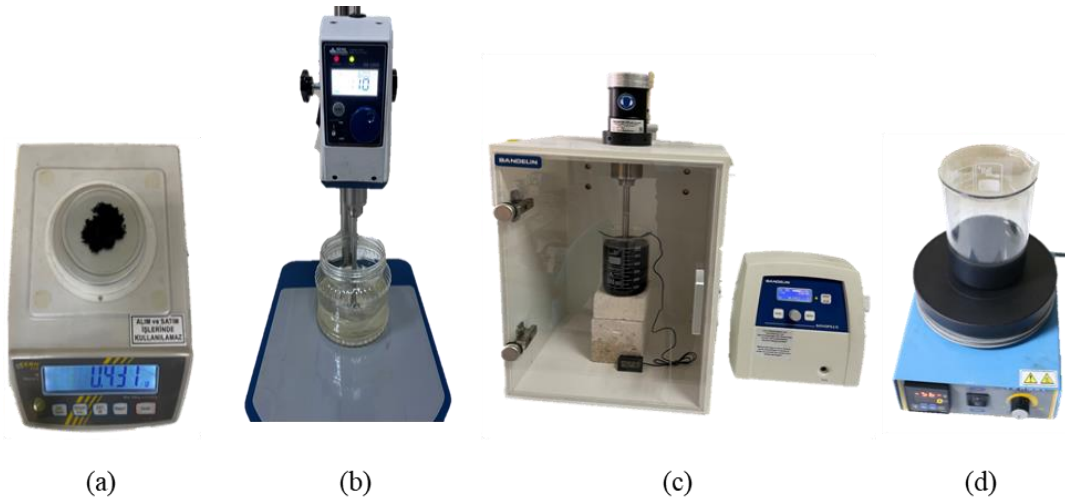




#### 8.4.4. Nanoakışkan Hazırlama Prosesi

Nanoakışkan hazırlama prosesi dört farklı proste gerçekleştirilmiştir. Birinci proste hacimce %0,6 oranlı CuO ve grafit nanopartikül ağırlıkları ölçülerek eklenecek yüzey aktif maddesi oranı belirlenmiştir. İkinci proste DAIHAN marka HS-100D model mekanik karıştırıcıda nanopartikül ağırlıkların %0,25 oranında CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddeleri eklenerek 10 dakika 600 devirde karıştırılmıştır. Ardından hacimce %0,6 konsantrasyon oranında nanopartiküller eklenerek 60 dakika 750 devirde karışım devam etmiştir. Üçüncü proste Bandelin SonoPuls HD3200 ultrasonik homojenizatör ile 20 kHz 200 kW 30 dakika karışım yapılmıştır. Karışımın son dördüncü prosesinde ise Termal N1151M manyetik karıştırıcı 1500 dev/dak 2 saat karışım sonlandırılmıştır.

Dört proste gerçekleştirilen karışım ile farklı nispeten homojen nanoakışkanlar elde edilmiştir. Karışımlar proseslerinde kullanılan cihazlar Şekil 8.88’de verilmiştir.



Şekil 8.8. Nanoakışkanların hazırlama aşamaları; a) Kern Pcb hassas terazi, b) Daihan HS-100D Mekanik karıştırıcı, c) Bandelin Sonoplus UW-3200 ultrasonik homojenizatör ve d) Termal N1150 manyetik karıştırıcı.

Nanoakışkan hazırlama prosesi sonunda tüm karışımlar dikkatlice isimlendirilmiştir. Nanoakışkan hazırlama prosesinde verilen isimlendirmeler ve içerikleri Çizelge 8. verilmiştir.

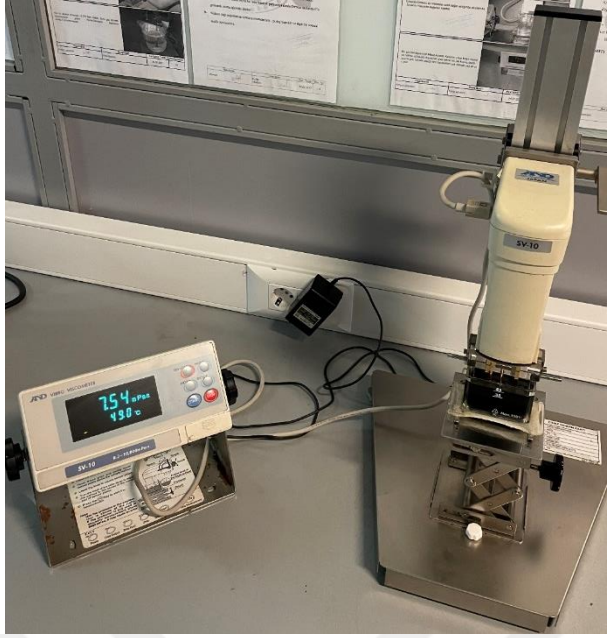
Çizelge 8.8. Nanoakışkan karışım isimlendirme tablosu.

İsimlendirme	Nanopartikül		Yüzey aktif maddesi	
	Tipi	Oran hacimce	Tipi	Oran ağırlıkça
Bitkisel yağ	-	-	-	-
CuO+CTAB	CuO	%0,6	CTAB	%0,25
CuO+PVP	CuO	%0,6	PVP	%0,25
CuO+SDS	CuO	%0,6	SDS	%0,25
CuO	-	-	-	-
Grpt	-	-	-	-
CuO/Grpt+PVP (1:1)	CuO	%0,3	PVP	%0,25
	Grpt	%0,3		
CuO/Grpt+PVP (1:2)	CuO	%0,2	PVP	%0,25
	Grpt	%0,4		
CuO/Grpt+PVP (2:1)	CuO	%0,4	PVP	%0,25
	Grpt	%0,2		
CuO/Grpt+PVP (1:3)	CuO	%0,15	PVP	%0,25
	Grpt	%0,45		
CuO/Grpt+PVP (3:1)	CuO	%0,45	PVP	%0,25
	Grpt	%0,15		

## 8.5. DENEYSEL ÖLÇÜM VE ANALİZLERDE KULLANILAN CİHAZLAR

### 8.5.1. Viskozite ve pH Ölçüm Cihazları

Hazırlanan nanoakışkan karışımların viskozite ölçümleri AND SV-10 viskozimetre cihazında 40 °C sıcaklıkta ölçülmüştür. Karışımlar hazırlandıktan sonra taze bir şekilde bekleme kaynaklı çökeltme topaklanma olmadan ölçümler gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkan karışımlara ait pH ölçümlerinde ise Sartorius PT-10P pH metre ile ölçülmüştür. Viskozite ve pH ölçümlerinde kullanılan cihazlar Şekil 8.99'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8.9. Nanoakışkan a) Viskozite ve b) pH ölçümleri.

### 8.5.2. Termal İletkenlik Ölçüm Cihazı

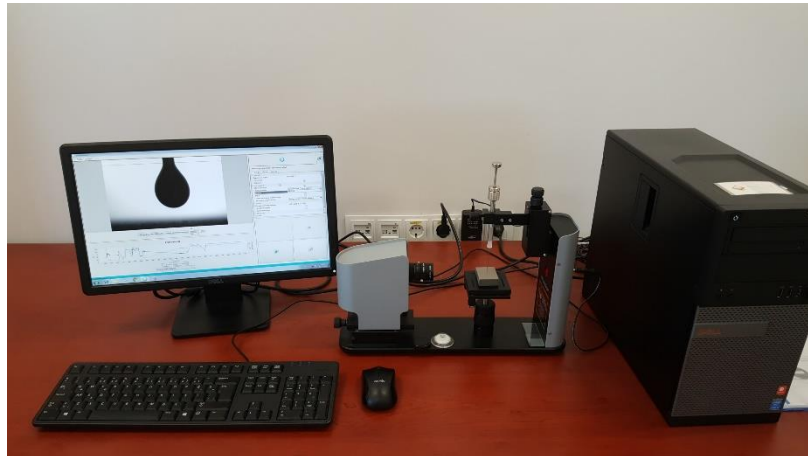
Yüksek termal iletim katsayısına sahip katı haldeki nanopartiküllerin eklendikleri karışımların termal iletkenliklerini yükselttiği bilinmektedir. Nanoakışkan karışımların termal iletkenlikleri oda sıcaklığında Hot Disk TPS 2500s termal analizatör yardımıyla ölçülmüştür. Termal iletkenlik ölçümleri sıvılar için tasarlanan 5465 kodlu, 3,2 mm yarıçaplı sensör yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Termal iletkenlik ölçüm sonucu özel yazılımı sayesinde yaklaşık 200 ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Termal iletkenlik ölçümleri Sakarya Üniversitesinde gerçekleştirilmiş olup ve ölçüm görseli ve cihaz Şekil 8.1010'da verilmiştir.



Şekil 8.10. Termal iletkenlik ölçüm cihazı.

### 8.5.3. Damlama Noktası Ölçümleri

Nanoakışkanların ıslanabilirlik özelliklerinin tespiti yüzey gerilimi ve temas açısı ölçüm sonuçları birlikte kullanılarak yorumlanabilmektedir. İş parçası üzerine belli hacimde damlatılan sıvının, belli süre içerisinde yüzeye dağılırken oluşturduğu açı ıslanabilirlik kabiliyetini ifade etmektedir. Yüze hızlı dağılan sıvının başka bir ifadeyle temas açısı düşük olan sıvının ıslanabilirlik kabiliyeti daha yüksektir denilebilir. Hazırlanan nanoakışkanların yüzey gerilimi ve temas açısı Necmettin Erbakan Üniversitesinde bulunan, Biolin Theta Lite cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümü Şekil 8.1’de verilmiştir.



Şekil 8.1. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümleri.

#### **8.5.4. Kesme Sıcaklığının Ölçümü**

Kesme bölgesindeki sıcaklığın işleme esnasında görüntülenmesi veya kontrol altına alınması son derece önem arz etmektedir. Bu kapsamda bu tez çalışmasında kesme bölgesindeki azami sıcaklık değerlerinin ölçülmesinde Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan termografik görüntüleme yapan Optris PI 450 kızılötesi kamera kullanılmıştır. Termal kamera -20 ~ 900 °C ölçüm aralığına sahip olup tüm deneylerde talaşlardan etkilenmemesi için kesme bölgesine 300 mm mesafede ve 45 derece açıda konumlandırılmıştır.

#### **8.5.5. Yüzey Pürüzlülüğün Ölçülmesi**

Yüzey pürüzlülük ölçümleri ISO 4287 standardına göre gerçekleştirilmiş olup aritmetik yüzey pürüzlülük değerleri ( $R_a$ ) dikkate alınmıştır. Frezelenen yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan taşınabilir mobil Mahr Marsurf PS10 pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Her bir ölçüm öncesinde pürüzlülük cihazı, doğrulama mastarı yardımıyla kalibre edilmiştir. Frezelenen yüzeylerin farklı üç bölgesinden alınan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülük ölçüm deney seti Şekil 8.2'de verilmiştir.



Şekil 8.2. Kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

#### **8.5.6. Kesici Takım Aşınma Ölçümleri**

Deneyler sonrasında kesici takımlarda meydana gelen yanak aşınma büyüklüklerin tespitinde, Dino Lite AM791MZT dijital mikroskop kullanılmıştır. Kesici takımlardaki aşınma mekanizmaların tespitinde, nanopartikül, yüzey aktif maddelerinin görüntülerin elde edilmesinde Düzce Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında (DÜBİT) bulunan FEI Quanta FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM cihazına ait görsel Şekil 8.3’de verilmiştir.



Şekil 8.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri.

## 8.6. TAGUCHI OPTİMİZASYON YÖNTEMİ

Yapılan frezeleme deneylerinde işlenebilirlik parametresi kalite karakteristiklerini belirlemek amacıyla yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ve kesme sıcaklığı ( $T$ ) incelenmiştir.

Kesme parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodunun  $L_9$  ( $3^2$ ) dikey dizini kullanarak iki aşamalı deney tasarımı uygulanmıştır. Birinci aşamada  $L_9$  dizini kullanılarak nanoakışkan karışımların optimizasyonu belirlenmiştir.  $L_9$  tasarımı ile yapılan deneylerde, girdi parametreleri kesme hızı ( $V_c$ -m/dak), ilerleme hızı (f-mm/dev) ve nanoakışkan karışımlar parametre olarak belirlenmiştir. Kontrol faktörleri ve seviyeleri Çizelge 8.9’da, deney tasarımı ise Çizelge 8.10’da verilmiştir.

Çizelge 8.9.  $L_9$  işleme parametreleri ve seviyeleri.

Kontrol faktörleri	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Nanoakışkan Karışımlar	A	CTAB	PVP	SDS
Kesme Hızı (m/dak)	B	120	160	200
İlerleme Hızı (mm/dev)	C	0,10	0,15	0,20

Çizelge 8.10. Taguchi L<sub>9</sub> dikey dizisi.

