

T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK ALAŞIMLI PASLANMAZ ÇELİĞİN SÜRDÜRÜLEBİLİR  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEKLİSANS TEZİ

TUBA KILINÇ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
Doç. Dr. Adem YAR

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI  
Dr. Öğretim Üyesi Üsame Ali USCA

BİNGÖL-2024

**YÜKSEK ALAŞIMLI PASLANMAZ ÇELİĞİN SÜRDÜRÜLEBİLİR  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Doç. Dr. Adem YAR danışmanlığında, Tuba KILINÇ tarafından hazırlanan bu çalışma 05/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mahir UZUN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Adem YAR

İmza :

Üye : Doç. Dr. Serhat ŞAP

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun ...../ ...../ ..... tarih ve ...../ .....  
nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Zafer ŞİAR**  
**Enstitü Müdürü**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖNSÖZ

Öğrencisi olmaktan gurur duyduğum, 17 yaşında mühendis olmak hayali ile adım attığım Bingöl Üniversitesi'nden Makine Yüksek Mühendisi olarak ayrılmaktan gurur duyarım. Ön lisans eğitimim ve sonraki eğitim hayatım boyunca yardımlarını, tecrübelerini ve bilgi birikimlerini esirgemeyen Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Mekatronik Bölümündeki tüm değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi ile Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği bölümündeki tüm değerli hocalarıma teşekkür ederim. Lisans ve yüksek lisans eğitimim esnasında her daim bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Ünal DEĞİRMENCİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarımın tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren, değerli danışman hocam Doç. Dr. Adem YAR'a, deneysel çalışmalarım ve analizlerim esnasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Üsame Ali USCA'ya, yaptıkları yönlendirmeler ve katkılarından dolayı danışman hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Lisans eğitim hayatımda bilgi birikiminden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. Mahir UZUN'a ve ön lisanstan yüksek lisansa kadar bilgi birikiminden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Serhat ŞAP'a, tezime olan katkılarından dolayı değerli jüri üyelerime teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi yazabilmeme ışık olan ve tez yazma yolculuğumda desteklerini esirgemeyen Sayın Enver Selim AKATA'ya şükranlarımı sunarım.

Beni bugüne kadar getiren ve her zaman iyi bir Mühendis olacağımdan kuşkusu olmadan inanan, canım anneme, canım babama ve canım kardeşlerime teşekkür ederim.

**TUBA KILINÇ**

**Bingöl 2024**

# İÇİNDEKİLER

|                                           |      |
|-------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ .....                               | i    |
| İÇİNDEKİLER .....                         | ii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....     | v    |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                    | vi   |
| TABLolar LİSTESİ .....                    | viii |
| ÖZET .....                                | ix   |
| ABSTRACT .....                            | x    |
| 1. GİRİŞ .....                            | 1    |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ .....                  | 3    |
| 3. ÇELİK .....                            | 19   |
| 3.1. Çeliklerin Genel Özellikleri .....   | 19   |
| 3.2. Çeliklerin Sınıflandırılması .....   | 19   |
| 3.2.1. Karbonlu Çelikler .....            | 20   |
| 3.2.1.1. Az Karbonlu Çelikler .....       | 20   |
| 3.2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler .....     | 21   |
| 3.2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler .....   | 21   |
| 3.2.2. Otomat Çelikleri .....             | 22   |
| 3.2.3. Nitrürlenebilen Çelikler .....     | 23   |
| 3.2.4. Islah Çelikleri .....              | 23   |
| 3.2.5. Sementasyon Çelikleri .....        | 23   |
| 3.2.6. Takım Çelikleri .....              | 23   |
| 3.2.6.1. Plastik Kalıp Çelikleri .....    | 24   |
| 3.2.6.2. Yüksek Hız Takım Çelikleri ..... | 24   |
| 3.2.6.3. Sıcak İş Takım Çelikleri .....   | 24   |
| 3.2.6.4. Soğuk İş Takım Çelikleri .....   | 24   |
| 3.2.7. Alaşımli Çelikler .....            | 24   |
| 3.2.7.1. Düşük Alaşımli Çelikler .....    | 25   |
| 3.2.7.2. Orta Alaşımli Çelikler .....     | 25   |
| 3.2.7.3. Yüksek Alaşımli Çelikler .....   | 25   |
| 3.2.7.3.1. X33CrS16 Çeliği .....          | 26   |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. PASLANMAZ ÇELİKLER .....                                                     | 28 |
| 4.1. Paslanmaz Çeliklerin Genel Kullanım Alanları .....                         | 29 |
| 4.2. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri .....                                    | 30 |
| 4.3. Paslanmaz Çeliklerin Metalurjik Özellikleri .....                          | 31 |
| 4.4. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özellikleri .....                            | 32 |
| 4.5. Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri .....                             | 33 |
| 4.6. Paslanmaz Çelik Türleri .....                                              | 33 |
| 4.6.1. Östenik Paslanmaz Çelikler .....                                         | 34 |
| 4.6.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler .....                                        | 35 |
| 4.6.3. Dupleks (Ferritik-Östenik) Paslanmaz Çelikler .....                      | 35 |
| 4.6.4. Çökelme Sertleşmesi (Yaşlandırma) Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler ..... | 36 |
| 4.6.5. Martenzitik Paslanmaz Çelikler .....                                     | 37 |
| 5. TALAŞLI İMALAT, TAKIM AŞINMALARI VE İŞLENEBİLİRLİK .....                     | 38 |
| 5.1. Frezeleme İşlemi .....                                                     | 38 |
| 5.2. Talaşlı İmalatta Takım Aşınmaları .....                                    | 40 |
| 5.2.1. Aşınma Tipleri .....                                                     | 40 |
| 5.2.1.1. Yan Yüzey Aşınması .....                                               | 41 |
| 5.2.1.2. Krater Aşınması .....                                                  | 41 |
| 5.2.1.3. Çentik Aşınması .....                                                  | 41 |
| 5.2.1.4. Uç Radyüsü Aşınması .....                                              | 41 |
| 5.2.1.5. Termal Çatlaklar .....                                                 | 42 |
| 5.2.1.6. Talaş Yığılması (BUE, built-up edge) Oluşumu .....                     | 42 |
| 5.2.1.7. Plastik Deformasyon .....                                              | 42 |
| 5.2.1.8. Parçacık Dökülmesi .....                                               | 42 |
| 5.2.1.9. Talaş Hasarı .....                                                     | 43 |
| 5.2.2. Aşınma Mekanizmaları .....                                               | 43 |
| 5.2.2.1. Kimyasal Aşınma .....                                                  | 43 |
| 5.2.2.2. Oksidasyon .....                                                       | 43 |
| 5.2.2.3. Difüzyon (Çözelti) Aşınması .....                                      | 44 |
| 5.2.2.4. Abrasiv Aşınma .....                                                   | 44 |
| 5.2.2.5. Adeziv Aşınma .....                                                    | 44 |
| 5.3. İşlenebilirlik .....                                                       | 45 |
| 5.4. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi .....                                     | 47 |
| 6. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                     | 48 |
| 6.1. Deneylerde Kullanılan Freze Tezgâhı .....                                  | 49 |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2. Deneylerde Kullanılan Malzeme.....                                | 50  |
| 6.3. Deneylerde Kullanılan Kesici Takım .....                          | 52  |
| 6.4. Deneylerde Kullanılan Takım Tutucu.....                           | 54  |
| 6.5. Deneylerde Kullanılan Kesme Sıvısı .....                          | 55  |
| 6.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı.....                               | 55  |
| 6.7. Deneylerde Kullanılan Kesme Sıcaklığı Ölçüm Cihazı.....           | 57  |
| 6.8. Enerji Tüketimi Ölçümü.....                                       | 58  |
| 6.9. Kesici Takım Aşınması İçin Kullanılan Dijital Ölçüm Kamerası..... | 59  |
| 6.10. EDX ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Cihazı.....            | 60  |
| 6.11. Deneylerde Kullanılan MMY Sistemi.....                           | 61  |
| 6.12. Deneylerde Kullanılan Nanotoz .....                              | 62  |
| 6.13. Soğutma ve Yağlama Koşulları.....                                | 64  |
| 6.13.1. Kuru.....                                                      | 64  |
| 6.13.2. MMY-Mineral Yağ .....                                          | 64  |
| 6.13.3. N1-MMY Emülsiyon .....                                         | 65  |
| 6.13.4. N2-MMY Emülsiyon .....                                         | 65  |
| 6.13.5. MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su).....                          | 66  |
| 6.14. Temas Açısı Ölçüm Cihazı .....                                   | 67  |
| 6.15. pH Cihazı.....                                                   | 68  |
| 6.16. Deneylerde Kullanılan Viskozite Cihazı.....                      | 69  |
| 7. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                          | 70  |
| 7.1. Kesme Sıvılarının Islanabilirliği .....                           | 70  |
| 7.2. pH Analizi .....                                                  | 72  |
| 7.3. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlendirilmesi .....                         | 73  |
| 7.4. Kesme Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi .....                     | 77  |
| 7.5. Güç Tüketimi Değerlendirilmesi.....                               | 80  |
| 7.6. Takım Aşınması Değerlendirilmesi.....                             | 83  |
| 7.6.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi.....                 | 86  |
| 7.6.2. EDS (EDX) ve Haritalama (Mapping) Analizi .....                 | 88  |
| 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                                          | 96  |
| 8.1. Sonuçlar.....                                                     | 96  |
| 8.2. Öneriler.....                                                     | 99  |
| KAYNAKLAR .....                                                        | 100 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                                |                                                                        |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| MMY(MQL)                       | :Minimum Miktarda Yağlama (Minimum Quantity Lubricant Method)          |
| AISI                           | :Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron And Steel Institute) |
| ANOVA                          | :Varyans Analizi                                                       |
| hBN                            | :Hegzagonal Bor Nitrür                                                 |
| S/N                            | :Sinyal/ Gürültü (Signal/ Noise)                                       |
| CVD                            | :Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapour Deposition)                |
| HRC                            | :Rockwell Sertliği                                                     |
| PVD                            | :Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapour Deposition)                |
| CNC                            | :Sayısal Kontrollü Bilgisayar (Computer Numerical Control)             |
| SEM                            | :Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)           |
| EDX                            | :Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometre                                 |
| MQLCO                          | :Hint Yağı                                                             |
| MQLSO                          | :Ayçiçek Yağı                                                          |
| C/L                            | :Soğutma/ Yağlama                                                      |
| MoS <sub>2</sub>               | :Molibden Di Sülfür                                                    |
| Grpt, nmql                     | :Grafit                                                                |
| Ti                             | :Titanyum                                                              |
| Ti-6AL-4V                      | :Titanyum-Alüminyum-Vanadyum Grade 5 Alaşımı                           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | :Alüminyum Oksit                                                       |
| TiN                            | :Titanyum Nitrür                                                       |
| TiCN                           | :Titanyum Karbon Nitrür                                                |
| TiAlN                          | :Titanyum Alüminyum Nitrür                                             |
| Cryo LN <sub>2</sub>           | :Kriyojenik Sıvı Azot                                                  |
| Vc                             | :Kesme Hızı                                                            |
| fn                             | :İlerleme Hızı                                                         |
| dak                            | :Dakika                                                                |
| dev                            | :Devir                                                                 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Yüzey frezeleme testi için tasarlanan deney düzeneği ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri (Kıvak, 2014) .....                                                                                 | 5  |
| Şekil 2.2. Tornalama testi için tasarlanan MQL kurulum gösterimi (Chetan, 2016).....                                                                                                               | 7  |
| Şekil 2.3. Frezeleme testi için tasarlanan deneysel kurulum gösterimi (Yıldırım, 2017)...                                                                                                          | 8  |
| Şekil 2.4. Deney kurulumunun şematik gösterimi (Marques, 2019) .....                                                                                                                               | 9  |
| Şekil 2.5. Frezeleme işlemi için takım yolu ve sıcaklık ölçüm yöntemi (Usca, 2022).....                                                                                                            | 10 |
| Şekil 2.6. Nano kesme sıvısının hazırlanma aşaması a)Manyetik karıştırma işlemi, b)Ultrasonikasyon ve c) $Al_2O_3$ bazlı nano kesme sıvısı (Gupta, 2020).....                                      | 11 |
| Şekil 2.7. Hibrit nano akışkanın karıştırılma işlemi: (A) Nano parçacık eklendi, (B) Üstten karıştırma, (C) Ultrasonik cihaz, (D) Manyetik karıştırıcı, (E) Hibrit nanoakışkan (Şirin, 2021) ..... | 13 |
| Şekil 2.8. Deney çalışmasının şematik fotoğrafı (Er, 2021) .....                                                                                                                                   | 14 |
| Şekil 2.9. Deneylerin gerçekleştiği CNC dik işleme freze tezgâhı (Şap, 2022) .....                                                                                                                 | 15 |
| Şekil 2.10. Saleem ve arkadaşının kullandığı MQL sistemi şeması (Saleem, 2022).....                                                                                                                | 16 |
| Şekil 2.11. Deney düzeneği (Usca, 2023) .....                                                                                                                                                      | 18 |
| Şekil 3.1. Çelik malzemelerin sınıflandırılması (Alnak, 2020) .....                                                                                                                                | 22 |
| Şekil 5.1. Yatay ve düşey freze tezgâhı (Serhat, 2022).....                                                                                                                                        | 39 |
| Şekil 5.2. Aşınma tipleri (Kaya, 2019) .....                                                                                                                                                       | 40 |
| Şekil 6.1. Deney freze tezgâhı görseli (Tezmaksan, 2023).....                                                                                                                                      | 50 |
| Şekil 6.2. X33CrS16 Paslanmaz çeliği .....                                                                                                                                                         | 51 |
| Şekil 6.3. Deneylerde kullanılan kesici takım görseli (ISCAR, 2023) .....                                                                                                                          | 53 |
| Şekil 6.4. Deneylerde kullanılan kesici takım (Usca, 2022), kesici uç (Smoxh, 2023) ve takım tutucu görseli (Atlasfor, 2023) .....                                                                 | 54 |
| Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan kesme sıvısı (Oilmarkt, 2023) .....                                                                                                                               | 55 |
| Şekil 6.6. Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülük cihazı (Indiamart, 2023).....                                                                                                                    | 56 |
| Şekil 6.7. Testo 885 termal kamera (Tetteknik, 2023).....                                                                                                                                          | 58 |
| Şekil 6.8. HIOKI PW 3198 Güç analizörü.....                                                                                                                                                        | 59 |
| Şekil 6.9. Dijital ölçüm kamerası (Ubuy, 2023) .....                                                                                                                                               | 60 |



|                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.10. ZEISS EVO LS10 Model taramalı elektron mikroskobu (İltek, 2024) .....                                                                                                                                                  | 61 |
| Şekil 6.11. Deneylerde kullanılan MMY nozul ve MMY sistemi .....                                                                                                                                                                   | 62 |
| Şekil 6.12. Deneylerde kullanılan $Al_2O_3$ nanotoz .....                                                                                                                                                                          | 63 |
| Şekil 6.13. MMY-Mineral Yağ kesme sıvısının hazırlanışı .....                                                                                                                                                                      | 64 |
| Şekil 6.14. $N_1$ -MMY Emülsiyon kesme sıvısının hazırlanışı .....                                                                                                                                                                 | 65 |
| Şekil 6.15. $N_2$ -MMY Emülsiyon kesme sıvısının hazırlanışı .....                                                                                                                                                                 | 66 |
| Şekil 6.16. MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) kesme sıvısının hazırlanışı .....                                                                                                                                                     | 67 |
| Şekil 6.17. Ölçümü yapılan kesme sıvıları.....                                                                                                                                                                                     | 67 |
| Şekil 6.18. Model OCA 50Micro Temas açısı ölçüm cihazı (İltek1, 2024) .....                                                                                                                                                        | 68 |
| Şekil 6.19. pH cihazı .....                                                                                                                                                                                                        | 68 |
| Şekil 6.20. Kinematik viskozite cihazı (Bumlab, 2023) .....                                                                                                                                                                        | 69 |
| Şekil 7.1. Temas açısı ölçüm grafiği .....                                                                                                                                                                                         | 71 |
| Şekil 7.2. ( <b>a</b> ) $V_c = 120$ m/dak, $f_n=0,08$ ve $f_n=0,15$ mm/dev; ( <b>b</b> ) $V_c = 150$ m/dak,<br>$f_n=0,08$ ve $f_n=0,15$ mm/dev Farklı C/L koşullarının ilerleme hızlarına<br>göre yüzey pürüzlülüğü sonuçları..... | 74 |
| Şekil 7.3. Farklı C/L şartlarında kesme sıcaklıkları .....                                                                                                                                                                         | 78 |
| Şekil 7.4. Farklı kesme koşullarında güç tüketimi verileri .....                                                                                                                                                                   | 81 |
| Şekil 7.5. Farklı C/L şartlarında takım aşınmaları ve görselleri .....                                                                                                                                                             | 84 |
| Şekil 7.6. 150 m/dak kesme ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında farklı kesme<br>ortamlarında kullanılan takımın SEM görüntüleri.....                                                                                                 | 87 |
| Şekil 7.7. Kullanılan $Al_2O_3$ nano tozun SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                                     | 88 |
| Şekil 7.8. Sıfır takımın EDS ve Haritalama görüntüleri .....                                                                                                                                                                       | 89 |
| Şekil 7.9. Kuru kesimde kullanılan takımın EDS ve Haritalama görüntüleri .....                                                                                                                                                     | 90 |
| Şekil 7.10. MMY-Mineral Yağ kesiminde kullanılan takımın EDS ve Haritalama<br>görüntüleri .....                                                                                                                                    | 91 |
| Şekil 7.11. $N_1$ -MMY Emülsiyon kesimde kullanılan takımın EDS ve Haritalama<br>görüntüleri .....                                                                                                                                 | 92 |
| Şekil 7.12. $N_2$ -MMY Emülsiyon kesimde kullanılan takımın EDS ve Haritalama<br>görüntüleri .....                                                                                                                                 | 93 |
| Şekil 7.13. MMY-Emülsiyon (mineral yağ+su) kesimde kullanılan takımın EDS ve<br>Haritalama görüntüleri.....                                                                                                                        | 94 |
| Şekil 7.14. Kullanılan nano tozun EDS ve Haritalama görüntüleri .....                                                                                                                                                              | 95 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.1. 1. 2085'in Kimyasal bileşimi (kütle oranı)(ağırlıkça %) (DongGuan Misung kalıp Steel Co, 2023) ..... | 27 |
| Tablo 6.1. Deney işleme parametreleri .....                                                                     | 48 |
| Tablo 6.2. Deneylerde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri (Tezmaksan, 2023) .....                            | 49 |
| Tablo 6.3. Kimyasal bileşimi (%) (Sağlam Metal, 2023) .....                                                     | 51 |
| Tablo 6.4. Isıl işlem bilgisi (Sağlam Metal, 2023).....                                                         | 52 |
| Tablo 6.5. Isıl iletkenliği (Sağlam Metal, 2023) .....                                                          | 52 |
| Tablo 6.6. Kesici takımın teknik özellikleri (ISCAR, 2023) .....                                                | 53 |
| Tablo 6.7. Yüzey pürüzlülük cihazı teknik özellikleri (Indiamart, 2023).....                                    | 56 |
| Tablo 6.8. Testo 885 termal kamera özellikleri (Testo, 2023).....                                               | 57 |
| Tablo 6.9. HIOKI PW 3198 Güç analizörü özellikleri (Globalpiyasa, 2023).....                                    | 59 |
| Tablo 6.10. Dijital ölçüm kamerasının teknik özellikleri (Ubuy, 2023).....                                      | 60 |
| Tablo 6.11. MMY sisteminin özellikleri (Kartes, 2023).....                                                      | 62 |
| Tablo 6.12. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nano tozu teknik özellikleri (Nanografi, 2023) .....                 | 63 |
| Tablo 6.13. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanotoz element analizi (Nanografi, 2023) .....                      | 63 |
| Tablo 7.1. Kesme sıvılarının temas açısı sonuçları.....                                                         | 71 |
| Tablo 7.2. Kesme sıvılarının pH sonuçları.....                                                                  | 73 |
| Tablo 7.3. Kesme sıcaklıklarının kuru kesimle kıyaslanması.....                                                 | 79 |
| Tablo 7.4. Takım aşınmalarının kuru kesim ile kıyaslanması .....                                                | 83 |

# YÜKSEK ALAŞIMLI PASLANMAZ ÇELİĞİN SÜRDÜRÜLEBİLİR İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

## ÖZET

Paslanmaz çelikler, termal iletkenliklerinin düşüklüğü, yüksek sertleşme ve mukavemet sebebiyle talaşlı şekillendirilmeleri çok zordur. Talaşlı şekillendirmeleri zor olmasına rağmen kimya, gıda, otomotiv gibi farklı alanlarda talaşlı imalat uygulanarak karşımıza çıkmaktadır. Bazı kesme sıvılarının uygulanması ile talaşlı şekillendirilmeleri gerçekleştirilebilir. Fakat doğa, insan sağlığı açısından ve işleme maliyeti yüksek olması nedeniyle dezavantajlıdır. Literatürde paslanmaz çeliklerin sürdürülebilir ortamlarda MMY yöntemi uygulanarak yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmada iş parçası olarak seçilen yüksek alaşımlı X33CrS16 paslanmaz çeliğini farklı işleme parametreleri kullanılarak beş farklı sürdürülebilir ortamlarda frezeleme işlemi yapılarak işleme parametreleri üzerindeki etkileri tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda işlenebilirlik deneyleri için çalışma parametreleri olarak iki farklı kesme hızı (120 ve 150 m/dak), iki farklı ilerleme hızı (0,08 ve 0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0,6 mm) seçilmiştir. Ayrıca, deneylerde soğutma ve yağlama ortamı olarak beş farklı [kuru, MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon ve MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) ] ortam kullanılmıştır. Beş farklı ortam ve dört farklı işleme parametrelerinden oluşan toplamda 20 adet deney gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve güç tüketimi değerleri ölçülüp kaydedilerek işlenebilirlik parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, pH, viskozite, SEM, EDX analizleri ve temas açısı ölçümü analizleri yapılmıştır. Tüm deney sonuçlarında kaydedilen en iyi işleme performansı ağırlıkça %0,5 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren nanotoz ilaveli nanoakışkan (N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon) koşullarında elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Emülsiyon, Frezeleme, Minimum Miktarda Yağlama (MMY), Sürdürülebilirlik, X33CrS16, Yüzey Pürüzlülüğü.

# INVESTIGATION OF THE SUSTAINABLE MACHINABILITY OF HIGH ALLOY STAINLESS STEEL

## ABSTRACT

Stainless steels are very difficult to shape with chips due to their low thermal conductivity, high hardening and strength. Although machining is difficult, machining is applied in different fields such as chemistry, food and automotive. With the application of some cutting fluids, their machining can be realized. But nature is at a disadvantage in terms of human health and the high cost of processing. In the literature, the studies carried out by applying the MMY method in sustainable environments of stainless steels are very few. In this study, it was aimed to determine the effects on machining parameters by milling the high alloy X33CrS16 stainless steel selected as a workpiece in five different sustainable environments using different machining parameters. In this context, two different cutting speeds (120 and 150 m/min), two different feed speeds (0.08 and 0.15 mm/rev) and fixed cutting depth (0.6 mm) were selected as operating parameters for machinability experiments. In addition, five different [dry, MMY-Mineral Oil, N<sub>1</sub>-MMY Emulsion, N<sub>2</sub>-MMY Emulsion and MMY- Emulsion (mineral oil + water)] media were used as cooling and lubrication media in the experiments. A total of 20 experiments consisting of five different environments and four different processing parameters were carried out. For each experiment, the cutting temperature, surface roughness, tool wear and power consumption values were measured and recorded, and the effects of machinability parameters on output parameters were examined. In addition, pH, viscosity, SEM, EDX analyzes and contact angle measurement analyzes were performed. The best processing performance recorded in all test results was achieved under nanofluidic (N<sub>1</sub>-MMM Emulsion) conditions with nanotose addition containing 0.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by weight.

**Keywords:** Emulsion, Milling, Marketing Qualified Lead (MQL), Sustainability, X33CrS16, Surface Roughness.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde metal sanayi uygulama alanlarında kullanılan manuel tezgâhlar günden güne yerini bilgisayar destekli üretim yapabilen ve CNC (Bilgisayar Sayısal Kontrol) adı verilen makinelerin yerine bırakmıştır. Gün geçtikçe Türkiye’de de sayıları giderek artmaktadır (Pehlivanoglu, 2002).

1950’li yıllarda nümerik programlama esasına göre çalışan NC tezgâhlar geliştirilerek talaşlı imalat teknolojisinde çığır açmıştır. Bu yıllardan itibaren günümüz tarihlerine doğru gelindikçe, geliştirilen NC tezgâhlar bilgisayar ile donatılarak CNC ve DNC tezgâhları ortaya çıkmıştır. CNC tezgâhlarının kullanım ve çalışma alanları, kişisel bilgisayarlarının kullanımının popülerleşmesi ile birlikte artmıştır. Günümüz tarihlerinde ise azalmakta olan geleneksel tezgâhların imalattaki kullanım payları giderek yerlerini CNC tezgâhlarının kullanımına bırakmaktadır (Kaygısız, 2010).

CNC tezgâh kullanımından dolayı frezeleme işleminin verim değeri artarak devam etmektedir. Frezeleme işlemi sistem kontrol üniteleri, takım tezgâhları ve kesici takımlardaki değişimler sonucunda dünyanın her yerinde bütün fabrika ve işletmelerde yaygın olarak kullanılan bir talaşlı imalat yöntemidir. CNC tezgâhlarında işleme süreleri ve maliyetleri düşürmek adına CNC tezgâhlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir iş parçasının frezeleme işlemi gerçekleştirilirken atılması gereken ilk adım iş parçasına uygun tezgâhın seçilmesidir. Talaşlı imalat uygulamalarından biri olan frezeleme işleminde kesicinin kendi ekseninde dönme hareketi yapması ve iş parçasının takım tezgâhına sabitlenerek tezgâh eksenlerinde doğrusal hareketleri sonucu meydana gelen bir talaşlı imalat işlemidir (Demir, 2022).

Sürdürülebilir ve kaliteli bir üretim verimliliğini artırmak için yüzey pürüzlülüğü oldukça önem arz etmektedir. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametrelerden biri kesici takım aşınmasıdır ve aşınma, yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu ve bunun gibi birçok olumsuzluğu azaltmak için deney parametreleri dikkatli seçilmelidir. İş parçası ile oluşan sürtünmeden kaynaklı kesici takımda aşınma meydana gelerek sürtünme bölgesindeki

ısının artmasına sebep olmaktadır. Üretim maliyetlerini ve bu olumsuz etkileri azaltmak ve ürün kalitesini artırmak için kesme sıvıları kullanılmaktadır. Fakat kesme sıvılarının kullanılması üretim maliyetini artırmaktadır (Bıyık, 2019).

Kesme sıvılarının talaşlı imalatlarda kullanılması insan sağlığını ve çevreyi olumsuz etkilemektedir. Bu etkiyi azaltmak için en önemli yöntem kesme sıvılarının kullanımının azaltılmasıdır. Fakat kullanılan soğutma sıvısının miktarının azaltılması talaşlı imalatla iş parçasını ve kesici takım ömrünü olumsuz etkilemektedir. Minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi basınçlı hava özelliği vasıtasıyla malzemeyi ve kesici takımı soğutmakta ve çıkan talaşları da uzaklaştırmaktadır. Kesme alanında oluşan sıcaklığı azaltarak, yağlama etkisi ile de kesici takım ve talaş ara yüzeyinde meydana gelen sürtünmeyi azaltarak kesici takım ömrünü artırıp ve yüzey kalitesini iyileştirebilmektedir. MMY sistemi kullanılarak üretim maliyeti ve kesme sıvısı kullanımı azaltılabilmektedir (Gürbüz, 2017). MMY sisteminde haznede yer alan yağlayıcının basıncı hava yardımıyla artırılarak kesici takımla iş parçasının temas ettiği bölgeye püskürtülür. Püskürtülen bu bölgede sürtünme düşürülerek bölgenin ısısını, kesici takım aşınmasını azaltır ve işleme esnasında oluşan titreşimleri de azaltarak verimli bir üretimi sağlamaktadır. Minimum miktarda yağlama yöntemi, geleneksel soğutma yöntemlerine göre çevre dostu ve temiz üretime sahiptir. Kuru işlemede ise sürekli aşınan parça maliyeti dikkate alındığında MMY sisteminin daha kullanılabilir olduğu görülmektedir (Bıyık, 2019).

Paslanmaz çelikler, termal iletkenliklerinin düşüklüğü, yüksek sertleşme ve mukavemet sebebiyle talaşlı şekillendirilmeleri çok zordur. Bazı kesme sıvılarının uygulanması ile talaşlı şekillendirilmeleri gerçekleştirilebilir. Literatürde paslanmaz çeliklerin sürdürülebilir ortamlarda MMY yöntemi uygulanarak yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmada, X33CrS16 paslanmaz çeliğinin sürdürülebilir ortamlarda MMY yöntemi uygulanarak frezelenmesi amaçlanmıştır. Frezeleme işleminde X33CrS16 paslanmaz çeliğinin beş farklı sürdürülebilir soğutma/yağlama koşullarında, farklı işleme parametreleri kullanılarak, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, kesme sıcaklığı ve güç tüketimi üzerindeki etkileri incelenecektir. Kesici takımın ve nano tozun SEM görüntüleri alınıp ve EDX analizi yapılarak, kesme sıvılarının temas açısı ölçülerek, kesme sıvılarının pH değerleri bulunarak ve kullanılan mineral yağın viskozite ölçümü yapılarak elde edilen verilerin deneysel olarak araştırılması amaçlanmaktadır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dhar ve arkadaşları 2005'te yaptıkları çalışmalarında, MQL ortamlarda yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının üzerindeki rolü araştırmak için bir deney gerçekleştirmişlerdir. 760 mm uzunluğunda ve 125 mm çapında AISI-4340 çeliğini ıslak, kuru ve MQL ortamlarda, endüstriyel alanlarda kullanılan kesme hızı ve ilerleme şartlarında kaplanmamış karbür kesici uçla tornalama işlemini yapmışlardır. MQL koşulları, kuru ve ıslak koşullara göre kesici kenarların aşınmasında azalma gerçekleştirdiği sonucuna varmışlardır. Daha az aşınma ile birlikte yüzey kalitesi iyileştirildiği ve bu iyileşme ile takım ömrünün uzamasını sağladığı gözlemlenebileceği veya yüksek kesme hızı ile ilerlemeye izin vererek verimliliği artırılabilirliği araştırmacılar tarafından saptanmıştır (Dhar, 2006).

Kamata ve arkadaşı 2007'de, Inconel 718 süper alaşımını farklı kesme şartlarında (ıslak, MQL ve kuru) tornalama işlemi gerçekleştirerek takım ömrü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Tornalama testlerinde TiAlN (PVD), TiN/AlN süper kafes ve TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (CVD) üç farklı kaplamalı karbür takım kullanarak kesme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Kesme parametrelerini, kesme derinliği 1mm, kesme hızı 60 ve 90 m/dak ve sabit ilerleme 0,1 mm/dev seçmişlerdir. DeneySEL sonuçlara göre MQL ile kesmede aşınmış takımın yan yüzeyi pürüzlü hale geldiğinden dolayı yüzey kalitesinde artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, takım ömründe en iyi performansı MQL şartlarında TiCN/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN kaplamalı takımda gözlemlemişlerdir (Kamata, 2007).

Khan ve arkadaşları 2009'da, bitkisel yağ esaslı soğutma sıvısı ile MQL tekniği yöntemlerini kullanarak AISI 9310 düşük alaşımlı çeliği tornalama esnasındaki etkileri incelemişlerdir. İşleme parametreleri, kesme hızı (223, 246, 348 ve 483 m/dak), ilerleme hızı (0,10; 0,13; 0,16 ve 0,18 mm/dev) ve sabit kesme derinliği 0,1 mm olarak seçmişlerdir. Tornalama deneylerinde talaş şekli, takım aşınması, takım ve talaş arayüz sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri belirleyerek, kuru kesme ve ıslak kesme teknikleri ile mukayese etmişlerdir. Deney testi sonuçlarına göre araştırmacılar MQL tekniğinin diğer tekniklere göre takım aşınmasında azalma olduğunu, takım ömrü

ve yüzey kalitesinde ise artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar MQL tekniğinin daha üstün performans göstermesi ve yüzey pürüzlülüğü azaltmasında da önemli bir teknik ve işlenebilirlik açısından da kaliteli bir çevre dostu olduğunu belirlemişlerdir (Khan, 2009).

İlhan 2014'te yüksek lisans tez çalışmasında AISI 1040 malzemesini CNC torna tezgâhında MQL teknikte yağlama debisi ve kaplamalı kesici takımlarla kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Tornalama deneylerinde dört farklı kesme hızı (100, 125, 160 ve 200 m/dak), beş farklı kesme sıvısı debisi (0,225; 0,45; 0,9, 3,25 ve 16,25 ml/dak), 2,5 mm sabit kesme derinliği (a), sabit ilerleme miktarı (f) 0,125 mm/dev olarak belirlemiştir. Deney sonuçlarına göre araştırmacı MQL sisteminin kesme kuvvetleri üzerinde daha iyi performans gösterdiğini tespit etmiştir. MQL sisteminin yağlama özelliği ile aynı zamanda kesme hızındaki artışla da yüzey kalitesini iyileştirilebileceği bilgisine varmıştır. Araştırmacı MQL sisteminin çevre dostu ve insan sağlığı açısından tercih edilmesi gerektiğine bu deney sonucunda varmıştır (İlhan, 2014).

Kıvak 2014'te çalışmasında, PVD ve CVD kaplamalı kesici uçlar ile birlikte AISI 1050 çeliğini farklı kesme hızlarında (90, 120 ve 150 m/dak) ve farklı ilerleme hızlarında (0,09; 0,12 ve 0,15 mm/dev) kesme derinliği (0,5 mm) sabit tutarak freze koşullarında işlenebilirliği değerlendirmiştir. Frezeleme işleminde uygun değer işleme parametrelerini belirlemeye çalışmıştır. Soğutma ortamı olarak konvansiyonel soğutma ve MQL ortamı tercih etmiştir. Frezeleme esnasında iş parçalarında görülen kenar aşınmalarını ve yüzey pürüzlülüğü Taguchi yöntemi kullanarak belirlemiş ve deney sonuçlarını ANOVA kullanarak analiz etmiştir. Ölçülen değerler %95 güven aralığında olduğunu tespit etmiştir. Araştırmacı MQL soğutma sistemi işlenmiş yüzeyin kalitesini artırdığını gözlemlemiştir. İstatiksel analiz sonuçlarına göre, kesme hızının %49,33'lük bir yüzde ile kanat aşınması üzerine önemli parametre olduğu ve ilerleme hızında %82,38'lik bir yüzde ile yüzey pürüzlülüğü için önemli bir parametre olduğu araştırmacı tarafından tespit edilmiştir (Kıvak, 2014). Şekil 2.1'de yüzey frezeleme testi için tasarlanan deney düzeneği ve yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı görülmektedir.





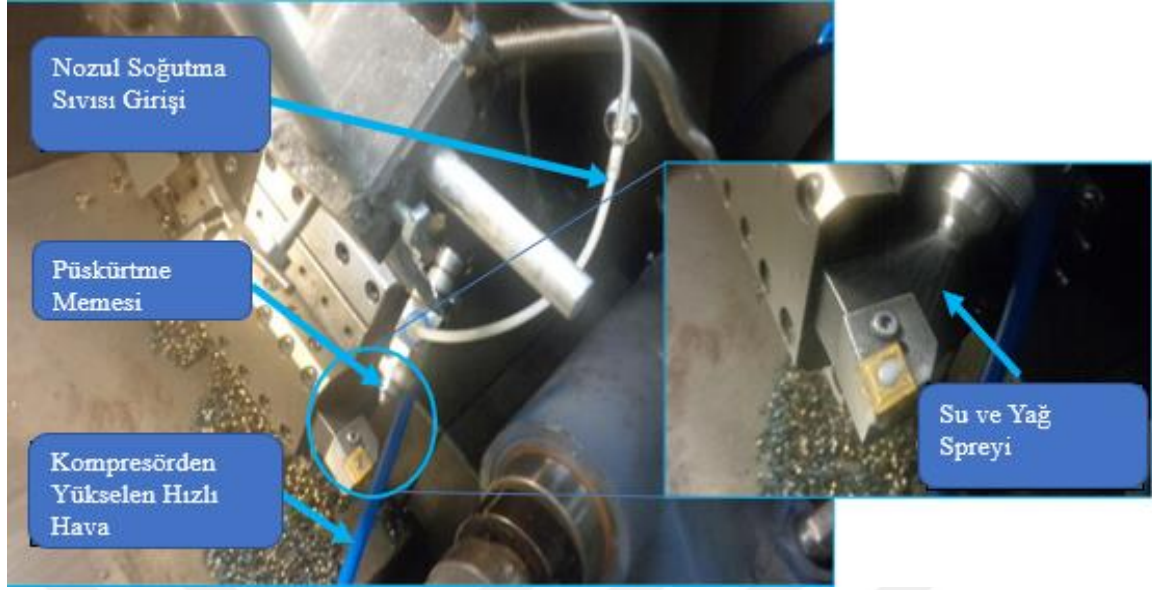
Şekil 2.1. Yüzey frezeleme testi için tasarlanan deney düzeneği ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri (Kıvak, 2014)

Lin ve arkadaşları 2015'te yaptığı çalışmada, 200 mm uzunlukta ve 50 mm çapında olan Ti-6AL-4V malzemesi ile farklı kesme parametreleri (70, 90, 110 m/dak), sabit ilerleme hızı (0,25 mm/dev) ve kesme derinliğinde (1mm) tornalama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Islak, kuru, MMY, kriyojenik kesme ortamlarının yüzey pürüzlülüğü, talaş morfolojisi ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, MMY koşulunun, diğer üç (kriyojenik, kuru ve ıslak) koşula göre daha üstün performans gösterdiği araştırmacılar tarafından gözlemlenmiştir (Lin, 2015).

Sarıkaya ve arkadaşları 2015'te kaplamasız kesici uç karbürle Haynes 25 süper alaşımını sürdürülebilir işleme için bir deney çalışması yapmışlardır. Bu çalışma farklı kesme hızlarında (15, 30, 45 ve 60 m/dak), farklı ilerleme hızlarında (0,08; 0,12 ve 0,16 mm/dev) ve kesme derinliği 1 mm'de sabit tutularak geleneksel soğutma (ıslak), kuru ve MQL destekli ortamlarda tamamlamışlardır. Kesici uçlardaki aşınmaları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlemişlerdir. Deney çalışması tamamlandıktan sonra Taguchi'nin sinyal-gürültü oranı (S/N) analizi kullanılarak en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir. MQL destekli ortamların yüksek basınçla malzemenin işlenebilirliği arttığı ve kullanılan yağ miktarı azaltılarak üretim maliyetlerini azalttığı görülmüştür. Geleneksel soğutma (ıslak), kuru ve MQL destekli ortamlarda yapılan testlerde, düşük kesme hızlarında düşük yüzey kalitesi, yüksek kesme hızlarında ise yüksek takım aşınması meydana geldiği gözlemlenmiştir (Sarıkaya, 2016).