Deney No	Değişkenler	Sembol A	Sembol B	Sembol C
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	1	1	1
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	1	2	2
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	1	3	3
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	2	1	3
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	2	2	3
6	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	2	3	1
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	3	1	3
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	3	2	1
9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	3	3	2

## 9. BULGULAR VE TARTIŞMA

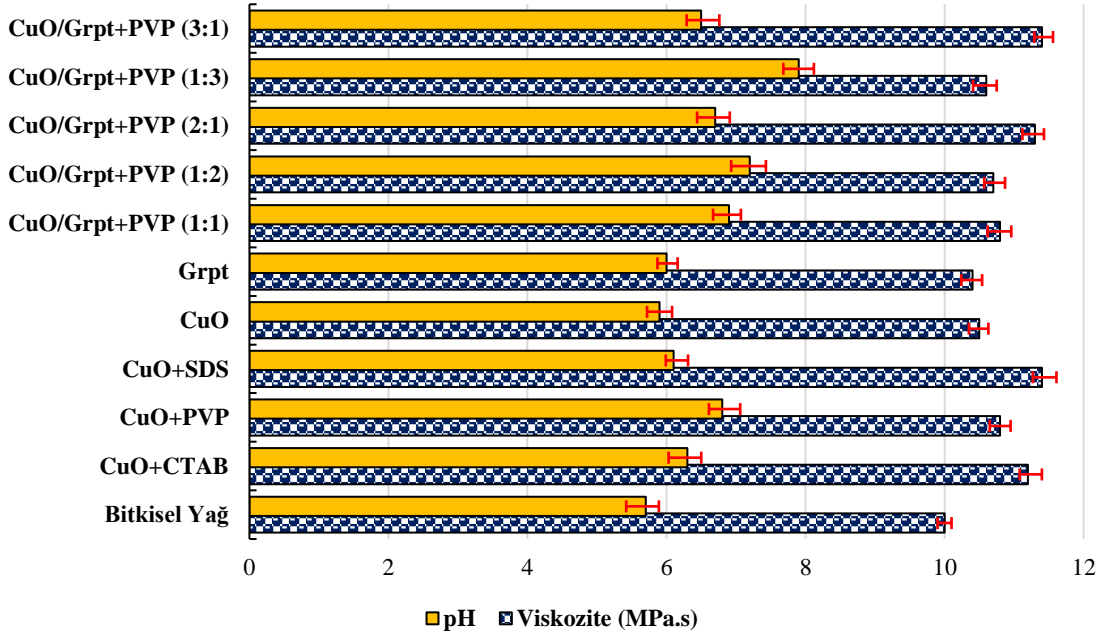
AISI 329 Dupleks paslanmaz malzemesinin, frezeleme operasyonu ile iki aşamalı deneyler gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada gerçekleştirilen deneylerde farklı kesme ve ilerleme hızlarında Taguchi'nin L<sub>9</sub> dikey deney optimizasyonu kullanılarak nanoakışkanlar için optimal yüzey aktif maddesi tespit edilmiştir. Bu aşamada kesme sıcaklıkları, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması sonuçları incelenerek optimum işlenebilirlik değerleri esas alınmıştır. İkinci ve son aşamada ise ilk aşamada elde edilen optimal yüzey aktif maddesi sabit tutularak farklı soğutma teknikleri altında ve farklı konsantrasyon oranlarında yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasının üzerindeki etkileri incelenmiştir.

### 9.1. NANOAKIŞKAN VİSKOZİTE VE pH SONUÇLARI

Kesme bölgesine gönderilen soğutucu/yağlayıcı sıvıların iyi nüfuziyet açısından düşük viskozite değerine sahip olması arzu edilen bir durumdur. Özellikle düşük viskoziteye sahip yağların kullanıldığı MMY sisteminde aerosol sis buharı olduğundan vizkozite son derece önemli bir faktördür. Viskozite esasen direkt olarak akışkanlıkla alakalı bir parametredir ve düşük mertebelerde olması arzu edilir [62]. Nanoakışkan karışımlarda pH ölçümleri karışımın homojenliği konusunda bilgiler vermektedir. pH değeri 9 veya 9 değerine yakın olan karışım daha homojen olarak kabul edilir [62]. Bundan dolayı bu tez çalışmamızda bitkisel esaslı yağ, nanoakışkan, hibrid nanoakışkan ve yüzey aktif madde ekli nanoakışkanların viskozite ve pH ölçümleri yapılarak Şekil 9.1'de verilmiştir.

Şekil 9.1 incelendiğinde en düşük viskozite (10 MPa.s) ve pH (5,7) değerine bitkisel esaslı yağın sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bitkisel esaslı yağa nanopartikül ve yüzey aktif madde eklenmesiyle viskozite ve pH değerlerinde artış olduğu görülmektedir. CuO ve Grpt nanoakışkan viskozite değerleri saf yağa göre %5 ve %4 artış gösterirken, pH değerleri ise saf yağa göre %3,51 ve %5,26 artış göstermiştir. CuO ve Grpt nanopartikülleri ile hazırlanan hibrid nanoakışkanı (CuO/Grpt+PVP) viskozite ve pH değerini saf yağa göre sırasıyla %7 ve %21,05 oranında artış göstermiştir.

CuO/Grpt+PVP hibrid nanoakışkanı, CuO ve Grpt nanoakışkanlarına göre viskozitede %1,9 ve %2,9 artış gösterirken, pH değerlerinde %16,95 ve %15 oranında artış göstermiştir. Meydana gelen bu artışın küresel formulu CuO ve lamel formulu Grpt nanopartiküllerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 9.1. Nanoakışkan viskozite ve pH ölçüm sonuçları.

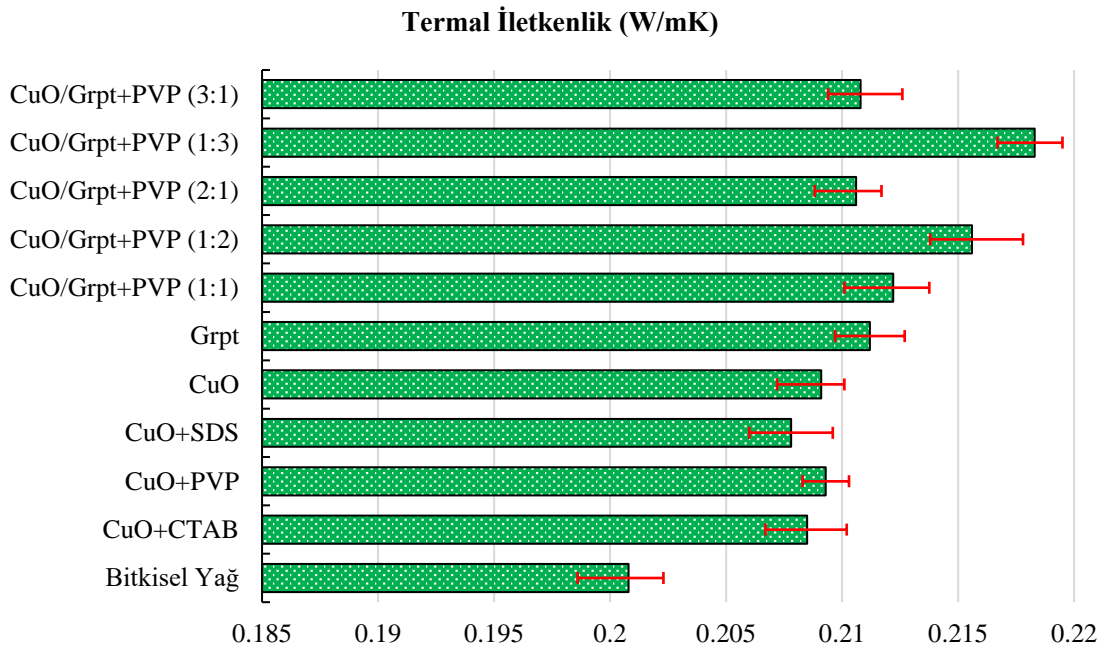
Tüm nanoakışkan koşulları kendi içlerinde kıyaslandığında ise en yüksek viskozite değerine (11,4 MPa.s) CuO/Grpt+PVP (3:1) hibrid nanoakışkanı sahip olurken en yüksek pH değerine (7,9) ise CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanı sahip olmuştur. Bir başka deyişle CuO/Grpt+PVP (3:1) nanoakışkanı viskozite değerini bitkisel yağa göre %11,4 artırırken, CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanı pH değerini bitkisel yağa göre %38,6 artırmıştır. MMY sisteminde kullanılan yağların viskozite değerinin yüksek olması aerosol sis buharı oluşumu verimini azalttığından yüksek viskozite istenmeyen bir durumdur. Ancak pH değeri karışımın stabilitesi hakkında fikir vermektedir. pH 9 değerine yaklaştıkça karışım daha homojen bir hale geldiğinden pH değerinin nispeten yüksek olması aslında istenen bir durumdur [62].

Bitkisel yağa nanopartikül ilavesiyle hem viskozite hem de pH değerleri artış göstermiştir. Nanoakışkan içeriğindeki nanopartiküllerin zayıf Van der Waals bağı ve Brown random kuvveti sayesinde viskozite ve pH değerinde artış gösterdiği ifade edilebilir. CuO ve Grpt nanopartiküllerin birbirine göre farklı şekil ve boyutlara sahip

olduğundan farklı karışım oranlarında farklı viskozite ve pH değerleri göstermektedir [63].

## 9.2. NANOAKIŞKAN TERMAL İLETKENLİK SONUÇLARI

Nanoakışkan hazırlamada kullanılan nanopartiküller, genelde 1-100 nm boyutlarında tercih edilmektedirler [56]. Katı halde nanopartiküllerin yüksek termal iletim katsayılarına sahiptirler. Nanopartiküller eklendikleri karışımların viskozite, pH, yağlayıcılık vb. değerlerini artırmakla kalmayıp aynı zamanda termal iletim katsayısını da artırmaktadırlar [56,58]. Nanopartiküller sıvı içerisinde Brown random ve Van der Waals kuvvetleri sayesinde hem askıda kalabilmekte hem de sürekli hareket edebilmektedirler. Brown random kuvveti akışkan ile nanopartiküller arasında sürekli mikro konveksiyon sayesinde termal iletim katsayısı artış göstermektedir. Van der Waals kuvveti ise askıda bulunan nanopartiküller arasında çekim kuvveti oluşturmaktadır. Karışım içerisindeki nanopartiküllerin Van der Waals kuvveti kuvvetli olduğunda topaklanma ve çökme gibi dezavantajlar oluşabilmektedir [62]. Bu yüzden nanopartiküllerin zayıf Van der Waals kuvveti olması arzu edilen bir durumdur. Bitkisel yağ ve nanoakışkanların termal iletkenlik sonuçları Şekil 9.2’de verilmiştir.

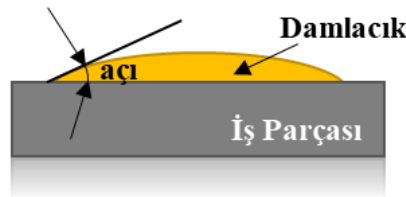


Şekil 9.2. Nanoakışkan termal iletkenlik sonuçları.

Şekil 9.2 termal iletkenlik sonuçları incelendiğinde en düşük termal iletim katsayısı (0,2008 W/mK) bitkisel yağda olurken, nanopartikül ilavesiyle tüm nanoakışkanlarda termal iletim katsayısı artış göstermiştir. CuO ve Grpt nanoakışkanları kendi içinde değerlendirildiğinde sırasıyla 0,2091 W/mK ve 0,2112 W/mK termal iletim katsayılarına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Yani bitkisel yağa göre CuO ve Grpt termal iletkenliği sırasıyla %4,13 ve %5,18 oranında artış göstermiştir. Grpt nanopartikülün sahip olduğu yüksek termal iletim katsayısı ve şekli sayesinde karışım içerisinde daha yüksek termal iletkenlik artışına sahip olduğu düşünülmektedir. En yüksek termal iletkenlik değeri (0,2183 W/mK) CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanında kayıt altına alınmıştır. Bitkisel yağa göre CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanı %8,72 oranında artış göstermiştir. Bu durum, Grpt partiküllerinin sahip olduğu yüksek termal iletim katsayısı, CuO nanopartiküllerinin şekli ve homojen dağılım ile açıklanabilir. Yüzey aktif maddeleri kendi içlerinde değerlendirildiğinde ise CuO nanoakışkanına eklenen CTAB, PVP ve SDS termal iletim katsayısını bitkisel yağa göre %3,83, %4,23 ve %3,48 oranında artırmıştır. Aynı şekilde CuO nanoakışkan içindeki yüzey aktif maddelerinden PVP yüksek pH seviyesine ve düşük viskoziteye (Şekil 8.9) sahiptir. PVP yüzey aktif maddesinin yüksek pH nispeten daha homojen bir dağılım olmasını ve düşük viskozite ise Brownian random kuvvetinin etkin olmasını sağlamıştır. Bu yüzden PVP yüzey aktif maddesi termal iletkenliği diğer yüzey aktif maddelere göre daha fazla artırmış yorumu yapılabilir.

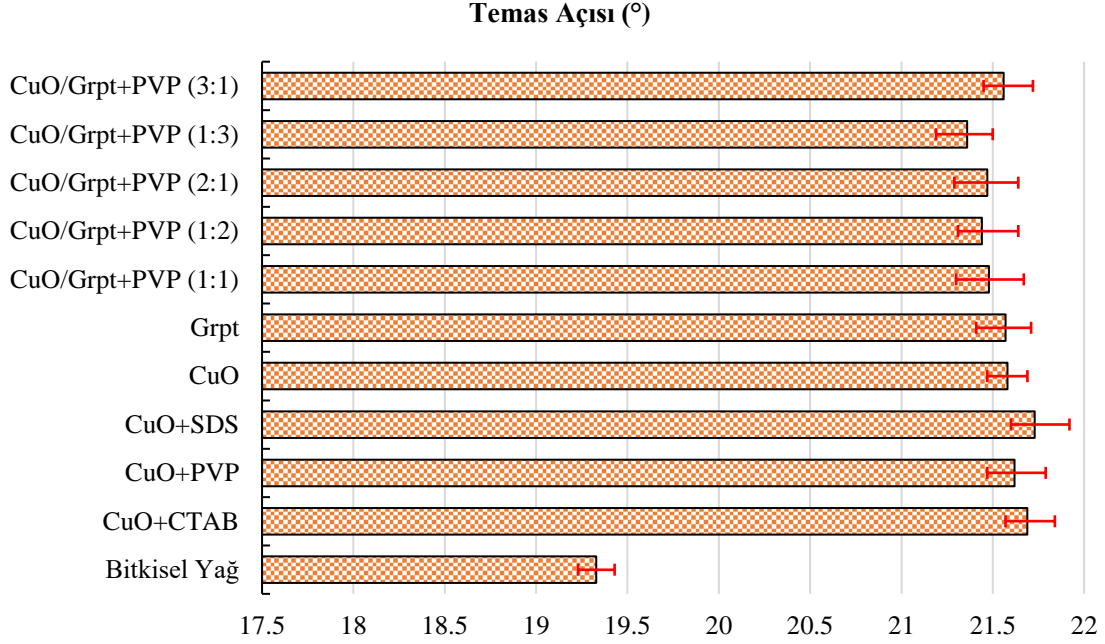
### 9.3. NANOAKIŞKAN DAMLAMA NOKTASI SONUÇLARI

Damlama noktası, ıslanabilirlik kabiliyeti olarak da tanımlanmakla beraber akışkanın yayılma hızını, kesici takım ve iş parçasına nüfuziyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Akışkanın yüzeye hızlı yayılmasıyla birlikte daha düşük temas açısı olmaktadır. Şekil 9.3'te iş parçası ve damlacık arasında oluşan açı ifade edilmiştir.



Şekil 9.3. Temas açısı ölçümü.

MMY sistemi içerisinde aerosol sis buharı kesme bölgesine yani kesici takım-ış parçası-talaş ara yüzeyine tatbik edilmektedir. Sis damlacığı şeklinde kesme bölgesine gönderilen akışkanın damlama noktası veya ıslanabilirlik kabiliyetinin yüksek olması beklenir. Bitkisel yağ ve nanoakışkan karışımların temas açısı ölçüm sonuçları Şekil 9.4'te verilmiştir.



Şekil 9.4. Temas açısı ölçüm sonuçları.

Şekil 9.4 temas açısı sonuçları incelendiğinde bitkisel yağa nanopartikül ve yüzey aktif maddesi eklendiğinde temas açısının artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Bitkisel yağa göre en az artış CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanında olurken en fazla artış ise CuO+SDS nanoakışkanında elde edilmiştir. Bir başka deyişle bitkisel yağa kıyasla CuO/Grpt+PVP hibrid nanoakışkanı ve CuO+SDS nanoakışkanı sırasıyla temas açısını %10,50 ve %12,42 oranında artırmıştır. Temas açısı sonuçları küçükten büyüğe doğru sıralanacak olursa; bitkisel yağ < CuO/Grpt+PVP (1:3) < CuO/Grpt+PVP (1:2) < CuO/Grpt+PVP (2:1) < CuO/Grpt+PVP (1:1) < CuO/Grpt+PVP (3:1) < Grpt < CuO < CuO+PVP < CuO+CTAB < CuO+SDS sonucu elde edilmektedir. Temas açısı ölçüm sonuçları Şekil 8.9 viskozite ölçüm yakın sonuçlar vermektedir. Viskozite değeri düşük olan akışkanın temas açısı değeri düşük dolayısıyla ıslanabilirliği yüksektir yorumu yapılabilir. Benzer şekilde yapılan çalışmalarda bu durum ele alınmış ve temas açısının değişimi viskoziteye atfedilmiştir [64].

## 9.4. YÜZEY AKTİF MADDESİNİN OPTİMİZE EDİLMESİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, hacimce %0,6 oranındaki CuO nanoakışkanına eklenen yüzey aktif maddelerinden kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlüğü ve takım aşınmasına etkileri incelenmiştir. İnceleme sonucunda AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde tribolojik performansı yüksek yüzey aktif maddesi belirlenmiştir. Bu amaçla Taguchi L<sub>9</sub> dikey dizini kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Girdi parametreleri ve faktörleri Çizelge 9.1’de verilmiştir.

Çizelge 9.1. Taguchi L<sub>9</sub> deney tasarımı ve kontrol faktörleri.

Kontrol Faktörleri	Sembol	Birim	Seviyeler		
			1	2	3
Nanoakışkanlar	A	(Yüzey aktif madde)	CTAB	PVP	SDS
Kesme Hızı (Vc)	B	(m/dak)	120	160	200
İlerleme (f)	C	(mm/dev)	0,10	0,15	0,20

### 9.4.1. S/N Oranlarının Analizi

İşlenebilirliği etkileyen en önemli kalite parametrelerinden birisi de yüzey pürüzlülüğüdür. İşleme esnasında kesici takım-iş parçası-talaş arasında, kesme bölgesinde meydana gelen ısı yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bir işleme operasyonunun kalitesini, verimini, kesici takımın ömrünü belirleyen unsurların en önemlisi elde edilmek istenen yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğünün optimize edilmesi amacıyla işleme verimliliği esas alınarak kesme parametrelerinin optimizasyonu amaçlanmaktadır. Taguchi S/N oranlarını kullanarak kontrol faktörlerini optimize etmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıklarına ait S/N oranları Çizelge 9.2’de verilmiştir. Yapılan deneylerde Denklem 9.1’de yer alan “*en küçük en iyidir*” yaklaşımı kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimum seviyeleri belirlenmiştir.

$$n = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (9.1)$$

Frezeleme deneyleri sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra<sub>ort</sub>) 0,456 µm, ortalama S/N oranı ise 6,95845 dB olarak elde edilmiştir. Ortalama kesme sıcaklıkları ise (T<sub>ort</sub>) 142,2 °C, ortalama S/N oranı ise -429,842 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 9.2. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıkları için S/N oranları.

No	A (Yüzey aktif madde)	B Kesme hızı (Vc) (m/dak)	C İlerleme hızı (f) (mm/dev)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) (µm)	Yüzey Pürüzlülüğü S/N Oranı (dB)	Kesme Sıcak. (T) (°C)	Kesme Sıcak. S/N Oranı (dB)
1	CTAB	120	0,10	0,386	8,26825	121	-41,6557
2	CTAB	160	0,15	0,437	7,19037	135	-42,6067
3	CTAB	200	0,20	0,570	4,88250	168	-44,5062
4	PVP	120	0,10	0,399	7,98054	114	-41,1381
5	PVP	160	0,15	0,516	5,74701	135	-42,6067
6	PVP	200	0,20	0,337	9,44740	151	-43,5795
7	SDS	120	0,10	0,556	5,09850	132	-42,4115
8	SDS	160	0,15	0,378	8,45016	153	-43,6938
9	SDS	200	0,20	0,524	5,561337	171	-44,6599

Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıkları üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini belirlemek amacıyla S/N yanıt tablosu kullanılmaktadır. Çizelge 9.3'te analiz sonuçlarına göre elde edilen S/N yanıt tablosu verilmiştir. Optimum yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasını belirlemek amacıyla Taguchi tekniği ile oluşturulan bu tablo, kontrol faktörlerinin optimum seviyelerini göstermektedir. Kontrol faktörleri için en iyi seviye o kontrol faktörünün tüm seviyeleri içerisindeki en büyük S/N oranına göre hesaplanmıştır. Bu hesapla en düşük Ra ve T değerleri için kontrol faktörleri ve seviyeleri sırasıyla A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub> olmuştur.

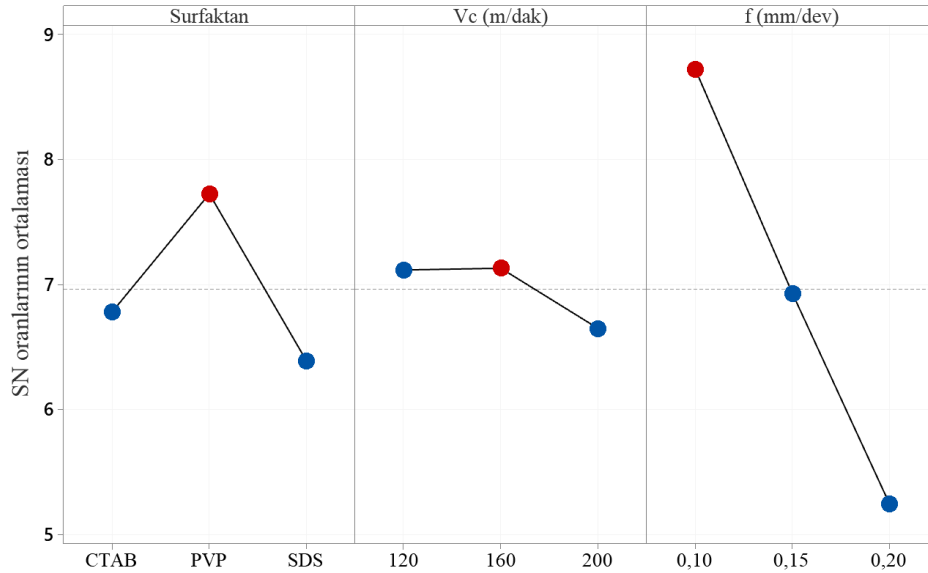
Çizelge 9.3. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıkları için S/N yanıt tablosu.

Seviyeler	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			Kesme Sıcaklıkları (T)		
	Kontrol Faktörleri			Kontrol Faktörleri		
	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>
Seviye 1	0,4643	0,4470	<b>0,3670</b>	141,3	<b>122,3</b>	141,7
Seviye 2	<b>0,4173</b>	<b>0,4437</b>	0,4533	<b>133,3</b>	141,0	<b>140,0</b>
Seviye 3	0,4860	0,4770	0,5473	152,0	163,3	145,0
Delta	0,0687	0,0333	0,1803	18,7	41,0	5,0

Not: \*Koyu ile gösterilen veriler optimum koşulları vermektedir.

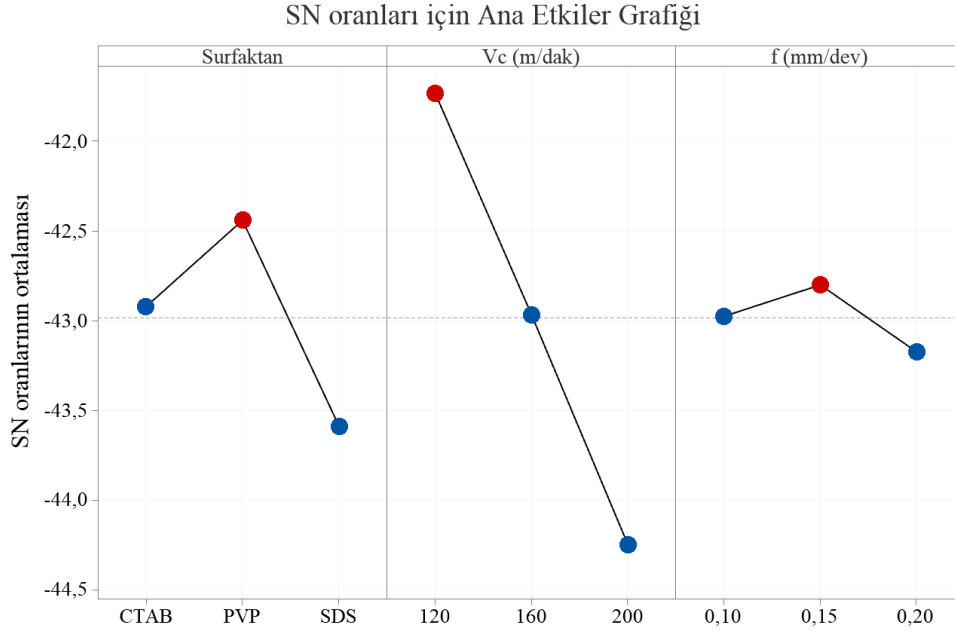
S/N oranları etki grafikleri, yüzey pürüzlülüğü için Şekil 9.5'te kesme sıcaklığı için ise Şekil 9.6'da verilmiştir. Şekil 9.5 incelendiğinde optimum kesme koşulunun PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkanı, 160 m/dak kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme olduğu anlaşılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı sonuçlarına göre PVP yüzey

aktif maddesinin CTAB ve SDS yüzey aktif maddesine göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Bu durum Şekil 9.1-a viskozite ve Şekil 9.2 termal iletkenlik sonuçlarıyla açıklanabilir. Düşük viskoziteli PVP katkılı yüzey aktif maddesi diğer yüzey aktif maddelerine göre kesme bölgesine daha iyi nüfuziyet sağlamıştır. Bu durum ise tribolojik yağlayıcı film oluşumunu daha verimli hale getirerek kesici takım ile iş parçası arasında bariyer görevi görmüştür. Ayrıca Şekil 9.1-b pH sonuçlarına göre PVP daha yüksek değere sahiptir. Yüksek pH değerine sahip PVP yüzey aktif maddesi nispeten homojen dağılım oluşturarak CuO partiküllerinin iş parçası yüzeyine daha iyi yayılmasını sağlamıştır. Şekil 9.4 temas açısı ölçüm sonuçları bu durumu doğrulamaktadır. PVP yüzey aktif maddeli CuO nanoakışkan karışımı CTAB ve SDS katkılı nanoakışkanlara göre daha düşük temas açısını sahip olmakla beraber yüzeye daha iyi dağılım göstermiştir. Şirin ve ark. yaptıkları çalışmada düşük temas açısına sahip yüzey aktif maddesi katkılı nanoakışkanların iş parçası yüzeyine daha iyi yayıldığı ve tribo film yağlayıcı tabakanın daha iyi oluştuğunu ifade etmişlerdir [64].