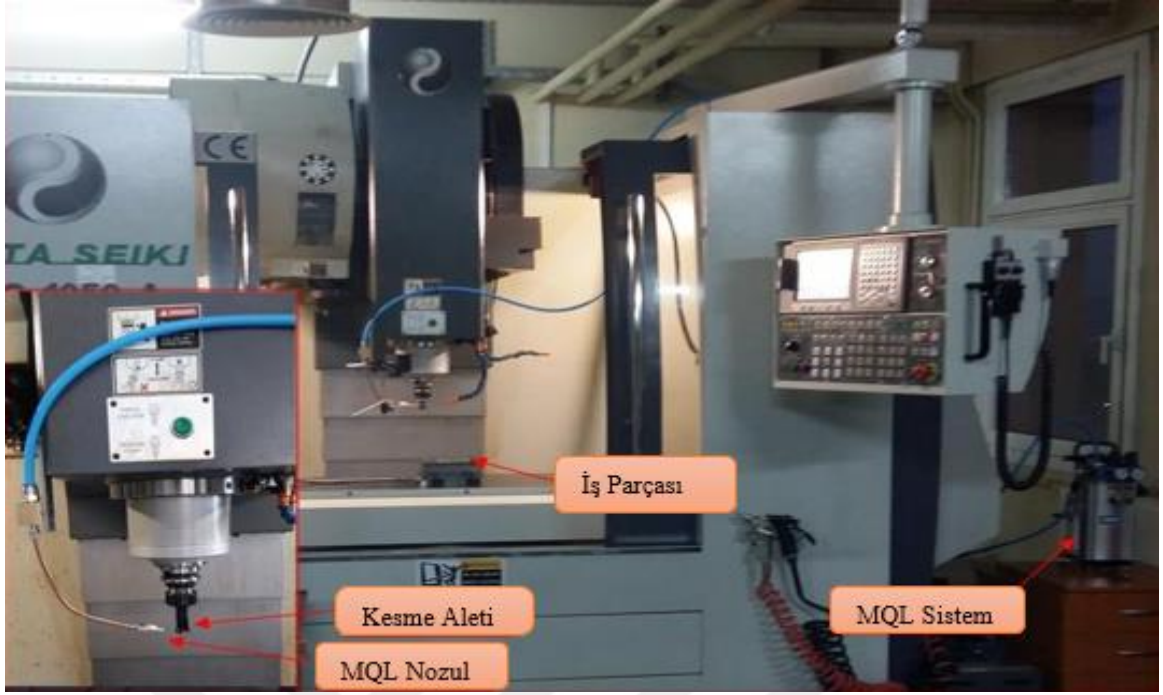
Thakur ve arkadaşı 2016'da yaptığı çalışmasında Incoloy 825 süper alaşımını PVD kullanılarak TiN/TiAlN kaplı bir takım ile birlikte kuru ortamda işlenmesini minimum miktar yağlama (MQL) ve ayrıca geleneksel soğutma sıvıları tekniğinde kullanarak araştırmışlardır. Araştırmada sürdürülebilirliği artırmak için işlenebilirlik testleri tornalama ile gerçekleştirilmiştir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti gibi işlenebilirlik özellikleri geleneksel soğutma ve MMY koşulunda kaplanmamış takım ile elde edilenlerle mukayese edilmiştir. Bu çalışma sonucunda kuru işleme tekniğinin, kaplamalı kesici takımlarla incelenmesinin, sürdürülebilir bir kesme olduğunu açıklamıştır. Araştırmacılar tarafından nikel temel tabanlı süper alaşımların yüksek hızda işlenmesi önerilerek ayrıca çevre dostu olduğu ileri sürülmüştür (Thakur, 2016).

Chetan ve arkadaşları 2016'da kuru ve MQL işleme şartlarında Nimonic 90 ve Ti6Al4V'nin tornalamasını incelemişlerdir. Deney tornalama testlerinde yüksek kesme şartlarında PVD TiN kaplı karbür kesici uçların takım aşınma özellikleri incelenmiştir. Deneyler sürdürülebilirlik açısından kuru ve MQL ortamlarda gerçekleştirilmiştir. İşleme parametreleri Nimonic 90 için kuru ve MQL ortamların tamamında kesme hızı (60 ve 120 m/dak), ilerleme hızı (0,15 ve 0,25 mm/dev) olarak kullanmışlardır. Ti6Al4V alaşımı için kuru ortamlarda kesme hızı (60 ve 120 m/dak), ilerleme hızı (0,15 ve 0,25 mm/dev), MQL ortamda ise kesme hızı (120 m/dak), ilerleme hızı (0,15 ve 0,25 mm/dev) ve kesme derinliği tamamında 0,5 mm olarak sabit tutulmuştur. Kesme sıvısı içerisine biyolojik olarak ayrılabilen ayçiçeği yağının su içindeki emülsiyonu kullanılarak, MQL'nin faaliyeti arttırılmak istenmiştir ve bu faaliyet neticesinde Ti6Al4V için daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Nimonic 90 alaşımının işlemi esnasında yüksek takım-talaş ara yüzü nedeniyle kesici uçlarda daha fazla burun aşınması görülmüştür. Öte yandan Ti6Al4V'nin tornalanması esnasında kesme kuvvetlerinin kontrollü bir şekilde aşınması sebebiyle Nimonic 90'la karşılaştırıldığında sabit ve önemli ölçüde düşük olduğu tespit edilmiştir. Yüksek penetrasyon ve iyi ıslanabilirlik özellikleri MQL işlemede Ti alaşımında daha az yan yüzey aşınması ve talaş aşınması sağladı. MQL şartlarda kesici takım daha iyi performansa sahiptir (Chetan, 2016). Şekil 2.2'de tornalama testi için tasarlanan MQL kurulumu gösterimi görülmektedir.



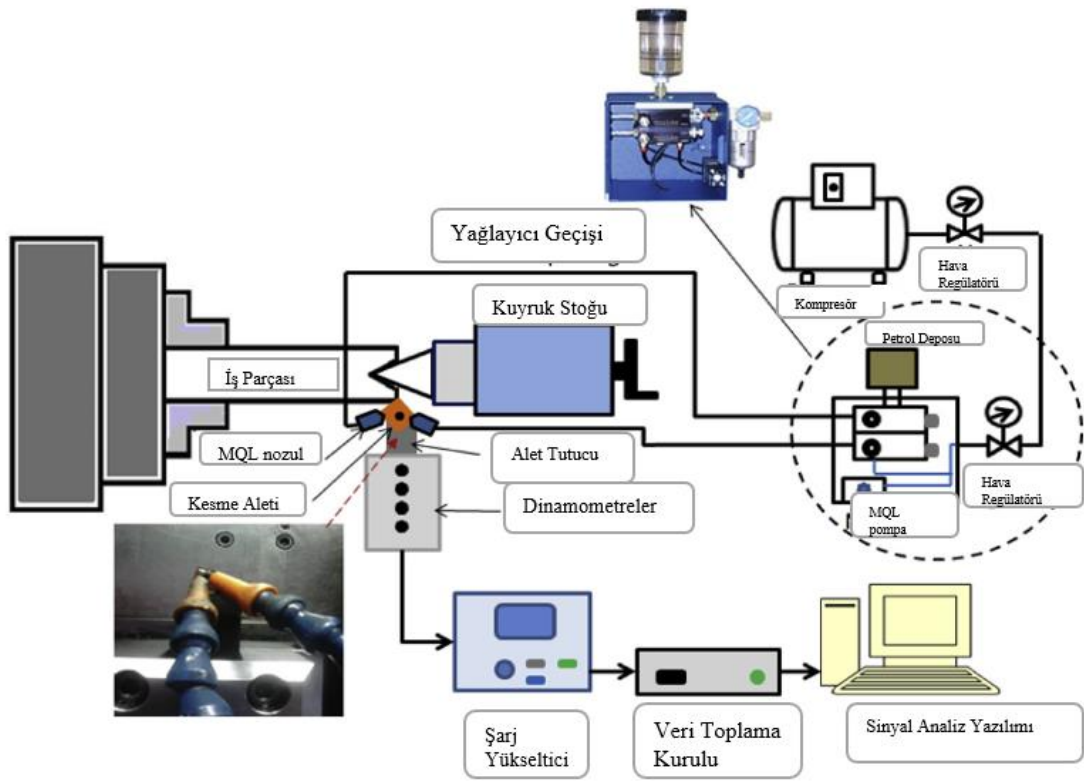
Şekil 2.2. Tornalama testi için tasarlanan MQL kurulum gösterimi (Chetan, 2016)

Yıldırım ve arkadaşları 2017’de yaptığı çalışmasında, nikel bazlı  $150 \times 100 \times 21$  mm ebadında kesilmiş Waspaloy MQL kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini H13A Sandvik kaplamasız karbür takımı tercih ederek frezeleme yapmışlardır. Bu çalışmada işleme parametreleri ilerleme hızı (0,1 mm/dev), sabit kesme hızı (45 m/dak), kesme derinliği (0,5 mm) olarak belirlenmiştir. Dört farklı MQL akış hızı (25, 50, 75 ve 100 ml/saat), iki farklı frezeleme yöntemi (yukarı frezeleme ve aşağı frezeleme), dört farklı yağ tipi (mineral, bitkisel, sentetik, mineral sentetik), MQL parametresi olarak iki farklı nozzle tipi ve iki püskürtme mesafesi (25 ve 50 mm) seçilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını elde etmek için ANOVA kullanılmış ve optimum MQL parametreleri için sinyal-gürültü (S/N) oranı kullanılarak belirlenmiştir. Deney sayısını azaltmak için Taguchi L16 ortogonal dizisi kullanıldı. Taguchi yöntemi ve regrasyon denklemleri kullanılarak tahmin edilen değerler ile kontrol faktörlerinin doğrulama testlerinden elde edilen değerler birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarından yüzey pürüzlülüğü üzerine etki eden unsurların akış oranı ve yağ tipi olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak MQL ile daha uzun takım ömrü ve minimum kesme kuvveti elde edilmiştir (Yıldırım, 2017). Şekil 2.3’te frezeleme testi için tasarlanan deneysel kurulum görülmektedir.



Şekil 2.3. Frezeleme testi için tasarlanan deneysel kurulum gösterimi (Yıldırım, 2017)

Marques ve arkadaşları 2019'da Inconel 718'in ( $Al_2O_3 + SiCw$ ) tornalanması esnasında MQL (Minimum Yağlayıcı Miktarı) ile uygulanan bitkisel tabanlı yağa katı yağlayıcı (%20 grafit) ilavesinin üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney testlerinde takım aşınma mekanizmaları, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve kesme kuvveti değerlendirildi. Genel sonuçlar, Inconel 718'in tornalanma işleminde MQL işleme ile bir kesme sıvısının uygulanmasının çalışılabilir olduğu kesme kuvveti ile yüzey bütünlüğü açısından işlenebilirliğe katkısı olacağı bilgilerini araştırmacılar elde etmiştir (Marques, 2019). Şekil 2.4'te deney kurulumunun şematik gösterimi görülmektedir.

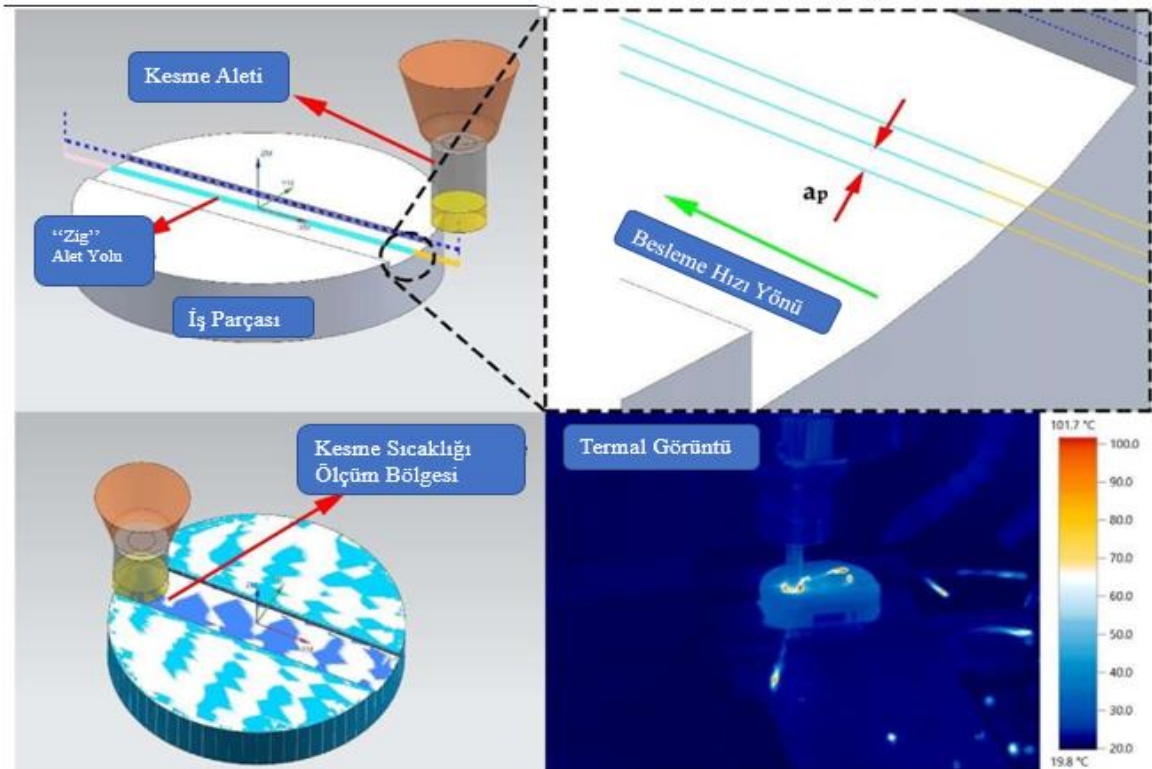


Şekil 2.4. Deney kurulumunun şematik gösterimi (Marques, 2019)

Bıyık, 2019’da gerçekleştirdiği yüksek lisans tez çalışmasında AISI O<sub>2</sub> takım çeliğini MQL koşullarında frezeleyerek işlenebilirliğini incelemiştir. Kesme parametreleri belirlenerek sinterlenmiş karbür kesici takımlar ile birlikte kuru ve MQL şartlar altında iş parçasında meydana gelen olaylar değerlendirilmiştir. Kesme parametreleri olarak belirlenen kesme hızı (100, 125 ve 150 m/dak) ilerleme oranı (0,05; 0,1 ve 0,15 mm/dev) ve yağlama miktarı (50, 100 ve 150 ml/saat) kullanılarak testler yapılmıştır. MQL tekniğiyle işlenen iş parçasının kuru kesme tekniği ile mukayese edildiğinde, takım ömürlerinde artış görülmüştür. Talaş kaldırma sırasında meydana gelen bileşke kesme kuvvetlerinde minimum miktarda yağlamanın etkisiyle (100 m/dak kesme hızında %27,48’lik azalma, 125 m/dak kesme hızında %17,37’lik azalma, 150 m/dak kesme hızında %28,49’luk azalma) kesme kuvvetlerinde gözle görülür bir azalma görülmüştür. Araştırmacı tarafından freze testlerinde kesme kuvvetleri üzerinde MQL tekniğinin olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün kuru kesme şartları ile karşılaştırıldığında minimum yağlama yönteminde azaldığı görülmüştür. MQL tekniğinin AISI O<sub>2</sub> takım çeliğini, kullanılan kesme parametreleri ile sinterlenmiş karbür kesici takım kullanılarak frezelenmesinde olumlu yönde etkisi görülmüştür (Bıyık, 2019).



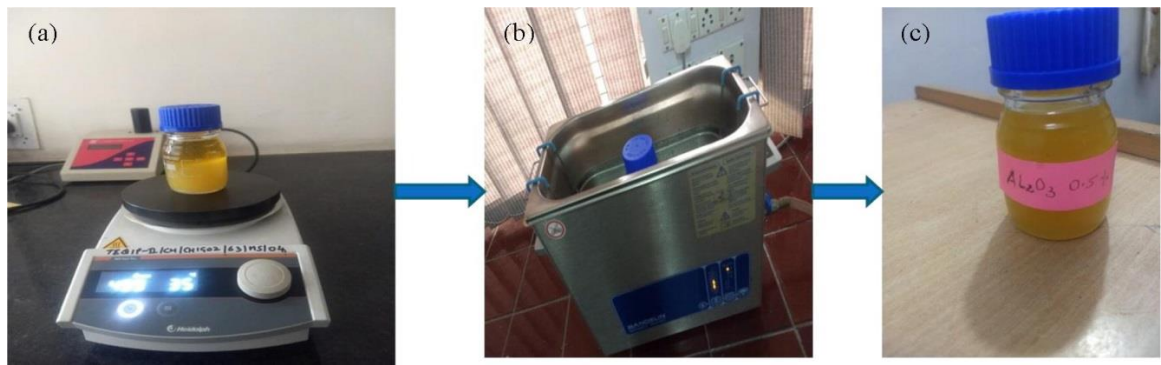
Usca ve arkadaşları 2020’de yaptığı çalışmada MQL ve cryo LN<sub>2</sub> soğutma-yağlama teknikleri kullanarak AISI 5140 çeliğini frezeleyerek işlenebilirlik özelliklerini araştırdılar. Araştırmacılar PVD yöntemi ile birlikte Al-TiN kaplamalı kesici takım kullanmışlardır. Freze deney testlerinde farklı iki ilerleme hızı (0,15 ve 0,2 mm/dev) ve farklı iki kesme hızı (75 ve 100 m/dak) kullanmışlardır. AISI 5140 çeliği için üç farklı C/L şartlarında (cryo-LN<sub>2</sub>, kuru ve MQL) gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada ilerleme hızı ve kesme hızının artmasıyla pürüzlülük değerleri arttı. Araştırmacılar kriyojenik ve MQL testler ile kıyasladıklarında en kötü yüzey pürüzlülük değerlerini kuru şartlarda gözlemlemişlerdir. cryoLN<sub>2</sub> kullanılarak işlenmiş numunelerde en düşük yüzey pürüzlülüğü meydana gelmiştir. Fakat kesme hızındaki artış ve ilerleme oranlarındaki artış bu durumu değiştirmemiş ve bu soğutma ortamında en iyi yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edildiği araştırmacılar tarafından görülmüştür. Elde edilen en iyi yüzey pürüzlülük değerinin kuru koşullarda yapılan frezelemeye göre %53,96 MQL yağlama şartlarında yapılan frezelemeye göre ise %1,67 oranında iyileştirildiği gözlemlenmiştir (Usca, 2022). Şekil 2.5’te frezeleme işlemi için takım yolu ve sıcaklık ölçüm yöntemi görülmektedir.



Şekil 2.5. Frezeleme işlemi için takım yolu ve sıcaklık ölçüm yöntemi (Usca, 2022)

Camcı, 2020’de yüksek lisans tez çalışmasında karbür kesici takımlar kullanarak AISI D2 çeliğinin frezelenmesini MQL ve kuru işlemede işlenebilirliğini incelemiştir. Deneysel araştırmalarda kesici takımın işleme özellikleri, kesme ömrü, kesici takımda ortaya çıkan aşınmalar araştırılarak yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Frezeleme testlerinde deney parametreleri olarak, kesme hızları (75, 100 ve 125 m/dak), yağlama miktarları (50, 100 ve 150 ml/saat), kesme adımları (0,05 mm/dev, 0,075 mm/dev, 0,1 mm/dev) ve sabit kesme derinliği 1 mm olarak kullanılmıştır. AISI D2 çeliğinin MQL teknik ve kuru teknikle frezeleme deneyi sonucunda meydana gelen özellikler mukayese edildiğinde MQL sistemi ile frezeleme işlemi esnasında kesme kuvvetlerinde azalma görülmüştür. MQL sistemi ile frezeleme işlemi esnasında sürdürülebilirlik açısından daha faydalı olduğu gözlemlenmiştir. MQL sistemi ile frezelenmesi esnasında daha iyi takım ömrü görülmektedir. MQL sistemi ile frezelenmesi esnasında daha iyi yüzey pürüzlülüğü tespit edilmiştir (Camcı, 2020).

Gupta ve arkadaşları, 2020’de yapmış oldukları çalışmasında AISI 4130’un tornalanması esnasında  $Al_2O_3$  bazlı bitkisel yağ ile saf bitkisel yağın işleme performanslarını mukayese etmek için araştırdılar. Deney kesme parametreleri kesme hızı (50, 80 ve 100 m/dak), ilerleme hızı (0,075; 0,1 ve 0,125 mm/dev) ve kesme derinliği (0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm) olarak kullanıldı. Araştırmacılar deney tasarımı için Taguchi yöntemini kullandılar. Deney tornalama sonuçlarına göre saf bitkisel yağ işleme şartlarında iş parçasının yüzey kalitesinde takriben %27,3’lük bir iyileşme gözlemlenmiştir. Tornalama performansı  $Al_2O_3$  bazlı nano akışkanlar şartlarında daha iyi performansta olduğu görülmüştür (Gupta, 2020). Şekil 2.6’da nano kesme sıvısının hazırlanma aşaması görülmektedir.

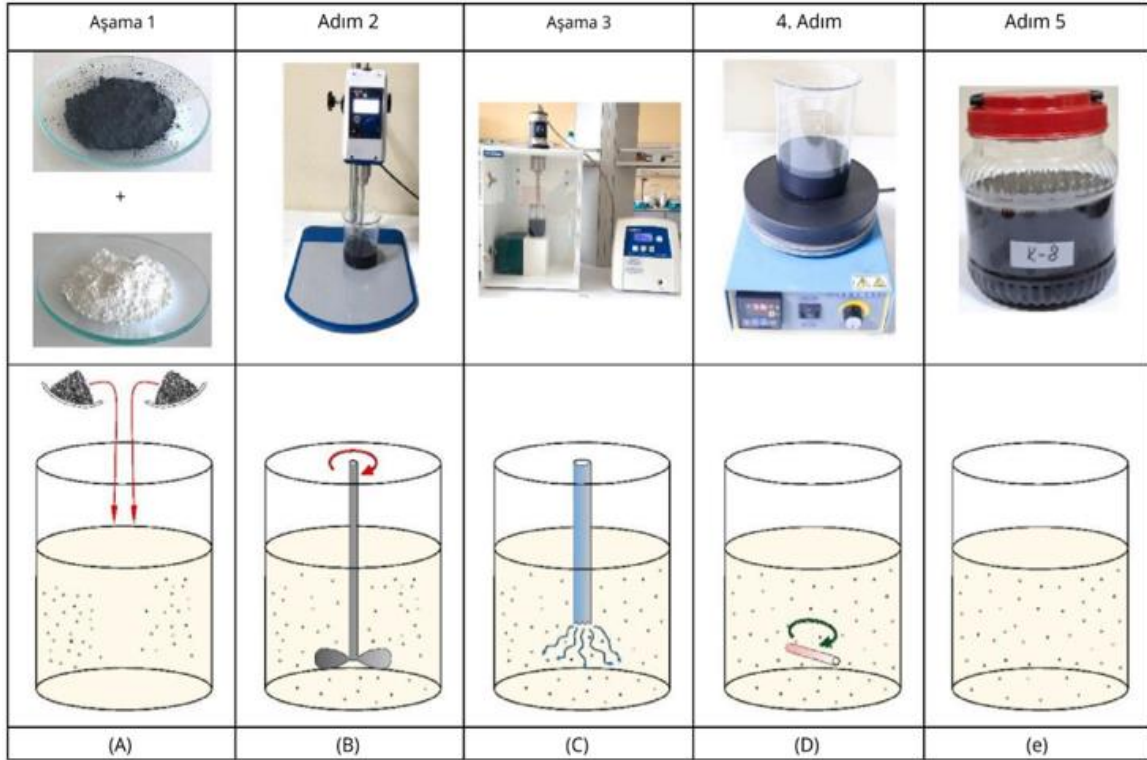


Şekil 2.6. Nano kesme sıvısının hazırlanma aşaması a)Manyetik karıştırma işlemi, b)Ultrasonikasyon ve c)  $Al_2O_3$  bazlı nano kesme sıvısı (Gupta, 2020)

Salur ve arkadaşları 2021’de yaptığı çalışmasında, AISI 1040 çeliğini kuru ve MQL ortamlarda frezeleme işlemi esnasında kesme sıcaklığı, takım aşınması ve kesme gücünün etkilerini deneyleyerek ölçmüş ve kesme sıcaklığı, takım aşınması ve kesme gücünün etkileri varyans analizi (ANOVA) kullanılarak analiz edilmiştir. En doğru frezeleme şartlarını belirlemek için Taguchi sinyal-gürültü (S/N) oranları kullanmışlardır. MQL sisteminin yağlama ve soğutma özelliği sayesinde kesme sıcaklığını, güç tüketimini ve takım aşınmasını azalttığı tespit edilmiş kuru frezelemeye nazaran daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Kuru ortamlarda, kesme koşullarının hepsinde kötü kenar aşınmasına sebep olduğu, kesme hızı arttırıldığında kenar aşınmasının, ilerleme hızı arttırıldığında kanat aşınmasının arttığı güç tüketimine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonucunda minimum kesme sıcaklığı için MQL destekli frezelemeyle birlikte kesme hızı (150 m/dak) yüksek bir ilerleme hızı (0,15 mm/dev) tercih edilmesi kanısına varılmıştır (Salur, 2021).

Şirin ve arkadaşı 2021’de yaptıkları çalışmada grafit (Grpt), MoS<sub>2</sub> nano parçacıkları ile Inconel X-750 süper alaşımının frezelenmesini araştırmışlardır. Bu çalışma işleme parametre kıstas olarak kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü, kesme kuvveti ve takım aşınması üzerinde meydana gelen etkileri incelemişlerdir. Deney frezeleme işlemleri sabit kesme derinliğinde (0,5 mm), üç farklı kesme hızında (30, 45 ve 60 m/dak), üç farklı ilerleme hızında (0,05; 0,10 ve 0,15 mm/dev) ve üç farklı kesme şartlarında (Grpt/ MoS<sub>2</sub>, hBN/Grpt, hBN/ MoS<sub>2</sub>) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre hBN/Grpt hibrit nano akışkanın tüm performans değerlerinde hBN/ MoS<sub>2</sub> ve Grpt/ MoS<sub>2</sub> koşullarından daha iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır. Bu çalışma ile hBN/Grpt kesme koşulu, hBN/ MoS<sub>2</sub> ve Grpt/ MoS<sub>2</sub> kesme koşullarıyla mukayese edildiğinde sırasıyla %6,08 ve %36,17 takım ömründe iyileşme sağlandığı görülmüştür. Bu çalışma ile hBN/Grpt kesme tekniği, hBN/ MoS<sub>2</sub> ve Grpt/MoS<sub>2</sub> kesme tekniği ile karşılaştırıldığında sırasıyla yüzey pürüzlülüğünde %8,21 ve %14,95 iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir (Şirin, 2021). Şekil 2.7’de hibrit nano akışkanın hazırlanma işlemi görülmektedir.



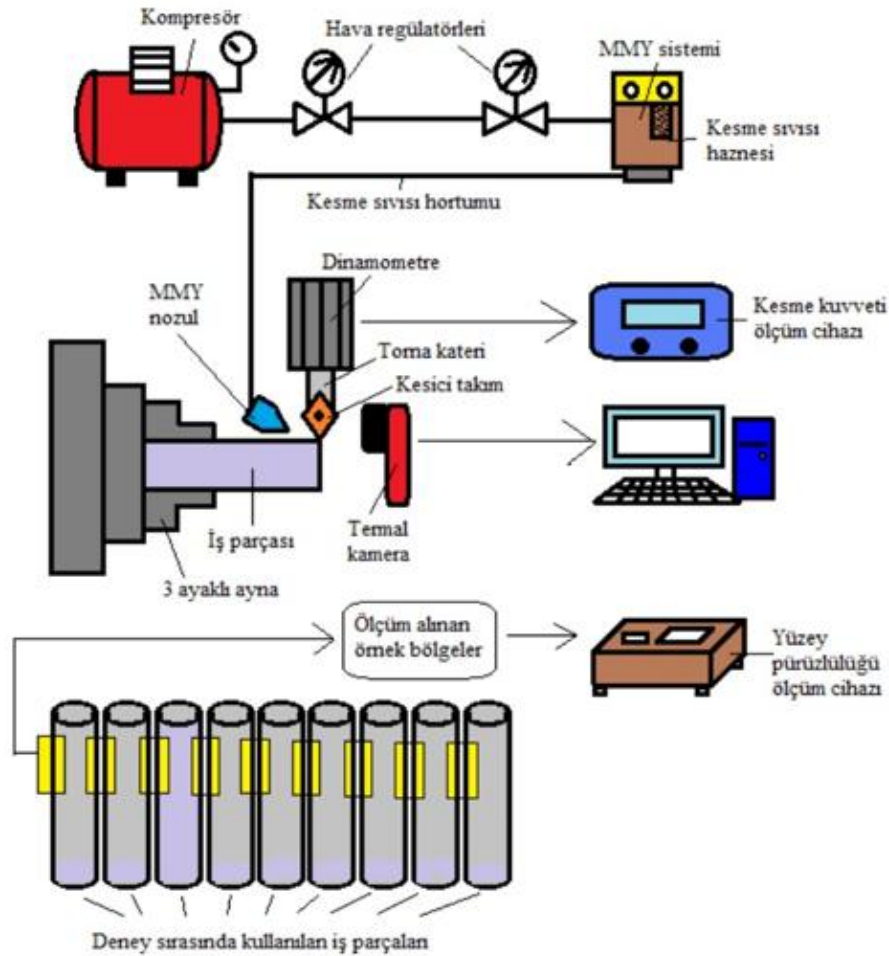


Şekil 2.7. Hibrit nano akışkanın karıştırılma işlemi: (A) Nano parçacık eklendi, (B) Üstten karıştırma, (C) Ultrasonik cihaz, (D) Manyetik karıştırıcı, (E) Hibrit nanoakışkan (Şirin, 2021)

Virdi ve arkadaşları 2021’de Inconel 718 alaşımının frezelenmesinde saf MQL, bitkisel yağ esaslı nano akışkan NFMQL ve geleneksel yağ olmak üzere üç farklı teknik kullanılarak araştırdılar. Deney testlerinde yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, taşlama enerjisi ve taşlama performansı (G oranı) gibi çıktı parametreleri belirlenerek analiz edildi. Deney testi sonuçlarında, bitkisel yağ bazlı NFMQL tekniğinin, Inconel 718 alaşımının takım-iş parçası ara yüzünde ince, sabit bir yağlama filmi oluşturma yeteneği sebebiyle yüzey pürüzlülüğünde, taşlama enerjisinde ve taşlama performansında (G oranı) artış meydana geldiği araştırmacılar tarafından görülmüştür. Ayrıca NFMQL sağlık ve çevre ile ilgili sorunları da çözebilmektedir (Virdi, 2021).

Er ve arkadaşı 2021’de yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımı TiAlN kaplı kesici takım ile birlikte kesme sıvısını kullanmadan önce tornalama işlemini gerçekleştirmiş, sonrasında mukayese etmek için aynı kesme parametreleri ile MQL sistemin içerisine eklenen ticari bitkisel esaslı kesme sıvısı ile tornalama yapılmıştır. Deney tornalama testlerinde kesme parametreleri farklı kesme hızları (60, 90 ve 120 m/dak ), farklı

ilerleme hızları (0,05; 0,15 ve 0,25 mm/dev ) ve kesme derinliği sabit (0,5; 1 ve 1,5 mm) olarak belirlenmiştir. Deney testi sonuçlarında sıcaklık, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü karşılaştırılmış ayrıca MQL sisteminin kuru işlemeye nazaran performans değişiklikleri hesaplanmıştır. Daha sonra sonuçlar Minitab uygulaması kullanılarak işleme alınmıştır. En uygun değer işleme parametrelerini bulmak için sinyal/gürültü oranları kullanılmış ve işleme parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkisi ise varyans analizi kullanılarak tespit edilmiştir. MQL sisteminin sürdürülebilirlik sebebiyle geleneksel kesme sıvısında kullanılan sıvı tüketimi MQL ile birlikte 1000 ml/sa iken 25 ml/sa tüketimine düşürülmüştür. MQL sistemi ile işleme parametrelerinin sıcaklığa, kesme kuvvetine ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri değişim gösterdiği anlaşılmıştır (Er, 2021). Şekil 2.8’de deney çalışmasının şematik fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 2.8. Deney çalışmasının şematik fotoğrafı (Er, 2021)

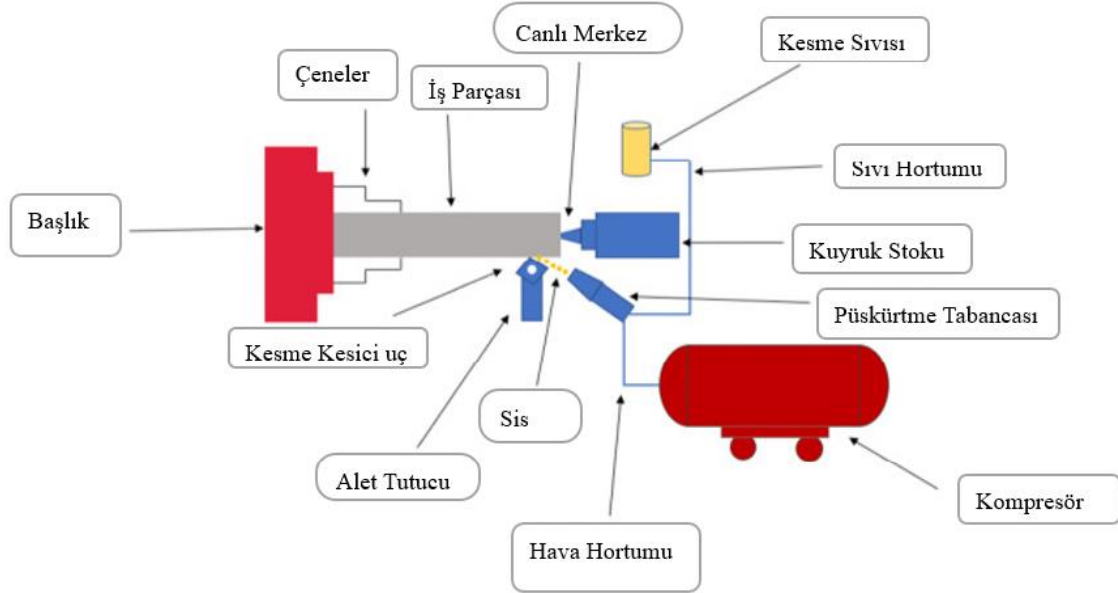
Şap 2022’de yaptığı bir deney çalışmasında AISI 5140 çeliğinin farklı kesme ortamları (hava, kuru, MMY) ile farklı kesme parametreleri (ilerleme hızı, kesme hızı) kullanılarak freze tezgâhında işlenebilirlik deneylerini analiz etmiştir. Analiz sonuçlarında ilerleme hızının artması ile birlikte yan aşınma miktarı azalmış olup kesme hızının artmasıyla da yan aşınma miktarının arttığı ve MMY ortamında yan aşınma miktarını azalttığı araştırmacı tarafından tespit edilmiştir. MMY ortamında yapılan işleme neticesinde basınçlı hava ortamına oranla takriben %17,06 oranında ve kuru işlemeye oranla takriben %29,32 oranında bir iyileşme gözlemlenmiştir. İstatistiksel analiz neticesinde kontrol faktörü olarak MMY ortamının en etkili ortam olduğu tespit edilmiş olup ANOVA analiz sonuçlarında kesme ortamının %90,349 oranıyla en yüksek kontrol faktörü olduğu saptanmıştır (Şap, 2022). Şekil 2.9’da kullanılan CNC freze tezgâhı görülmektedir.



Şekil 2.9. Deneylerin gerçekleştirildiği CNC dik işleme freze tezgâhı (Şap, 2022)

Saleem ve arkadaşının 2022’de yaptığı çalışmasında Inconel 718 süper alaşımının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemek için tornalama işlemi gerçekleştirdiler. Deneyler üç işleme kuru, MQLCO ve MQLSO ortamında gerçekleştirdiler. Deney MQL ve kuru işleme karşılaştırmak için Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanıldı. Deney kesme parametreleri kesme hızı ( 30, 50 ve 70 m/dak), sabit kesme derinliği 1 mm, ilerleme hızı (0,168; 0,281 ve 0,393 mm/dev) ve hava basıncı (2; 3,5 ve 5 bar) kullanıldı. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile takım aşınması analizi yapıldı. MQLCO ve MQLSO, kuru işleme ile karşılaştırıldığında bitkisel yağ bazlı MQL çok iyi performans göstermiştir. Deney testi sonuçlarına göre daha iyi yüzey bütünlüğü özellikleri ile Inconel 718 süper alaşımını tornalamak için MQLSO işlemi tercih edilmelidir. MQLSO işleminde yüzeyi ıslatması ve viskozitesi diğer kullanılan kesme

ortamlarının tamamından daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır (Saleem, 2022). Şekil 2.10’da kullanılan MQL sistemi görülmektedir.



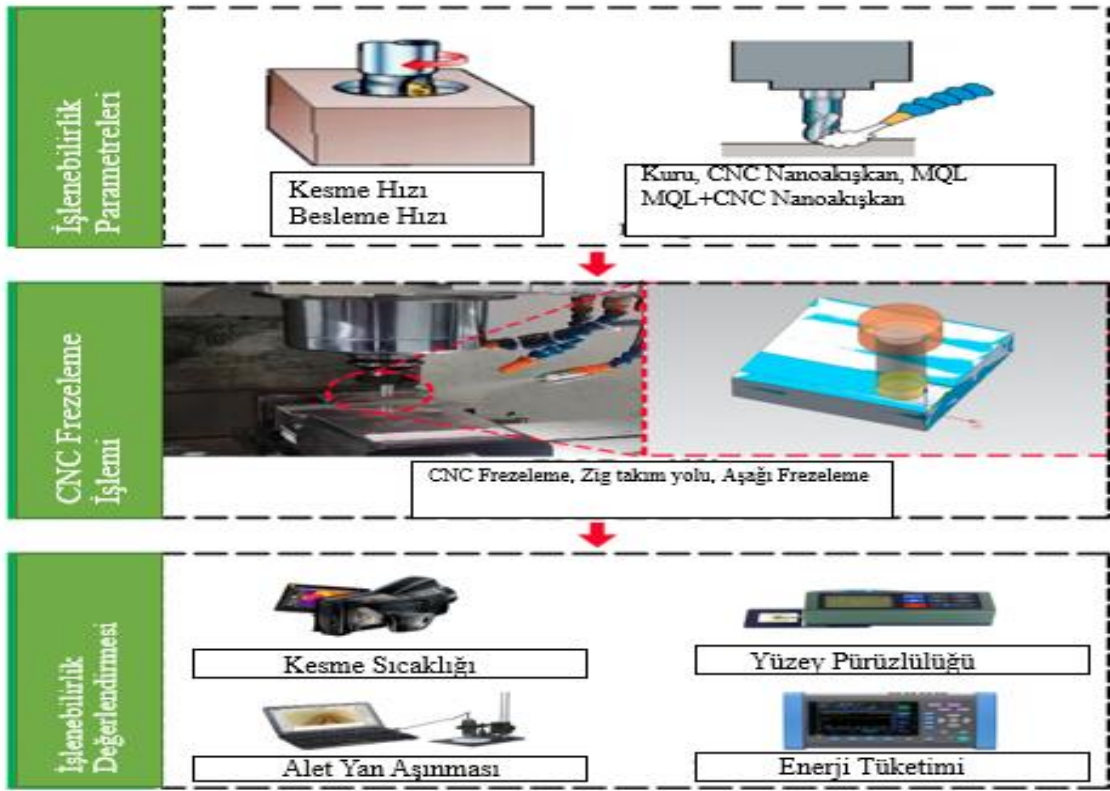
Şekil 2.10. Saleem ve arkadaşının kullandığı MQL sistemi şeması (Saleem, 2022)

Swain ve arkadaşları 2022’de Ti6Al4V alaşımını kaplamasız karbür kullanılarak, CNC tornalamasında işlenebilirlik performansı açısından demir ve alüminyum yağı destekli MQL işleme ve kuru işlemeyi karşılaştırmaktadır. Her iki işlemede de takım arızasına neden olan şiddetli aşınma, yapışma, ufalanma ve yayılma olduğu tespit edilmiştir. MQL, kuru tornalama ile kıyaslandığında yüzey kalitesi daha iyi ve takım titreşimi ise daha düşük elde edilmiştir. MQL işlemede takım ömrünün aynı işleme parametrelerinde kuru işlemeye göre %280 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. MQL işleme kuru işlemeye göre %12,38 daha düşük maliyet sunmaktadır. MQL işlemede Ti6Al4V alaşımının kaplamasız karbür takımı kullanılarak tornalanmasının kuru işlemekten daha ekonomik, daha hassas olduğu izlenildi ve seri üretim için tavsiye edilmiştir. Genel olarak demir alüminyum yağı esaslı MQL işleme, işlenebilirlik açısından kuru işlemeye göre daha üstündür (Swain, 2022).