*Sinyal-gürültü: Daha küçük daha iyidir*

Şekil 9.5. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama S/N oranları.



Sinyal-gürültü: Daha küçük daha iyidir

Şekil 9.6. Kesme sıcaklığı için ortalama S/N oranları grafiği.

Şekil 9.6 kesme sıcaklığı S/N oranları grafiği incelendiğinde ise kesme sıcaklığı için optimum kesme parametreler; PVP yüzey aktif madde katkılı CuO nanoakışkanı, 120 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme olmuştur. Şekil 9.2 termal iletkenlik sonuçlarına göre CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkanları içerisinde en yüksek değere (0,2093 W/mK) PVP sahip olmuştur. Yani PVP, CTAB ve SDS yüzey aktif maddelerine göre %0,38 ve 0,72 oranında artış sağlamıştır. PVP sahip olduğu düşük viskozite ve yüksek termal iletim katsayısı ile kesme sıcaklığını düşürmede etkili olmuştur yorumu yapılabilir. Zira yapılan çalışmalarda termal iletim katsayısı yüksek ve viskozite değeri düşük olan nanoakışkan karışımların kesme sıcaklığını düşürmede daha etkili olduğu belirtilmiştir [65], [66].

#### 9.4.2. Varyans Analizi (ANOVA)

İlk aşamada gerçekleştirilen deneylerde Taguchi L<sub>9</sub> tasarımı kullanılarak, kontrol faktörlerinin (kesme hızı, ilerleme ve yüzey aktif maddesi) yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıkları üzerindeki etki düzeylerini belirlemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için %95 güven aralığında gerçekleştirilen ANOVA analiz sonuçları sırasıyla; Çizelge 9.4 ve Çizelge 9.5'te verilmiştir.

Çizelge 9.4. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu.

Faktörler	DF	Seg SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
A (Yüzey aktif madde)	2	0,007394	12,33	0,007394	0,003697	4,23	0,191
B (Vc)	2	0,002022	3,37	0,002022	0,001011	1,16	0,464
C (f)	2	0,048810	81,38	0,048810	0,024405	27,90	0,035
Hata	2	0,001750	2,92	0,001750	0,000875	-	-
<b>Toplam</b>	<b>8</b>	<b>0,059975</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Çizelge 9.4 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli faktörün %81,38 katkı oranı ile ilerleme olduğu anlaşılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden diğer önemli parametreler ise %12,33 oran ile yüzey aktif madde ve %3,37 oran ile kesme hızı olmuştur. Hata değeri %2,92 olarak düşük mertebelerde gerçekleşmiştir.

Çizelge 9.5. Kesme sıcaklığı için ANOVA tablosu.

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
A (Yüzey aktif madde)	2	526,22	16,75%	526,22	263,11	10,91	0,084
B (Vc)	2	2528,22	80,48%	2528,22	1264,11	52,43	0,019
C (f)	2	38,89	1,24%	38,89	19,44	0,81	0,554
Hata	2	48,22	1,53%	48,22	24,11	-	-
<b>Toplam</b>	<b>8</b>	<b>3141.56</b>	<b>100%</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Çizelge 9.5 kesme sıcaklığı için ANOVA tablosu incelendiğinde, kesme sıcaklığı üzerinde %80,48 oranla en fazla kesme hızının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bunu %16,75 oranla yüzey aktif maddesi ve %1,24 oranla ilerleme takip etmiştir. ANOVA analizi sonucunda ise hata oranı sadece %1,53 düzeylerinde kalmıştır.

### 9.4.3. Doğrulama Deneyi Sonuçları

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülük ve kesme sıcaklığı için optimum parametreler sırasıyla  $A_2B_2C_1$  ve  $A_2B_1C_2$  olarak hesaplanmıştır. Taguchi ile elde edilen optimizasyon sonuçları bazen deney setinin içinde çıkarken bazen de farklı bir parametre olarak çıkabilmektedir. Bu çalışmada optimum parametreler yüzey pürüzlülüğü için deney setinin dışında çıkarken kesme sıcaklığı için deney setinin içinde çıkmıştır. Optimum parametrelerin belirlenmesinde yüzey pürüzlülüğü için Denklem 9.2'den kesme sıcaklığı için Denklem 9.3'ten faydalanılmaktadır.

$$Ra_{optimum} = (A2 - T_{Ra}) + (B2 - T_{Ra}) + (C1 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (9.2)$$

$$T_{optimum} = (A2 - T_T) + (B1 - T_T) + (C2 - T_T) + T_T \quad (9.3)$$

Denklem 9.2 ve Denklem 9.3'te  $A_2B_2C_1$  ve  $A_2B_1C_2$  yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için optimum koşulları,  $T_{Ra}$  ve  $T_T$  ise Çizelge 9.2'de yer alan yüzey pürüzlülük ve kesme sıcaklığı değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Değerler denklemlerde yerlerine konulduğunda,  $Ra_{optimum}$  0,316  $\mu\text{m}$ ,  $T_{optimum}$  111,2  $^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır.

Taguchi ile elde edilen optimum değerlerin ardından gerçekleştirilen doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen değerler, optimizasyon sonuç aralığında olmalıdır. Elde edilen optimum değerler ve doğrulama değerleri sonuçlarının değerlendirilmesinde Denklem 9.4 ve Denklem 9.5 kullanılmaktadır.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1;f_e} \times V_e \times \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (9.4)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + [T_{dof}]} \quad (9.5)$$

Denklem 9.4'te  $F_{\alpha;1;f_e}$ ,  $\alpha$  önem düzeyini,  $f_e$  hata serbestlik derecesini,  $V_e$  varyans hatasını,  $n_{eff}$  deney tekrar sayısını ve  $r$  doğrulama deneyi tekrar sayısını göstermektedir. Denklem 9.5'te ise  $N$  toplam deney sayısını ve  $T_{dof}$  serbestlik düzeyinin toplam ana faktörlerini belirtmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için  $F_{0.05;1;2} = 18,51$  (F test tablosundan faydalanılarak),  $V_e$  yüzey pürüzlülüğü için 0,000875, kesme sıcaklığı için 24,11 olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için  $r = 3$ ,  $N = 9$ ,  $T_{dof} = 6$ ,  $n_{eff} = 1,29$  olarak hesaplanmıştır. Denklem 9.4'te değerler yerlerine konulduğunda Güven Aralığı (CI) yüzey pürüzlülüğü için  $\pm 0,134$ , kesme sıcaklığı için ise  $\pm 22,24$  olarak bulunmuştur. %95 güvenirlikte tahmini ortalama optimal yüzey pürüzlülüğünün güven aralığı için Denklem 9.6'dan, kesme sıcaklığı için Denklem 9.7'den faydalanılarak hesaplanmıştır.

$$[Ra_p] - [CI] < Ra_{deneysel} < [Ra_p] + [CI] \quad (9.6)$$

$$[T_p] - [CI] < Ra_{deneysel} < [T_p] + [CI] \quad (9.7)$$

Denklem 9.6'daki yüzey pürüzlülüğü için değerler yerlerine konulduğunda;

$$[0,316 - 0,134] < 0,326 < [0,316 + 0,134] = [0,182] < \mathbf{0,326} < [0,450]$$

Denklem 9.7'deki kesme sıcaklığı için değerler yerlerine konulduğunda ise;

$$[111,2 - 22,24] < 114 < [111,2 + 22,24] = [88,96] < \mathbf{114} < [133,44] \text{ sonuçlarına ulaşılmaktadır.}$$

Deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü için 0,326  $\mu\text{m}$ , kesme sıcaklığı için 114  $^{\circ}\text{C}$  değerleri güven aralığı değerleri arasında çıkmıştır. Bir başka ifadeyle Taguchi deney tasarımı 0,05 anlamlılık düzeyinde gerçekleşmiştir.

Başarılı bir şekilde uygulanan Taguchi optimizasyonu için elde edilen optimum değerler ve deneysel değerler arasındaki farklar Çizelge 9.6'da verilmiştir.

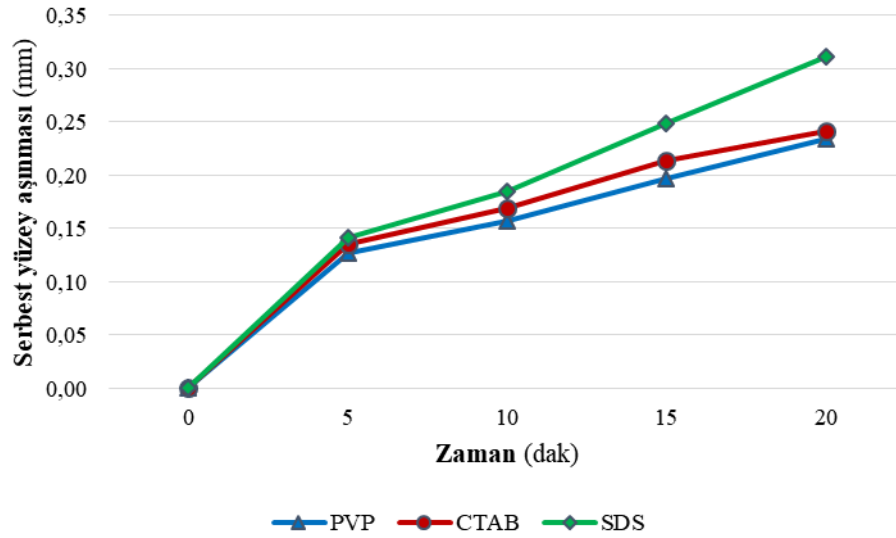
Çizelge 9.6. Deneysel değerler ve tahmini değerler tablosu.

Kaynak	Sonuçlar		Hata
	Deneysel	Tahmini	%
<i>Yüzey pürüzlülüğü</i>			
$A_2B_2C_1$ (optimum)	0,326	0,316	3,07
$A_1B_3C_3$ (rastgele)	0,570	0,577	1,23
<i>Kesme sıcaklığı</i>			
$A_2B_1C_2$ (optimum)	114	111,2	2,46
$A_3B_3C_2$ (rastgele)	171	170,9	0,06

Çizelge 9.6 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü için yapılan doğrulama deneyi ve tahmini değerleri arasındaki fark %3,07 mertebelerinde kalırken, kesme sıcaklığı için yapılan doğrulama deneyi ve tahmini değerleri arasındaki fark %2,46 mertebelerinde kalmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için rastgele seçilen seviyeler arasındaki fark ise sırasıyla %1,23 ve %0,06 düzeyindedir. Bir başka deyişle sonuçlardan yola çıkılarak optimizasyonun başarılı olduğu ifade edilebilir.

#### 9.4.4. Kesici Takım Ömrü ve Aşınma Sonuçları

Yüzey aktif maddelerinin tribolojik performans değerlendirilmesinde yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı deneyleri Taguchi L<sub>9</sub> tasarımına göre gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde yüzey aktif maddeleri aynı parametrelerde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için benzer koşulları olmadığından, kesici takım aşınma deneyleri kesme parametrelerinin aritmetik ortalamaları (160 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme) kullanılarak sabit koşullarda yürütülmüştür. Kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin (0,5 mm) sabit alındığı çalışmada 20 dakika süreyle takım ömrü deneyleri yapılmıştır. Her beş dakikalık sürelerde takım serbest yüzey aşınması ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneyler PVP, CTAB ve SDS yüzey aktif madde katkılı CuO nanoakışkan koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinden elde edilen kesici takım ömür sonuçları Şekil 9.7’de verilmiştir.

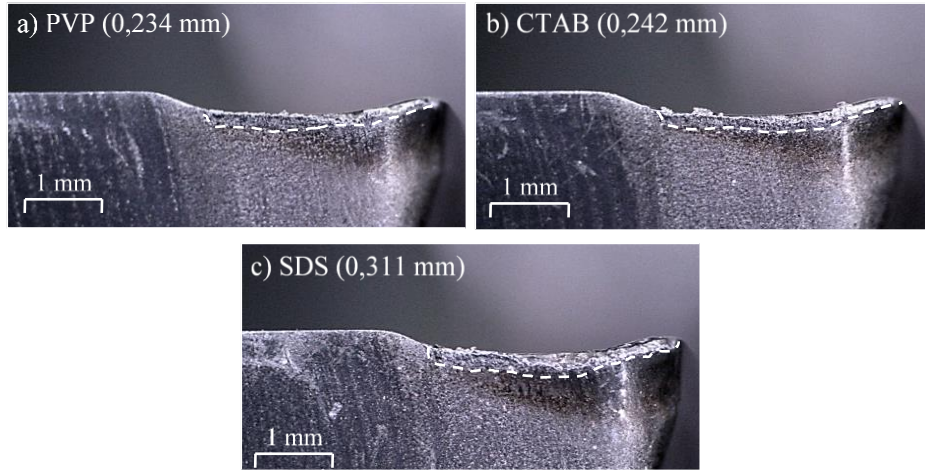


Şekil 9.7. Kesici takım ömür sonuçları.

AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğine 20 dakika frezeleme işlemi sonrasında PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkan koşulunda kesici takım serbest yüzeyi 0,234 mm aşınırken, CTAB ve SDS yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkan koşullarında sırasıyla 0,242 mm ve 0,311 mm aşınmıştır. Bir başka ifadeyle PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkanı, CTAB ve SDS yüzey aktif maddesi katkılarına göre kesici takım serbest yüzey aşınmasını sırasıyla %3,3 ve %27,8 oranlarında azaltmıştır. Kesici takım serbest yüzeylerde meydana gelen aşınma sonuçları Şekil 9.5 yüzey pürüzlülüğü

ve Şekil 9.6 kesme sıcaklığı sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. CTAB ve SDS yüzey aktif maddelerine göre PVP yüzey aktif maddesinin yüksek pH değerine sahip olması sayesinde (Şekil 8.9-b) daha homojen bir karışım sağlanmıştır. Bu da kesme bölgesine iyi nüfuziyetle birlikte, istenmeyen çökeltme ve topaklanmayı azaltmasıyla takım aşınmasını bir miktar düşürmüştür.

Şekil 9.8’de farklı yüzey aktif madde koşulları altında kesici takım serbest yüzey aşınma görüntüleri verilmiştir.



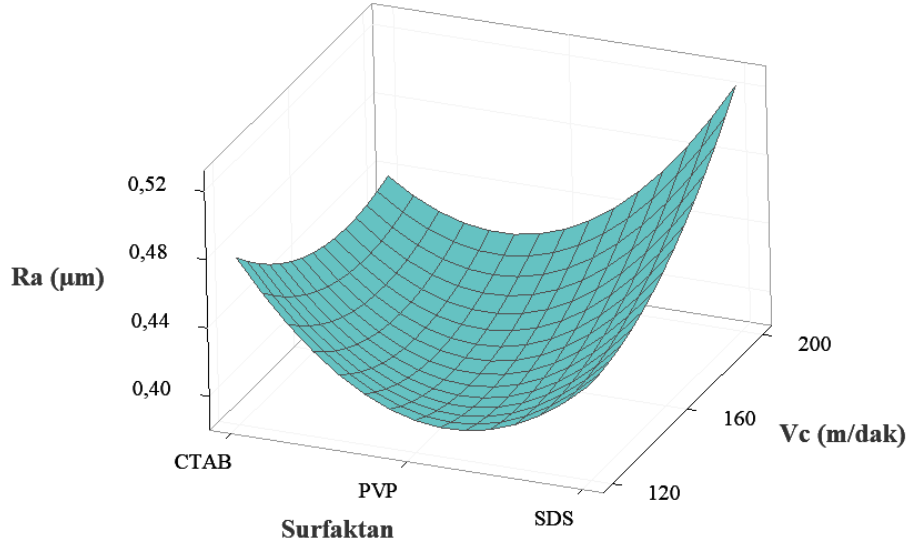
Şekil 9.8. Kesici takım serbest yüzey aşınma görüntüleri.

Şekil 9.8 incelendiğinde PVP ve CTAB yüzey aktif madde koşullarında serbest yüzey aşınmasının düzgün şekilde devam ettiği görülmektedir. SDS yüzey aktif maddesi koşulunda ise serbest yüzey aşınmasıyla birlikte takımda kopmaların meydana geldiği ve 0,3 mm (ISO 3685’e göre) eşik değerinin aşıldığı görülmektedir. Şekil 9.4 temas açısı ölçüm sonuçlarında en CTAB ve SDS yüzey aktif maddelerine göre PVP yüzey aktif maddesi nispeten daha iyi performans göstermiştir. Kesici takım ve iş parçası yüzeylerine daha verimli yayılan PVP yüzey aktif maddeli CuO nanoakışkanı, kesici takım aşınma hızını azaltmıştır yorumu yapılabilir.

#### 9.4.5. Deneysel Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Gerçekleştirilen ilk aşama deneylerinde amaç çalışmalarda sıkça tercih edilen; CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddelerinin tribolojik açıdan performanslarının incelenmesidir. Bir başka ifadeyle ikinci aşamada gerçekleştirilecek deneylerde girdi parametresinin oluşturulmasına çalışılmıştır. Gerçekleştirilen frezeleme deneyleri sonrasında yüzey aktif maddesi, kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıkları

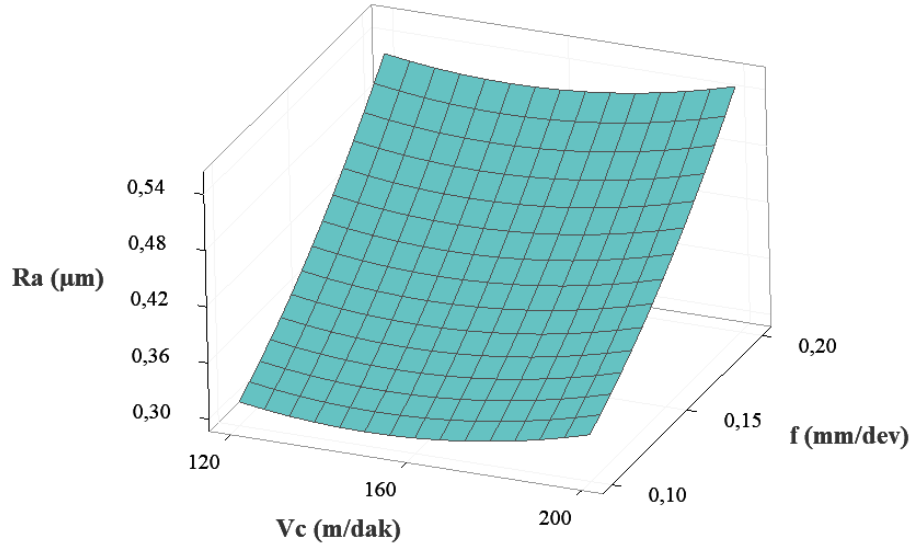
üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüzey aktif madde-kesme hızı yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği Şekil 9.9'da, kesme hızı-ilerleme yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği Şekil 9.10'da verilmiştir.



Şekil 9.9. Yüzey aktif madde-kesme hızı yüzey pürüzlülüğü değişimi.

Şekil 9.9 incelendiğinde PVP yüzey aktif maddesinin CTAB ve SDS yüzey aktif maddelerine göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere; PVP yüzey aktif maddeli CuO nanoakışkan, CTAB ve SDS yüzey aktif maddelerine göre düşük viskoziteye (Şekil 9.1-a), yüksek pH'a (Şekil 9.1-b) ve yüksek termal iletkenlik katsayısına (Şekil 9.2) sahiptir. Düşük viskozite kesme bölgesinde daha iyi nüfuziyete, yüksek pH kararlı homojen dağılıma ve yüksek termal iletkenlik katsayısı ise kesme bölgesinde ısı iletimin hızlı olmasına işaret etmektedir. Dolayısıyla PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkan koşulunda diğer koşullara göre yüksek performans elde edilmiştir. Kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğü değerlerinin önce azalmasına, kesme hızının daha da artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kötüleşmesine neden olmuştur. Kesme hızının 120 m/dak'dan 160 m/dak değerine artmasıyla kesme bölgesindeki sıcaklık artmakta, artan sıcaklık ile birlikte kesici takım ucunda yığıntı talaşın sertlik ve dayanımı azalarak operasyon sürecinde talaş tahliyesi kolay olmaktadır. Ancak kesme hızının 160 m/dak'dan 200 m/dak değerine artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermektedir. Kesme hızının daha da artmasıyla kesme sıcaklığı artmakta ve kesici takım ucundaki yığıntı talaşlar sertleşerek kesici takımında muhtemel hasarlara neden

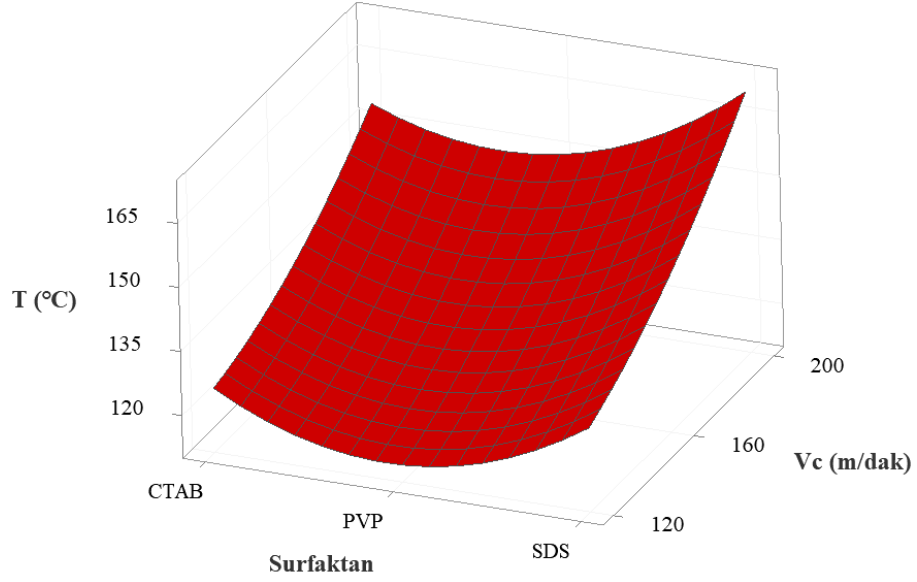
olabilmektedir [75]. Benzer durumun bu tez çalışmasında da olduğu düşünülmekte olup kesme hızının artması ilk önce yüzey pürüzlülüğü azaltmış, kesme hızının artış göstermeye devam etmesiyle yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermeye başlamıştır.



Şekil 9.10. Kesme hızı-ilerleme yüzey pürüzlülüğü değişimi.

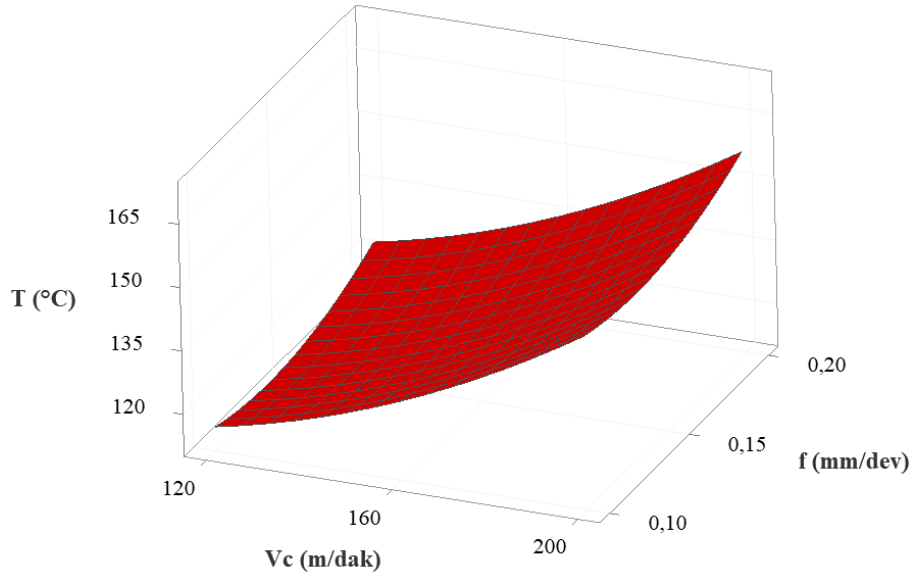
Şekil 9.10 incelendiğinde ilerlemenin artış göstermesiyle yüzey pürüzlülüğü değerlerinde hızlı bir artış meydana gelmektedir. Çizelge 9.4 yüzey pürüzlülüğü ANOVA tablosunda yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin %81,38 oran ile ilerleme olduğu görülmektedir. Bu noktadan hareketle yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızına göre ilerleme daha etkin rol oynamaktadır yorumu yapılabilir. İlerlemenin artması kesici takıma etkileyen kesme kuvveti değerlerinde artışa sebebiyet vermektedir. İlerleme değerinin artışıyla kesici takım iş parçası yüzeylerinde proses süresince daha fazla ilerlemesine neden olmakta ve frezeleme izlerinin artış göstermesi nedeniyle Ra yüzey pürüzlülüğü değerlerinde de artışa neden olmuştur [76].

Kesme sıcaklığı sonuçları için; yüzey aktif maddesi-kesme hızı kesme sıcaklığı değişimi Şekil 9.11’de, kesme hızı-ilerleme kesme sıcaklığı değişimi Şekil 9.12’de verilmiştir.