Makhesana ve arkadaşları 2023’te yaptıkları çalışmada kuru işleme ve saf MQL ile kıyaslandığında MoS<sub>2</sub> ve grafit nano bazlı yağlayıcının gelişimini incelemişlerdir. Deney tornalama testlerinde ilerleme hızı 0,20 mm/dev, kesme hızı 70 m/dak ve 0,5 mm

kesme derinliği kullanılmıştır. MQL işlemede ayçiçek yağı kuru işlemede ise herhangi bir yağlama maddesi kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. MoS<sub>2</sub> ve nMQL tekniği için ayçiçek yağına grafit nano parçacıklar ilave etmişlerdir. Deney tornalama testlerinde takım aşınması, kesme sıcaklığı, talaş morfolojisi, tüketilen güç, yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler analiz edilmiştir. MQL ve nMQL (Grafit) şartlarına nazaran MoS<sub>2</sub> ilaveli ayçiçek yağının yağlama sayesinde takım aşınmasını azaltmıştır. MoS<sub>2</sub> ve ayçiçek yağı ilaveli nanoakışkan, MQL, kuru ve nMQL (Grafit) ile mukayese edildiğinde yüzey kalitesinde iyileşme gözlemlendi (Makhesana, 2023).

Usca 2023'te yaptığı çalışmasında Dillimax 690T iş parçasının CNC esaslı kesme sıvıları ile işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine araştırma yapmıştır. Araştırmacı çalışmasında farklı soğutma/yağlama (C/L) sıvıları ile selüloz nano kristal (CNC) nano tozlarını hazırlamıştır. Araştırmacı tarafından CNC nano tozlarını hacimce %0,5 oranında damıtılmış suya ekleyerek yeni bir nanoakışkan üretilmiştir. Deney parametreleri; farklı iki ilerleme hızı (0,05 ve 0,075 mm/diş) farklı iki kesme hızı (120 ve 150 m/dak), dört farklı soğutma/yağlama (C/L) ortamı (MQL yağı, kuru, MQL yağı + CNC, CNC nanoakışkan) kullanıldı. Araştırmacı, çift minimum miktar yağlama (MQL) yöntemi ile kesme alanına CNC esaslı kesme sıvısı ve baz sentetik yağ püskürtülerek işlenebilirlik testlerini frezeleme ile gerçekleştirdi. 16 deney gerçekleştirerek yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, enerji tüketimi ve kesme sıcaklığı sonuçları araştırmacı tarafından analiz edildi. Sonuçlara göre CNC nanoakışkan kullanılarak yapılan deneylerde malzemenin işlenebilirlik özelliklerinde önemli gelişmeler elde edilmiştir. MQL yağı + CNC nano akışkanı kullanan hibrit C/L ortamı, kuru işlemeyle mukayese edildiğinde tüm işlenebilirlik ölçümlerini %15'in üzerinde geliştirdiği görülmüştür. CNC nano tozlarının kullanılması, Dillimax 690T malzemesinin etkili yağlama ve soğutma yeteneği ile iyi bir frezeleme devamlılığını sunacağı gözlemlenmiştir (Usca, 2023). Şekil 2.11'de kullanılan deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.11. Deney düzeneği (Usca, 2023)

Velmurugan ve arkadaşları 2023'te yaptığı çalışmalarında Inconel 625'in hBN + hindistancevizi yağı nanoakışkan MQL tekniği ile tornalama testlerindeki kesme hızının ve ilerlemenin, pürüzlülük ve aşınma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Tornalama testlerinde ilerlemenin artmasıyla birlikte kuvvette artma, kesme hızının artması ile kuvvette azalma görülmüştür. Düşük kesme ve ilerleme ile yüzey pürüzlülüğü en aza indirdiği tespit edilmiştir. Deney sonuçlarında PVD ile hindistancevizi yağına ağırlıkça %0,50 oranında hBN ilave edilmesi işlemi zor malzemeler için araştırmacılar tarafından sürdürülebilir olduğunu gösterdi (Velmurugan, 2023).

Literatür araştırmalarından da elde edilen sonuçlara bakıldığında sürdürülebilirlik açısından MQL sisteminin kullanımı daha avantajlı olduğu görülebilmektedir. MQL sistemleri malzemelerde daha az takım aşınması ile daha uzun takım ömrü meydana getirerek, daha iyi bir yüzey kalitesi elde edildiği yapılan çalışmalar sonucunda görülebilmektedir. İşlenebilirlik açısından insan sağlığı için daha iyi olduğu ve sürdürülebilirlik açısından da daha iyi bir çevre dostu olduğu yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır.



### 3. ÇELİK

Çelik; karbon ve demir alaşımından oluşmaktadır. Karbon oranı %2'den az olan ve içerisinde diğer elementleri de barındıran malzemeler çelik olarak isimlendirilir. Çeliğe farklı özellik kazandıran içerisinde yer alan karbon dışındaki her elementtir (Tokgöz, 2021). Farklı bir özellik kazandırmak için, çeliğe ısıtıl işlem uygulanarak istenilen özelliklerde çelik elde edilebilir. Uygulanan ısıtıl işlemler neticesinde korozyon direnci, sertlik, elektriksel özellik, fiziksel ve mekanik özellikler elde edilmiş olur (Akyay, 2022). Üretimlerinde diğer metal üretimlere oranla daha az enerji harcaması, doğada diğer metallere nazaran daha fazla bulunması, istenilen özelliklerde kullanılabilmesi ve iyileştirilebilirlik açısı suretiyle endüstride yaygın olarak çelikler kullanılmaktadır (Alnak, 2020).

#### 3.1. Çeliklerin Genel Özellikleri

Çelikler içerdiği elementlerden dolayı kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptirler ve çeliklere genellikle ısıtıl işlem uygulanabilmektedir. Çelikler içerisinde bulunan kimyasal elementlerle mukavemetine uygun şartlarda ısıtıl işlem uygulanırsa süneklik kazanır, sünekliği sayesinde talaş kaldırabilme özelliği yüksektir. Ayrıca soğuk olarak da şekillendirilebilir. Yüzey kalitesi istenildiği gibi elde edilebildiğinden ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı sebebiyle plastik ve boyama ile kaplanmaya müsaittir. Kimyasal elementler ile birlikte alaşımlandırmaya ilave olarak ısıtıl işlem uygulaması yapılarak istenilen yüksek sıcaklık, korozyon, sertlik, tokluk ve mekanik özelliğe dayanım kazandırılabilir (Tokgöz, 2021).

#### 3.2. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler, gerek kullanım yerleri gerekse üretim yöntemleri açısından karbon ve demirden başka çeşitli alaşım elementlerini içerisinde barındırmaktadırlar. Çelik malzemelerin içeriğinde yer alan karbonun miktarı ile birlikte bulunan alaşım elementlerinin miktarları ve cinsi, çeliklerin birçok özelliklerini sağlayan ana etmenlerdir. Kimyasal bileşimleri

yanı sıra presleme, dövme, haddeme, ekstrüzyon, derin çekme, talaşlı imalat, kaynak gibi şekillendirme işlemlerine göre meydana gelen farklı kesit ve boyutta profiller, teller, levha, sıcak ve soğuk haddelenmiş sac gibi ürünler ve bu tür ürünlere farklı ısıt işlemlerden geçirilmesi neticesinde sahip oldukları farklı yapı ve özellikleriyle çelikler farklı gayelerle kullanılmaktadır. Kimya sanayisinde üretim, depolama, taşımada, ulaşım araçları üretiminde, çelik yapılarda, madencilikte, makine yapımında, genel yapıda, tesisatta ve madeni eşya olmak üzere çeşitli kullanım alanına sahiptir. Çelikleri kullanım alanlarına, içerisindeki alaşımlara, yapısına ve daha çok özelliğine göre sınıflandırıp ayırmak güç olacağından dolayı çelikler şekildeki gibi karbonlu çelikler ve alaşımlı çelikler olarak iki ana gruba ayrılmıştır (Alnak, 2020).

### **3.2.1. Karbonlu Çelikler**

Karbon demiri sertleştirmek için kullanılan en etkili ve ucuz alaşım elementidir. Karbonlu çeliğin imalatı esnasında kullanılan karbon oranı %0,04-%1,7 arasındadır. Uygulanan işlem ve karbon miktarı çeliğin mekanik özelliklerini belirlemektedir (Camcı, 2020). Demir dışında ana alaşım elementinden yalnız karbon bulundurmakla beraber içerisinde belli sınırlar çerçevesinde alaşım elementlerini de ihtiva eder. İçerdikleri karbon miktarına bağlı olarak tüm özellikleri ile sade karbonlu çelikler, sahip oldukları yapılar ile doğrudan ilgilidir. Çeliklerde bulunan çekme, akma dayanımları ve sertlikleri karbon miktarı arttıkça artmaktadır. Darbe dayanımı ve süneklik ise karbon miktarı arttıkça azalmaktadır. Karbon içeriğine göre sade karbonlu çelikler; az karbonlu, orta karbonlu ve yüksek karbonlu çelikler olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadırlar (Alnak, 2020).

#### **3.2.1.1. Az Karbonlu Çelikler**

Bu çelikler %0-0,20 aralığında karbon bulundurmaktadır. Yumuşak çelikler olarak da adlandırılmaktadırlar. Isıl işlem ile düşük karbon içermesi sebebiyle yeterince sertleştirilemezler. Çelik üretiminin Dünya üzerinde en büyük miktarını oluşturmaktadırlar (Alnak, 2020). Düşük karbonlu çelikler, bileşiminde %0,3 oranına kadar karbon bulundururlar ve üretildikten hemen sonra karbon içeriğinden dolayı ısıt işleme tabi tutulmazlar. Bu çeliklere ısıt işlem uygulaması iki işlemde uygulanmaktadır.



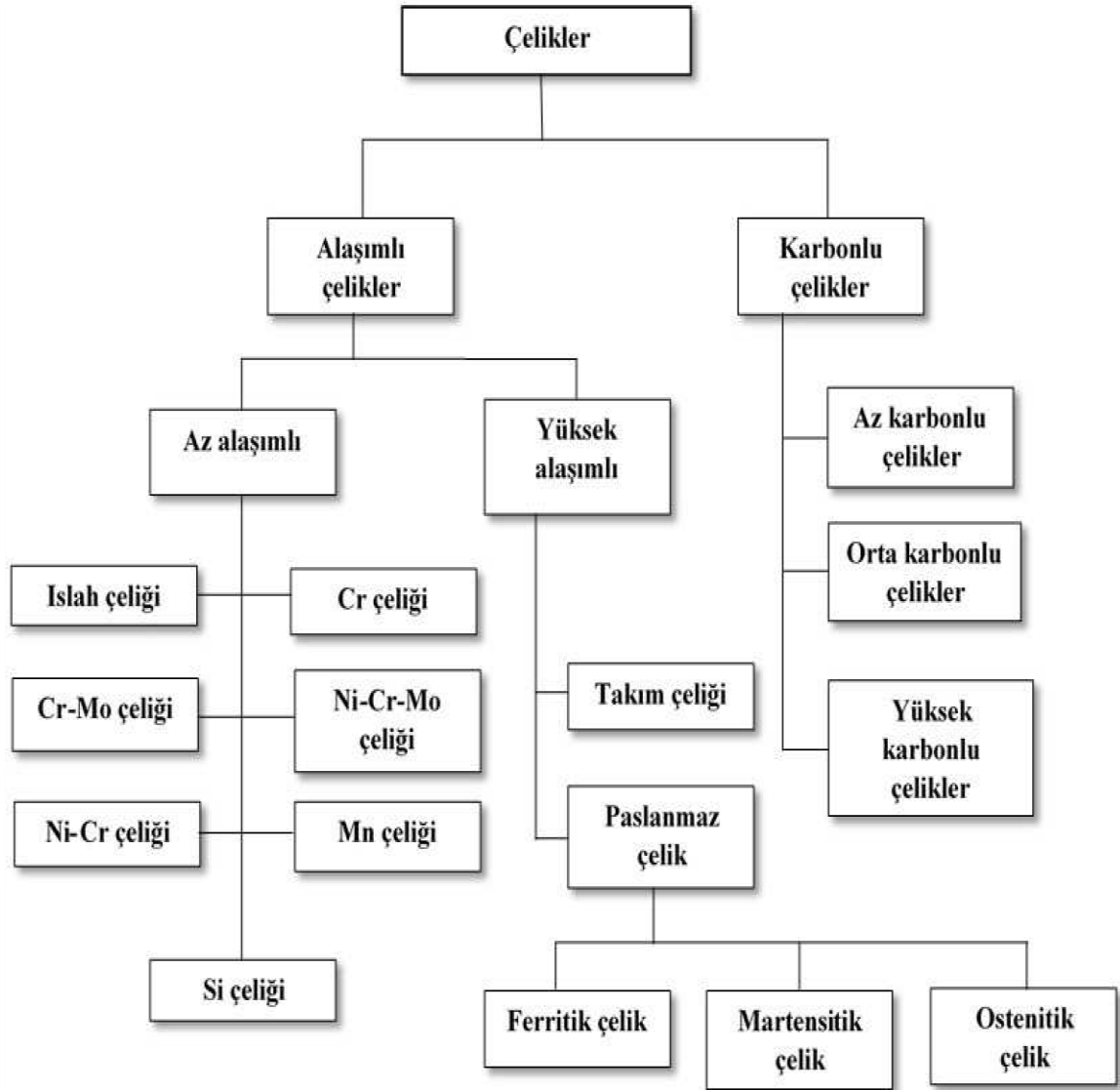
İlk işlemde çelik işlem sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta zengin bir karbon atmosferi ile doldurulmuş fırına yerleştirilir. İkinci işlem ise fırında ısıtılmış çeliğin oda sıcaklığında soğutulma işlemidir. Bunlar çoğunlukla levha veya şerit gibi yassı ürünlerden oluşmaktadır. Çoğunlukla soğuk haddelenmiş veya tavlanmış şekilde bulunur. Bu çelikler yüksek şekillendirilebilme özelliğine sahiptirler. Bu çelikler dikişsiz borular, dövme parçalar, kazan levhaları ve presler için kullanılmaktadır (Camcı, 2020).

### **3.2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler**

Orta karbonlu bu çelikler, %0,20 ve 0,50 aralığında karbon barındıran çeliklerdir. Karbon oranına bağlı olarak orta derecede mekanik özelliklerine sahiptirler. Isıl işlem ile yeteri derecede sertleştirilebilme kabiliyetine sahiptirler (Alnak, 2020). Karbon miktarının %0,3-%0,6 arasındaki çeliklerdir. Yapısında çeşitli alaşım elementleri yer almaktadır. Bu alaşım elementleri çeliğe ısı direnci, aşınma direnci, derin sertleşme ve darbe dayanımı sağlamaktadır. Bu alaşım elementlerinin başında manganez yer alır. Manganez oranı orta karbonlu çeliklerde %0,60 -%1,65 arasındadır. Bu çeliklere, hiçbir karbon katılmadan ısıl işleme tabi tutulabilmektedir. Bu çelikler, ısıl işlem uygulaması ardından sertlikleri 53 HRC-55 HRC düzeyine çıkabilmektedir. Bunlar akslar, şaftlar, krank milleri, kavramalar, dişliler ve dövme parçalarının üretiminde kullanılmaktadır (Camcı, 2020).

### **3.2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler**

Yüksek karbonlu çelikler ise %0,5'ten daha fazla karbon içerirler. Isıl işlem ile sertleştirilmeleri sayesinde sünekliği az olan yüksek mukavemetli çelikler, yüksek sertlik kazanırlar (Alnak, 2020). Kimyasal bileşimlerindeki karbon oranı %0,6-%2,4 arasındadır. Isıl işlem kabiliyetleri yüksektir. Isıl işlemin ardından sertlikleri 60 HRC'ye kadar çıkan bu çelikler el aletleri, yay malzemeleri ve dayanımı yüksek ürünlerin imalatında kullanılmaktadır (Camcı, 2020). Şekil 3.1'de çelik malzemelerin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3.1. Çelik malzemelerin sınıflandırılması (Alnak, 2020)

### 3.2.2. Otomat Çelikleri

Otomat çeliklerinde bulunan kükürt ve fosfor oranı düşük kesme kuvvetleri ve yüksek kesme hızları ile kolay işleme yapılır. Kükürt ve fosforun yağlayıcı özelliğinden dolayı daha temiz bir yüzey elde edilir. Kükürt ve fosfor talaşların daha kırılğan bir yapıda olmasını sağlar. İyi yüzey kalitesi istenilen durumlarda, kesici takım ömrü fazla olan yerlerde, otomotiv endüstrisinde ve seri imalat gerçekleştiren tezgâhlarda bu çelikler yaygın olarak kullanılmaktadır (Bıyık, 2019).

### 3.2.3. Nitrürlenebilen Çelikler

Nitrürleme iş parçası yüzeyinde korozyona engel olan dayanımı yüksek istenilen hallerde yapılan işlemdir. Nitrürleme işleminde malzeme yüzeyine azot difüzyonu yapılarak gerçekleştirilir. Böylece malzeme yüzeyinde sertliği yüksek bir tabaka oluşturulur. En önemli avantajları yüksek aşınma dayanımı, düşük yüzey sıcaklığı ve içyapıda değişikliklere neden olmamasıdır (Bıyık, 2019).

### 3.2.4. Islah Çelikleri

Bu çelikler, su verme işlemi yapılarak sertliklerinin sonucunda ortaya çıkan çeliklerdir. Islah çeliklerin karbon oranı %0,22-%0,6 arasındadır. Islah çelikleri alaşım çeliği ve karbonlu çelik şeklinde bulunur. Bu çeliklerden süneklik özellikleri ve yüksek mukavemet beraber aranır. Dövme parçaları, piston kolları, krank milleri, tahrik parçaları, dişliler, miller, akslar ve motor parçaları gibi yüksek dayanım gerektiren parça üretiminde kullanılır (Camcı, 2020).

### 3.2.5. Sementasyon Çelikleri

Malzemenin korozyon direnciyle sünekliğini belli bir oranda artırmak için sementasyon işlemi yapılır. Bu çeliklere takviye alaşım elementleri katılarak, içeriğinde yer alan karbon oranı fazlaştırılarak çekirdek bölgedeki direnci daha iyi hale getirebilmektedir. Yüksek aşınma dayanımı, malzeme yüzeyinde sertlik, dişli çarklar, kesici takımlarda içyapıda yüksek tokluk, diskler ve pistonlarda sementasyon uygulaması yapılmaktadır. Maliyeti açısından diğer çeliklerden daha ucuzdur (Bıyık, 2019).

### 3.2.6. Takım Çelikleri

Plastik, ahşap ve metale benzer malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Yüksek tokluk ve sertliğe sahip olmakla beraber aşınmaya karşı mükemmel mukavemet gösteren çeliklerdir. Kullanım alanlarına göre sınıflandırıldığında, plastik kalıp çelikleri, yüksek hız takım çelikleri, sıcak iş takım çelikleri ve soğuk iş takım çelikleri olarak sınıflandırılmaktadır (Bıyık, 2019).

### 3.2.6.1. Plastik Kalıp Çelikleri

Kalıplamadaki biçimlendirme ve termoplastik polimerlerin enjeksiyon uygulamalarında kullanılmaktadır. Korozyon dayanımı ve işlenebilirlik gibi özelliklerin kalıp imalatında büyük bir rolü vardır. Aşınma direncinin ve basınç direncinin yüksek olması istenilen özellikleri arasındadır (Bıyık, 2019).

### 3.2.6.2. Yüksek Hız Takım Çelikleri

Yüksek hızlı işleme sırasında sertliklerini korurlar. Yüksek tokluk ve sertliğe sahip olan bu çeliklerin içeriğindeki karbon oranı bir hayli fazladır. Bu çeliklerden iyi kesme istenilmektedir. Kılavuz, freze ve matkap gibi kesici takımlarda kullanılmaktadır (Bıyık, 2019).

### 3.2.6.3. Sıcak İş Takım Çelikleri

Sıcaklığı 600°C 'nin üzerinde olup metallere şekil vermek için kullanılmaktadır. Ana işlem burada döküm, dövme ve ekstrüzyondur. Kullanılan bu çeliklerin yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasının beraberinde tokluğu ve yorulma dayanımı da yüksek olması gerekmektedir (Bıyık, 2019).

### 3.2.6.4. Soğuk İş Takım Çelikleri

Karbon oranı düşük olan bu çelikler, 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda, metal şekillendirmede kullanılmaktadır. Kütük, damgalama veya levha kütük işleme gibi yerlerde kullanılmaktadır (Bıyık, 2019).

### 3.2.7. Alaşımli Çelikler

Bir veya birden fazla alaşım elementi eklenmek suretiyle elde edilen ve karbonlu çeliklerden normal olarak elde edilemeyen kendine özgü özellikleri elde edebilmek için oluşturulan çelikler alaşımli çeliklerdir. Bu çelikler düşük alaşımli (alaşım elemanlarının toplamı %5'ten az olan) ve yüksek alaşımli (alaşım elemanlarının toplamı %5'ten fazla olan) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadırlar (Alnak, 2020). Çelik pazarında çok az bir

yeri olmasına rağmen önemli bir sektör olan alaşımlı çelikler düşük alaşımlı, paslanmaz ve takım çelikleri olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Alaşımlı çelikler, karbon dışında eklenen diğer alaşım elementleri sayesinde farklı özellikler kazanır. Alaşımlı çeliklere bu elementlerin kattıkları özellikler aşağıda sunulmaktadır;

Çeliğin sertliği artmaktadır. Düşük veya yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik özellik gösterir. Gelişmiş tokluk, gelişmiş aşınma direnci, korozyon direnci yüksek, gelişmiş manyetik geçirgenlik veya manyetik kalıcılık sunar (Camcı, 2020).

#### **3.2.7.1. Düşük Alaşımlı Çelikler**

Bu çelikler, %6 oranından az krom, %1,8 oranından az nikel ve %0,65 oranından az molibden içermektedirler. Çeliğe krom, nikel ve molibden gibi alaşım elementleri eklenerek normal karbonlu çeliklere oranla mekanik özellikleri daha üstün bir hale gelmektedir. Alaşım elementlerinin eklenmesindeki amaç, ısıtılma işlemin ardından mekanik özellikleri ve tokluğu en iyi hale getirmek için sertleştirmeyi arttırmaktır. Gerilme dayanımı  $450 \text{ Nmm}^2$  ile  $1000 \text{ Nmm}^2$  arasında değişmektedir. Bu düşük alaşımlı çelikler dört başlık altında toplanabilmektedir. Nikel çelikler, molibden çelikler, nikel-krom çelikler ve krom-molibden çeliklerdir. Düşük alaşımlı çelikler ısıtılma işlemlerine göre su verilmiş ve temperlenmiş, normalize edilmiş ve temperlenmiş veya tavlanmış olarak üç sınıfa ayrılmaktadır (Camcı, 2020).

#### **3.2.7.2. Orta Alaşımlı Çelikler**

Isıl işlem uygulanarak sertleşmesi sağlanan bu çeliklerin, içeriğinde bulunan karbon miktarının uzun ömürlü aşınma yüzeyi sağlayacak kadar yüksek değildir. Orta alaşımlı çelikler %5-%12 arasındaki alaşım elementlerine sahiptirler (Camcı, 2020).

#### **3.2.7.3. Yüksek Alaşımlı Çelikler**

Yüksek direnç ve iyi ısı dayanıma sahiptirler. Bu çelikler, %12 oranından fazla miktarda alaşım elementi içerirler (Camcı, 2020). Alaşım elementlerinin toplam miktarları ağırlık olarak %5'ten büyük çeliklerdir. Yüksek alaşım olduğunu belirlemek için çeliğin isminin önüne "X" harfi yerleştirilmiştir. Sonra gelen sayı % C \* 100 karbon miktarıdır. Ardından alaşım elementinin sembolleri ve bu alaşım elementlerinin % olarak

ağırlıklarının miktarları yazılarak alaşım elementlerinin çarpanları “1” olarak kabul edilir. En çok miktarda içerdiği alaşım elementinden en az içerdiği alaşım elementine göre yazılır (Kartes, 2024).

**Örnek:** X33CrS16

%0,33 karbon, %16 Krom içeren Krom-Kükürt alaşımlı, yüksek alaşımlı çelik

**Örnek:** X7CrNi19 8

%0,07 Karbon, %19 Krom ve %8 Nikel içeren yüksek alaşımlı çelik (Hasçelik,2024)

**Örnek:** X50NiCrWV14

%0,50 karbon, %14 Nikel içeren Ni-Cr-W-V alaşımlı yüksek alaşımlı çelik (Hasçelik,2024)

### 3.2.7.3.1. X33CrS16 Çeliği

X33CrS16 (1. 2085) çeliği, korozyona dayanıklı bir martenzitik paslanmaz takım çeliğidir. Bu çeliğin sertlik değeri 44-46 HRC arasındadır. Bu malzeme ayna parlaklığı sağlayacak şekilde cilalanmış bir yüzeye sahip sertleştirilmiş haliyle en iyi korozyon dayanımı olan ve mıknatıslanabilir bir çeliktir. Sıcak şekillendirme kalıpları için ölçünlü bir malzemedir. Nemli veya ıslak koşullarda çalışmaya uygundur (Sağlam Metal, 2023).

X33CrS16 (1. 2085) çeliği, ısıtım işlemi esnasında mükemmel boyutsal dayanıklılığını korumaktadır. X33CrS16 (1. 2085) çeliğinin kükürt içermesinden ötürü iyi işlenebilirlik sağlamaktadır. X33CrS16 (1. 2085) çeliği, iyi mekanik dayanım ve tokluk sağlar. Dövme kalıpları, alüminyum enjeksiyon kalıpları, ekstrüzyon takımları, sıcak kesme bıçakları gibi alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Darbe mukavemetinin yüksek olması sebebiyle gerektiğinde kalın sac kesme kalıplarında da tercih edilmektedir (Sağlam Metal, 2023).

Kimyasal bileşim açısından X33CrS16 (1. 2085) çelik takriben %0,28-%0,38 karbon ve %0,15-%0,17 krom içermektedir. Bu bileşenler sayesinde olağanüstü korozyon dayanımı ve aşınma dayanımı sağlar. Havayla sertleşme özelliğinden ötürü kaynaklanabilirliği daha zayıftır. X33CrS16 (1. 2085) çeliği, gıda sanayisi kalıplarında korozyona karşı

dirençliliği sebebiyle gıda ürünleriyle temas halinde olan kalıpların imalat kullanımına çok uygundur. PVC gibi aşındırıcı malzemelerle karşılaştığı ortamlarda üstün performans gösterdiği için kullanımı uygundur. X33CrS16 (1. 2085) çeliğinin, yüksek sıcaklıkta korozyon dayanımı sayesinde dişçilik ve cerrahi aletler, tıbbi alet imalatı gibi alanlarında tercih edilir. Üreticiler şablonlar ve çerçeveler alanında yüksek basınca ve aşınmaya etkili bir şekilde dayanabilen kalıplama çerçevelerinin imalatında kullanırlar.

1. 2085 malzemesi, kimyasal olarak aşındırıcı plastikler veya nemli şartlar içeren kalıplama operasyonlarında önemli bir rol oynar ve böylece kalıp bakımı ihtiyacını azalttığı için kimyasal korozyona dayanıklı plastik kalıplarda tercih edilmektedir. Yapısal bileşenlerin ve enjeksiyon kalıplarının üretiminde de tercih edilir. Su ve buhar vanalarının imalatında kullanılır. 1. 2085 malzeme, korozyona dayanıklı, yüksek mukavemetli taban plakalarının üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Otai Özel Çelik, 2023). Tablo 3.1’de 1. 2085 iş parçasının kimyasal bileşimi görülmektedir.

Tablo 3.1. 1. 2085’in Kimyasal bileşimi (kütle oranı)(ağırlıkça %) (DongGuan Misung kalıp Steel Co, 2023)

| <i>C(%)</i> | <i>Si(%)</i> | <i>Mn(%)</i> | <i>P(%)</i> | <i>S(%)</i> | <i>Cr(%)</i> | <i>Ni(%)</i> |
|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 0,28-0,38   | Maks 1,0     | Maks 1,0     | Maks 0,030  | 0,05-0,10   | 15,0-17,0    | Maks 1,0     |

1. 2085 plastik kalıp çeliği ek parçaların veya kalıbın düşük yüzey ihtiyaçları için elverişli, genellikle aşındırıcı aksesuarlar ilk sırada yer almak üzere plastik ürünlerin yapımında kullanılan ve üretimi yapılan bir çeliktir (DongGuan Misung kalıp Steel Co, 2023).

#### 4. PASLANMAZ ÇELİKLER

Maksimum %2,06 karbon içeren demir karbon alaşımları çelik olarak isimlendirilmektedir. Çelikler saf karbonlu olabilirler. Bunun yanı sıra çeliklere bazı alaşım elementleri ihtiva edilerek çeşitli özellikler kazandırılır. Normal alaşımsız çelikler ve az alaşımlı çelikler koroziyon olaylara karşı kararlı ve sağlam olmadıkları durumlarda, genellikle bu tür uygulama alanları için paslanmaz çeliklerin tercih edilerek kullanılması gerekmektedir (Şenyüz, 2008).

Paslanmaz çelik, bileşiminde en az %11 krom içeren bir çelik türüdür. Bu paslanmaz çeliklere yüksek korozyon dayanımı sağlayan element ve yüzeye sıkıca yapışan sünek, yoğun, çok ince ve şeffaf bir oksit tabakasının bulunmasıdır. Bu çok ince amorf tabaka sayesinde paslanmaz çelik kimyasal tepkimelere girerek pasif olarak direnebilir ve indirgeyici olmayan koşullarda korozyona karşı dayanım kazanmaktadır (Yeşiltaş, 2022). Bu oksit tabakası oksijen koşullarında oluşarak ve aşınma, kesme veya işleme gibi dış etkilere dolaylı bozulsa bile kendi kendini yenileyip onararak tekrardan eski özelliğine gelir (Şenyüz, 2008).

Paslanmaz çelik, diğer paslanmaz çelik türleri ile mukayese edildiğinde yüksek mekanik mukavemetinin beraberinde stres korozyonu, çatlama ve oyuk korozyonuna karşı yüksek dayanımı ile öne çıkmaktadır. Bu nedenle petrol ve gaz boru hatlarında, nükleer tesislerde, kimya tesislerinde ve deniz alanlarında kullanımı yaygındır (Yeşiltaş, 2022).

Dünyada her yıl takriben 20 milyon ton paslanmaz çelik tüketimi gerçekleşmektedir. Genellikle yassı ürünler şeklinde, küçük miktarlarda; borular, çubuklar, tel, dövme gibi ve döküm şeklinde kullanıldığı görülmektedir. Paslanmaz çelik diğer çeliklerle kıyaslandığında çok pahalıdır. Fakat paslanmaz çeliğin bakımı kolay olduğundan ve uzun ömürlü olması sebebiyle daha çok tercih edilir. Bunun yanı sıra paslanmaz çelik, tamamen geri dönüştürülebilir ve sürdürülebilir çevre dostu olan bir malzemedir. Bu nedenle malzemenin uzun ömürlü olması dikkate alınarak ve bir fiyat analizi yapıldığında



tasarımda paslanmaz çelik kullanmanın daha ekonomik ve avantajlı olduğu görülebilir (Yeşiltaş, 2022).

Paslanmaz çeliklerin çevre ile temas etmesi esnasında yüzeyinde sünek, birbirinden ayrılması zor, yapısı yoğun ve inceliği çok az olan saydam bir krom oksit (CrO) katmanı oluşmaktadır. Oluşan krom oksit katmanı aşınma olaylarına karşı daha fazla dayanım sağlamaktadır. Bununla beraber oluşabilecek oksidasyonun malzeme içerisine girmesini engelleyerek pas oluşumunu durdurmaktadır. İş parçasının kullanılması ve yahut işlenmesinden dolayı katmanın bütünlüğü deforme olduğu anlarda kendi kendini onarır yenileyerek eski özelliklerine yeniden kavuştuğu görülmektedir. Yüksek alaşımlı paslanmaz çelik nitelikleri klorür ve alkali çözeltiler içeren ortamlarda dahi dayanım gösterir. Düşük alaşımlı paslanmaz çelik nitelikleri ise daha çok hava ve benzeri gibi atmosferik etkenlere karşı direnç gösterir (Acar, 2020).

#### **4.1. Paslanmaz Çeliklerin Genel Kullanım Alanları**

Paslanmaz çeliklerin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Günlük hayatımızın neredeyse her alanında karşımıza çıkmaktadır (Yeşiltaş, 2022).

Paslanmaz çeliklerin kullanımı günümüzde ziynet eşyalarından endüstri alanına kadar uzamaktadır. Paslanmaz çelikler günlük hayatımızda her gün karşılaştığımız mutfak aletinden tutun da gezinti yaptığımız bir sokakta bir gökdelenin dış duvarlarını kaplayan dekoratif bir malzeme olarak karşımıza çıkabilmektedir (Dengiz, 2014).

Yüksek korozyon direncine sahip olması ve yüksek sıcaklığa dayanıklılığı sayesinde otomotiv sanayine yönelik ısı eşanjörleri alanında da geçerlidir. Kimya endüstrilerinde, süt ürünleri takımlarında veya matbaada düşük karbonlu sürümleri karşımıza çıkmaktadır. Petrokimya sahalarında, buhar kazanlarında 600 °C sıcaklığa kadar dayanabildiklerinden dolayı buralarda da kullanılmaktadır. Basınçlı kapların yapımında, gıda sanayinde, fırın aksamalarında, dekoratif mühendislikte, depolama tanklarında ve birçok farklı alanda paslanmaz çelikler kullanılmaktadır (Yeşiltaş, 2022).

#### 4.2. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri

Paslanmaz çeliklerin en çok tercih edilme nedenleri aşağıda sunulmuştur.

- ✓ **Korozyon Dayanımı:** Paslanmaz çelikte bulunan minimum (%10,5) krom içeriği sayesinde, kromun sudan veya havadan gelen oksijen ile tepkimesi neticesinde yüzeyde meydana gelen pasif bir krom oksit tabakası sayesinde paslanmaz çelikler sürekli olarak korunur. Yüzeyde çizilmeler olursa kendini yeniler, bu özelliği sayesinde paslanmaz çeliklerde korozyon dayanımı sağlanır ve bundan dolayı paslanmaz çelik türlerinin tamamının korozyona karşı dirençleri yüksektir. Bu tür çelikler yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilir (Akyay, 2022).
- ✓ **Mekanik Dayanım:** Paslanmaz çelikleri diğer çelik türleri ile mukayese ettiğimizde, ortam sıcaklığında mekanik özellikleri güçlüdür. Paslanmaz çelikler soğuk şekillendirme ile sertleştirildiğinden dolayı dayanım artması özelliği sebebiyle tasarımlarda yapılan malzeme kalınlıkları da inceltilebilir parça ağırlığı ve maliyette azalışlar sağlanmaktadır. Paslanmaz çeliğin bazılarında ise uygulanan ısıtma işlemi uygulanarak malzemeye yüksek dayanım özelliği verilebilir. Üstelik hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik davranış gösterirler (Akyay, 2022).
- ✓ **Düşük ve Yüksek Sıcaklıklar:** Paslanmaz çeliğin bazı türlerinde sıcaklık artışlarında bile tufalleşme ve malzemenin mekanik dayanımında yeterli miktarda azalma gözlenmez. Bazılarında ise çok düşük sıcaklıklarda bile tokluklarını koruyarak gevrekleşmezler (Akyay, 2022).
- ✓ **Uzun Ömür:** Sürdürebilir yapı gereksinimleri paslanmaz çeliğin uzun ömürlü olması sayesinde tercih edilir. Az bakım gerektiren ve dayanıklılığı ile uzun ömürleri sayesinde paslanmaz çelikler ekonomik malzemelerdir (Akyay, 2022).
- ✓ **Görünüm:** Paslanmaz çelik parlak, mat, fırçalanmış ve oyulmuş gibi farklı yüzey kaplamalarına sahiptirler. Yüzeylerin bakımı kolay olduğundan uzun süre korunabilirler.
- ✓ **İmalat Kolaylığı:** Paslanmaz çeliklerin çoğu kolaylıkla kaynak edilebilir, kesilebilir, şekillendirilebilir, imal edilerek ve işlenebilirler (Akyay, 2022).

- ✓ **Hijyenik özellik:** Bakımı ve temizliği kolay olan paslanmaz çelikler hijyenik özelliği sebebiyle mutfaklarda, hastanelerde, gıda ve ilaç sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Akyay, 2022).

#### 4.3. Paslanmaz Çeliklerin Metalurjik Özellikleri

Paslanmaz çeliklerin içerisinde bulunan, paslanmazlık özelliğini veren bu elementlerin beraberinde diğer ihtiyaçlarını giderebilmek amacıyla isteyerek dahil edilen alaşım elementleridir. İstek dışı yer alan karbon ve diğer alaşım elementleri yer almaktadır. Katışıkları (içine başka şeyler karışmış olan, saf olmayan) ve bu alaşım elementlerinin ve etkileri aşağıda sunulmuştur: (Bilgin, 2008).

- ✓ **Mangan:** Östenik yapıcı bir elementtir. Oda sıcaklığı ve yakın sıcaklıklarda, östenitin kararlı bir halde olmasını sağlayan bir elementtir. Tam östenitik alaşımlarda kaynak metalinin çatlama mukavemetini artıran bir elementtir. Ancak yüksek sıcaklıklarda mangan sülfat ve ferrit oluşturmaktadırlar (Kaplan, 2014).
- ✓ **Azot:** Güçlü bir östenit yapıcıdır ve dayanım artırıcı özelliğe sahiptir. Az karbonlu ve yüksek kromlu çeliklerde yüksek sıcaklıklarda meydana gelen tane büyümesini engellemek için eklenir. Sıfır (0) altı eksi sıcaklıklarda kaynak metali tokluğunu ters yönde etki sağlar (Bilgin, 2008).
- ✓ **Titanyum:** Güçlü ferrit oluşturan aynı zamanda güçlü bir nitrür ve karbür yapıcı olan bu element, östenitik paslanmaz çeliklerde krom karbür çökmesini önlemek için dengeleyici olarak kullanılır. Bazı yüksek sıcaklıklarda dirençli alaşımlara sertlik mukavemet artırıcı etkilerinden dolayı eklenir. Yüksek dayanım ve bazı ısıya dayanıklı alaşımlara ise yaşlanma sertleşmesini etkilemek amacıyla alüminyum elementi ile beraber katılır (Kaplan, 2014).
- ✓ **Silisyum:** Ferrit yapıcı olan bu element, östenik çeliklerde korozyon dayanımı artırmak için kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta kullanılan çeliklerin karbürizasyon dayanımını artırmak amacıyla kullanılırlar. Yüksek sıcaklıkta tufalleşme dayanımını artırıcı etkisi vardır (Bilgin, 2008).
- ✓ **Tungsten ( Wolfram ):** Kuvvetli bir ferrit yapıcı olan bu element yüksek sıcaklık alaşımlarının bazılarında katılarak mukavemetini artırarak ve sürünme dayanımını da arttırmaktadır (Ölmez, 2014).