Şekil 9.11. Yüzey aktif maddesi-kesme hızı kesme sıcaklığı değişimi.

Şekil 9.11 incelendiğinde en düşük kesme sıcaklığı değerinin CTAB ve SDS yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkanına göre PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkanında elde edildiği anlaşılmaktadır. Bu durum Şekil 9.2 termal iletkenlik ölçüm sonuçları ile açıklanabilir. PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkanın CTAB ve SDS yüzey aktif madde katkılarına göre daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Yüksek termal iletim katsayısı ise kesme bölgesinden ısının hızlı tahliye edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu yüzden PVP koşulunda düşük kesme sıcaklıkları elde edilmiştir. Kesme hızının artmasıyla kesme sıcaklığı değerlerinin sürekli arttığı görülmektedir. Kesme hızındaki artışla kayma düzlemi bölgesinde şekil değişim hızı artış gösterdiğinden, kesme bölgesinde sıcaklık değerleri artış göstermektedir [77].

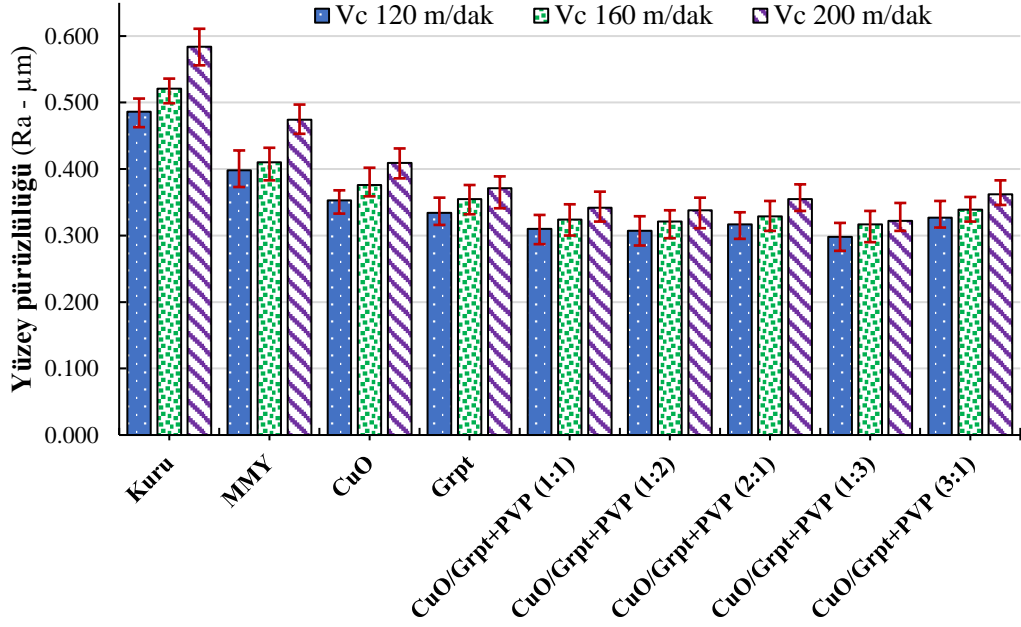


Şekil 9.12. Kesme hızı-ilerleme kesme sıcaklığı değişimi.

Şekil 9.12 kesme hızı-ilerleme kesme sıcaklığı grafiği incelendiğinde; kesme hızı ve ilerlemenin artmasıyla kesme sıcaklığı değerlerinin de artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Çizelge 9.5 kesme sıcaklığı için ANOVA tablosu incelendiğinde, kesme sıcaklığı için en etkili parametrenin %80,48 oranla kesme hızı olduğu görülmektedir.

## 9.5. NANOAKIŞKAN KARIŞIM ORANLARININ OPTİMİZE EDİLMESİ

Tez çalışmasının ilk aşamasında Taguchi L<sub>9</sub> tasarımı ile optimum yüzey aktif maddesi belirlenmişti. Bu ikinci aşamada ise ilk aşamadan elde edilen optimum PVP yüzey aktif maddesi kullanılmıştır. Hacimce %0,6 oranında CuO ve Grpt nanopartikülleri kullanılarak farklı oranlarda (1:1, 1:2, 2:1, 1:3 ve 3:1) hibrid nanoakışkan karışımlar hazırlanmıştır. Deneyler tam deney tasarımı gerçekleştirilmiş olup, Kuru, MMY, CuO, Grp ve farklı oranlarda CuO/Grpt (1:1, 1:2, 2:1, 1:3 ve 3:1) hibrid nanoakışkan koşulları altında, üç farklı kesme hızında (120, 160 ve 200 m/dak), sabit ilerlemede (0,1 mm/dev) ve sabit kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Soğutma koşullarının farklı kesme hızlarına göre yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği Şekil 9.13'te verilmiştir.



Şekil 9.13. Soğutma koşullarının farklı kesme hızına göre yüzey pürüzlülüğü değişimi.

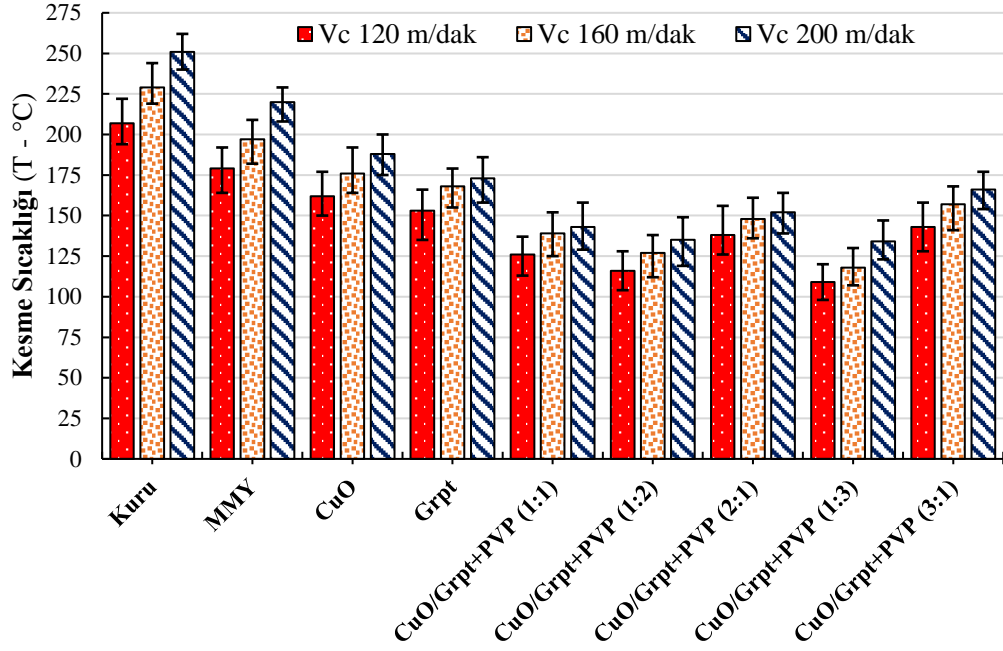
Şekil 9.13 incelendiğinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerinin kuru koşulda ve 200 m/dak kesme hızında, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin ise CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid koşulda ve 120 m/dak kesme hızında elde edildiği anlaşılmaktadır. Bir başka ifadeyle kuru koşula göre CuO/Grpt+PVP (1/3) hibrid koşulu yüzey pürüzlülüğünü %48,97 oranında azaltmıştır. Grafik incelenmeye devam edildiğinde kuru koşula göre tüm koşullarda yüzey pürüzlülüğünde iyileşme görülmüştür. Kuru koşula kıyasla 120 m/dak kesme hızında MMY, CuO, Grpt, CuO/Grpt+PVP (1:1), CuO/Grpt+PVP (1:2), CuO/Grpt+PVP (2:1), CuO/Grpt+PVP (1:3) ve CuO/Grpt+PVP (3:1) koşullarının yüzey pürüzlülüğü sırasıyla %18,11, %27,37, %31,28, %36,21, %36,83, %34,77, %38,68 ve %32,72 oranında azaltmıştır. Artış oranına göre büyükten küçüğe doğru sıralandığında ise; CuO/Grpt+PVP (1:3) > CuO/Grpt+PVP (1:2) > CuO/Grpt+PVP (1:1) > CuO/Grpt+PVP (2:1) > CuO/Grpt+PVP (3:1) > Grpt > CuO > MMY > kuru şeklinde sonuca ulaşılmaktadır. Benzer trend 120, 160 ve 200 m/dak kesme hızlarında da meydana gelmiştir. Kesme hızındaki artış yüzey pürüzlülüğü değerlerini artırmıştır. Örneğin; kuru koşulda 120 m/dak kesme hızında yüzey pürüzlülüğü 0,486  $\mu\text{m}$  mertebelerinde iken 160 m/dak kesme hızında 0,521  $\mu\text{m}$  ve 200 m/dak kesme hızında ise 0,584  $\mu\text{m}$  olarak kaydedilmiştir. Yani kuru koşulda 120 m/dak kesme hızı, 160 m/dak kesme hızına artırıldığında yüzey pürüzlülüğü %7,20 oranında artarken, 200 m/dak kesme hızına

artırıldığında yüzey pürüzlülüğü %20,16 oranında artış göstermiştir. MMY koşuluna göre tüm nanoakışkan koşullarında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. MMY sisteminde akışkan içerisine eklenen nanopartiküllerin yüzey kalitesini artırdığı literatürde yer alan çalışmalarda ifade edilmiştir [62], [67], [68].

Tek başlarına üstün yağlayıcılık ve yüksek ısı iletim katsayısına sahip nanopartiküller eklendikleri karışımın yağlayıcılık özelliğine katkı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda gösterdiği bazı nanopartikül mekanizmalarıyla kesme sıcaklığını azaltma, kesici takım aşınmasını geciktirme gibi özellikler de sergilemektedirler. Nanopartiküller nanoakışkan içerisinde tamir etkisi, parlatma etkisi, dönme etkisi, tribo film oluşumu, tabakalar arası kayma etkisi ve hibrid nanopartikül etkisi olmak üzere farklı mekanizmalar göstermektedirler [69]–[72]. Tamir etkisi ile iş parçasında yer alan mikro çatlaklara yerleşen nanopartiküller kesici takımın ani hasarını engellemekte kesici takım aşınma mekanizmalarının gelişimini geciktirmektedirler. Ayrıca yuvarlanma etkisiyle kesici takım-iş parçası arayüzlerinde sürtünme kaynaklı teması minimum seviyeye indirerek yüzey deformasyonunu azaltmaktadırlar. Tüm bu mekanizmalar sayesinde nanoakışkan koşulları MMY sistemine son derece önemli pozitif katkılar sağlamaktadır yorumu yapılabilir.

Hibrid nanoakışkan koşullarında Grpt katkı oranının artmasıyla yüzey kalitesinde iyileşmelerin olduğu Şekil 9.13'te görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü değeri CuO/Grpt+PVP (1:1) koşulunda 0,310  $\mu\text{m}$  mertebesinde iken, CuO/Grpt+PVP (1:2) koşulunda 0,307  $\mu\text{m}$  ve CuO/Grpt+PVP (1:3) koşulunda 0,298  $\mu\text{m}$  mertebelerine kadar gerilemiştir. Bir başka ifadeyle yüzey pürüzlülüğü değeri 1:1 oranına göre (hacimce %0,3 CuO + 0,3 Grpt) 1:2 (hacimce %0,2 CuO + 0,4 Grpt) ve 1:3 (hacimce %0,15 CuO + 0,45 Grpt) oranlarında sırasıyla %0,97 ve %3,87 azalma eğilimi göstermiştir. Bu durum katı haldeki Grpt nanopartikül yoğunluğunun CuO nanopartikül yoğunluğundan daha düşük mertebelerde olduğundan (Çizelge 8.) meydana geldiği düşünülmektedir. Bu durumu Şekil 9.1-a viskozite ölçüm sonuçları destekler niteliktedir. Viskozite değeri CuO/Grpt+PVP (1:3) koşulunda diğer koşullara göre düşük mertebelerde ölçülmüştür.

Aynı şekilde kesme sıcaklığı sonuçları da yüzey pürüzlülük sonuçlarıyla paralel sonuçlara sahiptir. Soğutma koşullarının farklı kesme hızlarına göre meydana gelen kesme sıcaklığı değişimleri Şekil 9.14'te verilmiştir.



Şekil 9.14. Soğutma koşullarının farklı kesme hızlarına göre kesme sıcaklık değişimi.

Şekil 9.14 kesme sıcaklığı sonuçları irdelendiğinde en yüksek değer kuru koşulda (251 °C) ve 200 m/dak kesme hızında olduğu, en düşük değer ise CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkan koşulda (109 °C) olduğu anlaşılmaktadır. Dahası kuru koşula göre CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkan koşulu kesme sıcaklığını %56,57 oranında azaltmıştır denilebilir. Bu durum hibrid olarak eklenen küresel formulu CuO (Şekil 8.6-a) nanopartiküllerinin lamel formulu Grpt (Şekil 8.6-b) nanopartikülleri arasında yuvarlanması sayesinde sürtünme kaynaklı ısı artışına bariyer oluşturmasıyla açıklanabilir. Termal iletim katsayı ölçümleri Şekil 9.2 incelendiğinde ise 0,2183 W/mK ile en yüksek katsayı değerinin CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkan koşulunda olduğu görülmektedir. Farklı üstün özellikleri olan CuO ve Grpt nanopartiküllerin bir arada optimum konsantrasyon ile birleşmesi bu durumu sağlamıştır yorumu yapılabilir. Benzer şekilde termal iletim katsayısı yüksek olan nanopartiküllerin kesme bölgesindeki ısı oluşumları hızlı tahliye ettiği literatürde bahsedilmiştir [64], [69], [73].

## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 10.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğine iki aşamalı olarak frezeleme işlemi uygulanmıştır. İlk aşamada, deneyler nanoakışkan karışımlarda kullanılan CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddeleriyle hazırlanan hacimce %0,6 CuO nanoakışkan koşullar altında ve Taguchi L<sub>9</sub> deney tasarımına göre gerçekleştirilmiştir. Girdi parametresi olarak üç farklı nanoakışkan koşulu (CTAB, PVP ve SDS katkılı CuO nanoakışkanları), üç farklı kesme hızı (120, 160 ve 200 m/dak) ve üç farklı ilerleme (0,10, 0,15 ve 0,20 mm/dev) seçilmiştir. İlk aşama sonunda elde edilen sonuçlara göre ikinci aşama deneylerine geçilmiştir. İlk aşama sonunda PVP yüzey aktif maddesi kullanılarak CuO ve Grpt nanopartikülleriyle farklı karışım oranlarında mono ve hibrid (1:1, 1:2, 2:1, 1:3 ve 3:1) karışımlar hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, kesici takım yanak aşınması performans kriteri olarak belirlenmiştir. Yapılan bu tez çalışması sonunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Hazırlanan nanoakışkan karışımlarda en düşük viskozite (10 MPa.s) ve pH (5,7) değeri beklendiği üzere bitkisel yağda ölçülmüştür. Bitkisel esaslı yağa nanopartikül ve yüzey aktif madde eklenmesiyle viskozite ve pH değerlerinde artış olduğu görülmektedir. CuO ve Grpt nanoakışkan viskozite değerleri saf yağa göre %5 ve %4 artış gösterirken, pH değerleri ise saf yağa göre %3,51 ve %5,26 artış göstermiştir. CuO ve Grpt nanopartikülleri ile hazırlanan hibrid nanoakışkanı (CuO/Grpt+PVP) viskozite ve pH değerini saf yağa göre sırasıyla %7 ve %21,05 oranında artış göstermiştir.
- En düşük termal iletim katsayısı (0,2008 W/mK) bitkisel yağda olurken, nanopartikül ilavesiyle tüm nanoakışkanlarda termal iletim katsayısı artış göstermiştir. CuO ve Grpt nanoakışkanları kendi içinde değerlendirildiğinde sırasıyla 0,2091 W/mK ve 0,2112 W/mK termal iletim katsayılarına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Yani bitkisel yağa göre CuO ve Grpt termal iletkenliği sırasıyla %4,13 ve %5,18 oranında artış göstermiştir. Grpt nanopartikülün sahip olduğu

yüksek termal iletim katsayısı ve şekli sayesinde karışım içerisinde daha yüksek termal iletkenlik artışına sahip olduğu düşünülmektedir. En yüksek termal iletkenlik değeri (0,2183 W/mK) CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanında kayıt altına alınmıştır. Bitkisel yağa göre CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanını %8,72 oranında artış göstermiştir.

- Bitkisel yağa nanopartikül ve yüzey aktif maddesi eklendiğinde temas açısının artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Bitkisel yağa göre en az artış CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkanında olurken en fazla artış ise CuO+SDS nanoakışkanında elde edilmiştir. Bir başka deyişle bitkisel yağa kıyasla CuO/Grpt+PVP hibrid nanoakışkanını ve CuO+SDS nanoakışkanını sırasıyla temas açısını %10,50 ve %12,42 oranında artırmıştır. Temas açısı sonuçları küçükten büyüğe doğru sıralanacak olursa; bitkisel yağ < CuO/Grpt+PVP (1:3) < CuO/Grpt+PVP (1:2) < CuO/Grpt+PVP (2:1) < CuO/Grpt+PVP (1:1) < CuO/Grpt+PVP (3:1) < Grpt < CuO < CuO+PVP < CuO+CTAB < CuO+SDS sonucu elde edilmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme koşulunun PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkanını, 160 m/dak kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme olmuştur. Kesme sıcaklığı için optimum kesme parametreler; PVP yüzey aktif madde katkılı CuO nanoakışkanını, 120 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme olmuştur. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı sonuçlarına göre PVP yüzey aktif maddesinin CTAB ve SDS yüzey aktif maddesine göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir.
- ANOVA sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli faktörün %81,38 katkı oranı ile ilerleme olduğu anlaşılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden diğer önemli parametreler ise %12,33 oran ile yüzey aktif madde ve %3,37 oran ile kesme hızı olmuştur. Kesme sıcaklığı üzerinde %80,48 oranla en fazla kesme hızının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bunu %16,75 oranla yüzey aktif maddesi ve %1,24 oranla ilerleme takip etmiştir.
- AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğine 20 dakika frezeleme işlemi sonrasında PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkan koşulunda kesici takım serbest yüzeyi 0,234 mm aşırken, CTAB ve SDS yüzey aktif maddesi katkılı CuO

nanoakışkan koşullarında sırasıyla 0,242 mm ve 0,311 mm aşınmıştır. Bir başka ifadeyle PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkanı, CTAB ve SDS yüzey aktif maddesi katkılarına göre kesici takım serbest yüzey aşınmasını sırasıyla %3,3 ve %27,8 oranlarında azaltmıştır.

Gerçekleştirilen ilk aşama deneylerinde amaç çalışmalarda sıkça tercih edilen; CTAB, PVP ve SDS yüzey aktif maddelerinin tribolojik açıdan performansların incelenmesidir. Bir başka ifadeyle ikinci aşamada gerçekleştirilecek deneylerde girdi parametresinin oluşturulmasına çalışılmıştır. PVP yüzey aktif maddesi katkılı CuO nanoakışkan koşulunda diğer koşullara göre yüksek performans elde edilmiştir.

İkinci aşamada gerçekleştirilen tez çalışması sonucunda ise aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- İkinci aşamada ise ilk aşamadan elde edilen optimum PVP yüzey aktif maddesi kullanılmıştır. Hacimce %0,6 oranında CuO ve Grpt nanopartikülleri kullanılarak farklı oranlarda (1:1, 1:2, 2:1, 1:3 ve 3:1) hibrid nanoakışkan karışımlar hazırlanmıştır. Deneyler tam deney tasarımı gerçekleştirilmiş olup, Kuru, MMY, CuO, Grp ve farklı oranlarda CuO/Grpt (1:1, 1:2, 2:1, 1:3 ve 3:1) hibrid nanoakışkan koşulları altında, üç farklı kesme hızında (120, 160 ve 200 m/dak), sabit ilerlemede (0,1 mm/dev) ve sabit kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir.
- En yüksek yüzey pürüzlülüğü değerinin kuru koşulda ve 200 m/dak kesme hızında, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin ise CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid koşulda ve 120 m/dak kesme hızında elde edildiği anlaşılmaktadır. Bir başka ifadeyle kuru koşula göre CuO/Grpt+PVP (1/3) hibrid koşulu yüzey pürüzlülüğünü %48,97 oranında azaltmıştır. Kuru koşula kıyasla 120 m/dak kesme hızında MMY, CuO, Grpt, CuO/Grpt+PVP (1:1), CuO/Grpt+PVP (1:2), CuO/Grpt+PVP (2:1), CuO/Grpt+PVP (1:3) ve CuO/Grpt+PVP (3:1) koşullarının yüzey pürüzlülüğü sırasıyla %18,11, %27,37, %31,28, %36,21, %36,83, %34,77, %38,68 ve %32,72 oranında azaltmıştır.
- Kesme sıcaklığı sonuçları irdelendiğinde en yüksek değer kuru koşulda (251 °C) ve 200 m/dak kesme hızında olduğu, en düşük değer ise CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkan koşulda (109 °C) olduğu anlaşılmaktadır. Dahası kuru koşula göre CuO/Grpt+PVP (1:3) hibrid nanoakışkan koşulu kesme sıcaklığını

%56,57 oranında azaltmıştır denilebilir.

## 10.2. ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında AISI 329 dubleks paslanmaz çeliği farklı nanoakışkan koşulları altında frezelenmiştir. İki aşamalı gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçlar yukarıdaki bölümlerde bahsedilmiştir. Çalışmadan farklı olarak bundan sonraki çalışmalarda yapılabilecekler öneriler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- AISI 329 paslanmaz çeliğin farklı operasyonlarla (tornalama, delme vb.) işlenebilirliği incelenebilir.
- MMY sistemine ek olarak kriyojenik koşullarla (sıvı CO<sub>2</sub>, LN<sub>2</sub> vb.) hibrid olarak denenebilir.
- Nanopartikül olarak farklı formlu, geometriye sahip nanopartiküller kullanılabilir.
- CTAB, PVP ve SDS dışında farklı bir yüzey aktif maddesi kullanılarak deneyler tekrar edilebilir.
- Farklı kesici takımlar kullanılarak çalışmanın kapsamı genişletilebilir.

## 11. KAYNAKLAR

- [1] A. Mavi ve G. Uzun, "Dubleks 1.4462 Paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerine etkisi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 5, sayı 3, ss. 177-184, 2017.
- [2] F. Memiş ve Y. Turgut, "AISI 2205 Dupleks paslanmaz çeliğin cnc torna tezgâhında işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin deneysel araştırılması," *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, c. 1, sayı 1, ss. 22-33, 2020.
- [3] T. Çetin, "Dubleks paslanmaz çeliğin Ni<sub>3</sub>Al ile kaplanabilirliğinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Metalurji Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye, 2014.
- [4] E. Çelik, "AISI 2507 Süper dupleks paslanmaz çeliğin tornalanmasında hibrid soğutma/yağlama tekniklerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi," Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.
- [5]. H. Yalılı, "AISI 904L Paslanmaz çeliğin MQL yöntemi kullanılarak tornalanmasında nanografen katkılı kesme yağının işleme performansı üzerindeki etkisi," Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [6] A. Aytürk, "AISI 316 Ti Paslanmaz çeliğin işlenmesinde kesici uç geometrisinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi," Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [7] T. Yıldız, "Paslanmaz çeliklerin frezelenmesinde minimum miktarda yağlama etkisinin istatistiksel olarak araştırılması," Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.
- [8] D. Yıldırım, "2205 Dupleks paslanmaz çelik ile S355J2 genel yapı çeliğinin birleştirilebilirliğinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2018.
- [9] O. Öndin, "PH 13-8 MO çeliğinin tornalanmasında MQL sisteminde kullanılan bitkisel esaslı kesme yağına çok duvarlı karbon nanotüp ilavesinin işleme çıktıları üzerindeki etkisi," Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.
- [10] E. Çelik, "Martenzitik paslanmaz çelik ve ferritik paslanmaz çeliğin kendileriyle ve birbirleriyle sürtünme karıştırma yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Metalurji Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye, 2006.
- [11] U. Delice, "1,4462 Dupleks paslanmaz çelik malzemelerin nikel ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi," Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, Türkiye, 2021.

- [12] N. Tekin, "Paslanmaz çelik malzeme ile düşük karbonlu alaşımsız çelik malzemelerin tozaltı kaynak metodu ile birleştirilmesi," Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [13] Y. Yürekli, "Frezeleme işleminde eş yönlü ve ters yönlü talaş kaldırmanın CVD/PVD kaplanmış sert metal uçların ömrüne etkisi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [14] F. Günan, "Hastelloy C276 alaşımının frezelenmesinde minimum miktarda yağlamanın yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.
- [15] A. Şah, "Frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve kesme enerjisine etkisinin Taguchi metodu ile optimizasyonu," Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye, 2018.
- [16] C. Y. Nian, W. H. Yang ve Y. S. Tarng, "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 95, sayı 1-3, ss. 90-96, 1999.
- [17] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*, New York, ABD: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [18] E. Canıyılmaz, "Kalite geliştirmede Taguchi metodu ve bir uygulama," Yüksek lisans tezi, Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2001.
- [19] Y. T. İç ve S. Yıldırım, "Çok kriterli karar verme yöntemleriyle birlikte Taguchi yöntemini kullanarak bir ürünün tasarımının geliştirilmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 27, sayı 2, ss. 447-458, 2012.
- [20] B. Gökçe ve S. Taşgetiren, "Kalite için deney tasarımı," *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 6, sayı 1, ss. 71-83, 2009.
- [21] W. P. Yang ve Y. S. Tarng, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 84, sayı 1-3, ss. 122-129, 1998.
- [22] A. Pander, A. Hatta ve H. Furuta, "Optimization of catalyst formation conditions for synthesis of carbon nanotubes using Taguchi method," *Applied Surface Science*, c. 371, ss. 425-435, 2016.
- [23] S. Apak, B. Özüğür ve M. Hakan Tezcan, "Yeni ürün geliştirme sürecinde robust tasarım yaklaşımının incelenmesi," *3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, Türkiye, 2012, ss. 27-35.
- [24] M. Şirvancı, *Kalite için Deney Tasarımı*, 1. Baskı, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık, 1997.
- [25] M. İlhan, "Talaş kaldırma işlemlerinde minimum miktarda yağlama (MQL) uygulamasının kesme hızı ve yağlama debisinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.