- ✓ **Niobyum:** Kuvvetli bir karbür yapıcı olan bu element östenitik paslanmaz çeliklerin krom karbür çökmesine karşı dengelemek için kullanılır. Bu element orta düzeyde ferrit yapıcıdır. Bazı yüksek dirençli alaşımlara mukavemet ve sertliği artırmak için eklenir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin bazı türlerine ise karbonu bağlayarak çeliğin sertleşme eğilimini düşürmek için eklenir (Ölmez, 2014).
- ✓ **Nikel:** Dengeleyici ve kuvvetli bir östenit yapıcı olan bu elementin, kaynak metali tokluğunu artıran bir önemi bulunmaktadır. Korozyona karşı direnci, yüksek sıcaklıklardaki dayanımı ve sünekliliği artırıcı etkisi vardır. Paslanmaz çeliklerde mekanik özellikleri iyileştirmektedir (Kaplan, 2014).
- ✓ **Krom:** Tufalleşme ve korozyon dayanımı sağlayan ferrit ve karbür yapıcı olan, alaşım elementidir. Kromun paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve sürünme direncine bariz bir etkisi olmamaktadır (Kaplan, 2014).
- ✓ **Alüminyum:** Güçlü bir ferrit yapıcı ve %12 krom içeren kaynak metaline eklenerek yapıyı sertleşmez yani ferritik hale getirir. Yüksek sıcaklıklarda tufalleşme dayanımını artırmak amacıyla kullanılır. Bazı yüksek dayanımlı alaşımlara titanyum ile birlikte eklenerek yaşlanma sertleşmesi olayını düşürmektedir. Bunun yanı sıra güçlü bir nitrür yapıcıdır (Bilgin, 2008).
- ✓ **Karbon:** Güçlü bir östenit yapıcı olan bu element, yüksek dayanımlı alaşımlara sertleştirme ve mukavemet arttırmak için eklenir. Bu element kaynak metalinin korozyon dayanımını ve düşük sıcaklıktaki tokluğunu ters yönde etkilemektedir (Bilgin, 2008).
- ✓ **Kobalt:** Paslanmaz alaşımların birçoğunun yüksek sıcaklıklardaki mukavemet ve sürünme özelliklerini iyileştirmek için bu element eklenir (Kaplan, 2014).
- ✓ **Kükürt, Selenyum ve Fosfor:** Kaynak metalinde çatlamayı teşvik eden elementlerdir. Bu elementlerden herhangi bir tanesiyle ve az bir miktarda zirkonyum ya da molibden, paslanmaz çeliğe eklenerek, paslanmaz çeliğin talaşlı üretime eğiliminin artırıcı etkisi görülür (Bilgin, 2008).

#### 4.4. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özellikleri

Paslanmaz çeliklerin aşınma dayanımlarını, işlenebilme özelliklerini, kaynak kabiliyetlerini ve bunun gibi uygulama alanlarını artırabilmek amacıyla ihtiva edilen

alaşım elementleri paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerini de çok etkilemektedir. Paslanmaz çelikler karbonlu çelikler ile mukayese edildiğinde ısı ve elektrik iletkenliği oldukça zayıf olduğu görülmektedir. Paslanmaz çeliklerin termal iletkenliği karbonlu çeliklerin %50'sinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu paslanmaz çeliklerin elektrik öz direnci ise karbonlu çeliklerden altı (6) kat daha büyük olduğu bilinir. Östenitik alaşımlar karbonlu çeliklerle kıyaslandığında termal genleşme katsayısı %50 daha büyüktür. Ferritik paslanmaz çeliklerin, östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla elektrik iletme dirençleri %20 daha düşüktür. Ferritik paslanmaz çeliklerin, östenitik paslanmaz çeliklere oranla özgül ısıları da %10 daha düşük olduğu bilinmektedir. Paslanmaz malzemelerin tamamının elektrik dirençleri alaşımsız çeliklere oranla takriben 4 ila 7 kat daha yüksektir. Dolayısıyla paslanmaz çeliklerin kaynağında yüklenmekte olan elektrotlar %25 daha az akım şiddetine sahiptirler (Karcı, 2008).

#### **4.5. Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri**

Malzemelerin uygulanan gerilme ile birlikte kalıcı şekil değiştirme davranışları paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleriyle ilgilidir. Mekanik özellikler sadece kristal yapıları ve atom türleri değil, tane büyüklüğüne yani içyapılarına bağlıdır. Malzemelerin biçimlerinin kalıcı olarak ne zaman şekil değiştirebileceğini bilmek önemlidir. Malzemelerin mekanik özellikleri malzemenin boyutuna malzemenin şekline bağlıdır. Şekil değiştirme kabiliyeti ile malzemenin kırılma davranışı ve dayanım en önemli mekanik davranışlar olarak bilinmektedir (Karcı, 2008).

#### **4.6. Paslanmaz Çelik Türleri**

Farklı özelliklerde alaşımlar elde etmek için paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilir. Molibden ve nikel gibi alaşım elementleri eklenerek veya krom miktarı yükseltilerek korozyon dayanımı artırılabilir. Titanyum, niyobyum, silisyum, selenyum, alüminyum, bakır, kükürt ve azot gibi bazı elementler ile alaşımlama ilavesiyle pozitif etkiler sağlanabilir. İmalatçılar ve makine tasarımcıları çeşitli kullanım alanları için en uygun özellikteki paslanmaz çeliği permüte etme şansına sahip olurlar. Önem sırasına göre paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen nikel, krom, mangan ve molibden en önemli alaşım elementleridir. Ferritik veya östenitik olmasını, bu alaşım elementleri

arasından öncelikle krom ve nikel içyapılarını belirlemektedir. Paslanmaz çelikler içyapılarına göre beş ana sınıfta gruplandırılırlar. Bunlar sırasıyla aşağıda açıklanarak sunulmuştur:

- Östenitik paslanmaz çelikler
- Ferritik paslanmaz çelikler
- Dupleks (Ferritik-Östenitik) paslanmaz çelikler
- Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler
- Martenzitik paslanmaz çelikler (Yıldırım, 2019).

#### 4.6.1. Östenik Paslanmaz Çelikler

Östenik çeliklerin ana bileşimi %8 nikel ve %18 krom'dur. Paslanmaz çeliğin bileşiminde yeterli miktarda nikel elementi varsa içyapısı oda sıcaklığında bile östenik olmaktadır. Korozyon direnci ve mekanik özellikleri açısından uygun bir seçim sunarlar. Düşük sıcaklıklarda bile biçimlendirme kabiliyetleri, süneklilikleri ve toklukları mükemmeldir. Östenik içyapıları dönüşüm göstermediğinden dolayı sertleştirme ısı işlemleri uygulanmayan bu manyetik olmayan çeliklerin mekanik dayanımlarının artırılabilmesi yalnız soğuk şekillendirme ile yapılabilir. Paslanmaz çeliklerin toplam imalatı içerisinde östenik çeliklerin payı %70'tir. Kullanım açısından ve alaşım kalitelerinin fazlalığı açısından en zengin grup östenik çelikler olup ve arasında en yaygın kullanılan 304 kalitedir (Aran & Temel, 2004).

##### Genel Özellikleri

- Pekleşme ile dayanımları artırılabilir.
- Bu çeliğin temizlik işlemi ve bakımı oldukça kolaydır.
- Düşük sıcaklıklarda bile mükemmel mekanik özelliklerine sahiptirler.
- Yüksek ısıda iyi mekanik özelliklerine sahiptirler.
- Sünek olmaları sebebiyle kolay şekillendirilebilirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetlerine sahiptirler.
- Korozyon direncine sahip çeliklerdir (Aran & Temel, 2004).

##### Kullanım Alanları

Asansörlerde, imalat ve makine sanayisi çeşitli uygulamalarında, mutfak aletlerinde, mutfak evyelerinde, mimari uygulamalarda, bina ve dış cephe kaplamalarında, gıda işleme takımlarında östenik çeliklerin kullanımını görmekteyiz (Aran & Temel, 2004).

#### 4.6.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Martenzintik çelikler gibi sadece krom içeren paslanmaz çeliklerdir. Fakat martenzintik paslanmaz çeliklerden farkı %15-30 daha yüksek krom içermeleridir. Hacim merkezli kübik yapıda olan bu çelikler, faz dönüşümü göstermediklerinden dolayı sertleştirilemezler. Bu paslanmaz çeliklerde bulunan karbon, azot ve krom elementleri sayesinde mekanik ve korozyon özellikleri etkili bir şekilde belirlenmektedir. Krom içeriği artırılarak korozyon özellikleri de olumlu yönde artmaktadır. Fakat azot ve karbon içeriği belirli limitler altına düşürülmedikçe kaynak edilebilme, soğuk şekillendirilebilme, tokluk gibi mekanik özelliklerini kötü etkilemektedir. Bu ferritik paslanmaz çeliklerin avantajları ise düşük fiyatlarda, atmosferik koşullardaki korozyon ve üstün oksidasyon dayanımlarıdır (Gök, 2008).

##### Genel Özellikleri

- Östenik çelikler kadar kolay şekillendirilemezler.
- Manyetik özelliklere sahiptirler.
- Isıl işlem ile mukavemet artırılmaz, yalnız tavlanmış durumda kullanılır.
- Krom miktarının artması ile birlikte orta ila iyi derece aralığında olan korozyon direnci iyileşir.
- Kaynak edilebilme yetenekleri düşüktür (Aran & Temel, 2004).

##### Kullanım Alanları

Dekoratif uygulama alanlarında, sıcak su tanklarında, otomobil şasi parçalarında, mutfak gereçlerinde ve egzoz elemanlarında kullanılmaktadır (Aran & Temel, 2004).

#### 4.6.3. Dupleks (Ferritik-Östenik) Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler orta miktarda nikel (%4,5-8) ve yüksek oranda krom (%18-28) içeren çeliklerdir. Bu çelikler genellikle %2,5-4 molibden içermektedir. İyi süneklik ve iyi mukavemet özelliklerini beraber sağlarlar. Üstelik korozif şartlarda bile uygun yorulma dayanımlarına sahiptirler. Ferritik çeliklerle mukayese edildiğinde daha iyi tokluk ve süneklığe ve östenik çeliklerle mukayese edildiğinde daha iyi gerilme korozyon direncine sahiptirler (Aran & Temel, 2004).

Bu çelikler, içyapısında hem ferritik hem de östenitik fazları aynı anda barındıran çift fazlı paslanmaz çeliklerdir. Genellikle %50 Östenit ve %50 Ferritten meydana gelen içyapıları bulunmaktadır. Hem ferritik hem de östenitik paslanmaz çeliklerin iyi özelliklerine sahiptirler. Bu çelikler bölgesel korozyona azot, yüksek krom ve çoğunlukla da molibden içeriği sebebiyle, iyi dayanım göstermektedirler. Dupleks çelikler mikro yapı gerilmeli korozyon çatlağına direnç ve yüksek mukavemet göstermektedir. Üstelik dupleks paslanmaz çelikler iyi kaynak edilebilirlik kabiliyetine sahiptirler (Dengiz, 2014).

#### **Genel Özellikleri**

- Şekil alma ve iyi kaynak edilebilirlik kabiliyetine sahiptirler.
- Klor iyonunun yer almadığı koşullarda yüksek korozyon direnç gösterirler.
- Gerilmeli korozyona karşı yüksek kararlılığa sahiptirler.
- Ferritik ve östenik çeliklerden daha yüksek mekanik dayanıma sahiptirler (Aran & Temel, 2004).

#### **Kullanım Alanları**

Baca gazı temizlemesinde, köprülerde, ısı değiştiricilerinde, posa ve kağıt endüstrisinde, deniz suyuna maruz makine ve mekanizmalarında, depolama tanklarında, tuz arıtma tesislerinde, basınçlı kaplarda, yapısal dizayn bileşenlerinde, su ısıtıcılarında, uskur ve millerde, kağıt endüstrisinde, rotor, kimyasal tankların borulama sistemlerinde ve açık deniz alanlarında yangın ve patlayıcılara karşı koruma duvarlarında kullanılmaktadır (Dengiz, 2014).

#### **4.6.4. Çökelme Sertleşmesi (Yaşlandırma) Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler**

Yaşlandırma olarak adlandırılan uygulanabilen paslanmaz çelik türüdür. İçyapıları östenik veya martenzitik olabilir. Bileşimindeki içerdiği karbon miktarının azlığı nedeniyle martenzitik yapıda olanlarda bile sertleşme yalnızca çökelmeye bağlı olarak gerçekleşir. Niyobyum, bakır, alüminyum ve titanyum elementleri ile alaşımlama yapıldığında çökelti oluşturulabilmektedir. İyi tokluk ve süneklik değerlerine sahip olmakla birlikte korozyon dayanımları da nispeten yüksektir. Bu çelikleri martenzitik paslanmaz çelikler ile karşılaştırdığımızda mukavemet ve korozyon direnci olarak iyi bir durumdadır. Bunun nedeni ise karbon miktarının düşük ve alaşım elementi miktarının yüksek olmasıdır. Bunun için aşınma direnci düşüktür. Akma dayanımı 1700 MPa değerindedir ancak soğuk şekillendirme işlemi yapıldıktan sonra ardından sertleştirme



yöntemine tabi tutuldukları esnada ise bu değer daha fazla artırılabilir. Bu çeliklere yaşlandırma işlemi uygulandıktan sonra östenik paslanmaz çeliklerin de ait oldukları korozyon dayanımına ve martenzitik paslanmaz çeliklerin de ait oldukları mekanik özelliklere ulaşabilmektedirler. Uçak ve uzay teknolojileri alanında yaygın kullanılan paslanmaz çelik türüdür (Canbaz, 2023).

#### **Genel Özellikleri**

- Çok yüksek mekanik dayanımları vardır.
- Kaynak edilebilme yetenekleri iyidir.
- Manyetik özelliğe sahiptirler.
- Orta ve iyi sıcaklıkta korozyon kararlılığı vardır (Aran & Temel, 2004).

#### **Kullanım Alanları**

Pompa ve vana şaftı (Aran & Temel, 2004).

#### **4.6.5. Martenzitik Paslanmaz Çelikler**

Yüksek ısıda östenik içyapıya sahip, karbon miktarı %0,1'den fazla olan çeliklerdir. Çeliğin türüne göre östenitleme sıcaklığı 950°C ila 1050°C arasındadır. Bu sıcaklık değerleri arasında bulunan çeliğe su verildiğinde martenzitik bir içyapı meydana gelir. Meydana gelen bu yapıda mekanik mukavemeti ve yüksek sertlik karbon yüzdesi ile beraber artar. Bu çelikler ürün şekline bağlı olarak tavlanmış veya ıslah edilmiş şekilde piyasaya sunulur. Satın alınan tavlanmış bu ürünler biçim verildikten sonra su verme + temperleme yani ıslah işlemi uygulanır. Çeşitli özelliklerde kombinasyonlar temperleme sıcaklığı değiştirilerek elde edilir. Önerilen ısı işlem sıcaklıklarına uyularak mükemmel korozyon direnci elde edilebilir (Aran & Temel, 2004).

#### **Genel Özellikleri**

- Manyetik özelliğe sahiptirler.
- Isıl işlem uygulanabilirliği sayesinde yüksek direnç ve sertlikler elde edilebilir.
- Kaynak edilebilme yetenekleri düşüktür.
- Orta sıcaklıklarda korozyon kararlılığına sahiptirler (Aran & Temel, 2004).

#### **Kullanım Alanları**

Ameliyat aletleri, pimler, miller ve bıçaklardır (Aran & Temel, 2004).

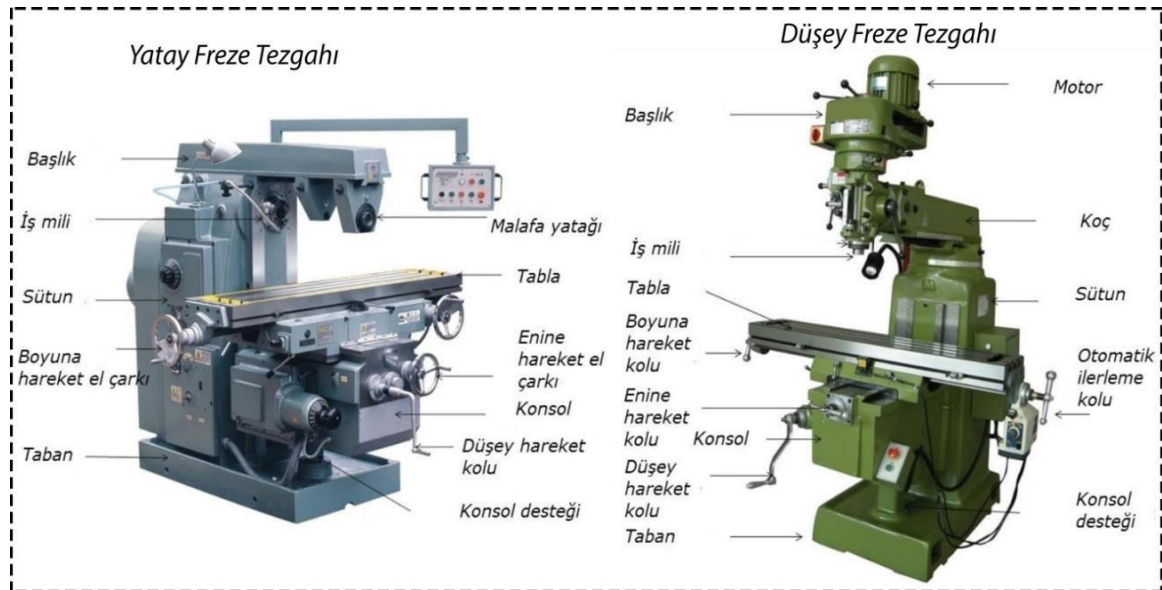
## 5. TALAŞLI İMALAT, TAKIM AŞINMALARI VE İŞLENEBİLİRLİK

### 5.1. Frezeleme İşlemi

Takımın kendi eksenini etrafında dönme hareketi etmesine karşılık, malzemenin yani iş parçasının ilerlemesi sonucu ile oluşan talaş kaldırma işlemine frezeleme adı verilir. Üzerinde kesici uçlar barındıran takımın kendi eksenini etrafında dönmesi ile iş parçasının takıldığı tablanın X, Y ve Z koordinatlarında hareket etmesiyle iş parçası üzerinden talaş kaldırma yöntemi frezelemedir (Çiftçi, 2005). Talaş, frezeleme yöntemi kullanılarak talaş kaldırma sırasında iş parçasından elastik ve plastik deformasyon neticesi iş parçasından ayrılan parçalara denir. İş parçası ve takım arasında talaş kaldırma esnasında ilerleme, kesme, sürtünme gibi yardımcı hareketler ortaya çıkar (Çiftçi, 2005). Frezeleme uygulamasında takımlarla talaş kaldırma sırasında üretimi yapılan iş parçası malzemenin, talaş kaldırma kabiliyeti, kesme kuvvetlerine karşı göstermiş olduğu dayanıma denir. İşlenecek iş parçasının kayma düzlemine, mekanik özelliklerine, malzemenin kristal kafes yapısına ve kimyasal bileşimindeki elementlerin türüne bağlı olduğu gibi talaş kaldırma işleminde frezeleme yöntemine, işlenecek yüzeyin kalitesine, kullanılan kesici takım türüne, kesme zamanına bağlı olarak talaş kaldırma kabiliyeti değişmektedir (Çiftçi, 2005). Frezeleme işlemi sistem kontrol üniteleri, takım tezgâhları ve kesici takımlardaki değişimler sonucunda işletmelerde dünyanın her yerinde uygun görülen bir talaşlı imalat yöntemidir (Demir, 2022).

Günümüz sanayisinde üniversal freze tezgâhlarının dışında hassas işleme kapasitesine sahip CNC tezgâh kullanımı sayesinde frezeleme işleminin verim değeri artmaktadır. İşleme süreleri ve maliyetleri düşürmek için CNC tezgâhları yaygın olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir iş parçasının frezeleme işlemi yapılacağı zaman ilk adım iş parçasına uygun tezgâhın seçimini yapmaktır (Demir, 2022). Bu seçimde parça boyutu işleme hassasiyeti ve bağlama şekilleri göz önünde tutularak üniversal, yatay, dikey CNC işleme merkezlerinden biri seçilmelidir. Frezeleme işlemi için hangi tezgâhın işlenecek parçanın yapısına uygun, yüzey kalitesi ve ölçüsel hassasiyetlik göz önünde tutularak en iyi saptaması yapılır. Tezgâh kapasitesinin ve işlem parametrelerinin yorumlanması

sırasında hassaslık ve işlem sonrası yüzey kalitesi tezgâh ve iş parçasının rijitliği gibi parametreler dikkate alınması gerekmektedir. Talaşlı imalatta işlem sonrası parçanın istenilen ölçülerde üretilmesi açısından önemli ve düzgün ayarlanmaması durumunda en büyük tehlike rijitlik eksikliğidir. İş parçası, takım ve tezgâh rijitliği frezeleme işleminin en önemli değişkenleridir, eksikliği halinde istenilen neticeye almamız mümkün değildir (Demir, 2022). Kesici takımının her kesme kenarı her biri belli bir miktarda işleme kapasitesine sahiptir. Frezeleme işleminin avantajları ölçülerde doğruluk ve tasarlanan şeklin oluşturulması esnasında imalat esnekliği ile iş parçasının yüzey kalitesi çok iyi derecelere çıkmasıdır. Frezeleme işlemi genellikle dizayna bağlı kanal açma işlemlerinde, kalıpcılık sektöründe, yüzeyi düz ve köşesi dik olan parçalarda kullanıldığını görmekteyiz (Demir, 2022). Frezeleme, düşey ve yatay olmak üzere iki sınıfta gruplandırılmaktadır. Yatay frezelemede, takımın dış kısmında yer alan dişler vasıtasıyla yüzey işlenmekte ve bu yüzey takımın dönme eksenıyla paraleldir. Genellikle yatay milli tezgâhlarda işlenir. Yatay frezeleme ile farklı şekillerde veya düz yüzeylerde uygulanabilir. Uygulaması yapılan yüzeylerin kesit ölçüsü takımın aksenel yöndeki ölçüsü ile aynı şekildedir. Düşey frezelemede ise işlenen iş parçası yüzeyi ve takım arasında  $90^\circ$ 'lik bir açı bulunmaktadır. Takımın dıştaki kısmı sayesinde kesme işleminin büyük bir bölümü yapılmaktadır. Düşey ve yatay milli tezgâhlarda düşey frezeleme işlemi yapılmaktadır (Serhat, 2022). Şekil 5.1'de yatay ve düşey freze tezgâhı görülmektedir.



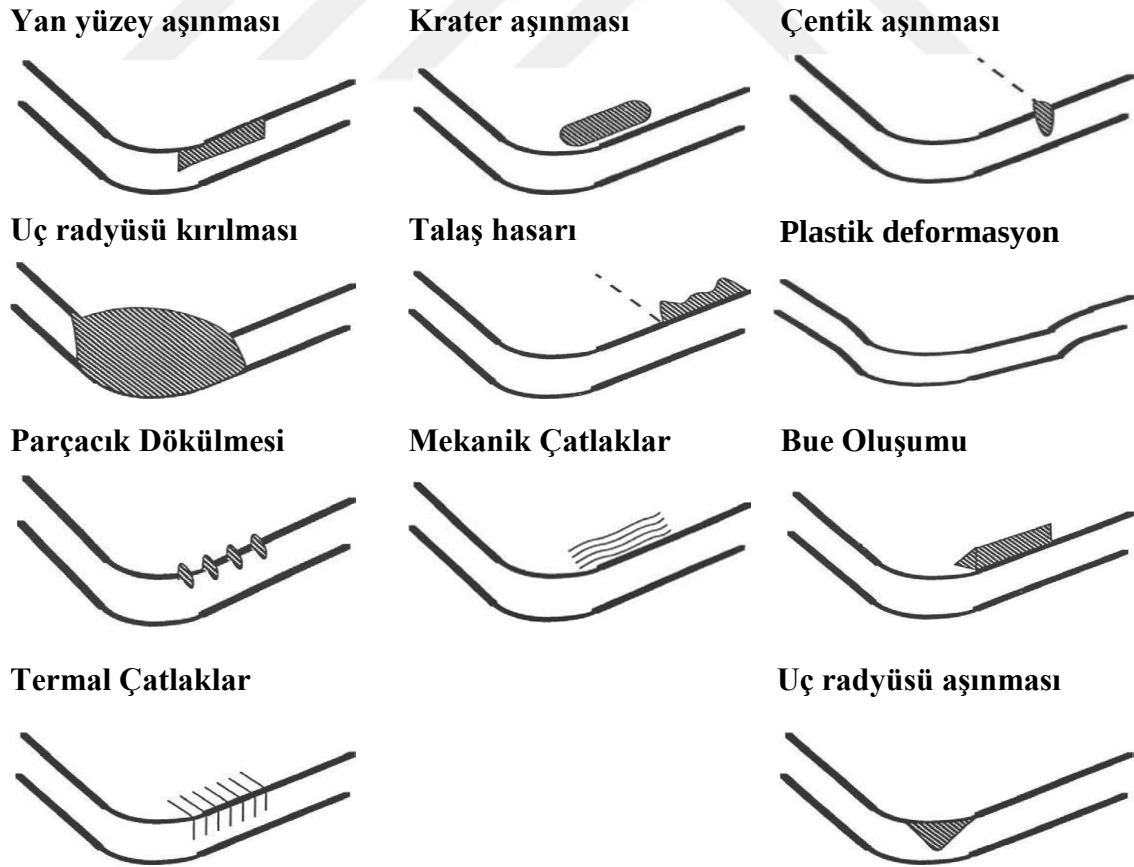
Şekil 5.1. Yatay ve düşey freze tezgâhı (Serhat, 2022)

## 5.2. Talaşlı İmalatta Takım Aşınmaları

Talaşlı üretimde istenmeyen takım aşınmasını kontrol etmek ve minimum seviyeye çekmek malzeme kabiliyeti aynı zamanda ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Kontrollü olarak uzun sürede aşınan takımlar, işleme sonrası iş parçası kalitesinin kontrollü bir şekilde yürütülmesini sağlarken bir yandan da uzun süreli bir takım ömrü sağlar. Takım aşınmalarını iyi kavrayabilmek için takım aşınma mekanizmaları ve takım aşınma tiplerini iyi öğrenmek gerekir. Kesme alanında oluşan yüksek sıcaklıklar ve gerilmeler takım, iş parçası ve kesme koşulu arasında gerçekleşen kimyasal olaylar takım aşınmasının oluşmasının temel nedenleridir (Kaya, 2019).

### 5.2.1. Aşınma Tipleri

Aşınmanın geometrik şekline ve oluştuğu alana göre adlandırılmaktadır. Şekil 5.2’de aşınma tipleri görülmektedir.



Şekil 5.2. Aşınma tipleri (Kaya, 2019)

#### **5.2.1.1. Yan Yüzey Aşınması**

Takımın yan yüzeyinde meydana gelen aşınmadır. Yan yüzey alanının işlenmiş alanla olan sürtünmesinden kaynaklı ısınma ve bu alana dik yönde yan yüzey kuvvetleri ortaya çıkar. Bunun sonucunda iş parçasında ölçüsel hatalar ve kesici takımda deformasyonlar oluşur. Bu aşınmada abrazyon aktif aşınma mekanizmasıdır. Bu aşınma sonrası kenar bölgesi sivriliğini kaybederek düzenli olarak aşınma gerçekleştirir ve kritik bir aşınma değerinin ardından aşınma hızı giderek artar. Diğer aşınma tiplerine göre daha çabuk, daha hızlı ilerlemekte ve takım ömrünün takibi konusunda aktif aşınma tipidir. Yan yüzey aşınma miktarı sürekli olarak ölçülerek kaydedilir (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.2. Krater Aşınması**

Takımların talaş yüzeyi üzerinde çukur görünümündedirler. Bu aşınma türü yan yüzey aşınmasına göre daha geç ilerlese de kontrol edilmesi gereken bir aşınma türüdür. Kesici ucun mekanik direncini azaltmakta buda ani kenar kırılmaları oluşturabilir. Çoğunlukla yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan difüzyon aşınması ve kimyasal aşınma mekanizmaları ile oluşur. Kaplamalı kesici uç kullanılmasının veya kesme hızının değiştirilmesinin krater aşınması üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.3. Çentik Aşınması**

Kaba tornalama işlemlerinde sürekli talaşın olduğu alanlarda görülür. Diğer bir ismi kesme derinliği çentiğidir. Kesici uç üzerinde kesilmemiş yüzey civarında ve talaşın serbest olduğu bölgede oluşur. Abraziv aşınmadan kaynaklanan bu aşınma, iş parçasındaki sert katmandan veya işleme sertleşmesi geçirmiş tabakadan kaynaklı abraziv talaş oluşumuna neden olur. Çentik aşınması yan yüzey üzerinde meydana gelebileceği gibi talaş yüzeyi üzerinde de görülebilir (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.4. Uç Radyüsü Aşınması**

Kesici ucun radyüsünün yan yüzey ile temas ettiği yerden itibaren başlar. Genellikle yan yüzey ve çentik aşınmalarının birleşimi gibi bir görüntü meydana gelir. Abrazyon,

korozyon ve oksidasyondan kaynaklanır. Yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkisi bulunur (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.5. Termal Çatlaklar**

Genellikle kesici takım ile talaş ara yüzündeki yüksek sıcaklıklarda ya da vuruntulu kesim koşullarında meydana gelir. Genellikle kesici uca dik olarak oluşmakta ve çatlak oluşumunun ardından kenar dökülmesine veya kenar kırılmasına neden olur (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.6. Talaş Yığılması (BUE, built-up edge) Oluşumu**

Bu oluşum genellikle düşük hızlarda yumuşak veya sünek malzemelerin işlenmesi esnasında meydana gelir. BUE oluşumunda metal, kesici uca yapışmakta ilerleyerek malzeme hacmini artırarak yığılma etkisi yapmaktadır. Genellikle BUE takımın efektif geometrisini değiştirdiği için istenmeyen bir durumdur. Fakat bazı kaba tornalama işlemlerinde aşınmayı azaltmaktadır. Pozitif talaş açıları veya daha keskin kesme kenarı kullanılarak, kesme hızı artırılarak, bu aşınma tipi ortadan kaldırılabilir (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.7. Plastik Deformasyon**

Takımlarda kesme kenarında yükler fazla arttığı anlarda meydana gelir bu olay genelde çok yüksek ilerleme ya da kesme derinliği kullanıldığında ortaya çıkar. HSS veya WC gibi takım malzemelerinde yüksek kesme hızlarında termal yumuşama sebebiyle bu aşınma tipi görülebilir. Yüzey kalitesini ve ölçüm hassasiyeti olumsuz yönde etkilediği için bu aşınma tipi istenmeyen bir durumdur (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.8. Parçacık Dökülmesi**

Genellikle gevrek kesici takımların (seramikler, CBN, PCD) kullanımında veya sert, abraziv parçacıklar içeren metallerin kesilmesi esnasında oluşmaktadır. Tezgâhın rijit olmamasından kaynaklı titreşimler veya yüksek kesme kuvvetleri titreşimler de kenar dökülmesi oluşumuna kadar ilerleyebilir. Bu aşınma tipi kenar kırılmasına yol açabilir

veya yan yüzeyi aşınmasını hızlandırabilir. Frezeleme işlemlerinde bu aşınma tipiyle çok sık karşılaşilmektedir (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.9. Talaş Hasarı**

Nikel esaslı alaşımlar ve paslanmaz çelik gibi tok ve abraziv talaş oluşumunun gözlemlendiği metaller işlenirken bu aşınma tipi görülmektedir. Kesimi yapılan talaş kırılmadan önce bükülür. Tekrardan kesici ucun gerisine sürtmeye başlar. Takım kenar alanının aşınmasına bu olay sebep olur. Talaşın doğru yöntemle kırılması ve kontrolünün yerine getirilmesi ile bu aşınma tipi engellenebilmektedir (Kaya, 2019).

#### **5.2.1.10. Takım Kırılması**

Kesici takımın kopması veya büyük bir miktarının kopmasıdır. Diğer aşınma tiplerinin ilerleyip büyüyerek meydana gelmesidir. Bu kırılmayı engellemek için kama açısı daha büyük bir takım geometrisi veya daha tok bir kesici uç malzemesi kullanılabilir (Kaya, 2019).

### **5.2.2. Aşınma Mekanizmaları**

#### **5.2.2.1. Kimyasal Aşınma**

İş parçası malzemesi, takım veya kesme sıvılarındaki bileşenler ile kimyasal tepkimesi neticesinde bu aşınma meydana gelir. Krater aşınması ve yan yüzey aşınması üzerinde baskın olan bu aşınma kesme hızının artmasıyla doğru orantılı olarak artar. Tepkime ardından meydana gelen kimyasal ürün takımın yüzeyine yapışır. Fakat kesim işlemine devam edilerek öteki aşınma mekanizmalarından dolayı yeniden yok edilebilmektedir. Kimyasal afinitesi fazla olan bunlar titanyum gibi malzemelerin işlenmesinde daha çok görülmektedir (Kaya, 2019).

#### **5.2.2.2 Oksidasyon**

Takımın elemanları oksijen ile tepkimeye girdiği zaman bu aşınma tipi oluşur. Kesici takım ve talaş ara yüzüne yakın bir yerde en yüksek sıcak alanda meydana gelir. Ciddi

çentik aşınmasına sebep olmakta ve bu alanda renk değişimi oluşturur. Bu aşınma  $Al_2O_3$  seramiklerde oluşmadığı tespit edilmiştir. Malzemenin veya takımın okside olması nedeniyle oluşan oksit parçacıkları abraziv aşınmayı meydana getirmeye sebep olurlar (Kaya, 2019).

#### 5.2.2.3. Difüzyon (Çözelti) Aşınması

Takım malzemesinin talaşa taşınması veya talaş ile beraber katı çözelti oluşturması neticesi ayrılmasıdır. Ayrılma sonucu krater aşınması oluşumu gerçekleşir ve talaş yüzeyinden malzeme eksilmesine sebep olur. Difüzyon oranı temel olarak takım malzemesinin iş parçası içinde çözünabilirliğine bağlıdır. Aynı zamanda kesici takım ve talaşın yüksek sıcaklıklardaki temas süresine de bağlıdır.  $Al_2O_3$  seramik takım malzemeleri kapsamında difüzyon inertliği en yüksek malzemedir. Kesici takım tokluk ve sertlik özellikleri etkin değildir. Kesme sıcaklıkları bu aşınma mekanizmasında büyük önem arz etmektedir (Kaya, 2019).

#### 5.2.2.4. Abraziv Aşınma

Sert parçacıklar kesici takım üzerinde kazıma tipinde bir aşındırma oluşturur. Bunun sebebi yüksek gerilimden ve iş parçası-takım arasındaki izafi hareketten kaynaklıdır. Sert parçacıklar talaştaki karbürler, oksitler, nitrürler, alüminyum olabilir. Kesici uçtan kopan parçacıklar bu aşınmaya neden olabilir. Yüksek sıcaklıklarla birlikte iş parçası ve takım arasındaki kimyasal olaylarla oluşan parçacıklarda bu aşınmayı meydana getirmektedir. Bu tip aşınma yan yüzey aşınması, çentik adeziv aşınma, adezyon aşınması ve kesici uç radyüsü aşınması üzerinde baskındır. Talaş yüzeyi aşınmasının da bu aşınmadan etkilenmektedir. Takım sertliğinin artırılarak bu aşınma azaltılabilir. Talaş açısının küçültülmesi ile daha düşük kesme kuvvetleri elde edilir ama kesici kenarın zayıflamasına ve kenar dökülmelerine sebep olur (Kaya, 2019).

#### 5.2.2.5. Adeziv Aşınma

Sünek malzemelerin düşük hızlarda işlenmesinde görülür. Takım ve talaş arasındaki temas ve basınçtan dolayı parçacıkların takıma kaynaklama ile yapışarak ardından bu parçacıkların kopması ile daha çok malzeme eksilerek oluşur. Genellikle talaş yüzeyinde



gerçekleşerek krater aşınmasına sebep olur. Yalnız aşırı adezyon, BUE oluşumunu aynı zamanda kenar dökülmesi gibi öteki aşınma tiplerini de ortaya çıkarabilir. Bu aşınma mekanizması kesme hızı değiştirilerek ortadan kaldırılabilir. Bu aşınma davranışı mekanik olaylara bağlı olduğu kadar termal olaylara da bağlıdır. Bu aşınma oranı diğer aşınma mekanizmalarına göre daha azdır (Kaya, 2019).

### 5.3. İşlenebilirlik

Bir iş parçasının işlenebilirliğinin kolay mı zor mu olduğunu farklı ölçütler kullanarak değerlendirme işlenebilirliktir. Bir iş parçası malzemesinin işlenebilirliği ile ilgili bilgi edinebilmek için bilgi birikimi ve uzun bir deney süreci gereklidir. İşlenebilirliğe iş parçası, deney parametreleri, kesme ortamları, kesici takım malzemesi, talaşlı imalat yöntemleri vb. etki eder. İşlenebilirlik özelliklerini sayısal verilerle ifade etmek yerine karşılaştırma ve sıralama yaparak ölçmek geçerli bir yöntemdir. Günümüzde malzeme biliminin önemi gittikçe artmaktadır. Havacılık, uzay ve biyomedikal gibi alanlarda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Malzemelerin operasyonel anlamda görevleri kritikleşmesi sebebiyle işlenebilirlik ölçütleri daha geniş bir hal almaktadır. İşlenebilirlik malzeme yüzey kalitesi, takım ömrü ve aşınmaları, güç tüketimi ve maliyet açısından oldukça önem arz etmektedir (Kaya, 2019).

#### Genellikle kullanılan işlenebilirlik ölçütleri:

- ✓ **Takım ömrü ve takım aşınması oranı:** Genellikle en çok rastlanan işlenebilirlik ölçütlerindendir. İş parçasının kalitesini, işleme ve maliyetlerini ve takım aşınmasını doğrudan etkilemektedir. Takım ömrünü artırarak, takım aşınmasının yol açtığı olumsuzlukları azaltmaktadır. Yeni takım maliyetini düşürmektedir. Takım değişimi nedeniyle geçirilen süreden tasarruf edilir ve operatörsüz tezgâh yöntemi süreçleri daha mümkün hale getirilir (Kaya, 2019).
- ✓ **Parça yüzey kalitesi:** Malzemenin yüzey kalitesinin iyi olması tüm durumlarda işlenebilirliğinin iyi olduğunun kanıtıdır. Yüzey kalitesini, ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile sayısallaştırılır. İşleme parametreleri yüzey kalitesini etkilediği kadar kesici takım ve iş parçası arasındaki temasta yüzey kalitesini etkilemektedir (Kaya, 2019).
- ✓ **Boyutsal tolerans:** Belirlenmiş işleme şartlarında kaydedilen ölçüsel toleransın azaltılarak işlenebilirlik derecesini artırmaktadır. Çünkü daha hassas kesim

yapılabilmesi için ilave kesme operasyonlarının sayısını ve ıskarta parça oranını daraltmaktadır (Kaya, 2019).

- ✓ **Yüzey bütünlüğü:** İşlenebilirlik ölçütünü etkileyen en önemli parametredir. Hasara uğramış ve yüzey altı sertleşmiş bölge, mikro yapı, kalıntı gerilmeler ve yüzey altı mikro çatlaklar en önemli elemanlarıdır (Kaya, 2019).
- ✓ **Fonksiyonel bütünlük:** Aktif malzemelerin yaygınlaşması ile işlenebilirliği etkileyen önemli bir parametre haline gelmektedir. Aktif malzemelerin, mekanik özelliklerinin olduğu kadar fonksiyonel özelliklerinin de görevleri vardır. Talaşlı imalattan kaynaklı oluşabilecek termo-mekanik etkilerin, malzemelerin bu fonksiyonel özellikleri üzerinde etkisi olabilir. Mesela, ŞHA'larda faz dönüşüm enerjisinin düşmesi, malzemenin darbe sönümleme veya etkinleşme enerjilerini düşürecektir. Talaşlı imalatın fonksiyonel bütünlük üzerindeki etkileri de araştırılmalıdır (Kaya, 2019).
- ✓ **Kesme kuvvetleri, güç ve enerji tüketimi:** Kesme gücünün, kesme kuvvetlerinin ve gerekli enerjinin azalması durumu işlenebilirliği arttırmaktadır. Kesme kuvvetleri daha düşük görüldüğü takdirde takım aşınması azalır, yüzey bütünlüğü, fonksiyonel bütünlük, takım tezgâhı ömründe ve yüzey kalitesinde artış gerçekleşebilmektedir. Düşük kesme kuvvetleri ile takım tezgâhının eksen motorlarının daha düşük güç seviyelerinde çalıştırarak enerji tasarrufu elde ederek çevresel koşulları da iyileştirebilmektedir (Kaya, 2019).
- ✓ **Kesme sıcaklığı:** İş parçası, talaş ve takım etkileşiminde kesme sıcaklığı oldukça etkilidir. Metal kesme mekaniğinin kanunu gereği, ilk başta ilk deformasyon alanında ve sonra daha fazla olacak şekilde ikinci deformasyon alanında resen kesme sıcaklığı artar. Genelde kesme sıcaklıklarının fazla artışı işlenebilirliği azalttığı görülebilmektedir. Bazı özel durumlar dışında kesme sıcaklıklarının düşük olmasının sebebiyle düşük takım aşınması meydana gelebilir. Fakat kendiliğinden meydana gelen sıcaklık yükselişinin, belirli bir aşamaya kadar işlenebilirliği arttırdığı görülebilmektedir (Kaya, 2019).
- ✓ **Talaş formu ve çapak oluşumu:** Sünek, karmaşık, uzun ya da çok küçük, toz benzeri talaşlardansa parçalı ve kısa talaş oluşumu işlenebilirlik açısından, istenilen bir durumdur. Matkap ve iç çap tornalama işlemlerinde, kırılmayan uzun talaşlar üretim kalitesini azaltmaktadır. Bu talaşlar operatör açısından kesilme, batma, gibi riskler oluşturmakta ve talaşlar sıkışarak aşınma, titreşim,

takım aşınması meydana getirmektedir. İş parçasında kalan arzu edilmeyen çapaklar şekilsel ve ölçüsel hassasiyeti bozmakta buda çapak alma işlemini artırmaktadır. Takım aşınması arttıkça, sünek malzemelerde uzun talaş ve çapak oluşumu meydana getirmektedir. İlerleme değerleri ve kesme derinliği kesme sırasında talaş kırılması ve talaş kontrolü üzerinde doğrudan etkisi olan parametrelerdir. Çünkü talaşın kalınlığı ve genişliğini en çok etkileyen parametrelerdir (Kaya, 2019).

#### 5.4. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

Literatürde minimum miktarda yağlama sistemi üzerine yapılan araştırmalar oldukça fazladır. Talaşlı imalat sanayisinde kullanılan kesme sıvılarının yüksek maliyetleri ile çevreye bıraktığı problemler sebebiyle çalışmacılar olumsuz etkileri minimum seviyeye indirgeyebilmek için başka soğutma teknikleri üzerine araştırmalar yapmaktadır. Günümüzde sürdürülebilir ve çevre dostu üretim teknikleri üzerine olan yönelim oldukça artmıştır. Minimum miktarda yağlama sistemi esas olarak haznede yer alan sıvının basınçlı hava özelliği sebebiyle işleme alanına püskürtülmesi ile kesme bölgesinde oluşan sürtünmenin azaltılması temeline dayanır. İstenilen ölçüde yağlama miktarı ve püskürtme aralığı kalibre edilebilmektedir (Bıyık, 2019).

Minimum miktarda yağlama tekniği yağlayıcı sıvının akacak olduğu zaman aralıklarını, kullanılacak yağ miktarını ayarlanabilir düğmeler sayesinde ve yağlayıcı sıvının tek seferde püskürtülecek miktarını ayarlayabilen bir sistem mümkündür (Camcı, 2020). MMY yöntemi iki farklı şekilde yapılabilir. İlk teknik sabit nozul aracılığıyla dışarıdan püskürtme işlemi yapılarak, ikinci teknik ise açılmış kanallar vasıtasıyla takım içerisine püskürtme işleminin yapılmasıdır (Çelik, 2022).

Talaşlı imalatta frezeleme, matkapta delik delme, tornalama operasyonlarında etkin bir şekilde kullanılabilen bir yöntemdir (Yanartaş, 2023). MMY sistemi kesme yapılan bölgenin temizlenmesine, kullanılmış sıvıların geri dönüşümüne ve etkisiz hale getirilmesine gerek kalmaması, kullanılan kesme sıvılarının miktarının azalmasına, kuru kalan talaşların geri dönüşüm kolaylığı avantajları arasındadır (Yanartaş, 2023).

## 6. MATERYAL VE YÖNTEM

X33CrS16 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde, kesme parametrelerinin ve kesme şartlarının, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, kesme sıcaklığı ve güç tüketimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın amacı X33CrS16 paslanmaz çeliğini kullanarak MMY tekniğini uygulayarak kullanılan nano tozun diğer soğutma/yağlama ortamları ile kıyaslayarak ve avantajlarını ortaya çıkarmaktır. Frezeleme deneylerinde iki farklı kesme hızı (120 ve 150 m/dak) ve iki farklı ilerleme hızı (0,08 ve 0,15 mm/dev) kullanılmıştır. Kesme parametrelerimiz üreticinin tavsiyesi ve literatürdeki optimum değerler baz alınarak seçilmiştir. Beş farklı [kuru, MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon ve MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su)] soğutma ve yağlama ortamı ve sabit kesme derinliği (0,6 mm) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.1’de deney parametreleri aşağıda görülmektedir.

Tablo 6.1. Deney işleme parametreleri

### DENEY PARAMETRELERİ

|                      |                                                                                                                        |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| İş parçası malzemesi | X33CrS16 paslanmaz çeliği                                                                                              |
| İş Parçası Boyutu    | 50 × 50 × 10 mm                                                                                                        |
| Kesici Takım         | Kaplamalı Karbür Uç (PVD ALTİN)                                                                                        |
| Kesme Koşulu         | Kuru, MMY-Mineral Yağ, N <sub>1</sub> -MMY Emülsiyon, N <sub>2</sub> -MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su), |
| Nozul Konumu         | 45 derece, 90 mm                                                                                                       |
| Kesme Uzunluğu       | 50 mm                                                                                                                  |
| Kesme Hızı           | 120 m/dak, 150 m/dak                                                                                                   |
| İlerleme Hızı        | 0,08 mm/dev, 0,15 mm/dev                                                                                               |
| Kesme Derinliği      | 0,6 mm                                                                                                                 |

### 6.1. Deneylerde Kullanılan Freze Tezgâhı

Frezeleme deneyleri, Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği laboratuvarlarında yer alan maksimum 10,000 rpm dönüş hızına ve 7,5 kW güce sahip 3 eksenli Dahlih MCV-860 dik işleme merkezinde (Dahlih, Taichung, Tayvan) freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Bu CNC frezenin kontrol ünitesi FANUC Series Oi – MD'dir. Frezeleme işleminde "Zig" takım yolu ve aşağı frezeleme (tırmanma frezeleme) stratejisi kullanılmıştır. Kesici takımı cüruftan veya gömülü sert parçacıklardan korumak amacıyla deneylere başlamadan önce her numune yüzeyinden 0,5 mm'lik bir katman kaldırıldı. İşleme parametrelerini seçerken takım kataloğunda yer alan veriler göz önünde bulunduruldu. Her deney öncesi malzeme yüzeyi basınçlı hava yardımıyla temizlendi. Freze tezgâhının Şekil 6.1'de görseli ve teknik özellikleri Tablo 6.2'de görülmektedir.

Tablo 6.2. Deneylerde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri (Tezmaksan, 2023)

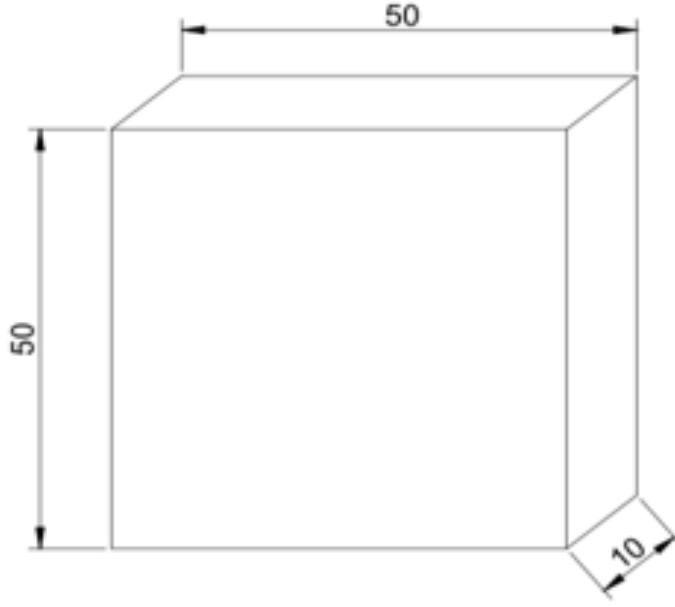
| Model                           | Dahlih MCV-860 |
|---------------------------------|----------------|
| Maksimum Tabla Yüğü             | 800 kg         |
| Ağırlık                         | 5400 kg        |
| Takım Değıştirme Süresi         | 3,5 sn         |
| Tabla İş Mili Mesafesi          | 150-700 mm     |
| Takım Sayısı                    | 24             |
| Hava İhtiyacı                   | 6 bar          |
| İş Mili Motor Gücü              | 11/7,5 kW      |
| İş Mili Devri                   | 10,000 rpm     |
| X,Y,Z Eksenleri Hareketleri     | 860-550-550 mm |
| X,Y,Z Eksenlerinde Hareket Hızı | 40-40-30 m/dak |
| X,Y,Z Eksenlerinde Kesme Hızı   | 10-10-10 m/dak |
| X,Y,Z Eksenleri Motor Gücü      | 3-3-4 kW       |
| Max. Takım Ağırlığı             | 7 kg           |



Şekil 6.1. Deney freze tezgâhı görseli (Tezmaksan, 2023)

## 6.2. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Frezeleme deneylerinde kullanılan iş parçası yani malzeme herhangi bir kimyasal ve ısıl işlem uygulanmamış olan ticari olarak temin edilen  $50 \times 50 \times 10$  mm ölçülerinde X33CrS16 paslanmaz çeliği deney numunesi olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan paslanmaz çeliğin ölçüleri Şekil 6.2’de görülmektedir.



Şekil 6.2. X33CrS16 Paslanmaz çeliği

X33CrS16 paslanmaz çeliği Sağlam Metal firmasından temin edilmiştir. Malzeme kodu HC50, 1. 2085, X40Cr14'tür. X33CrS16 çeliği korozyona dayanıklı martenzitik bir paslanmaz takım çeliğidir. Bu çelik manyetize edilebilir bir çeliktir. X33CrS16 plastik kalıp çeliği; iyi bir mekanik direnç ve tokluk sunmaktadır. Kükürt içeriği sayesinde takım işlenebilirliği iyidir. Islak veya nemli ortamda çalışmaya uygundur. Bu malzeme ısıtılma sırasında boyutsal kararlılığını mükemmel şekilde korumaktadır. Kullanım sertlik değeri 44-46 HRC arasındadır (Sağlam Metal, 2023).

Aşağıda Tablo 6.3'te iş parçasının kimyasal bileşimi, Tablo 6.4'te iş parçasının ısıtılma işlem bilgisi, Tablo 6.5'te iş parçasının ısıtılma iletkenliği bilgileri görülmektedir.

Tablo 6.3. Kimyasal bileşimi (%) (Sağlam Metal, 2023)

| Kimyasal Bileşim (%) | C    | Mn   | Cr    | Ni   | S    |
|----------------------|------|------|-------|------|------|
| % Ortalama           | 0,33 | 1,40 | 16,00 | 1,00 | 0,10 |

Tablo 6.4. Isıl işlem bilgisi (Sağlam Metal, 2023)

| <b>X33CrS16</b>        | Sıcaklık    | Ortam                           | Sertlik               |
|------------------------|-------------|---------------------------------|-----------------------|
| Yumuşatma<br>Tavlaması | 850-880°C   | Fırın                           | 241 HB                |
| Gerilim Giderme        | 600-650°C   | Fırın                           |                       |
| Sertleştirme           | 1000-1050°C | Yağ, Gaz, Hava, Sıcak,<br>Banyo | Menevişleme<br>Eğrisi |

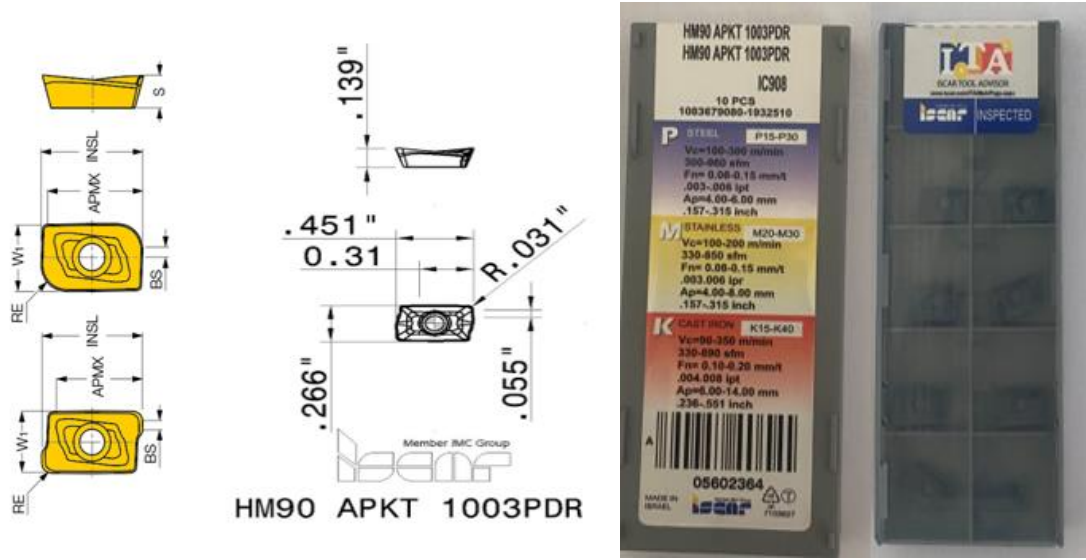
Tablo 6.5. Isıl iletkenliği (Sağlam Metal, 2023)

| <b>Isıl İletkenlik</b> | 20    | 350°C | 700°C |
|------------------------|-------|-------|-------|
| ( W/ m.K )             | 39,50 | 36,50 | 33,50 |

### 6.3. Deneylerde Kullanılan Kesici Takım

Frezeleme deneylerinde, ISCAR firması tarafından 5602494 katalog nolu ticari olarak üretimi yapılan karbür kesici takım üzerinde PVD Al-TiN kaplamalı HM 90 APKT 1003PDR IC908 kesici ucu kullanıldı. Kesici uç genişliği 6,76 mm, kesici uç kalınlığı 3,53 mm, kesici uç uzunluğu 11,45 mm ve köşe radyüsü 0,8 mm'dir. Helisel kesici kenarlı, yüksek 90° kenar doğruluğu ve yüzey kalitesinde kesici uçlardır. Çelikler, östenitik paslanmaz çelikler, alaşımlı çelikler ve yüksek sıcaklık alaşımları gibi malzemeler üzerinde çok farklı kesme hızlarında çeşitli işlemler ve genel kullanım için önerilir. PVD kaplamalı, mikron altı tane boyutunda sağlam bir alt tabakaya, yüksek aşınma dayanımına ve kırılma direncine sahiptir. Bu tez çalışmasında X33CrS16 paslanmaz çeliğinin frezeleme deneylerinde kesici takımda meydana gelen aşınmalar test edilmektedir. Kesici takıma ait görseller Şekil 6.3'te ve teknik özellikler Tablo 6.6'da görülmektedir.





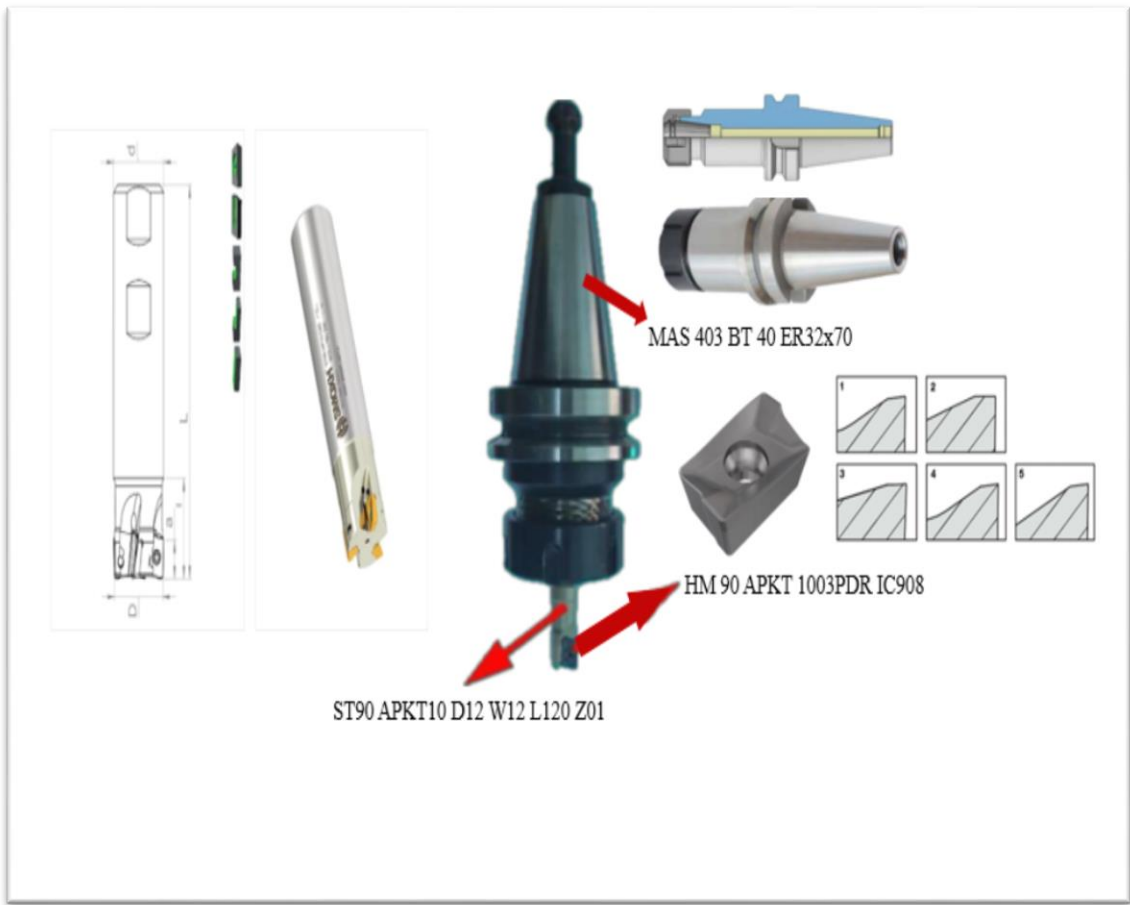
Şekil 6.3. Deneylerde kullanılan kesici takım görseli (ISCAR, 2023)

Tablo 6.6. Kesici takımın teknik özellikleri (ISCAR, 2023)

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| Kesici Uç Genişliği (W1)          | 0,266     |
| Köşe Radyüsü (RE)                 | 0,031     |
| INSL                              | 0,451     |
| Etkin Kesme Kenar Uzunluğu (APMX) | 0,386     |
| Kesici Uç Kalınlığı (S)           | 0,139     |
| Tekrar                            | 0,0315    |
| Silici Uç Köşe Uzunluğu (BS)      | 0,055     |
| fz (dak)                          | 0,0031    |
| fz (max)                          | 0,0059    |
| Kaplama                           | PVD TiAlN |

#### 6.4. Deneylerde Kullanılan Takım Tutucu

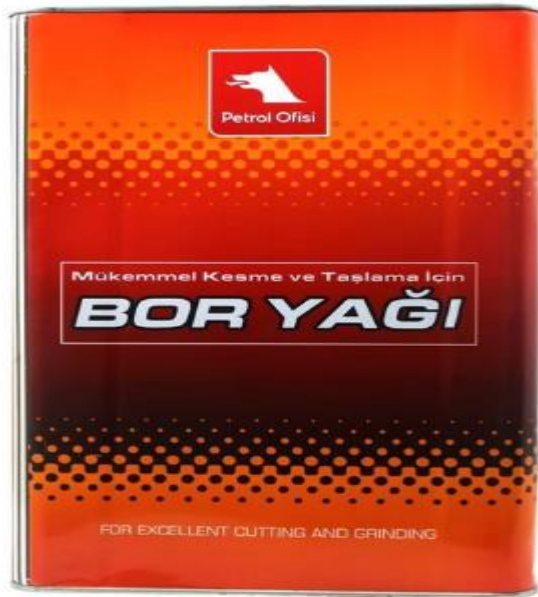
Frezeleme işleminde MAS 403 BT 40 ER32x70 takım tutucu kullanıldı. Smoxh Kesici Takımlar ST90 APKT10 D12 W12 L120 Z01 kodlu tek dişli freze takımını kullanıldı. Kesici uç, ST90 AP10 D12 W12 L120 Z01 kodlu tek dişli freze takımına takıldı. Freze makinesi MAS 403 BT 40 takım tutucuya 60 mm sıkma uzunluğu ile bağlandı. Her deney için bir adet insert kullanıldı ve her deney için insertler yenilendi. Şekil 6.4'te deneylerde kullanılan kesici takım, kesici uç ve takım tutucu görseli görülmektedir.



Şekil 6.4. Deneylerde kullanılan kesici takım (Usca, 2022), kesici uç (Smoxh, 2023) ve takım tutucu görseli (Atlasfor, 2023)

### 6.5. Deneylerde Kullanılan Kesme Sıvısı

Deneylerde MMY sisteminde kesme sıvısı tercih edilmesinin sebebi püskürtme sistemlerinde sıklıkla kullanılan, mineral bor yağı (petrol ofisi bor yağı) kullanılmıştır. Farklı metallerin kesme işleminde suya %5-%10 oranında ilave edilerek kullanılan metal kesme sıvısıdır. Takımın ıskarta oranını azaltarak takım ömrünü uzatmaktadır. Korozyon direnci yüksek olup paslanmaya karşı sistemi korumaktadır. Mükemmel soğutma özelliğine sahiptir. Dökme demir ve yumuşak çelik gibi metallerin ağır ve hafif talaşlı imalatı, alüminyum alaşımlarında, talaşsız imalatı, bakır alaşımlarında soğutma ve yağlama koşulları için kullanılmaktadır (Oilmarkt, 2023). Şekil 6.5'te kullanılan kesme sıvısının görseli görülmektedir.



Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan kesme sıvısı (Oilmarkt, 2023)

### 6.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı

Freze işleme deneyleri yapıldıktan sonra, işlenmiş yüzeyde yüzeyin pürüzlülüğünü ölçmek için Time 3200 (Time, Beijing, China) yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanıldı. ISO 4287 standartları kuralına uygun olarak pürüzlülük ölçümleri yapıldı. Bu yüzey pürüzlülük cihazı kolay kullanılabilir ve taşınabilir, geniş ölçüm ve çeşitli analiz özelliklerine, kompakt özelliklere sahip bir cihazdır. Her kesme işleminin ardından iş

parçası malzemesinin yüzeyi talaş yığınlarından basınçlı hava yardımıyla temizlenmiştir. Frezeleme işleminden sonra, yüzey pürüzlülük değerleri, her bir iş parçası boyunca beş farklı belirlenen noktadan ölçümler alınmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Ra parametresi, yüzeyin beş farklı noktasından alınan ölçümün aritmetik ortalaması alınarak sonuçlar kaydedildi.

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı teknik özellikleri Tablo 6.7’de ve Şekil 6.6’da yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı görseli görülmektedir.

Tablo 6.7. Yüzey pürüzlülük cihazı teknik özellikleri (Indiamart, 2023)

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| Model No        | 3200                 |
| Veri Çıkışı     | RS232                |
| Standart        | ISO                  |
| Oran            | $\pm 40 \mu\text{m}$ |
| İzleme Uzunluğu | 1,3 mm/0,052 inç     |
| Filtre          | RC                   |
| Ekran           | Ra                   |



Şekil 6.6. Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülük cihazı (Indiamart, 2023)

### 6.7. Deneylerde Kullanılan Kesme Sıcaklığı Ölçüm Cihazı

Frezeleme işlemi esnasında kesici takım iş parçası boyunca iş parçasının üzerinde kesme yaparken bir yandan MMY yağı püskürtülerek bir yandan termal kamera ile çekim yapılmıştır. Kesici takım ile iş parçası arasındaki kesme sıcaklığı ölçümleri için  $320 \times 240$  piksel, termal hassasiyet  $< 30$  mK, otomatik ve manuel odaklama ve  $1200^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar yüksek sıcaklık ölçümüne sahip Testo 885 markaya sahip termal kamera (Testo, İstanbul, Türkiye) kullanıldı. Bu cihazın ölçüm aralığı  $30-100^{\circ}\text{C}$ 'dir.  $0-350^{\circ}\text{C}$  ve  $0-650^{\circ}\text{C}$  değiştirilebilir. Görüntüler, kesici takım frezeleme işlemini bitirmeden önce iş parçası üzerindeki son işleme işlemi esnasında elde edildi. Termal kameranın kesme bölgesine olan mesafesi yaklaşık 500 mm idi. Şekil 6.7'de kullanılan termal kameranın fotoğrafı ve Tablo 6.8'de termal kameranın özellikleri görülmektedir.

Tablo 6.8. Testo 885 termal kamera özellikleri (Testo, 2023)

| Testo 885                | Değer                                                     |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Ağırlık                  | 1,570 g                                                   |
| Sıcaklık Ölçüm Aralığı   | $-30...+100^{\circ}\text{C}$ - $0...+650^{\circ}\text{C}$ |
| Termal Duyarlılık        | $< 30$ mK                                                 |
| Çalışma sıcaklık aralığı | $-15^{\circ}\text{C}... +50^{\circ}\text{C}$              |
| Boyut (U x G x Y) mm     | $253 \times 132 \times 111$ m                             |
| Lens Versiyonu           | $640 \times 480$                                          |
| Hassasiyet               | $\pm 2^{\circ}\text{C}$ veya $\pm 2\%$ ölçülen değer      |
| Emisivite                | 0,01-1                                                    |
| Ekran Seçeneği           | IR /Gerçek Görüntü                                        |
| Dijital Zoom             | $1 \times 3$                                              |
| Infrared Çözünürlük      | $272 \times 480$ Piksel                                   |
| Spektral Aralık          | $7,5...14\mu\text{m}$                                     |
| Görüş Alanı              | $30^{\circ} \times 23^{\circ}$                            |
| Dedektör boyutu          | $320 \times 240$ Piksel                                   |



Şekil 6.7. Testo 885 termal kamera (Tetteknik, 2023)

## 6.8. Enerji Tüketimi Ölçümü

Frezeleme deneyi esnasında HIOKI PW 3198 güç analizörü (Hioki, Nagano, Japonya) cihazında güç ölçümleri yapılmıştır. IEC 61000-4-30'a göre Class A olarak tüm uluslararası standartlara uygun olarak yapan cihaz ile tüm değişkenler için eş zamanlı ve hassas ölçüm yapıldı. Cihazdaki akım penslerinin CNC makinesinin ana güç besleme kablolarına bağlanması ve üç fazdan akım-gerilim değerleri elde edilerek aktif güç ölçüldü. Cihazın özel yazılım desteği sayesinde ve tüketilen enerji sonuçları hesaplandı. Cihaza ait görsel aşağıda Şekil 6.8'de ve Tablo 6.9'da görülmektedir.



Şekil 6.8. HIOKI PW 3198 Güç analizörü

Tablo 6.9. HIOKI PW 3198 Güç analizörü özellikleri (Globalpiyasa, 2023)

---

|                                                     |
|-----------------------------------------------------|
| Akım klempları ile 5000A'ye kadar akım ölçümü       |
| Dip(Gerilim Çökmeleri), Swell(Gerilim Yükselmeleri) |
| 4 Akım 4 Gerilim Kanalı                             |
| 4 kanal üzerinden hem AC hem DC ölçüm               |
| 50, 60 ve 400 Hz temel frekanslarda ölçüm           |
| 600V rms, 6000 V Peak Gerilim Ölçümü                |

---

## 6.9. Kesici Takım Aşınması İçin Kullanılan Dijital Ölçüm Kamerası

Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Insize ISM PM200SB (Insize, Suzhou New District, Çin) marka dijital ölçüm kamerası kullanılarak ölçülmüştür. Kesici takımın yan alanında ortaya çıkan yan aşınma miktarını ( $V_{b_{max}}$ ) belirlemek için her deneysel test tamamlandıktan sonra kesici takım aşınması görüntülenerek ölçüldü. Elde edilen görüntüler dijital olarak kaydedildi. Dijital ölçüm kamerasına ait görsel Şekil 6.9'da ve teknik özellikler Tablo 6.10'da görülmektedir.



Tablo 6.10. Dijital ölçüm kamerasının teknik özellikleri (Ubuy, 2023)

| Marka                  | Boyut             |
|------------------------|-------------------|
| Gerçek Bakış Açısı     | 45 Derece         |
| Maksimum Büyütme       | 200 x             |
| Ürün Ağırlığı          | 1,94 Kilogram     |
| Voltaj                 | 3 Volt            |
| Işık Kaynağı Türü      | LED               |
| Renk                   | Mavi yeşil        |
| Objektif Lens Açıklama | Akromatik         |
| Güç kaynağı            | AC / DC           |
| Işık Kaynağı Türü      | LED               |
| Ürün Boyutları         | 34,5 × 23 × 13 cm |



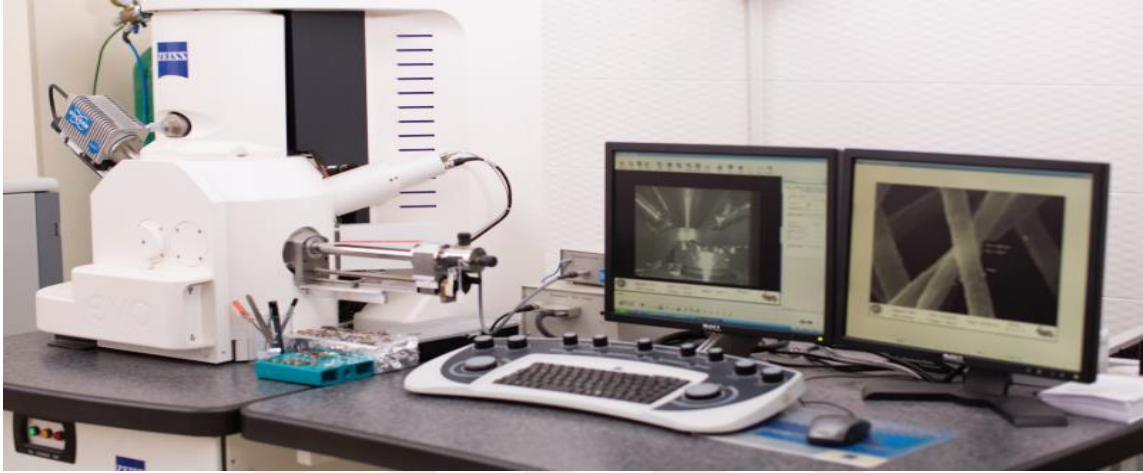
Şekil 6.9. Dijital ölçüm kamerası (Ubuy, 2023)

### 6.10. EDX ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Cihazı

Kesici takımdaki aşınma mekanizmalarının ve nano tozun, görüntülerini ayrıntılı bir biçimde belirlemek için Selçuk Üniversitesi, İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM), ZEISS EVO LS10 marka



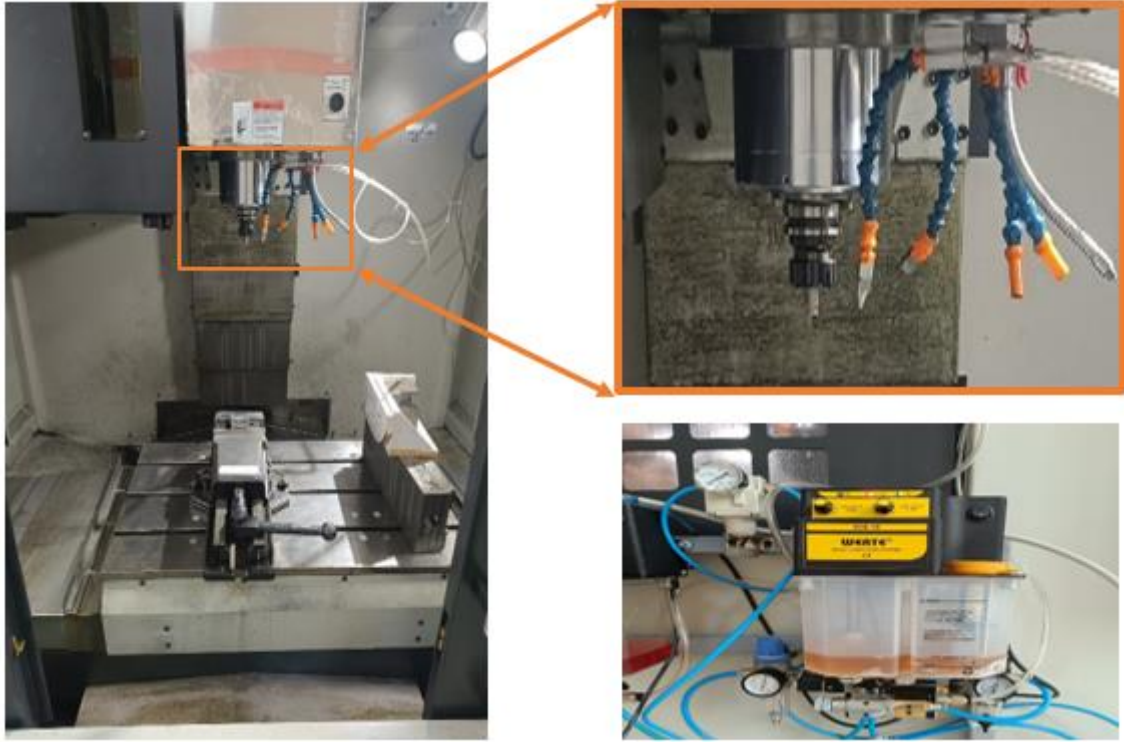
model cihazı kullanıldı. Kullanılan nano toz ve kesici takımların yüzeyinde bulunan ana malzemelerin bileşim yüzdeleri Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometre (EDX) analizi ile tespit edilmiştir. Kesici takımlardaki ve nano tozdaki tarama işlemleri aşağıdaki Şekil 6.10'da verilen SEM cihazında gerçekleştirilmiştir. Kesici takım ve nano toz numuneleri aparata yerleştirilip, kesici takımın ve nano tozların yüzeylerinden görüntüler alınmıştır.



Şekil 6.10. ZEISS EVO LS10 Model taramalı elektron mikroskobu (İltek, 2024)

### 6.11. Deneylerde Kullanılan MMY Sistemi

Frezeleme deneylerinde Werte Micro STN15 MMY (Kar-Tes, İstanbul, Türkiye) cihazı kullanıldı. MMY sistemine ait yağ haznesi deney öncesi temizlenerek deneyde kullanılabilir hale getirilmiştir. İş parçası malzemesinin tamamının işlenmesinde cihazın çalışma basıncı 7 bar olarak ayarlandı. Sistemde 3 mm iç çapa sahip nozül kullanılmış olup bu nozülün kesme bölgesine uzaklığı yaklaşık 90 mm uzaklıkta sabit tutuldu. Nozül açısı  $45^\circ$  olarak ayarlandı. Yağlayıcı akışkan olarak mineral yağ kullanılmıştır. Sıvı akış hızı sistemin 40 mL/sa olarak belirlendi. MMY sistemi dört farklı ortam için kullanıldı. Bu sistemin özellikleri aşağıda gösterilmektedir. Şekil 6.11'de MMY nozül ve MMY sistemi, Tablo 6.11'de MMY sisteminin özellikleri aşağıda görülmektedir.



Şekil 6.11. Deneylerde kullanılan MMY nozul ve MMY sistemi

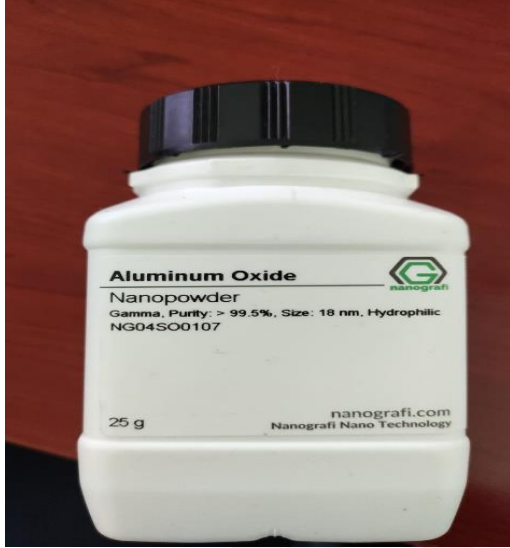
Tablo 6.11. MMY sisteminin özellikleri (Kartes, 2023)

| Model                | STN15        |
|----------------------|--------------|
| Çalışma Basıncı      | 4-6 Bar      |
| Çalışma Voltajı      | 24V AC/DC    |
| Yağ Miktarı Minimum  | 0,0012 ml    |
| Yağ Miktarı Maksimum | 0,028 ml     |
| Yağlama Aralığı      | 0,1sn – 10sn |
| Yağlama Süresi       | 0,1sn – 10sn |
| Rezervuar            | 1,5lt        |
| Viskozite Aralığı    | 2 – 30cst    |

## 6.12. Deneylerde Kullanılan Nanotoz

$Al_2O_3$  nano tozu yüksek boyutsal ve sertlikte kararlılığa sahiptir. Seramik, kauçuk, plastik için kırılmaya karşı direnci, korozyon ve ısı yorulma dayanımı ile seramik yoğunluğunu iyi hale getirmek için kullanılır. Parlatma malzemelerine, metal ürünlere ve cam ürünlere eklenir. Dayanımı yüksek alüminyum oksit seramikte, fırın tüplerinde, yüksek saflıkta

potalarda ve kesici aletlerde kullanılır (Nanografi, 2023). Aşağıda  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano tozun teknik özellikleri Tablo 6.12’de, element analizi Tablo 6.13’te, deneylerde kullanılan nanotoz ise Şekil 6.12’de görülmektedir.



Şekil 6.12. Deneylerde kullanılan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanotoz

Tablo 6.12.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano tozu teknik özellikleri (Nanografi, 2023)

|                                             |                |
|---------------------------------------------|----------------|
| Safılık (%)                                 | 99,5+          |
| Renk                                        | Beyaz          |
| Ortalama Parçacık Boyutu (nm)               | 18             |
| Özgül Yüzey Alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | 140            |
| Özgül Isı Sığası ( $\text{J/Kg.K}$ )        | 890            |
| Gerçek Yoğunluk ( $\text{Kg/m}^3$ )         | 3900           |
| Biçim                                       | Küresele yakın |

Tablo 6.13.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanotoz element analizi (Nanografi, 2023)

| Cr      | Co      | Ca       | Na       | Fe       | Mn      |
|---------|---------|----------|----------|----------|---------|
| < 4 ppm | < 2 ppm | < 25 ppm | < 70 ppm | < 80 ppm | < 3 ppm |

### 6.13. Soğutma ve Yağlama Koşulları

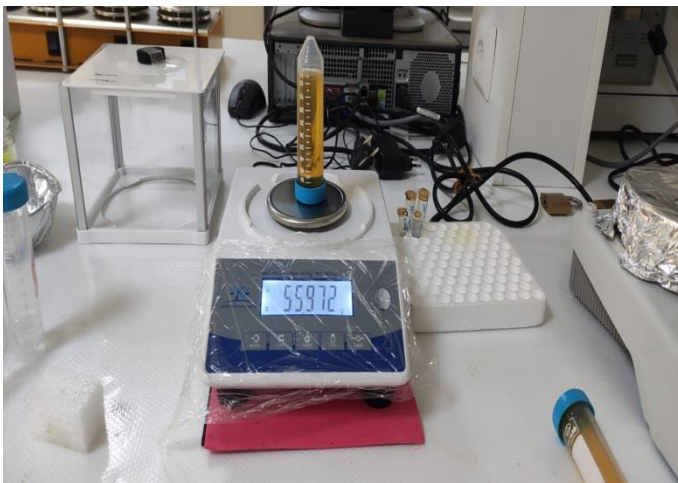
X33CrS16 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde beş farklı soğutma ve yağlama ortamı kullanılarak toplamda 20 deney gerçekleştirildi. Deneyin amacı hazırlanan kesme sıvılarının diğer soğutma/yağlama ortamlarına kıyasla işlenebilirliğini nasıl etkilediğini gözlemlemektir.

#### 6.13.1. Kuru

Deneyler sürdürülebilir olduğundan herhangi bir soğutucu ortam olmadan gerçekleştirdiğimiz 2 farklı kesme hızı ve 2 farklı ilerleme hızında hiç bir soğutma/yağlama ortamının kullanılmadığı koşullarda toplamda 4 adet deney gerçekleştirildi.