- [26] O. Duman ve Y. Bozkurt, “İş sağlığı ve güvenliğinde metal işleme sıvıları,” *OHS Academy*, c. 4, sayı 1, ss. 27-43, 2021.
- [27] S. Pervaiz, S. Kannan, ve H. A. Kishawy, “An extensive review of the water consumption and cutting fluid based sustainability concerns in the metal cutting sector,” *Journal of Cleaner Production*, c. 197, ss. 134-153, 2018.
- [28] M. Kaminski, ve R. L. Ossowski, “Prediction of the effective parameters of the nanofluids using the generalized stochastic perturbation method,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, c. 393, ss. 10-22, 2014.
- [29] P. Kwon, ve L. T. Drzal, “Nanoparticle Graphite-Based Minimum Quantity Lubrication Method and Composition,” ABD, Patent Numarası: US 2010/0204072 A1, 2010.
- [30] Ç. V. Yıldırım, Ş. Şirin, ve T. Kıvak, “Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde nanopartikül katkılı yağlamanın takım aşınması üzerindeki etkisinin araştırılması”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, sayı 1, ss. 466-476, 2019.
- [31] Ş. Şirin, T. Kıvak, Ç. V. Yıldırım, E. Şirin ve İ. Uygur, “Bitkisel esaslı kesme yağına nano grafit ilavesinin viskozite ve termal iletkenlik üzerindeki etkileri”, *6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Antalya, Türkiye, 2018, ss. 488-497.
- [32] E. Çelik, Ş. Şirin ve T. Kıvak, “AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğinin hibrit soğutma/yağlama yöntemleri altında tornalanmasında yüzey kalitesinin incelenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, sayı 2, ss. 929-942, 2021.
- [33] A. K. Rasheed, M. Khalid, W. Rashmi, T. C. S. M. Gupta ve A. Chan, “Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 63, ss. 346-362, 2016.
- [34] S. Yi, N. Li, S. Solanki, J. Mo, ve S. Ding, “Effects of graphene oxide nanofluids on cutting temperature and force in machining Ti-6Al-4V”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 103, sayı 1-4, ss. 1481-1495, 2019.
- [35] A. K. Sharma, J. K. Katiyar, S. Bhaumik, ve S. Roy, “Influence of alumina/MWCNT hybrid nanoparticle additives on tribological properties of lubricants in turning operations”, *Friction*, c. 7, sayı 2, ss. 153-168, 2019.
- [36] A. Kumar, G. Singh, ve V. Aggarwal, “Analysis and optimization of nozzle distance during turning of EN-31 steel using minimum quantity lubrication”, *Materials Today: Proceedings*, 2021, c. 49, ss. 1360-1366, 2022.
- [37] A. Thakur, A. Manna, ve S. Samir, “Multi-response optimization of turning parameters during machining of EN-24 Steel with SiC nanofluids based minimum quantity lubrication”, *Silicon*, c.12, sayı 1, ss. 71-85, 2020.
- [38] R. K. Singh, A. K. Sharma, A. R. Dixit, A. K. Tiwari, A. Pramanik, ve A. Mandal, “Performance evaluation of alumina-graphene hybrid nano-cutting fluid in hard turning”, *Journal of Cleaner Production*, c. 162, ss. 830-845, 2017.
- [39] B. Rahmati, A. A. D. Sarhan, ve M. Sayuti, “Investigating the optimum molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) nanolubrication parameters in CNC milling of AL6061-T6 alloy”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,

c. 70, sayı 5-8, ss. 1143-1155, 2014.

- [40] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu, ve N. R. Dhar, “Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 209, sayı 15-16, ss. 5573-5583, 2009.
- [41] A. Uysal, F. Demiren, ve E. Altan, “applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano MoS<sub>2</sub> reinforced vegetable cutting fluid”, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, c. 195, ss. 2742-2747, 2015.
- [42] H. Hegab, H. A. Kishawy, M. H. Gadallah, U. Umer, ve I. Deiab, “On machining of Ti-6Al-4V using multi-walled carbon nanotubes-based nano-fluid under minimum quantity lubrication”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 97, sayı 5-8, ss. 1593-1603, 2018.
- [43] V. Anandan, M. Naresh Babu, M. Vetrivel Sezhian, C. V. Yildirim, ve M. Dinesh Babu, “Influence of graphene nanofluid on various environmental factors during turning of M42 steel”, *Journal of Manufacturing Processes*, c. 68, ss. 90-103, 2021.
- [44] T. M. Duc, T. T. Long, ve T. Q. Chien, “Performance evaluation of MQL parameters using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MoS<sub>2</sub> nanofluids in hard turning 90CrSi steel”, *Lubricants*, c. 7, sayı 5, 2019.
- [45] M. M. S. Prasad ve R. R. Srikant, “Performance evaluation of nano graphite inclusions in cutting fluids with MQL technique in turning of AISI 1040 steel”, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, c. 2, ss. 381-393, 2013.
- [46] P. B. Patole ve V. V. Kulkarni, “Parametric optimization of minimum quantity lubrication in turning of AISI 4340 using nano fluids”, *Materials Today: Proceedings*, c. 5, ss. 12419-12425, 2018.
- [47] O. Öndin, T. Kıvık, M. Sarıkaya, ve Ç. V. Yıldırım, “Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel”, *Tribology International*, c. 148, 2020.
- [48] Ç. V. Yıldırım, M. Sarıkaya, T. Kıvık, ve Ş. Şirin, “The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625”, *Tribology International*, c. 134, ss. 443-456, 2019.
- [49] M. Jamil, A. M. Khan, H. Hegab, L. Gong, M. Mia, M. K. Gupta, ve N. He, “Effects of hybrid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CNT nanofluids and cryogenic cooling on machining of Ti-6Al-4V”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 102, sayı 9-12, ss. 3895-3909, 2019.
- [50] B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, M. Yang, N. Zhang, Q. Wu, Z. Han, ve K. Sun, “Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids for Ni-based alloys using vegetable oil”, *Journal of Cleaner Production*, c. 154, ss. 1-11, 2017.
- [51] H. Hegab, U. Umer, I. Deiab, ve H. Kishawy, “Performance evaluation of Ti-6Al-4V machining using nano-cutting fluids under minimum quantity lubrication”,

*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 95, sayı 9-12, ss. 4229-4241, 2018.

- [52] A. M. Khan, M. Jamil, M. Mia, N. He, W. Zhao, ve L. Gong, “Sustainability-based performance evaluation of hybrid nanofluid assisted machining: Sustainability assessment of hybrid nanofluid assisted machining”, *Journal of Cleaner Production*, c. 257, 2020.
- [53] A. A. D. Sarhan, M. Sayuti, ve M. Hamdi, “Reduction of power and lubricant oil consumption in milling process using a new SiO<sub>2</sub> nanolubrication system”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 63, sayı 5-8, ss. 505-512, 2012.
- [54] A. Shokrani, I. Al-Samarrai, ve S. T. Newman, “Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy”, *Journal of Manufacturing Processes*, c. 43, ss. 229-243, 2019.
- [55] P. Sivaiah ve D. Chakradhar, “Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel: A comparison with MQL, wet, dry machining”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, c. 21, ss. 86-96, 2018.
- [56] T. Kivak, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım, ve Ş. Şirin, “Study on turning performance of PVD TiN coated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiCN ceramic tool under cutting fluid reinforced by nano-sized solid particles”, *Journal of Manufacturing Processes*, c. 56, ss. 522-539, 2020.
- [57] F. Gunan, T. Kivak, C. V. Yildirim, ve M. Sarıkaya, “Performance evaluation of MQL with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mixed nanofluids prepared at different concentrations in milling of Hastelloy C276 alloy”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 9, sayı 5, ss. 10386-10400, 2020.
- [58] M. K. Gupta, M. Jamil, X. Wang, Q. Song, Z. Liu, M. Mia, H. Hegab, A. M. Khan, A. G. Collado, C. I. Pruncu, ve G. M. S. Imran, “Performance evaluation of vegetable oil-based nano-cutting fluids in environmentally friendly machining of inconel-800 alloy”, *Materials*, c. 12, sayı 7, 2019.
- [59] P. Rapeti, V. K. Pasam, K. M. Rao Gurram, ve R. S. Revuru, “Performance evaluation of vegetable oil based nano cutting fluids in machining using grey relational analysis-A step towards sustainable manufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, c. 172, ss. 2862-2875, 2016.
- [60] Z. Said, L. S. Sundar, A. K. Tiwari, H. M. Ali, M. Sheikholeslami, E. Bellos, ve H. Babar, “Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids”, *Physics Reports*, c. 946, ss. 1-94, 2022.
- [61] M. S. Najiha, M. M. Rahman, ve K. Kadirgama, “Performance of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluid during the minimum quantity lubrication machining of aluminium alloy, AA6061-T6”, *Journal of Cleaner Production*, c. 135, ss. 1623-1636, 2016.
- [62] Ş. Şirin, “Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N<sub>2</sub> and hybrid nanofluid cutting environments,” *Journal of Manufacturing Processes*, c. 76, ss. 428–443, 2022.

- [63] Ç. V. Yıldırım, Ş. Şirin, T. Kıvak, ve M. Sarıkaya, “A comparative study on the tribological behavior of mono&proportional hybrid nanofluids for sustainable turning of AISI 420 hardened steel with cermet tools,” *Journal of Manufacturing Processes*, c. 73, ss. 695–714, 2022.
- [64] E. Şirin, T. Kıvak, ve Ç. V. Yıldırım, “Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X,” *Tribology International*, c. 157, ss. 106894, 2021.
- [65] Ş. Şirin, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım, ve T. Kıvak, “Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL,” *Tribology International*, c. 153, ss. 106673, 2021.
- [66] M. Sarıkaya, M. K. Gupta, I. Tomaz, M. Danish, M. Mia, S. Rubaiee, M. Jamil, D. Y. Pimenov, ve N. Khanna, “Cooling techniques to improve the machinability and sustainability of light-weight alloys: A state-of-the-art review,” *Journal of Manufacturing Processes*, c. 62, ss. 179–201, 2021.
- [67] E. Şirin ve Ş. Şirin, “Investigation of the performance of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel,” *Manufacturing Technologies and Applications*, c. 2, sayı 1, ss. 75–84, 2021.
- [68] A. Yücel, Ç. V. Yıldırım, M. Sarıkaya, Ş. Şirin, T. Kıvak, M. K. Gupta, ve I. V. Tomaz, “Influence of MoS<sub>2</sub> based nanofluid-MQL on tribological and machining characteristics in turning of AA 2024 T3 aluminum alloy,” *Journal of Materials Research and Technology*, c. 15, ss. 1688–1704, 2021.
- [69] E. Şirin, “Hastelloy X süper alaşımının delinmesinde nanopartikül katkılı kesme yağlarının işleme performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi,” Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2021.
- [70] T. Kıvak, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım, ve Ş. Şirin, “Study on turning performance of PVD TiN coated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiCN ceramic tool under cutting fluid reinforced by nano-sized solid particles,” *Journal of Manufacturing Processes*, c. 56, ss. 522–539, 2020.
- [71] K. Lee, Y. Hwang, S. Cheong, Y. Choi, L. Kwon, ve J. Lee, “Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication,” *Tribology Letters*, c. 35, ss. 127–131, 2009.
- [72] J. He, J. Sun, Y. Meng, ve X. Yan, “Preliminary investigations on the tribological performance of hexagonal boron nitride nanofluids as lubricant for steel/steel friction pairs,” *Surface Topography: Metrology and Properties*, c. 7, sayı 1, ss. 15022, 2019.
- [73] F. Gunan, T. Kıvak, C. V. Yıldırım, and M. Sarıkaya, “Performance evaluation of MQL with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mixed nanofluids prepared at different concentrations in milling of Hastelloy C276 alloy,” *Journal of Materials Research and Technology*, c. 9, sayı 5, ss. 10386–10400.

- [74] H. K. Tönshoff, W. Spintig, W. König, ve A. Neises, “Machining of holes developments in drilling technology,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, c. 43, sayı. 2, 1994.
- [75] İ. Çiftçi, “Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*,” c. 20, sayı 2, ss. 205-209, 2005.
- [76] K. Habalı, H. Gökkaya, ve H. Sert, “Kesici takım kaplama malzemesi ve kesme parametrelerinin AISI 1040 çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, c. 9, sayı 1, ss. 35–38, 2006.
- [77] U. Şeker, ve M. Günay, İM 322-Kesici takım tasarımı, *Ders Notları*, Ankara, 2008.



# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İbrahim DEMİR

Yabancı Dili : İNGİLİZCE

## ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İmalat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2022
Lisans	Teknik Eğitim Fakültesi	Fırat Üniversitesi	2004
Lise	Tesviye	Ş.K.Ö. EML	1999

## Yayımlar

İ. Demir, T. Kıvak, ve Ş. Şirin, “AISI 329 paslanmaz çeliğin frezelenmesinde farklı surfaktan katkılı CuO nanoakışkanların performans değerlendirilmesi”, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, c. 3, sayı 2, ss. 9-21, 2022.