#### 6.13.2. MMY-Mineral Yağ

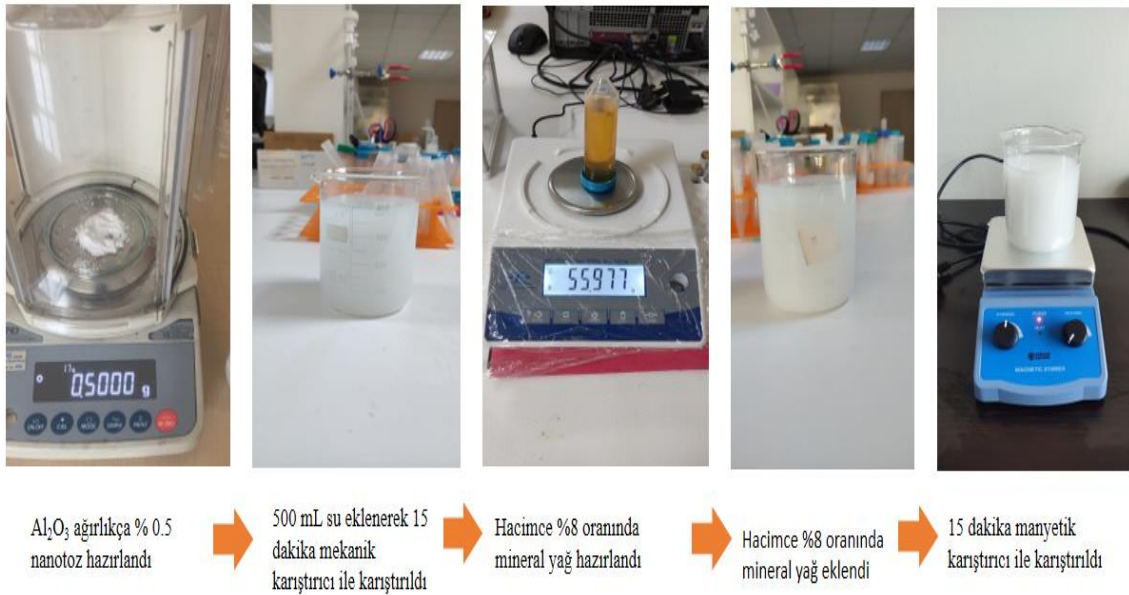
Sadece MMY yağlama ile yapılan deneylerde hidrodinamik yağlama özelliği yüksek olan ve püskürtme sistemlerinde kullanılabilen mineral yağ kullanılarak, 2 farklı kesme hızı ve 2 farklı ilerleme hızında, MMY-Mineral Yağ adını verdiğimiz koşullarda toplamda 4 adet deney gerçekleştirildi. Sadece mineral yağ kullanılıp hazırlanarak MMY ile aynı akış hızına ve basınca sahip MMY nozülü ile kesme bölgesine gönderilmiştir. Şekil 6.13'te MMY-Mineral Yağ kesme sıvısının hazırlanışı görülmektedir.



Şekil 6.13. MMY-Mineral Yağ kesme sıvısının hazırlanışı

### 6.13.3. N1-MMY Emülsiyon

Frezeleme deneylerinde kuru, MMY-Mineral Yağ, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) ortamlarının yanı sıra kullanılan N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ve N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon iki farklı ortam hazırlanarak kullanıldı. Hassas terazide ölçülen suda çözünür olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ağırlıkça %0,5 oranında nanotoz ve 500 mililitre su 15 dakika mekanik bir karıştırıcıyla karıştırıldı. Ardından hacimce %8 oranında mineral yağ eklenerek manyetik karıştırıcı cihazında 15 dakika karıştırıldı. N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ortamı için Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ağırlıkça %0,5 nanotoz + 500 mililitre su + hacimce %8 oranında mineral yağ karıştırılarak nano akışkan üretildi. N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ortamı için nano akışkanlar hazırlanarak MMY ile aynı akış hızına ve basınca sahip MMY nozülü ile kesme bölgesine gönderilmiştir. İki farklı kesme ve ilerleme hızlarında toplam 4 adet deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.14'te N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon kesme sıvısının hazırlanışı görülmektedir.



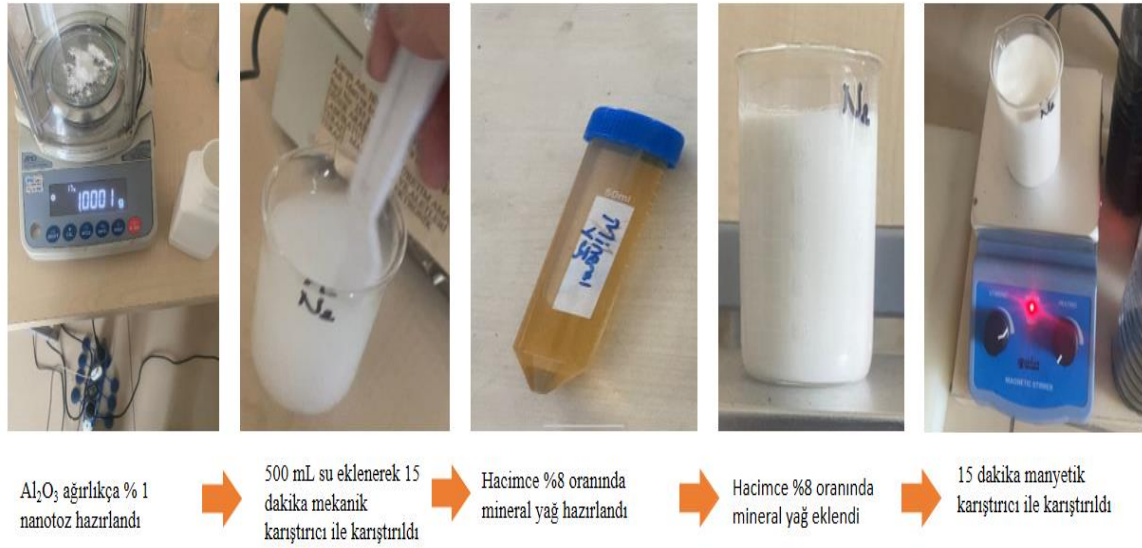
Şekil 6.14. N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon kesme sıvısının hazırlanışı

### 6.13.4. N2-MMY Emülsiyon

Hassas terazide ölçülen suda çözünür olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ağırlıkça %1 nanotozları baz sıvıya dağıtarak çözmek amacıyla, 500 mililitre su eklenerek mekanik bir karıştırıcıyla 15 dakika karıştırıldı. Ardından hacimce %8 oranında mineral yağ eklenerek manyetik



karıştırıcı cihazında 15 dakika karıştırıldı. Hazırlanan  $N_2$ -MMY Emülsiyon ortamı için  $Al_2O_3$  ağırlıkça %1 nanotoz + 500 mililitre su + hacimce %8 oranında mineral yağ karıştırılarak nano akışkan kesme sıvısı üretildi. Nano akışkanlar hazırlanarak MMY ile aynı akış hızına ve basınca sahip MMY nozülü ile kesme bölgesine gönderilmiştir. İki farklı kesme ve ilerleme hızlarında toplam 4 adet deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.15'te  $N_2$ -MMY kesme sıvısının hazırlanışı görülmektedir.



Şekil 6.15.  $N_2$ -MMY Emülsiyon kesme sıvısının hazırlanışı

#### 6.13.5. MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su)

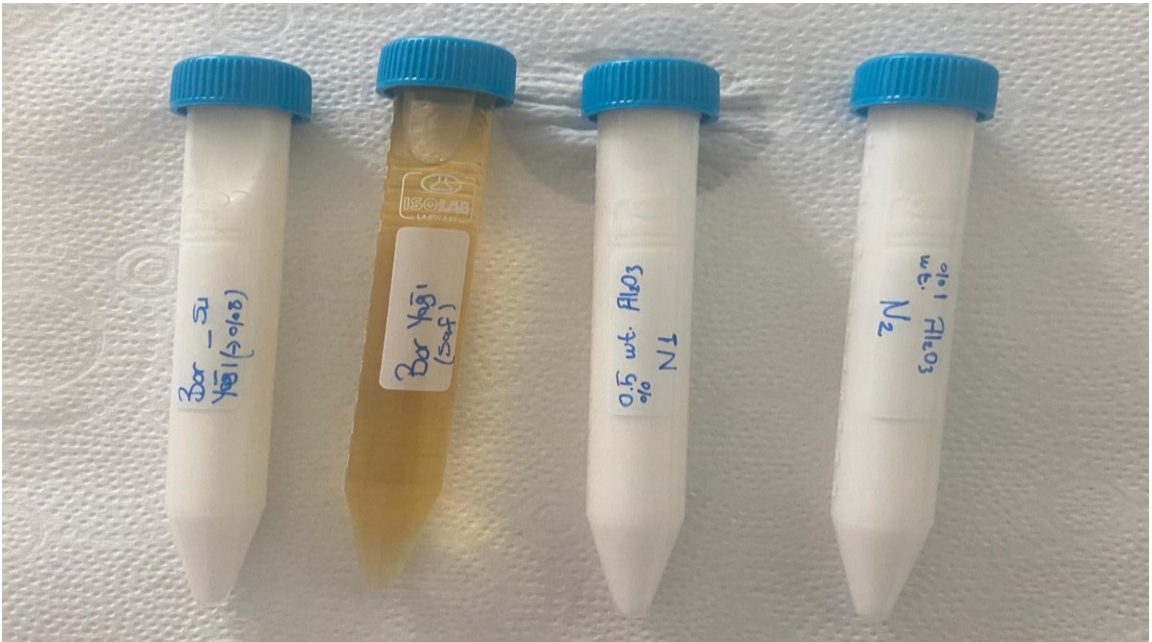
Frezeleme deneylerinde 500 mililitre su hacimce %8 oranında mineral yağ karıştırılıp hazırlanarak MMY ile aynı akış hızına ve basınca sahip MMY nozülü ile kesme bölgesine gönderilmiştir. İki farklı kesme ve ilerleme hızlarında toplam 4 adet deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.16'da MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) kesme sıvısının hazırlanışı görülmektedir.



Şekil 6.16. MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) kesme sıvısının hazırlanışı

#### 6.14. Temas Açısı Ölçüm Cihazı

Selçuk Üniversitesi, İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Model OCA 50Micro ve Marka DataPhysics Şekil 6.18'deki Temas açısı ölçüm cihazı kullanıldı. Hazırlanan Şekil 6.17'deki homojen kesme sıvıları numunelerin yüzeylerin ıslanabilirliklerinden yola çıkarak, bahse konu sıvıların morfolojik yapıları ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi edinebilmek amacıyla kesme sıvıları analiz edildi.



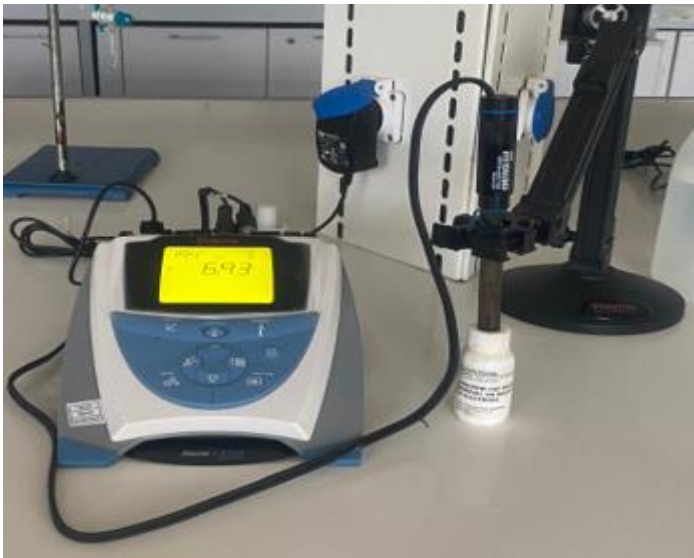
Şekil 6.17. Ölçümü yapılan kesme sıvıları



Şekil 6.18. Model OCA 50Micro Temas açısı ölçüm cihazı (İltek1, 2024)

### 6.15. pH Cihazı

Endüstriyel üretimlerde, insan sağlığı ve çevre açısından kullanılan atıkların pH tayini oldukça önemlidir. Yukarıda verilen Şekil 6.17'deki kullanılan kesme sıvılarının sürdürülebilir olduğunu kanıtlamak ve homojen karışım karışmadığını belirlemek için pH değeri ölçüldü. Bingöl Üniversitesi, Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan pH Cihazı kullanıldı. Kullanılan pH cihazı Şekil 6.19'da görülmektedir.



Şekil 6.19. pH cihazı



### 6.16. Deneylerde Kullanılan Viskozite Cihazı

Hazırlanan kesme sıvılarında kullanılan mineral bor yağının akmaya karşı gösterdiği direnci hesaplamak için viskozite analizi yapıldı. Hacimi sabit olan kesme sıvısının, ayarlanmış bir viskozimetre içindeki bir kılcal damardan bilinen bir mesafeyi, kontrol edilen sıcaklıkta akması için gereken zamanın saniye cinsinden ölçülmesi ile kaydedilir (Bumlab, 2023). Bingöl Üniversitesi, Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Tanaka marka AKV-202 model Kinematik Viskozite Cihazı kullanılarak kesme sıvılarının viskozite analizi yapıldı. Şekil 6.20'de kinematik viskozite cihazı görülmektedir.



Şekil 6.20. Kinematik viskozite cihazı (Bumlab, 2023)

## 7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu deney çalışmasında literatürde pek rastlamadığımız X33CrS16 yüksek alaşımlı paslanmaz çeliğin, frezeleme esasları ele alınmıştır. Freze işleme deney çalışmaları, kuru kesim koşullarında, MMY-Mineral Yağ koşullarında, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon koşullarında, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon koşullarında ve MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları olmak üzere beş farklı ortamda iki farklı kesme ve iki farklı ilerleme hızlarında olmak üzere toplamda 20 deney yapılmıştır. Frezeleme işlemi esnasında güç tüketimi, frezeleme işlemi sonrasında ise numunelerin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve termal kamera ile kesme sıcaklığı ölçülerek kaydedilmiştir. Kaydedilen ölçümler hakkında bu bölümde değerlendirmeler yapılacaktır. Kesici takımın ve kullanılan nano tozun yapılan SEM ve EDX analizleri değerlendirilecektir. Kullanılan mineral yağın viskozite ölçümü ile kesme sıvılarının kaydedilen temas açısı ile pH ölçümü değerlendirilecektir.

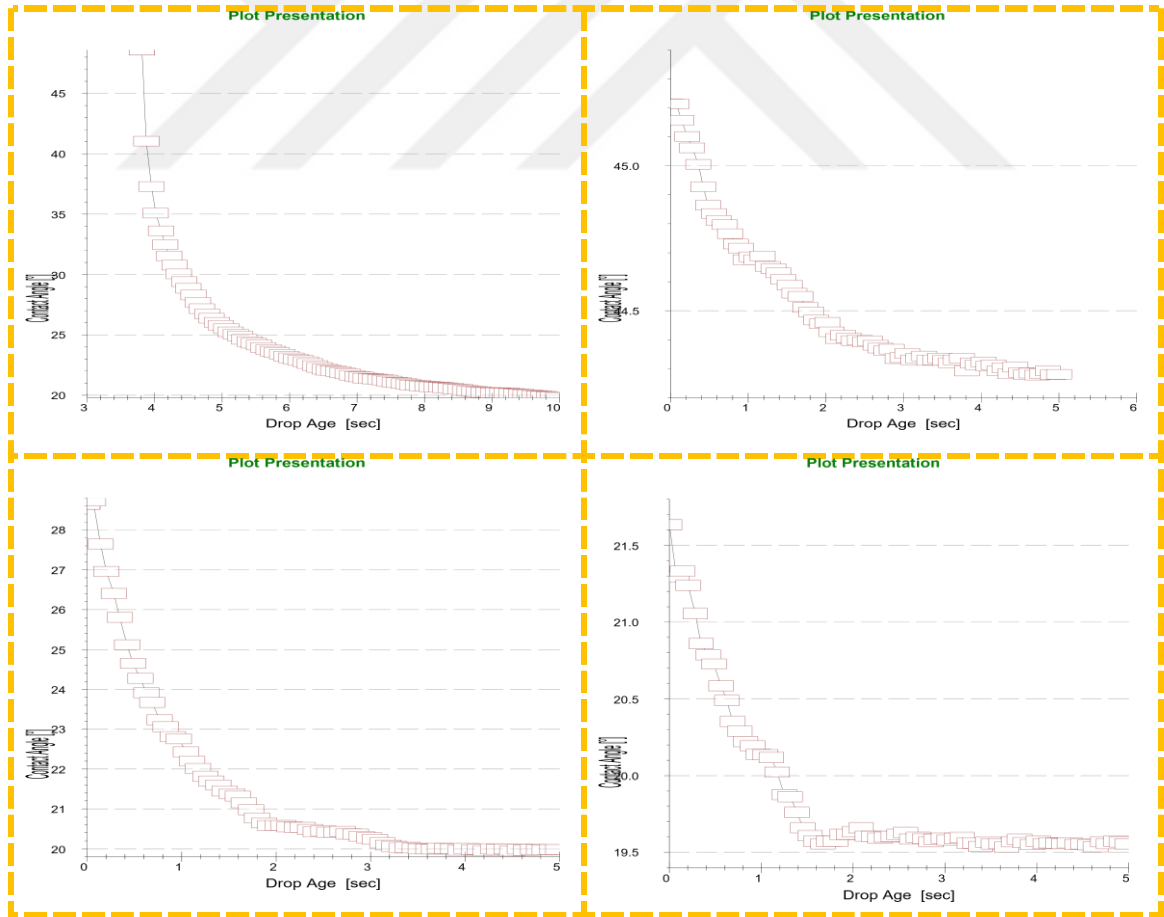
### 7.1. Kesme Sıvılarının Islanabilirliği

Islanabilirlik, sıvının iş parçasına ve alete yayılma, kaplama ve nüfuz etme kabiliyeti olarak tanımlanabilmektedir. Herhangi bir sıvının damla noktası yani ıslanabilirliği, katı yüzey ve yağlayıcı damlacık arasındaki temas açısıyla ölçülmektedir. MMY yöntemi kullanılarak yağlayıcılar, kesici takım, talaş ara yüzlerine nüfuz ederek soğutma ve yağlama kabiliyeti sağlayan bir aerosol sisi olarak kesme alanına gönderilir. Yağlayıcıların yüzeyde yayılma durumu yağlama performansını etkilemektedir. Düşük temas açısı değeri, yağlayıcı damlacıklarının yüzeye daha fazla yayılması, ıslanabilirliği yüksek demektir (Şirin, 2022).

Baz akışkan yani MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon ve MMY-Emülsiyon ( mineral yağ + su ) yağlayıcılara ilişkin temas açısı ölçüm sonuçları Tablo 7.1’de ve temas açısı ölçüm sonuç grafiği Şekil 7.1’de görülmektedir.

Tablo 7.1. Kesme sıvılarının temas açısı sonuçları

| Kesme Sıvıları                      | Temas açısı $\theta$ (°) | Görseli |
|-------------------------------------|--------------------------|---------|
| MMY-Mineral Yağ                     | 25,52                    |         |
| N <sub>1</sub> -MMY Emülsiyon       | 19,98                    |         |
| N <sub>2</sub> -MMY Emülsiyon       | 19,56                    |         |
| MMY-Emülsiyon<br>(mineral yağ + su) | 44,28                    |         |



Şekil 7.1. Temas açısı ölçüm grafiği

Tablo 7.1’de verilen temas açısı ölçüm sonuçlarında en düşük  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ağırlıkça %1 nanotoz takviyeli  $\text{N}_2$ -MMY Emülsiyon şartlarında kaydedilmiştir. Buradan anlaşılaçağı üzere  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano tozu, kesme sıvılarına ilave edilen ortamların MMY sistemlerinde daha iyi nüfuz etme, daha iyi ıslanabilirliği artırdığı kaydedilmiştir. Baz akışkanı yani mineral yağı,  $\text{N}_1$ -MMY Emülsiyon,  $\text{N}_2$ -MMY Emülsiyon ve MMY Emülsiyon (mineral yağ + su ) ile kıyasladığımızda temas açi ölçümleri sırasıyla %21,7 azalmış, %23,26 azalmış, %73 artmıştır.

## 7.2. pH Analizi

Atık numunelerin kanal yapısını aşındıran, bozan, alkaliler, asitler, korozif maddeler, pH değeri 6’dan düşük, 10’dan yüksek atıklardır (İsu, 2024). Hazırlanan kesme sıvı numunelerimizin pH analiz sonuçları  $8,56 < \text{pH} < 9,47$  aralığındadır. Kaydedilen sonuçlarımız 6 ile 10 arasında olduğundan dolayı atık sınıfına dahil edemeyiz. Bu sebeple yüzey ve yer altı suları ile çevre ve doğa açısından çok kirletici bir etkisi bulunmamaktadır. pH değerleri, nano akışkanlı kesme sıvılarında karışımın homojenliği hakkında bilgiler sunmaktadır. Kesme sıvılarında pH değerleri 9 veya 9 değerine yakın ise homojen bir karışım olarak bilinmektedir (Demir, 2022). MMY nozulü ile aerosol olarak püskürtülen kesme sıvılarımızın homojen olarak dağıldığını söyleyebiliriz. pH değeri küçükten büyüğe doğru MMY-Emülsiyon ( mineral yağ + su ) <  $\text{N}_1$ -MMY Emülsiyon < MMY-Mineral Yağ <  $\text{N}_2$ -MMY Emülsiyon olarak sıralanmıştır. Mineral yağın viskozite değeri ise  $31,62 \text{ mm}^2/\text{s}$  olarak kaydedilmiştir. Tablo 7.2’de kesme sıvıların pH sonuçları görölmektedir.

- ✓ Mineral yağı su ile seyrelttiğimizde pH değeri düşmektedir.
- ✓ Mineral yağa %0,5 ağırlıkça  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano toz ve su eklendiğinde pH değeri düşmektedir.
- ✓ Mineral yağa %1 ağırlıkça  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano toz ve su eklendiğinde pH değeri artmaktadır. Buradan gözleendiğine göre nano toz miktarı arttırıldıkça pH değeri 9,47 değerinin üzerine çıkıp 10’u aşabilir, 10 değerinin üzerine çıktığında ise atık tehlike oluşturup sürdürülebilir olma koşulundan çıkabilir. Yani ağırlıkça %1’i aşan nano partiküllü kesme sıvısının kullanılabilirliği ve devamlılığı çevreye zarar verebilir.
- ✓ Baz akışkanı yani mineral yağı,  $\text{N}_1$ -MMY Emülsiyon,  $\text{N}_2$ -MMY Emülsiyon ve MMY-Emülsiyon ( mineral yağ + su ) ile kıyasladığımızda pH değeri sırasıyla %1

azalmış, %4 artmış, %6 azalmıştır. Çevremizi koruyarak kullanılan kaynağın gelecekte de devam edilerek kullanılabilmesi sürdürülebilirlik olarak tanımlanabilmektedir (Ercan, 2019). Geri dönüşüm ve atıkların en aza indirilerek, sağlıklı bir çevre odaklı yaklaşımımız doğrultusunda elde edilen sonuçlara göre kesme sıvılarımızın sürdürülebilir olduğu kaydedilmiştir. Sürdürülebilir kesme (soğutma) sıvılarının işleme dünyasında çevre açısından alt yapı kirletilip tüketilmediği için ekolojik ayak izini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır.

Tablo 7.2. Kesme sıvılarının pH sonuçları

| Kesme Sıvıları                   | pH Değeri |
|----------------------------------|-----------|
| MMY-Mineral Yağ                  | 9,10      |
| N <sub>1</sub> -MMY Emülsiyon    | 9,02      |
| N <sub>2</sub> -MMY Emülsiyon    | 9,47      |
| MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) | 8,56      |

### 7.3. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlendirilmesi

Kaliteli bir yüzey elde edebilmek için sürdürülebilir koşullarda iş parçasının kesme performanslarını yüzey pürüzlülüğü ölçümü ile bu bölümde değerlendirilmektedir. Deney numunelerinden alınan ölçümlerin yüzeyinde, tepe noktaların ve oyukların bir çizgi boyunca eşitsizliğin devam etmesi pürüzlülük olarak adlandırılır (Kuntoğlu, 2020). Talaşlı imalat operasyonlarının ardından yüzey kalitesini tayin etmek amacıyla farklı hesaplama metotları geliştirilmiştir. Sıklıkla kullanılan yüzey pürüzlülük göstergesi Ra parametresidir (Haq, 2016). Bu parametre iş parçasında bir çizgi boyunca devam eden oyukların derinliği ve tepe noktalarının toplam değerinin ortalaması alınarak hesaplanır. Literatürde yüzey kalitesinin daha iyi elde edilebilmesi için bu parametre tercih edilir (Uzun, 2020). Deneyler sırasında kullanılan yağlama sıvısıyla beraber deney parametrelerinden kesme ve ilerleme hızı yüzey pürüzlülüğü ile doğrudan ilgilidir (Karabatak, 2016). Yüzey pürüzlülüğünü kesme derinliği, takım tezgâhı, iş parçası, kesici takım ve çevresel gibi faktörler etkilemektedir (Aslan, 2018).



Şekil 7.2. ( **a** )  $V_c = 120$  m/dak,  $f_n=0,08$  ve  $f_n=0,15$  mm/dev; ( **b** )  $V_c = 150$  m/dak,  $f_n=0,08$  ve  $f_n=0,15$  mm/dev Farklı C/L koşullarının ilerleme hızlarına göre yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Şekil 7.2’de farklı kesme ve ilerleme hızlarına göre yüzey pürüzlülük ölçümleri görülmektedir. Yukarıdaki grafikte beş farklı ortamda uygulanan iş parçası malzemesinin her birinden ayrı ayrı ölçüm yapılarak ortalaması alınarak hesaplanan Ra parametresi elde edilmiştir. Frezeleme işlemlerinde kullanılan işleme parametrelerinden kesme ve ilerleme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü de tüm ortamlarda artmıştır. Yapılan bir çalışmada da bu durum benzerlik göstermektedir (Usca, 2022). Kaydedilen en düşük yüzey pürüzlülük değeri 120 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon şartlarında 0,982 µm olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen en yüksek yüzey pürüzlülük değeri 120 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme hızında, kuru kesim koşullarında 3,226 µm olarak kaydedilmiştir. Herhangi bir soğutma ve yağlama sıvısı olmadan yapılan işlemlerde iş parçası ve takım arasında aşırı bir direnç oluşmaktadır. Bu sebeple daha fazla takım aşınması, yüksek kesme sıcaklığı oluşturarak beraberinde kötü yüzey kalitesi meydana getirir. Bu durum literatür çalışmalarında da görülmüştür (Usca, 2023).

En uç veriler dikkate alındığında; 120 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında, kuru kesimden N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon kesime geçişte yüzey pürüzlülüğü değerinde %62 oranında iyileşme meydana gelmiştir. 150 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında ise yüzey pürüzlülüğünde %16 oranında bir iyileşme meydana gelmiştir.

Kesme hızları artınca yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. Yüksek kesme hızlarında kesici takımda daha fazla aşınma ve titreşim meydana geldiği için yüzey pürüzlülüğü artmıştır (Usca, 2023). Kuru kesimde 0,08 mm/dev ilerleme hızında, 120 m/dak kesme hızından 150 m/dak kesme hızına geçildiğinde yüzey pürüzlülüğü %4 artmış, 0,15 mm/dev ilerleme hızında, 120 m/dak kesme hızından 150 m/dak kesme hızına geçildiğinde %12 oranında yüzey pürüzlülüğünün azaldığı kaydedilmiştir. N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon şartlarında ise 0,08 mm/dev ilerleme hızında, 120 m/dak kesme hızından 150 m/dak kesme hızına geçildiğinde %129 artış, 0,15 mm/dev ilerleme hızında, 120 m/dak kesme hızından 150 m/dak kesme hızına geçildiğinde %11 artış oranında kaydedilmiştir.

İlerleme hızlarına bakıldığında, ilerleme hızı artınca yüzey pürüzlülük değerleri tüm koşullarda artmaktadır. Kuru kesime baktığımızda, 120 m/dak kesme hızı için; 0,08

mm/dev ilerleme hızından 0,15 mm/dev ilerleme hızına çıkıldığında %24, 150 m/dak kesme hızı için; 0,08 mm/dev ilerleme hızından 0,15 mm/dev ilerleme hızına çıkıldığında %6 oranında yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. Diğer dört ortamda MMY yöntemi ve takviyeleri kullanılarak yapılan kesimlerde ilerleme oranı artınca yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. Ancak kesme hızı artışı ilerleme hızındaki artışlarından daha fazla yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir.

120 m/dak kesme hızında MMY-Mineral Yağ ve MMY-Emülsiyonun (mineral yağ + su) daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. 150 m/dak kesme hızlarında ise N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ve N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon koşulunun yüzey pürüzlülük oranlarının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. MMY kesme sıvılarının yağlayıcı etkisinden dolayı takviye oranlarıyla birlikte kullanılması iş parçasında onarım görevi görerek yüzey kalitesini iyileştirmiştir, literatür çalışmaları da bu durumu desteklemektedir (Şap, 2022). Kesme sıvılarının MMY yöntemi ile basınçlı olarak kesici takım ve iş parçası ara yüzüne nüfuz edip ince bir film tabakası oluşturarak takım aşınmasını ve sürtünmeyi azaltarak yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktadır, literatür çalışmalarında da bu durum görülmektedir (Aydın, 2023).

Düşük kesme hızlarında, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ortamı, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon ortamına göre daha iyi yüzey pürüzlülükleri kaydedilmiştir. Yüksek kesme hızlarında ise N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon ortamı N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ortamına göre daha iyi yüzey pürüzlülükleri kaydedilmiştir. Farklı deney parametreleri karşılaştırıldığında kesme hızı ve nano-akışkanın konsantrasyonundaki artışın yüzey kalitesini iyi yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Bir başka sebebi ise, nano tozların ilave edilmesiyle, akışkanın viskozitesini etkileyebilir. Baz sıvıya nano partikül eklenerek viskozite değerleri artırılabilir. Düşük takviyeli nano akışkanlar daha düşük viskoziteye sahiptir. Bundan dolayı kesici takım iş parçası arasında daha ince bir film tabakası meydana getirmektedir. Bundan dolayı sürtünme azalmakta kesme sıcaklığı azalmakta ve yüzey pürüzlülüğü azalarak yüzey kalitesi artmaktadır. Takviye oranı arttıkça viskozitede artmaktadır. Buda film tabakasını kalınlaştırarak iş parçası takım ara yüzeyindeki yağlamanın zayıflamasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, sürtünmeyi belli bir oranda artırarak kesme sıcaklığının artmasına ve yüzey kalitesini düşürerek yüzey pürüzlülüğünün artmasına yol açmaktadır.



Yüksek kesme hızlarında viskozitesi düşük akışkanlar, kesme alanına kolay nüfuz ederek verimli bir soğutma ve yağlama koşulu hazırlar. Düşük kesme hızlarında viskozitesi yüksek akışkanlar, yağlama katmanını daha iyi meydana getirerek, kesici takım aşınmalarını azaltarak kaliteli yüzeyler meydana getirir. Yapılan çalışmalarda nano akışkanların diğer kesme sıvılarına göre takım aşınması azalttığını, kesme sıcaklığını düşürdüğü ve aşınmayı engelleyerek, sürtünmeyi azaltarak, yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Aydın,2023 ). En iyi yüzey pürüzlülük değerleri düşük kesme hızı ve düşük ilerleme hızlarında elde edilmiştir. Kesme ve ilerleme hızlarının artışı iş parçası ve takım arasında yüksek titreşim meydana getirerek yüzey pürüzlülüğünü kötü etkilemektedir. Kuru işlemeye göre ağırlıkça %0,5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon koşulu kesim performansını iyi bir şekilde etkilemektedir.

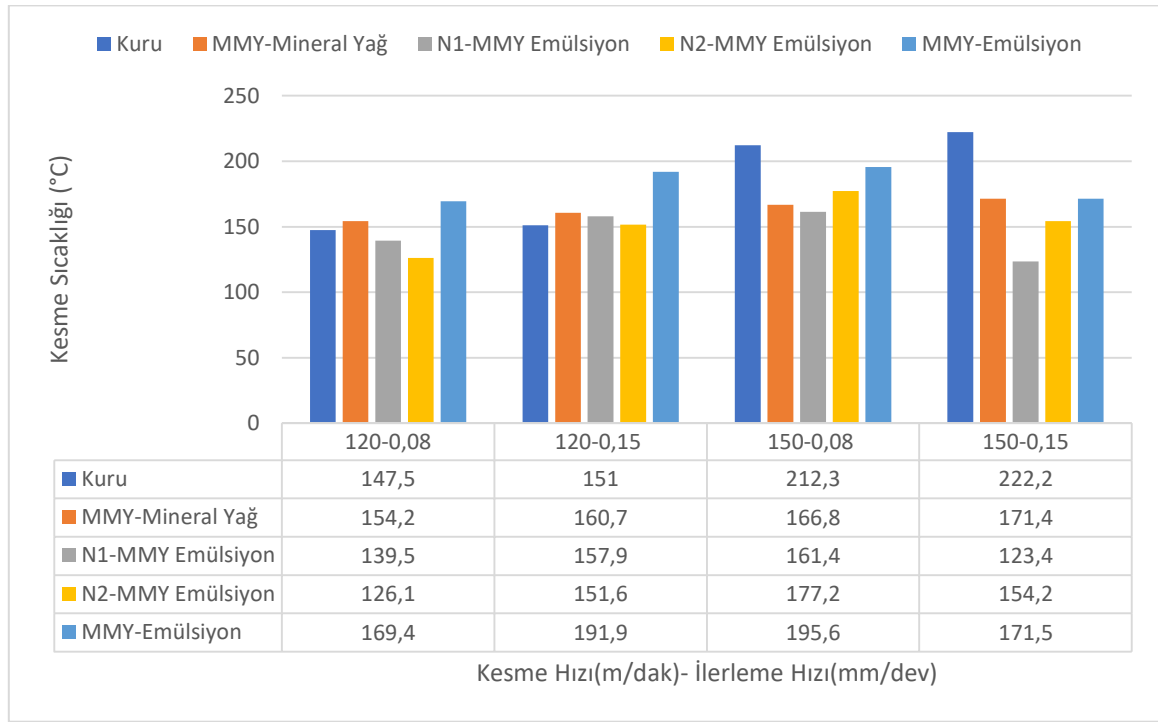
#### **7.4. Kesme Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi**

Malzemenin yüzey kalitesini istenilen oranda elde etmek ve takım ömrünü uzatmak için kesme sıcaklığı önemlidir. Kesme sıcaklığı, işlenebilirlik ölçümlerinden takım aşınması ve yüzey kalitesi gibi etkenleri önemli ölçüde etkiler (Abukhshim, 2006). İlerleme ve kesme hızının artması ile kesme sıcaklığının artması beklenebilir. Bunun sebebi malzemeler arasındaki yüksek sürtünmeden kaynaklıdır (Davim, 2022).

Kesme hızının artması ile kesme ve basınç alanındaki deformasyon alanları arasındaki sürtünmeden kaynaklı kesme için harcanan enerji genellikle ısıya dönüşmektedir (Ning, 2019).

Elde edilen ısı ise sıcaklığa dönüşerek kesim bölgesine yayılır. Kesme sıcaklığı, kesici takımdaki aşınmanın nedeni olarak bilinir. Bunun için elde edilen ısıнын kesim bölgesinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Sıcaklık artarak malzeme yumuşar bu da kimyasal termal tepkimeleri kolaylaştırır. Bu sebeple malzeme yapısının bozulmasına sebep olur. Bu da düşük yüzey kalitesine ve gerilmeye sebep olur (Buruaga, 2018). Şekil 7.3'te farklı soğutma/yağlama şartlarının farklı deney işleme parametreleriyle termal kamera ile ölçülen kesme sıcaklıkları görülmektedir.

Soğutma/yağlama koşullarında en düşük sıcaklıklar, parametre fark etmeksizin N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon (123,4°C) < N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon (126,1°C) < Kuru (147,5°C) < MMY-Mineral Yağ (154,2°C) < MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) (169,4°C) olarak elde edildi. En yüksek sıcaklıklar ise parametre fark etmeksizin Kuru (222,2°C) > MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) (195,6°C) > N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon (177,2°C) > MMY-Mineral Yağ (171,4°C) > N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon (161,4°C) olarak kaydedildi.



Şekil 7.3. Farklı C/L şartlarında kesme sıcaklıkları

120 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında; MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları kuru ortamla kıyaslandığında sırasıyla kesme sıcaklıkları %4,54 artış, %5,43 azalış, %14,51 azalış ve %14,84 oranında artış göstermiştir.

120 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında; MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları kuru ortamla kıyaslandığında sırasıyla kesme sıcaklıkları %6,42; %4,56; %0,39 ve %27,08 oranında artış göstermiştir.

150 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında; MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları kuru ortamla kıyaslandığında sırasıyla kesme sıcaklıkları %21,44; %23,98; %16,54 ve %7,87 oranında azalış göstermiştir.

150 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında; MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları kuru ortamla kıyaslandığında sırasıyla kesme sıcaklıkları %22,87; %44,47; %30,61 ve %22,82 oranında azalış göstermiştir. Bu azalışın sebebi ilerleme hızı arttıkça tabla ilerlemesi artar, kesici takım ve iş parçası arasındaki temas süresi kısalmır, temas süresinin kısalığı sürtünmeyi etkiler. Dolayısıyla sürtünme daha az yaşandığı için kesme sıcaklıkları düşmüştür. Başka bir sebebi ise MMY ile püskürtülen mineral yağ kesme sıvısına su, ağırlıkça %0,5 ve %1 nano tozların takviye edilmesi ile takım-iş parçası arasında ince bir yağlama filmi nüfuz etmesinden sürtünmeyi azaltarak sıcaklığı düşürmede etkin bir rol oynamıştır. Literatür çalışmalarında da benzer durum görülmektedir (Şap, 2023). Diğer bir sebep ise yüksek ilerleme hızlarında üretilen talaş hacmi artar. Kesme bölgesinden daha fazla talaş tahliyesi meydana gelir. Artan talaş hacmi yüksek ısı taşıırken ayrılır. Giden yüksek ısıya sahip talaşla kesme sıcaklığı düşer, yapılan bir çalışmada buna benzerlik göstermektedir (Usca, 2023).

Tablo 7.3. Kesme sıcaklıklarının kuru kesimle kıyaslanması

| Kuru Kesim İle Diğer Kesim Ortamlarının Kıyaslanması (+): Azalış (-): Artış |           |            |            |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
|                                                                             | 120-0,08  | 120-0,15   | 150-0,08   | 150-0,15   |
| MMY-Mineral Yağ                                                             | %4,54 (-) | %6,42 (-)  | %21,44 (+) | %22,87 (+) |
| N <sub>1</sub> -MMY Emülsiyon                                               | %5,43 (+) | %4,56 (-)  | %23,98 (+) | %44,47 (+) |
| N <sub>2</sub> -MMY Emülsiyon                                               | %14,51(+) | %0,39 (-)  | %16,54 (+) | %30,61 (+) |
| MMY-Emülsiyon<br>(mineral yağ + su)                                         | %14,84(-) | %27,08 (-) | %7,87 (+)  | %22,82 (+) |

Kesme sıcaklıklarının kuru kesimle yüzdelik olarak kıyaslaması yapılmış olup Tablo 7.3'te görülmektedir. Kesme sıcaklıklarındaki azalış çalışma için olumlu performans gösterirken, artış istenmeyen bir durumdur. Soğutma/yağlama ortamlarından herhangi biri kullanılmadığı için en yüksek kesme sıcaklığı kuru ortamda 222°C görüldü. İlerleme hızları aynı iken kesme hızı artarken karşıt iki malzeme temasından kaynaklı sürtünme artışından kesme sıcaklığının artmasına sebep olmuştur, literatür çalışmasında da benzer durum görülmektedir. (Şap, 2022).

Kesme sıcaklığında en uç veriler dikkate alınarak kuru ortam ile MMY yöntemlerinden N<sub>1</sub>- MMY Emülsiyon kesiminde kıyaslamalar yapılmıştır. Kesme sıcaklığında nano toz ilaveli nano akışkanlarda kendi içerisinde kıyaslanarak değerlendirmeler yapılmıştır.

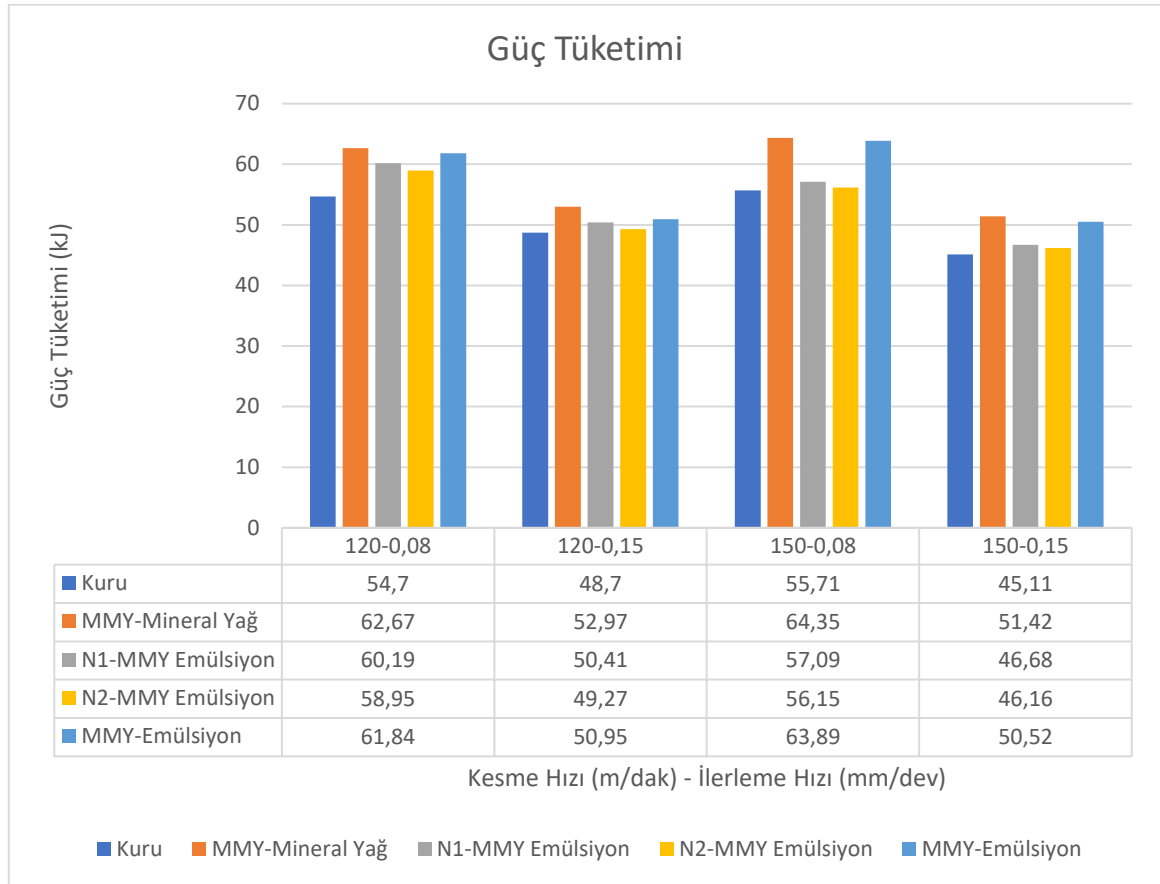
Kuru kesim ve N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ortamını kıyasladığımızda; 120 m/dak kesme hızında, 0,08 ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında, kesme sıcaklıklarında sırasıyla %5,43 azalış ve %4,56 artış meydana gelmiştir. 150 m/dak kesme hızında, 0,08 ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında kesme sıcaklıklarında sırasıyla %23,98 ve %44,47 azalış meydana gelmiştir. N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon koşulu yüksek kesme ve ilerleme hızlarında dahi kuru kesimden daha üstün performans gösterdiği sonuçlardan gözlemlenmiştir.

N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ve N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon ortamını kıyasladığımızda; 120 m/dak kesme hızında, 0,08 ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla kesme sıcaklıklarında sırasıyla %9,61 ve %3,99 azalış meydana gelmiştir. 150 m/dak kesme hızında, 0,08 ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında, kesme sıcaklıklarında sırasıyla %9,78 ve %24,95 artış meydana gelmiştir. Nano akışkanlar her ne kadar kesme sıcaklığının düşürülmesinde etkili olsa bile yüksek kesme hızlarında ilerleme hızı artınca konsantrasyon oranı arttıkça kesme sıcaklıklarının arttığı görülmektedir. Ancak kuru ortama göre nano partikül ilavesi kesme sıcaklıklarını büyük oranda düşürmektedir (Şap,2024).

## 7.5. Güç Tüketimi Değerlendirilmesi

Sanayi şirketlerinin temel amaçlarından biri, enerji tüketimini azaltmaktır. Bu tüketimin payı ise her geçen gün artmaktadır. Enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımı oldukça maliyetlidir. İmalat sahalarında enerji tüketiminin büyük bir çoğunluğu takım

tezgâhlarından kaynaklıdır. Kesme enerjisinin fazla kullanımı karbon emisyonu ile ilişkilidir. Sürdürülebilirlik açısından en önemli etken talaşlı imalat işlemleri ile kesme enerjisini azaltmaktır. İşleme parametreleri (kesme ve ilerleme hızı) toplam enerji tüketimiyle doğrudan ilgilidir (Şap, 2022). Harcadığımız her enerji karbon ayak izimizi oluşturmaktadır. Çevrenin korunması açısından enerjinin azaltılması, karbon emisyonlarını da azaltabilmektedir. İşlemenin verimliliğini artırmak ve sürdürülebilirlik için kesme koşullarının güç tüketimi bu bölümde değerlendirilmektedir.



Şekil 7.4. Farklı kesme koşullarında güç tüketimi verileri

Bu tez çalışmasında, X33CrS16 paslanmaz çeliğinin frezelenmesi esnasında minimum enerji tüketimi için en ideal kesme şartlarını bulmayı amaçlamaktadır. Farklı kesme soğutma ve yağlama koşullarında güç tüketimleri hesaplanmıştır. Güç tüketimi deney kesme parametreleriyle yakından ilişkilidir. Güç tüketiminde en uç veriler dikkate alınarak kuru ortam ile MMY yöntemlerinden seçilen MMY-Mineral Yağ kesiminde

kıyaslamalar yapılmıştır. Nano toz ilaveli nano akışkanlarda kendi içerisinde kıyaslanarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Kuru ve MMY-Mineral Yağ kesimini kıyasladığımızda; 120 m/dak kesme hızında, 0,08 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla %14,57 enerji tüketimi, %8,77 enerji tüketimi meydana gelmiştir. 150 m/dak kesme hızlarında 0,08 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla %15,5 enerji tüketimi, %14 enerji tüketimi meydana gelmiştir.

N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ve N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon kesimini kıyasladığımızda; 120 m/dak kesme hızlarında 0,08 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla %2,07 enerji tasarrufu, %2,27 enerji tasarrufu sağlanmıştır. 150 m/dak kesme hızlarında 0,08 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında %1,65 enerji tasarrufu, %1,1 enerji tasarrufu gerçekleşmiştir.

Kuru kesim koşulunda MMY sistemi kullanılmadığı için MMY sisteminin enerji tüketimi dahil edilmediğinden dolayı en düşük güç tüketimi kuru kesimde görünmektedir. Fakat diğer işlenebilirlik parametrelerinde kaydedilen ölçüm sonuçları ele alındığında kuru kesimin kullanılan malzemelerin işlenebilirliğini çok kötü etkilediği görülmektedir. Literatür çalışmasında da görüldüğü üzere, MMY sistemi ile takviyeleri kullanılan ortamların kuru kesim yapılan ortama göre enerji tüketiminin fazla olması doğaldır (Usca, 2023). İlerleme hızının artmasıyla güç tüketimi her koşulda azalmaktadır. Genelde kesme hızının artmasıyla da tüketilen güç azalmaktadır. Güç tüketimi açısından ilerleme hızının etkisi büyüktür. İlerleme hızı artınca toplam işleme süresi azaldığından tüm ortamlarda güç tüketimi yaklaşık 10 kJ olarak azalmıştır, literatür çalışmasında da bu benzerlik mevcuttur (Usca, 2022). İlerleme ve kesme hızının artmasıyla beraber tabla ilerleme hızı artar ve kesme süresi azalır bundan kaynaklı enerji tüketimi de azalmaktadır. Kesme hızının artırılması iş parçasının deformasyonunu kolaylaştırarak kesme kuvvetlerini azaltarak güç tüketimini azaltmaktadır. Soğutma ve yağlama koşulları takım ve iş parçası arasındaki temastan dolayı sürtünmeyi etkilemektedir. Sürtünmenin artması kesme kuvvetlerini ve sıcaklığını artırmaktadır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano akışkanı ile yapılan kesimlerde nano partiküller takım ile iş parçası arasına nüfuz ederek ortaya çıkan sürtünmeyi azaltabilir. Literatürde olduğu gibi, buda MMY'e göre daha az kesme kuvveti

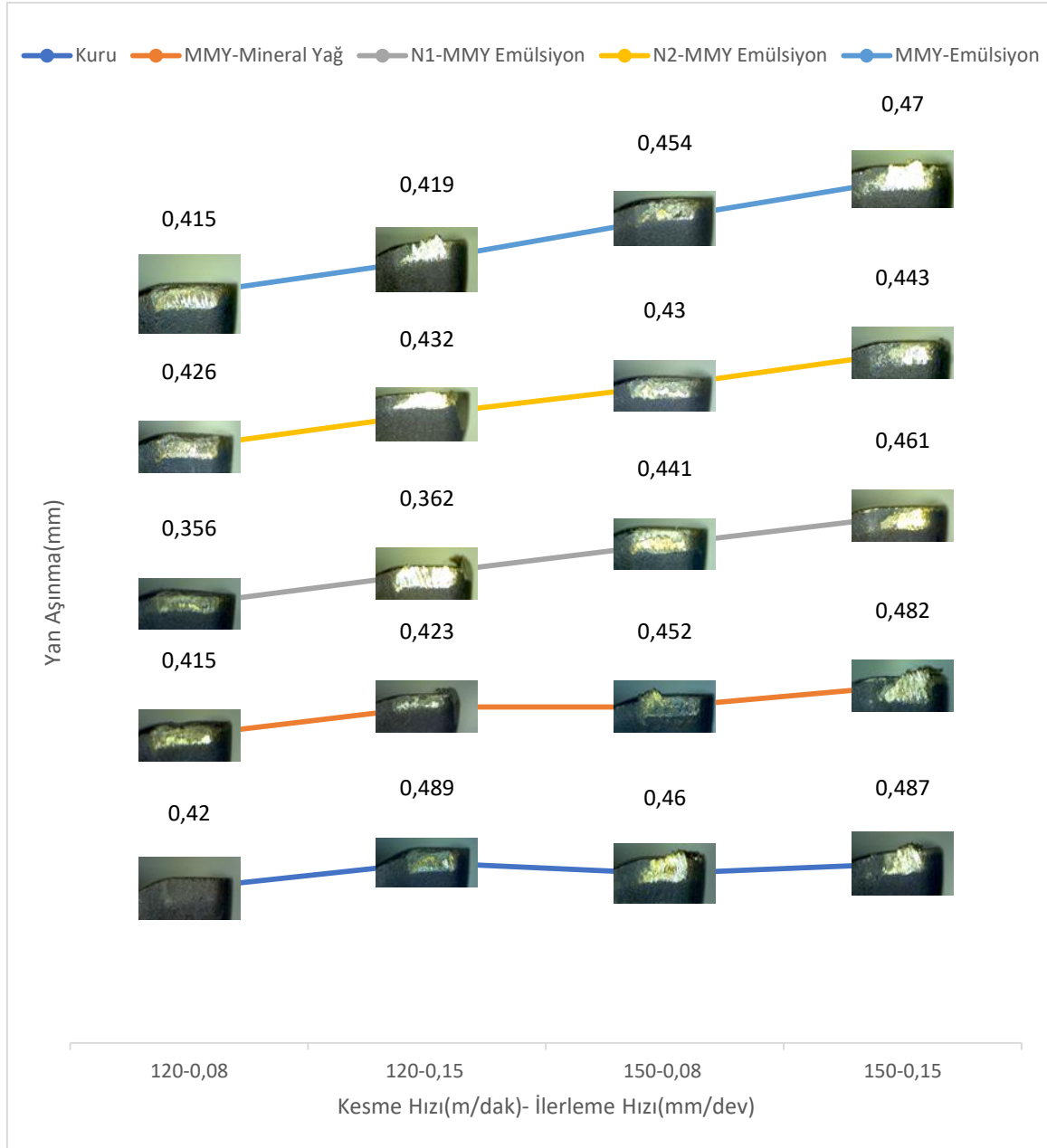
gerektiğinden daha az güç tüketimi meydana getirir (Usca, 2023).  $Al_2O_3$  katı nano partikülü kesme sıvılarına ilave edildiğinde termal (ısı) iletkenliği artırdığı için iyi soğutma, aynı zamanda viskoziteyi de artırdığı için daha kalın yağlama sağlamaktadır (Şirin, 2020). Ağırlıkça %0,5 oranında  $Al_2O_3$  içeren nanotoz ilaveli nanoakışkan olan  $N_1$ -MMY Emülsiyon koşulundan, ağırlıkça %1 oranında  $Al_2O_3$  içeren nanotoz ilaveli nanoakışkan olan  $N_2$ -MMY Emülsiyon koşuluna geçişlerde baz akışkana ilave edilen nano toz miktarının artırılması ile soğutma ve yağlama kabiliyeti artarak kesici takım ve iş parçası arasındaki temastan kaynaklı sürtünme azalmaktadır. Sürtünme de kesme kuvvetlerini azaltarak güç tüketimini azaltıp enerji tasarrufu sağlamaktadır.

## 7.6. Takım Aşınması Değerlendirilmesi

Takım ömrü açısından yan aşınma son derece önemlidir (Usca, 2023). Aşınma türleri arasından yan aşınma, aşındırıcı aşınma mekanizmasının bir neticesi olarak yan yüzeyde gitgide artarak tanımlanan bir aşınma çeşididir. Kesici takımın boşluk yüzeyinde aşınma alanı oluşur. Ana kesici kenardan başlayarak dikey ve yatay olarak genişler. Yan aşınma ana kesme kenarındaki iş parçasını tüketir. Belli bir zaman sonra kesme yeteneğini azalttığından takım ömrü için önemli bir parametre olarak kabul edilir (Şap, 2024). Kesme hızı artırılınca takımdaki kenarların malzemeye dokunduğu an yüksek ısınmaya ve sürtünmeye maruz kalarak, sürtünme ve yüksek ısınmadan dolayı kesici takımın yan yüzeylerinde aşınma meydana gelir. Takımın kenarları yıpranarak zayıflar bunun sonucunda yanak aşınması artarak kesici takımın ömrü azalır. İş parçasının kalitesini olumsuz etkileyerek kesici takımın performansını düşürür (Şap, 2023).

Tablo 7.4. Takım aşınmalarının kuru kesim ile kıyaslanması

| Kuru Kesim İle Diğer Kesim Ortamlarının Kıyaslanması (+): Azalış (-): Artış |           |            |           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|
|                                                                             | 120-0,08  | 120-0,15   | 150-0,08  | 150-0,15  |
| <b>MMY-Mineral Yağ</b>                                                      | %1,2 (+)  | %13,5 (+)  | %1,74 (+) | %1,03 (+) |
| <b><math>N_1</math>-MMY Emülsiyon</b>                                       | %15,24(+) | %25,98 (+) | %4,14 (+) | %5,34 (+) |
| <b><math>N_2</math>-MMY Emülsiyon</b>                                       | %1,42(-)  | %11,66 (+) | %6,53 (+) | %9,04 (+) |
| <b>MMY-Emülsiyon<br/>(mineral yağ + su)</b>                                 | %1,2 (+)  | %14,32 (+) | %1,31 (+) | %3,5 (+)  |



Şekil 7.5. Farklı C/L şartlarında takım aşınmaları ve görselleri

Tablo 7.4'te takım aşınmalarının kuru kesim ile kıyaslanması görülmektedir. Takım aşınmalarındaki azalış çalışma için olumlu performans gösterirken, artış istenmeyen bir durumdur. Şekil 7.5'te farklı soğutma ve yağlama koşullarında takım aşınma oranları ve görselleri görülmektedir.

120 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında; MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları



kuru ortamla kıyaslandığında sırasıyla takım aşınmaları %1,2 azalış, %15,24 azalış, %1,42 artış, %1,2 oranında azalış göstermiştir.

120 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında; MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları kuru ortamla kıyaslandığında sırasıyla takım aşınmaları %13,5; %25,98; %11,66 ve %14,32 oranında azalış göstermiştir.

150 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında; MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları kuru ortamla kıyaslandığında sırasıyla takım aşınmaları %1,74; %4,14; %6,53 ve %1,31 oranında azalış göstermiştir.

150 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında; MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) koşulları kuru ortamla kıyaslandığında sırasıyla takım aşınmaları %1,03; %5,34; %9,04 ve %3,5 oranında azalış göstermiştir.

Takım aşınmasında en uç veriler dikkate alınarak kuru ortam ile MMY yöntemlerinden N<sub>1</sub>- MMY Emülsiyon kesiminde kıyaslamalar yapılmıştır. Nano toz ilaveli nano akışkanlarda kendi içerisinde kıyaslanarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Kuru ve N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon kesimini kıyasladığımızda; 120 m/dak kesme hızında, 0,08 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla %15,24 iyileşme, %25,98 iyileşme meydana gelmiştir. 150 m/dak kesme hızlarında 0,08 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla %4,14 iyileşme, %5,34 iyileşme meydana gelmiştir.

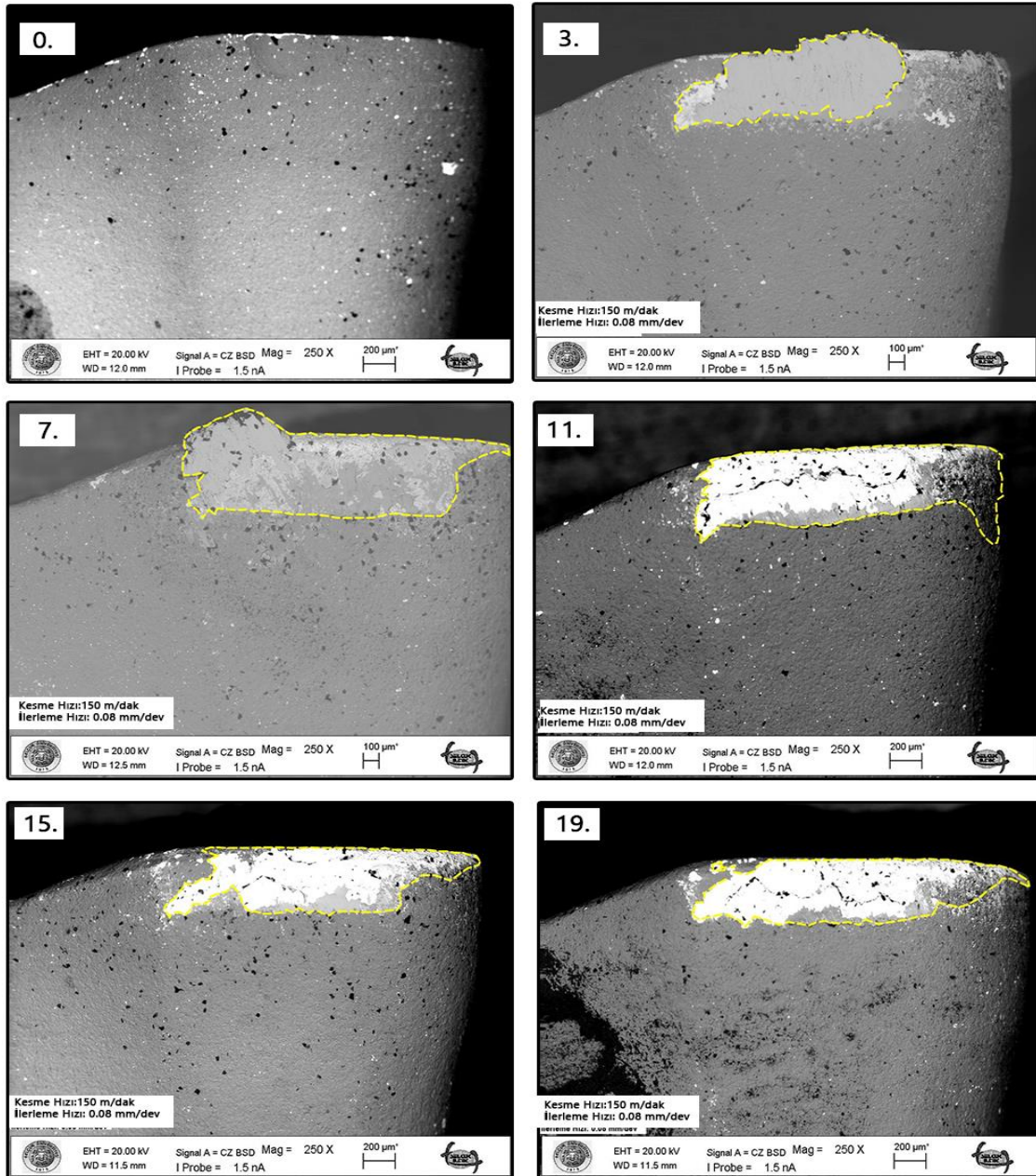
N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ve N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon kesimini kıyasladığımızda; 150 m/dak kesme hızlarında 0,08 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla %19,66 bozulma, %19,33 bozulma meydana gelmiştir. 150 m/dak kesme hızlarında 0,08 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme hızlarında %2,5 iyileşme, %4 iyileşme meydana gelmiştir. Nano partikül ilavesindeki artış kesim üzerinde literatürde olduğu gibi olumlu bir etki yapmaktadır (Şap,2024).

Elde edilen en yüksek yan aşınma herhangi bir soğutma ve yağlama kullanılmadığı için kuru kesme şartlarında 2 nolu deneyde (0,489), elde edilen en düşük yan aşınma ise 9 nolu deneyde N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon şartlarında (0,356) kaydedildi. Tüm soğutma ve yağlama şartlarında kesme hızının ve ilerleme hızının artmasıyla beraber yan aşınma miktarının arttığı sonucu elde edildi. Kesme hızları artınca kesici takım-iş parçası malzemesinde plastik deformasyonun da artan bir eğilim görülmektedir bunun sebebi kesici takım ile talaş arasındaki temas alanlarında artan sürtünmedir. Sürtünme arttıkça aşınmada artmıştır (Şap, 2024). MMY yöntemi kullanılarak kesim yapılan mineral yağ ve takviyeleri aşınmayı azaltmıştır. Düşük kesme ve ilerleme hızlarında MMY yöntemi ile yapılan işlemlerde takım aşınması azalmıştır, literatür çalışmasında da benzer durum görülmektedir (Usca, 2023). Tüm şartlar birbiriyle mukayese edildiğinde tüm kesme ve ilerleme hızlarında yan aşınma miktarının en az olduğu N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ortamlarında kaydedildi. Bunun sebebi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano tozu kesme sıvılarına ilave edildiğinde termal iletkenliği artırdığı için iyi soğutma, viskoziteyi de artırdığı içinde iyi yağlama özelliğine sahiptir (Şirin, 2020). Kesici takım ve iş parçası malzemesi temas alanlarında sürtünme mevcuttur. İyi soğutma/yağlama kabiliyetine sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano partikül ilaveli kesme sıvımız kesici takım ve X33CrS16 arasına MMY nozül ile püskürtülerek sürtünmeyi azaltmaktadır, sürtünmenin azalmasıyla da takım aşınması azalmaktadır.

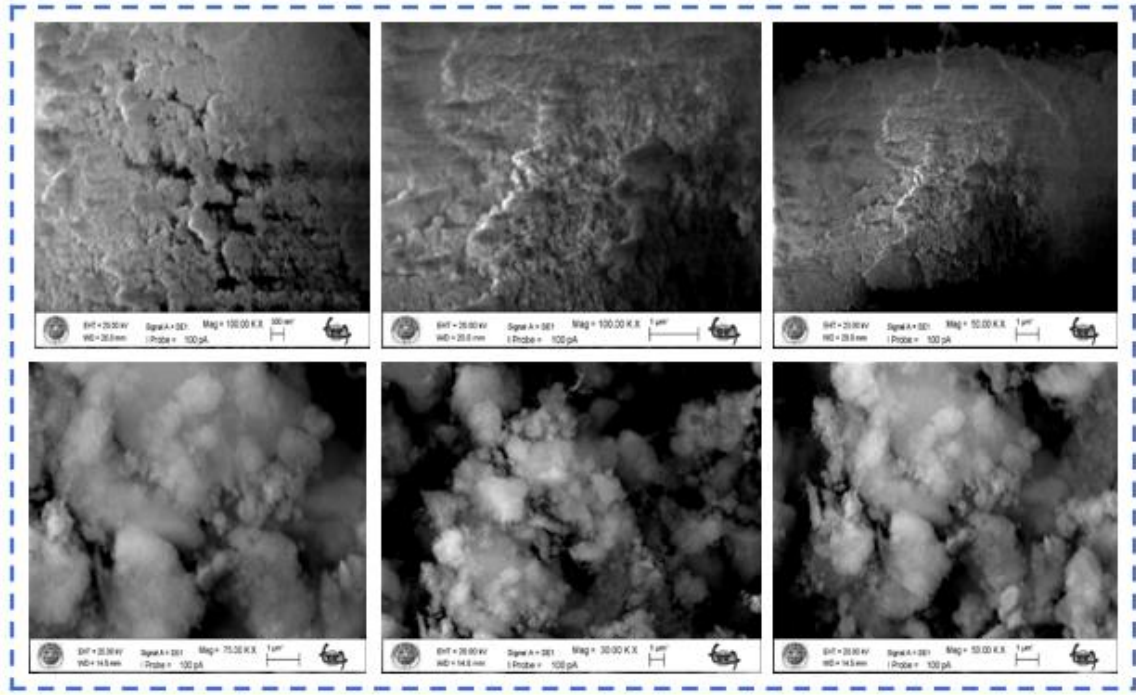
#### 7.6.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi

Kuru kesme ortamlarında Şekil 7.6'da 0 numarada deneylere başlamadan önce kesici takımın kullanılmamış hali görülmektedir. 3 nolu deneyde kuru ortamda kesici takımda BUE ( birikmiş kenar) oluşumları gözlemlendi. BUE kararsız olmasına rağmen takımın işleme yeteneğini azalttığı ve yüzey pürüzlülük değerlerini artırdığı bilinmektedir. Bu işlemede kuru kesme ortamlarında yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek olması BUE oluşumundan kaynaklı olabilir, literatür çalışması da bu sonucu desteklemektedir (Usca, 2022). Ayrıca 7 nolu deneyde MMY-Mineral Yağ ortamında da BUE görülmektedir. MMY yöntemi kullanılan 11 nolu deney (N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon), 15 nolu deney (N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon ) ve 19 nolu deney (MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su)) ortamlarında, kuru kesme yapılan ortamlara (3 nolu deneye) göre kesme sıcaklığı daha düşüktür. MMY yönteminin kullanıldığı ortamlarda, iş parçası ve takım sürtünme

yüzeyinde ince bir film oluşturur. Sürtünme ve kesme sıcaklığı malzemenin erimesine sebep olacak kadar yeterli olmadığından BUE varlığı oluşmaz, literatür çalışmasında da bu durum bildirilmiştir (Usca, 2022). 11, 15 ve 19 nolu deneylerde BUE varlığına rastlanmamaktadır. Farklı kesme ortamlarının neredeyse tamamında görülen serbest (yan) yüzey aşınmasıdır. İş parçasının sert yüzeyi ile takımın kesme kenarının temas etmesinden kaynaklı bu aşınma türü oluşmaktadır (Bıyık, 2019). Sık görülen bir diğer aşınma türü ise adhesif (yapışma) ve abrasif aşınma türüdür.



Şekil 7.6. 150 m/dak kesme ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında farklı kesme ortamlarında kullanılan takımın SEM görüntüleri



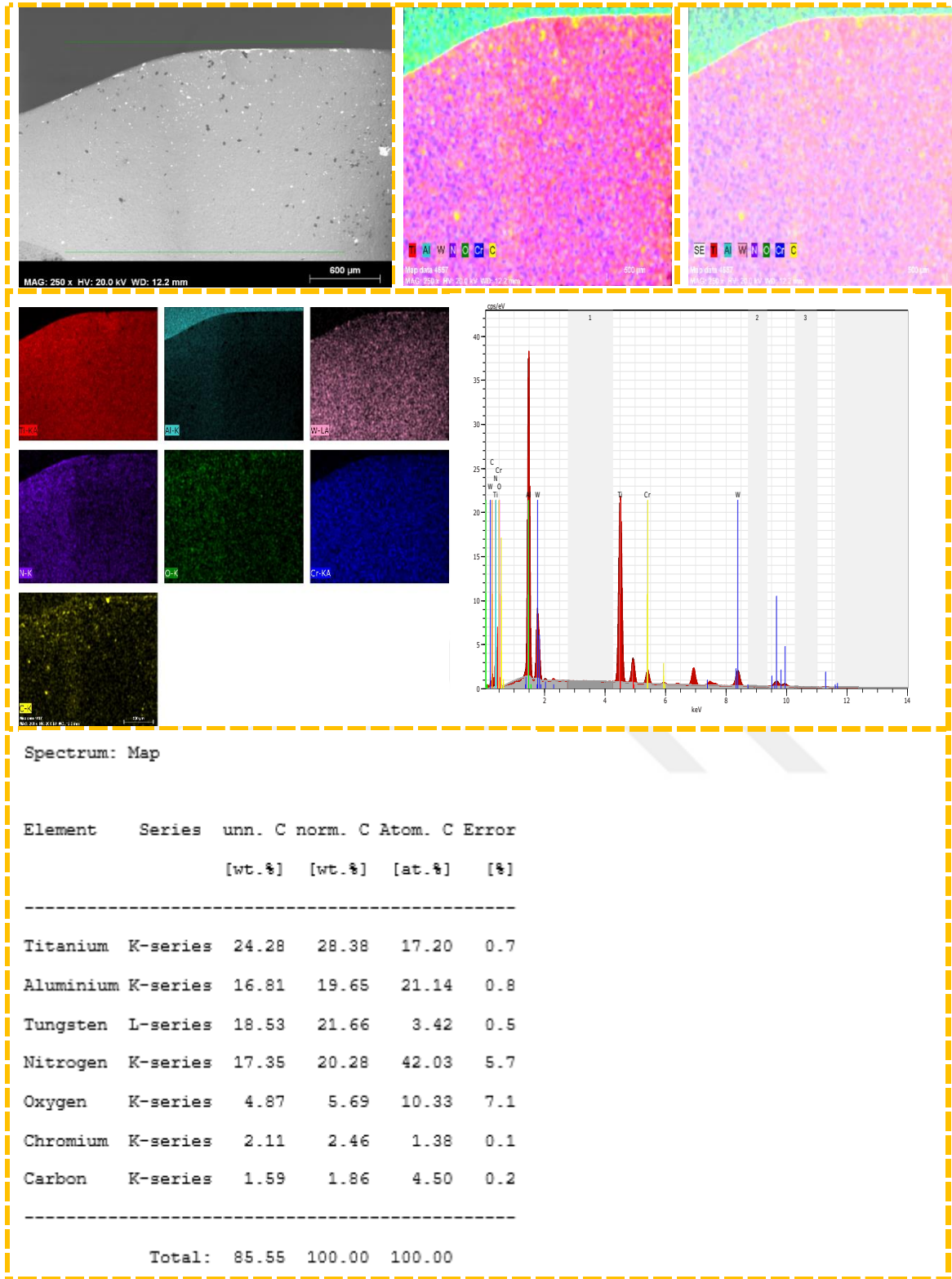
Şekil 7.7. Kullanılan  $Al_2O_3$  nano tozun SEM görüntüsü

Şekil 7.7’de baz akışkana ilave edilecek nano toz üzerinde gerçekleştirilen SEM görüntüleri görülmektedir. MMY yönteminde kullanılan kesme sıvılarının hazırlanmasında takviye edilen  $Al_2O_3$  nano toz partikülleri SEM görüntüsünde görüldüğü üzere düzensiz ve karmaşık bir yapıya sahiptir. SEM görüntülerinde işleme koşullarının tamamında kesici takım yüzeyinde ciddi hasarlar oluşmadığı tespit edilmiştir.

#### 7.6.2. EDS (EDX) ve Haritalama (Mapping) Analizi

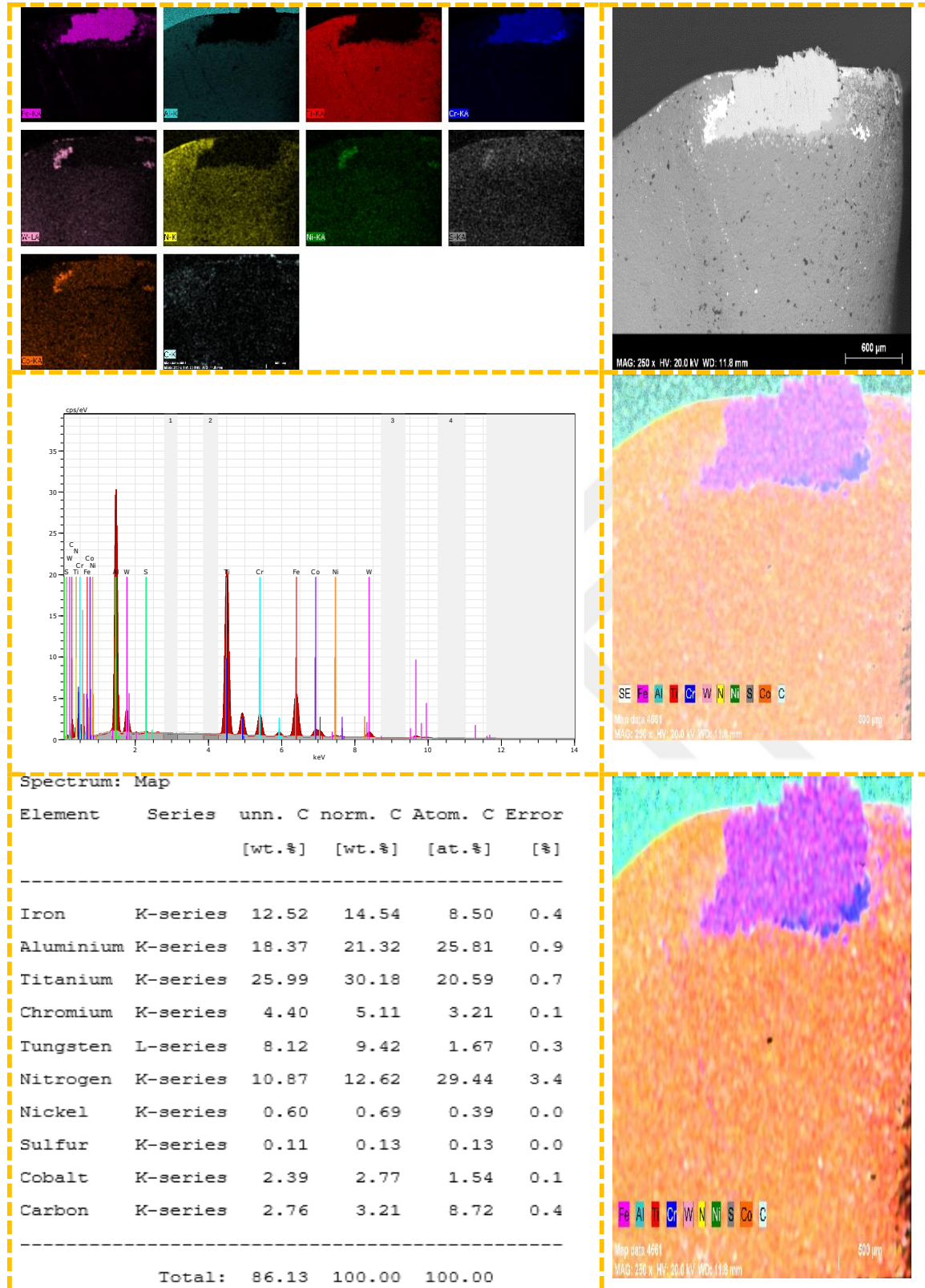
Frezeleme işlemlerinde farklı kesme şartlarında kullanılan kesici takımın aşınmış bölge üzerinde yapılan ve ilave edilen nano tozun EDS analiz ve haritalama analiz sonuçları bu bölümde görülmektedir.

Kuru kesim Şekil 7.9, MMY-Mineral Yağ Şekil 7.10,  $N_1$ -MMY Emülsiyon Şekil 7.11,  $N_2$ -MMY Emülsiyon Şekil 7.12’de, kullanılan kesici takımın EDS ve haritalama analizleri görülmektedir. MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) şartlarında Şekil 7.13’te, ilave edilen nano tozun Şekil 7.14’te, sıfır takımın Şekil 7.18’de, EDS ve haritalama analizleri görülmektedir. Görsellerde her element farklı bir renkte gösterilmektedir.

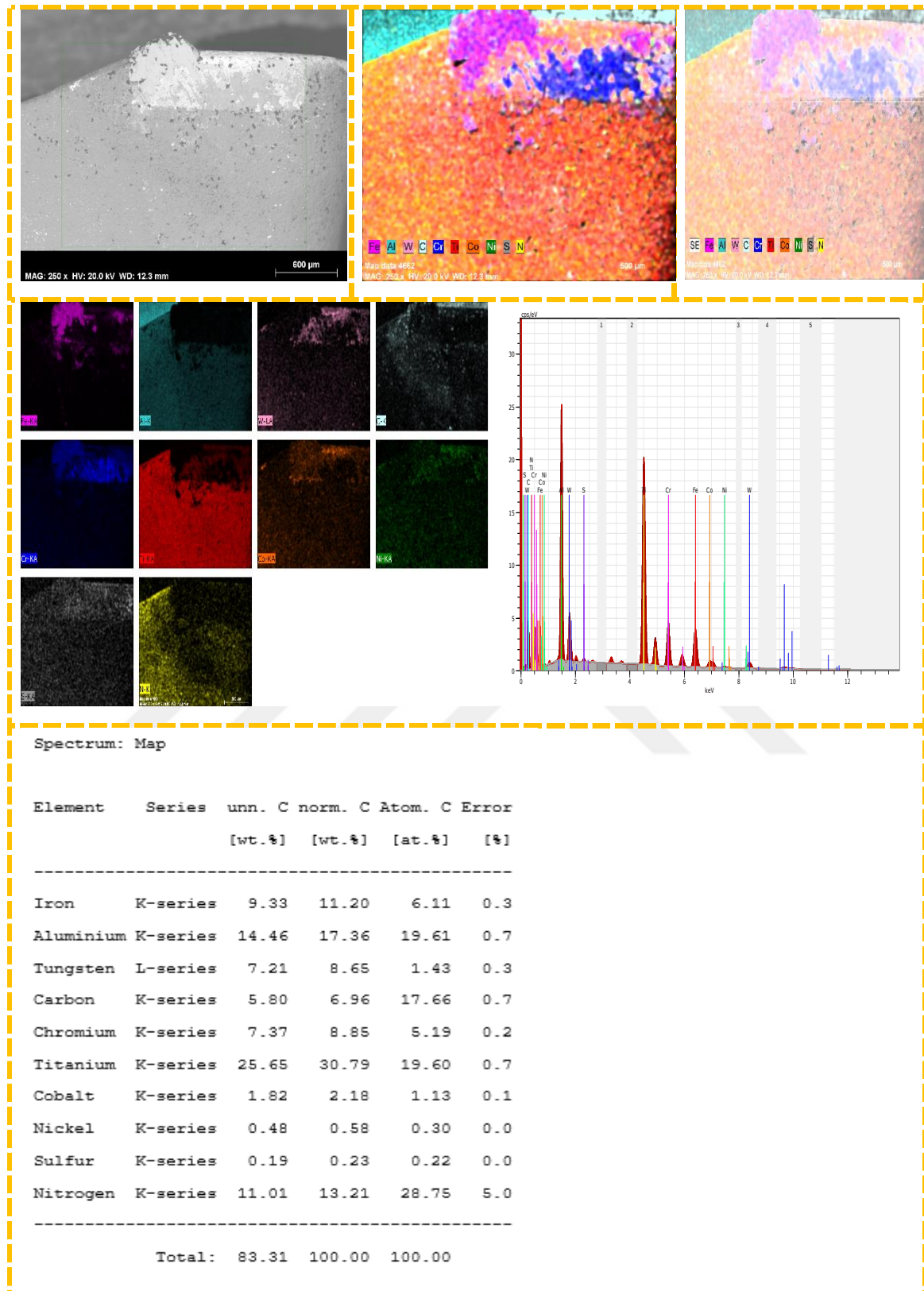


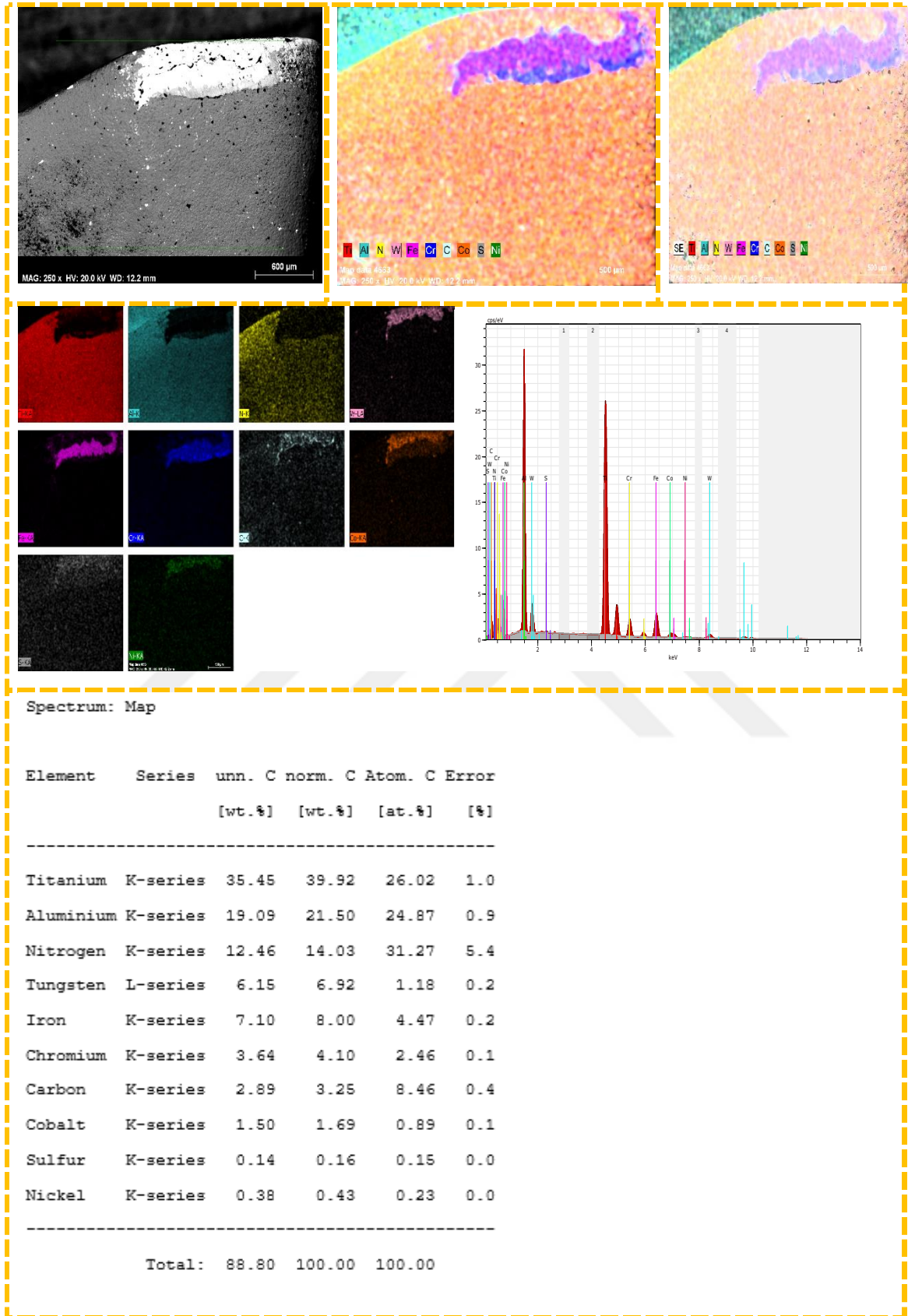
Şekil 7.8. Sıfır takımının EDS ve Haritalama görüntüleri





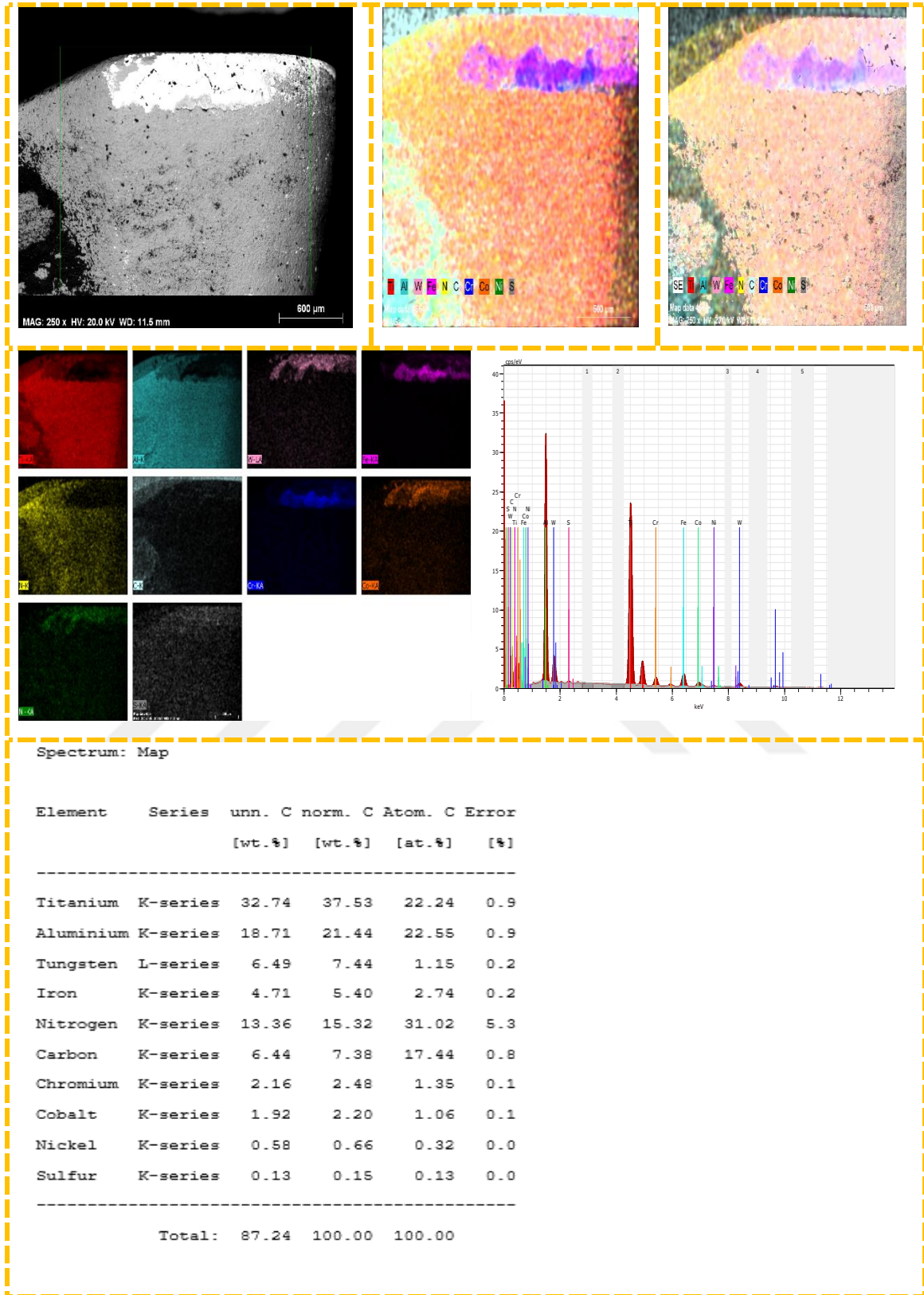
Şekil 7.9. Kuru kesimde kullanılan takımın EDS ve Haritalama görüntüleri



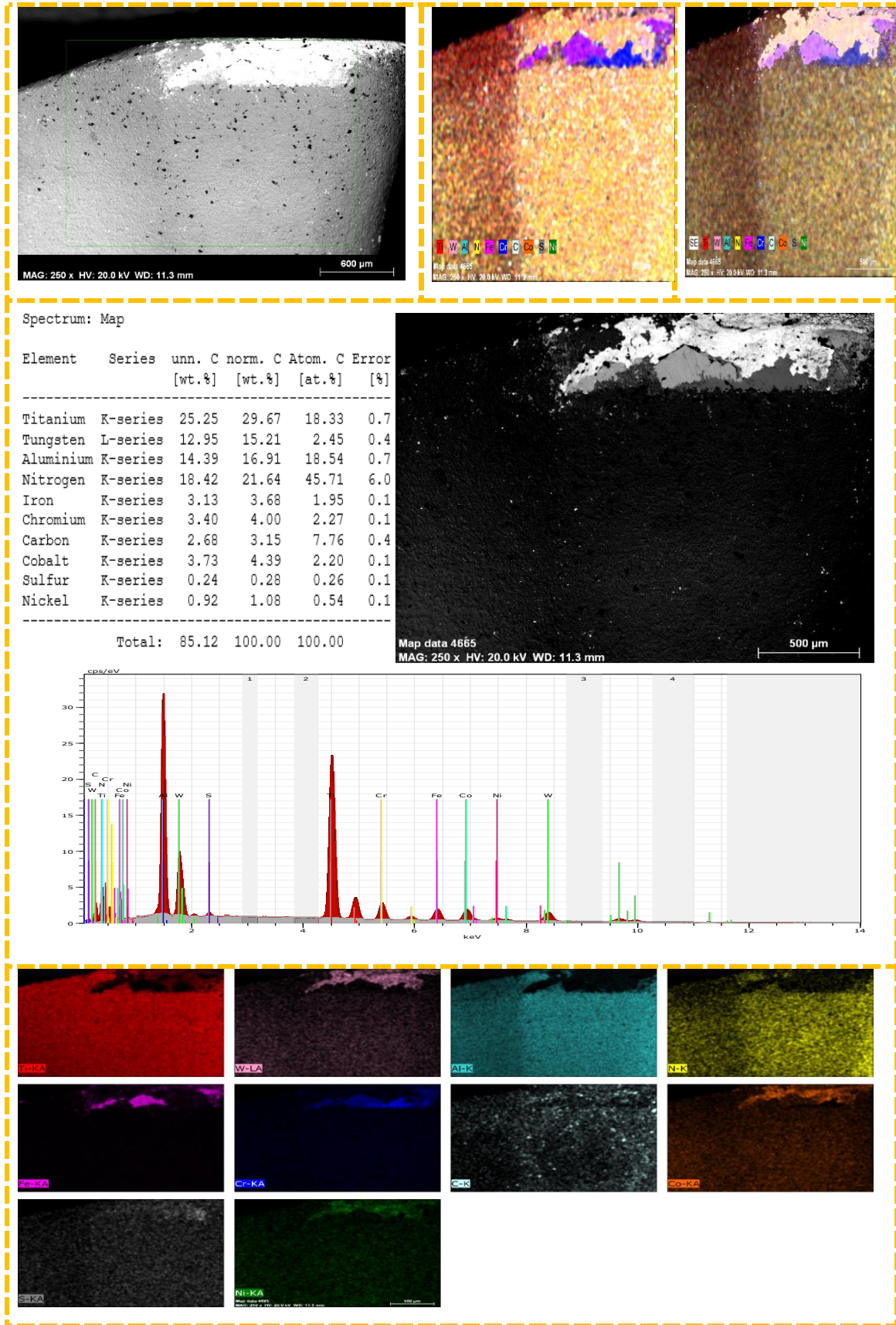


Şekil 7.11. N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon kesimde kullanılan takımın EDS ve Haritalama görüntüleri

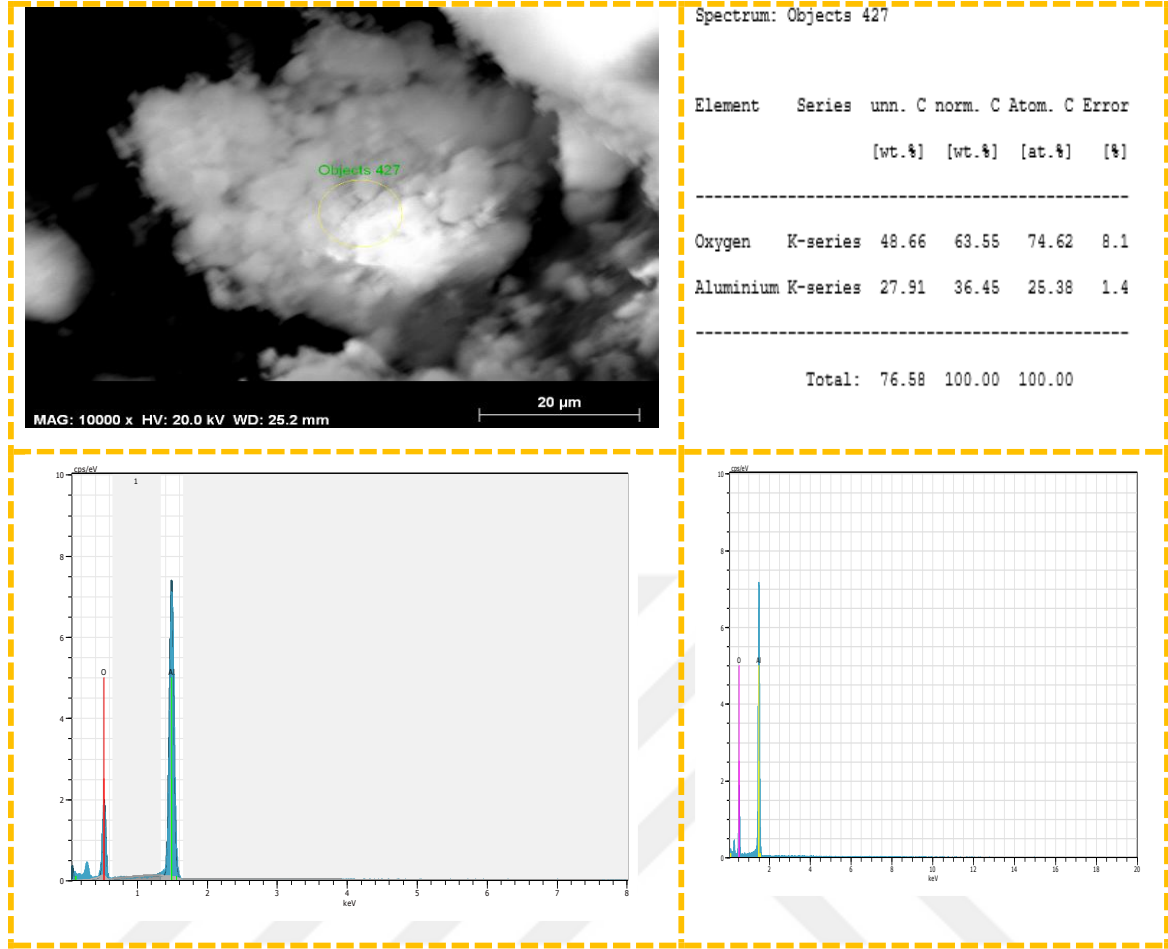




Şekil 7.12. N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon kesimde kullanılan takımın EDS ve Haritalama görüntüleri



Şekil 7.13. MMY-Emülsiyon (mineral yağ+su) kesimde kullanılan takımın EDS ve Haritalama görüntüleri



Şekil 7.14. Kullanılan nano tozun EDS ve Haritalama görüntüleri

Takım ömrünü analiz etmek ve belirlemek için takımın hasar mekanizmalarının bilinmesi gerekir. Bu hasar mekanizmaları için aşınma tiplerini ve mekanizmalarını belirlemek gerekir. Frezeleme operasyonlarında kullanılan kesici takım AlTiN kaplama malzemelerine ve kullanılan nano toz ise  $Al_2O_3$  elemanlarına sahiptir. EDS analizi sayesinde kesici takımdaki ve nano tozdaki elemanlar doğrulanmaktadır ve EDS analizi ile tespit edilen elemanların varlığı da haritalama analizi ile doğrulanmaktadır. Kesici takım üzerinde farklı elementlerde görülmesinin nedeni kesici takım ve iş parçası arasındaki temastan dolayı iş parçasına ait elementlerde görülmektedir. Takım malzemesindeki element ağırlığının daha çok olduğu gözlemlendi. Takımın AlTiN kaplama özelliğine sahip olduğundan dolayı ileri aşınmayı ortadan kaldırma özelliğine sahiptir (Şap, 2024). Farklı kesme ortamlarında frezeleme işlemi sonucunda kullanılan kesici takım kenarında aşınmış bölge üzerinde gerçekleştirilen ve nano toza ait EDS ve haritalama analiz sonuçları Şekil 7.9-7.14 arasında görülmektedir.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 8.1. Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı yüksek alaşımlı X33CrS16 paslanmaz çeliğini farklı deney kesme parametrelerinde sürdürülebilir soğutma/yağlama koşulları altında, Minimum Miktarda Yağlama yöntemleri ve PVD Al-TiN kaplamalı kesici takım ile frezelenerek işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir. Frezeleme işleminde sabit kesme derinliği seçilerek; kesme hızı, ilerleme hızı ve soğutma/yağlama koşulları değiştirilerek deneyler gerçekleştirildi.

Küresel sanayileşmenin her geçen gün artmasıyla birlikte işleme dünyasında da kesme işlemlerinin önemi artmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, takım aşınmaları, güç tüketimi ve kesme sıcaklıkları olmak üzere 4 önemli işlenebilirlik parametrelerini iyileştiren yeşil çevreye duyarlı MMY sistemi kullanıldı. MMY sisteminin kullanılması işleme ekonomisinin yanında yeşil teknolojiye katkı sağlayarak verimliliği artırmaktadır. Deney sonuçlarına göre elde edilen yüzey pürüzlülüğü, takım aşınmaları, güç tüketimi ve kesme sıcaklıkları, temas açısı, pH, SEM ve EDS analizleri incelenmiş olup elde edilen veriler kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veriler birbiriyle karşılaştırılmış sürdürülebilir kesme koşulları ile ilgili sonuçlar ortaya konulmuştur. Analiz sonuçlarına ve elde edilen bulgulara bakılınca aşağıda verilen sonuçlar ortaya konulmuştur.

- ✓ **120 m/dak kesme hızı sabit;** 0,08 mm/dev ilerleme hızından, 0,15 mm/dev ilerleme hızına çıkıldığında ve **150 m/dak kesme hızı sabit;** 0,08 mm/dev ilerleme hızından, 0,15 mm/dev ilerleme hızına çıkıldığında yüzey pürüzlülük oranları artmıştır. **0,08 mm/dev ilerleme hızı sabit;** 120 m/dak kesme hızından, 150 m/dak kesme hızına çıkıldığında ve **0,15 mm/dev ilerleme hızı sabit;** 120 m/dak kesme hızından, 150 m/dak kesme hızına çıkıldığında yüzey pürüzlülük oranları artmıştır. Kısacası kesme ve ilerleme hızları artınca yüzey pürüzlülük oranları artmıştır. **MMY nozül ile kesme yapılan ortamlarda (MMY-Mineral Yağ, N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon, N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon, MMY-Emülsiyon (mineral**

yağ + su)); kesme sıvılarının yağlayıcı ve soğutucu etkisinden dolayı takviye oranlarıyla birlikte kullanılması iş parçasında onarım görevi görerek yüzey kalitesini iyileştirmiştir. **Nano akışkanlı kesme ortamları (N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ve N<sub>2</sub>-MMY Emülsiyon);** yüzey pürüzlülük oranlarını iyileştirmiştir. Çünkü Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano tozu kesme sıvılarına ilave edildiğinde aynalama, parlatma ve cilalama özelliğinden dolayı yüzey kalitesini onararak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir.

- ✓ Kesme parametrelerinden ilerleme ve kesme hızı artarken kesme sıcaklığı artmıştır. Yapılan tüm deneylerde en yüksek sıcaklık değeri tahmin edildiği gibi kuru kesim koşullarında ( $V_C = 150$  m/dak,  $f_n = 0,15$  mm/dev) 222,2°C olarak kaydedilmiştir. MMY sisteminin kullanıldığı ortamlarda sıcaklığın azaldığı kaydedilmiş olup en düşük değer N<sub>1</sub>-MMY Emülsiyon ile yapılan ortamda ( $V_C = 150$  m/dak,  $f_n = 0,15$  mm/dev) 123,4°C olarak kaydedilmiştir. En uç veriler değerlendirildiğinde kesme sıcaklığını yaklaşık %4,56 ile %44,47 oranında azaltarak işlenebilirlik açısından fayda sağlamıştır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano tozu baz akışkan ile nanoakışkan olarak kullanıldıklarında termal iletkenliği artırdığı için iyi soğutma ve viskoziteyi artırdığı için iyi yağlama sağlamaktadır. İyi soğutma/yağlama kesme alanındaki ısıyı düşürüp kesme sıcaklığını azalttığı kaydedilmiştir.
- ✓ Takım aşınması, işlenebilirliği etkileyen en önemli parametredir. MMY sistemi sayesinde mineral yağ ve takviyeleri ile kullanılan ortamlarda nanotozlar takım talaş ara yüzüne girerek ince bir film tabakası oluşturup yağlama etkisi yaparak sürtünme kuvvetini azaltarak aşınmayı da azaltmıştır. Nano akışkan işleme şartları, kuru, MMY-Mineral Yağ ve MMY-Emülsiyon (mineral yağ + su) işleme ortamlarına kıyasla takım aşınmasını düşürerek takım ömrünü artırmıştır.
- ✓ SEM görüntülerinde, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bazlı nano akışkanlar ve MMY-Emülsiyon ( mineral yağ + su ) takım ve iş parçası arasında soğutma/yağlama kabiliyetinden dolayı sürtünmeyi azalttığı için bu ortamlarda BUE'ye rastlanılmamıştır. SEM görüntülerinde yan aşınma her ortamda mevcuttur. EDS ve haritalama analizlerinde, kesici takım kaplamasının soyulduğu bu soyulan bölgede ise iş

parçası malzemesinin temasından kaynaklı iş parçasına ait (S) kükürt elementi takıma yapıştığı tüm ortamlarda tespit edilmiştir.

- ✓ Güç tüketimi açısından en iyi kesim kuru kesme koşulu görünse de diğer işlenebilirlik parametrelerinden kaydedilen sonuçlar ele alınınca kuru kesimin avantajlı olmadığını görmekteyiz.  $Al_2O_3$  bazlı nano akışkanın ağırlıkça oranı arttıkça yani  $N_1$ -MMY Emülsiyon'dan  $N_2$ -MMY Emülsiyon şartlarına geçildiğinde güç tüketiminde yaklaşık %2 iyileşme gerçekleşmiştir. İlerleme ve kesme hızları artınca güç tüketimi değerleri azalmıştır.
- ✓ pH değeri, sürdürülebilir işlemede kullanılan sıvılardan, homojenliği en iyi karışım  $Al_2O_3$  ağırlıkça %0,5 nano akışkan olan  $N_1$ -MMY Emülsiyon ortamında görülmüştür. pH değerlerine bakılarak işleme ardından yer altına atık olarak bırakılan kesme sıvılarımızın doğaya zararlı bir etkisinin de olmadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sürdürülebilir kesme (işleme, soğutma) esnasında kullanılan sıvılarımızın homojen ve sürdürülebilir olduğu kaydedilmiştir.
- ✓  $N_1$ -MMY Emülsiyon ile  $N_2$ -MMY Emülsiyon nano akışkanlı kesme sıvılarının diğer kesme şartlarına göre temas açılarının düşük olduğu yani ıslanabilirliğinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.  $Al_2O_3$  bazlı nano akışkanın ağırlıkça oranı arttıkça yani  $N_1$ -MMY Emülsiyon'dan  $N_2$ -MMY Emülsiyon şartlarına geçildiğinde temas açısı değerlerinin düşerek kesici takım ve iş parçası arasına aerosol yani sprey sisi şeklinde daha iyi nüfuz ettiği kaydedilmiştir.

$Al_2O_3$  nano tozu kesme sıvılarına ilave edildiğinde, termal iletkenliği artırdığı için iyi soğutma ve viskoziteyi artırdığı için iyi yağlama özelliğine sahip olmaktadır. Kesici takım ve X33CrS16 iş parçası malzemesinin temas alanlarında sürtünme mevcuttur. Sürtünme arttıkça takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı artmaktadır. Kesme kuvvetleri artarak güç tüketimini de artırmaktadır.  $Al_2O_3$  nano ilaveli kesme sıvımız MMY nozülü ile takım ve iş parçası arasına nüfuz ederek sürtünmeyi azaltmaktadır. Sürtünmenin azalması ile takım aşınması, kesme sıcaklığı azalmaktadır, kesme kuvvetleri azalarak güç tüketimi de azalmaktadır.  $Al_2O_3$  nano tozu kesme

sıvılarına ilave edildiğinde aynalama, parlatma ve cilalama özelliği sayesinde yüzey kalitesini onararak yüzey pürüzlülüğü de iyileştirmektedir. Tüm işlenebilirlik parametrelerimizde  $Al_2O_3$  nano ilaveli kesme sıvılarımız iyi sonuçlar vermiştir. İşlenebilirlik performansında nano partikül kadar kesme parametrelerinin de önemli olduğu bu çalışma ile kanıtlanmıştır.

## 8.2. Öneriler

X33CrS16 (1. 2085) paslanmaz çeliğinin farklı kesme parametrelerinde ve farklı kesme ortamlarında frezelenmesi incelenmiştir. Frezeleme deneyleri esnasında kesici takımda meydana gelen aşınma, yüzey pürüzlülük değerleri, kesme sıcaklığı, enerji tüketimi araştırılmıştır.

Bu çalışmadan esinlenerek, ileride araştırmacılar tarafından yapılabilecek çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

- X33CrS16 (1. 2085) paslanmaz çeliği malzemesi ile frezeleme haricinde tornalama, delme gibi farklı talaş kaldırma işlemleri altındaki işlenebilirlik performansları incelenebilir.
- X33CrS16 (1. 2085) paslanmaz çeliği malzemesi ile farklı kesici takımlar ve farklı takım tutucular ve farklı kesme derinlikleri kullanılarak araştırma yapılabilir.
- Aynı kesme ortamlarında, aynı işleme parametrelerinde (ilerleme ve kesme hızı), aynı kesici takım kullanılarak ve frezeleme yapılarak farklı bir malzeme kullanılarak araştırma yapılabilir.
- Kullanılan kesme sıvıları farklı bir iş parçası malzemesi üzerinde araştırma yapılabilir.
- MMY sisteminde kullanılan mineral yağ yerine sentetik yağ veya farklı yağlar, kullanılan yağlara farklı takviye oranları eklenilerek, farklı nano toz kullanılarak araştırma yapılabilir.



## KAYNAKLAR

Acar, F. (2020). Kaynaklanmış paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin mekanik özelliklerine taneler arası korozyonun etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Abukhshim, N. A., Mativenga, P. T. ve Sheikh, M. A. (2006). Metal kesmede ısı üretimi ve sıcaklık tahmini: Yüksek hızlı işlemeye yönelik bir inceleme ve çıkarımlar. Uluslararası Takım Tezgahları ve İmalatı Dergisi , 46 (7-8), 782-800.

Akyay, S. (2022). AISI 420 paslanmaz çelik ve E360 çeliğinin sürtünme kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Alnak, Y. (2020). Farklı standartlardaki paslanmaz çelik ve sade karbonlu çelik çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilmesi, mekanik özelliklerinin ve mikroyapılarının incelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Aran, A. ve Temel, M. A. (2004). Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller Üretimi Kullanımı Standartları (2b.). İstanbul, Türkiye: Acar Matbaacılık A.Ş.

Atlasfor. (2023). Takım Tutucu. Erişim Tarihi: 06.12.2023.  
<https://www.atlasfor.com/heikenei-bt-40-mas-403-bt-er-tipi-pens-tutucu-28068>.

Aslan, A., Güneş, A., Salur, E., Şahin, Ö. S., Karadağ, H. B. ve Akdemir, A. (2018). Metal talaşlarının geri dönüştürülmesiyle üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı. Uluslararası Mineraller, Metalurji ve Malzemeler Dergisi 25(9): 1070–1079.

Ercan, A. ve Yüksel, A. (2019). Yaşamın Sürdürülmesinde Beslenme, Beslenmenin Sürdürülebilmesinde Sıfır Atık. Nutrition for Sustaining Life, Zero Waste for Sustaining Nutrition.

Aydın, E. (2023). Geleneksel ve bitkisel tabanlı kesme sıvılarının insan/çevre sağlığı ve işlenebilirlik bakımından değerlendirilmesi. Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(4), 1360-1371.

Bıyık, Y. E. (2019). AISI O<sub>2</sub> takım çeliğinin minimum miktarda yağlama yöntemi (MQL) kullanılarak frezelenmesinde işlenebilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.

Bilgin, S. (2008). Isıl püskürtme yöntemi ile oluşturulan martenzitik paslanmaz çelik kompozit toz kaplamanın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



Bumlab. (2023). Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi Erişim Tarihi: 14.12.2023.  
<https://bumlab.bingol.edu.tr/media/16000/bumlab-katalog.pdf>.

Camcı, H. (2020). AISI D2 çeliğinin minimum miktarda yağlama yöntemi (MQL) kullanılarak frezelenmesinde işlenebilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.

Canbaz, M. (2023). AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik malzemelerin farklı ortamlarda tribolojik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Chetan., Behera, B. C., Ghosh, S. and Rao, P. V. (2016). Wear behavior of PVD TiN coated carbide inserts during machining of Nimonic 90 and Ti6Al4V superalloys under dry and MQL conditions. *Ceramics International*, 42(13), 14873-14885.

Çelik, M. (2022). Ti6Al4V titanyum alaşımlarının minimum miktarda yağlama (MMY) tekniği ile tornalanmasında kullanılan bitkisel yağlara hBN nanoparçacık katkısının işleme performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Çiftçi, K. (2005). Mikroalaşımli çeliklerin frezelenmesinde kesme parametrelerinin talaşlı işlenebilirliğe etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Davim, J. P. (2002). Diamond tool performance in machining metal–matrix composites. *Journal of materials processing technology*, 128(1-3), 100-105.

Dhara, N. R., Kamruzzaman, M. and Ahmed, M. (2006). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 299-304.

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

Dengiz, C. G. (2014). Dubleks paslanmaz çelik sacların derin çekme ve hidroşekillendirme kabiliyetlerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

DongGuan Misung kalıp SteelCo. (2023). 1. 2085 Çeliği. Erişim Tarihi: 06.12.2023.  
<https://turkish.moldtoolsteel.com/sale-13457548-plastic-mold-inserts-easy-cutting-1-2085-mold-tool-steel.html>.

Er, A. O. ve Zeyrek, K. (2021). Ti-6Al-4V Alaşımının Tornalanmasında Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi ile Kesme Sıvısı Uygulamanın İşlenebilirliğe Etkilerinin Araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(2), 653-665.

- Globalpiyasa. (2023). Güç Analizörü. Erişim Tarihi: 29.11.2023.  
<https://www.globalpiyasa.com/tr/urun/hioki-pw3198-guc-ve-harmonik-analizoru-testone/31520>.
- Gök, M. S. (2008). Düşük ve orta karbonlu çeliklerin yüzeyine TIG kaynak metoduyla kaplanan ostenitik paslanmaz çelik tozunun aşınma direncine karbür içeriğinin etkisinin araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Gürbüz, H., Baday, Ş. ve Gönülaçar, Y. E. (2017). Minimum Miktarda Yağlamanın Frezeleme İşlemleri Üzerine Etkisinin Araştırılması: Derleme. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 7(2/2), 59-78.
- Gupta, A., Kumar, R., Kumar, H. and Garg, H. (2020). Comparative performance of pure vegetable oil and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based vegetable oil during MQL turning of AISI 4130. Materials Today: Proceedings, 28, 1662-1666.
- Haq, S. ve Srivastava, R. (2016). Ahşap plastik kompozitler için malzeme bileşiminin nano ölçekli pürüzlülük üzerindeki etkisinin AFM ile ölçülmesi. Ölçü 91: 541–547.
- Hasçelik. (2024). Çeliklerin Sınıflandırılması. Erişim Tarihi: 18.09.2024.  
<https://hascelik.com/tr/celiklerin-siniflandirilmesi/celik-standartlarinin-okunmasi>.
- ISCAR.(2023). Kesici Takım. Erişim Tarihi: 16.12.2023.  
<https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnun=1202&mapp=ML&app=0&GFSTYP=I>.
- Indiamart. (2023). Time3200 Yüzey Pürüzlülüğü Cihazı. Erişim Tarihi: 11.12.2023.  
<https://www.indiamart.com/proddetail/time-3200-surface-roughness-tester-22787386597.html>.
- İlhan, M. (2014). Talaş Kaldırma İşlemlerinde Minimum Miktarda Yağlama (Mql) Uygulamasının Kesme Hızı Ve Yağlama Debisinin Yüzey Pürüzlülüğü Ve Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- İltektek. (2024). Selçuk Üniversitesi İLTEK. Erişim Tarihi: 25.05.2024.  
[https://www.selcuk.edu.tr/contents/ileri\\_teknoloji\\_arastirma\\_ve\\_uygulama\\_merkezi-aum/icerik/43233/Sel%C3%A7uk%20%C4%B0ltektek%20Katalog\\_638096294204157920.pdf](https://www.selcuk.edu.tr/contents/ileri_teknoloji_arastirma_ve_uygulama_merkezi-aum/icerik/43233/Sel%C3%A7uk%20%C4%B0ltektek%20Katalog_638096294204157920.pdf).
- İltektek1. (2024). Selçuk Üniversitesi İLTEK. Erişim Tarihi: 27.05.2024.  
[https://www.selcuk.edu.tr/Birim/arastirma\\_ve\\_uygulama\\_merkezleri/ileri\\_teknoloji\\_arastirma\\_ve\\_uygulama\\_merkezi\\_aum/2069/yuzey-karakterizasyon/31290](https://www.selcuk.edu.tr/Birim/arastirma_ve_uygulama_merkezleri/ileri_teknoloji_arastirma_ve_uygulama_merkezi_aum/2069/yuzey-karakterizasyon/31290)
- İsu, 2024. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi İzmit Su Ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü Atık suların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği. Erişim Tarihi: 26.05.2024.  
<https://www.isu.gov.tr/component/GetFiles.ashx?t=2&FileName=e6ec7594-d49a-493f-a6de-7760ce870ae2.pdf>.

Kamata, Y. and Obikawa, T. (2007). High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, 281-286.

Kaplan, M. N. (2014). 316l paslanmaz çelik üzerine indüksiyon kaynak yöntemiyle gözenekli NiTi'nin kaplanılabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Karabatak, M. ve Kara, F. (2016). AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Sert Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel Optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 19 (3), 349–55.

Karcı, F. (2008). Soğuk deformasyon ve kaynak ısı girdisinin aısı 304 paslanmaz çelik direnç kaynak kalitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Kartes. (2023). Minimum Miktarda Yağlama Sistemi. Erişim Tarihi: 28.12.2023. <https://kar-tes.com.tr/urunlerimiz/endustriyel-makinalar/mikro-ve-merkezi-yaglama-sistemleri/mikro-yaglama-sistemleri/stn-15/>.

Kartes. (2024). Minimum Miktarda Yağlama Sistemi. Erişim Tarihi: 18.09.2024. <https://kar-tes.com.tr/blog/genel-bilgiler/celik-standartlari-nelerdir/>.

Kaya, E. (2019). Farklı Kesici Takım Malzemeleri Kullanarak Niti Şekil Hafızalı Alaşımların İşlenebilirlik Davranışlarının Araştırılması Ve Performans Parametrelerini İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir.

Kaygısız, H. (2010). CNC Freze Eğitim Seti Tasarımı ve Uygulaması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2(3), 53-71.

Khan, M., Mithu, M. A. H. and Dhar, N. R. (2009). Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16), 5573-5583.

Kıvak, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50, 19-28.

Kuntoğlu, M., Aslan, A., Pimenov, D. Y., Giasin, K., Mikolajczyk, T. ve Sharma, S. (2020). AISI 5140 çeliğinin tornalanmasında tepki yüzey metodolojisi yoluyla yüzey pürüzlülüğü ve titreşimin çok kriterli optimizasyonu için kesme parametrelerinin ve takım geometrisinin modellenmesi. *Malzemeler*, 13(19), 4242.

Lin, H., Wang, C., Yuan, Y., Chen, Z., Wang, Q. and Xiong, W. (2015). Tool wear in Ti-6Al-4V alloy turning under oils on water cooling comparing with cryogenic air mixed with minimal quantity lubrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1-4), 87-101.

Makhesana, M. A., Patel, K. M., Krolczyk, G. M., Danish, M., Singla, A. K. and Khanna, N. (2023). Influence of MoS<sub>2</sub> and graphite-reinforced nanofluid-MQL on surface roughness, tool wear, cutting temperature and microhardness in machining of Inconel 625. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, 225-238.

Marques, A., Suarez, M. P., Sales, W. F. and Machado, A. R. (2019). Turning of Inconel 718 with whisker-reinforced ceramic tools applying vegetable-based cutting fluid mixed with solid lubricants by MQL. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 530-543.

Nanografi. (2023). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanotozu. Erişim Tarihi: 27.12.2023.  
<https://shop.nanografi.com.tr/aluminyum-oksit-al2o3-nano-tozu-gama-safl-k-99-5-boyut-18-nm-hidrofilik/>.

Ning, J. ve Liang, S.Y. (2019). Kesme mekaniği ve bileşen ilişkisi kullanılarak kuvvet-sıcaklık korelasyonu ile işleme sıcaklıklarının tahmine dayalı modellenmesi. *Malzemeler*, 12 (2), 284.

Oilmarkt. (2023). Mineral Bor Yağı. Erişim Tarihi: 14.11.2023.  
<https://oilmarkt.com/petrol-ofisi-bor-yagi-15-kg-su-ile-karisabilen-metal-isleme-yagi>.

Otai Özel Çelik. (2023). 1. 2085 Çeliği. Erişim Tarihi: 03.12.2023.  
<https://www.otaisteel.com/1-2085-steel-2/>.

Ölmez, E. (2014). Paslanmaz çelik üretiminde Al-Ti-B alaşımının mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Pehlivanoglu, V. ve Batı, M. (2002). CNC Takım Tezgahları ve DNC”, Marmara Üniv. Teknik Eğ. Fak. Makine Böl. İstanbul. (Erişim Tarihi: 27.11.2023).  
<http://www.turkcadcamlar.net/rapor/cnc-tezgahlar/index5.html>.

Saez-de-Buruaga, M., Soler, D., Aristimuno, P. X, Esnaola, J. A. ve Arrazola, P. J. (2018). Metal kesmede termografi ölçümlerinden takım/talaş sıcaklıklarının belirlenmesi. *Uygulamalı Isı Mühendisliği*, 145, 305-314.

Sağlam Metal. (2023). 1. 2085 Çeliği. Erişim Tarihi: 06.12.2023.  
<https://www.saglammetal.com/en/steel/stainless-steel/tool-steel/martensitic-stainless-steels/plastic-mold-steels/12085-x33crs16>.

Saleem, M. Q. and Mehmood, A. (2022). Eco-friendly precision turning of superalloy Inconel 718 using MQL based vegetable oils: Tool wear and surface integrity evaluation. *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 112-127.

Salur, E. (2021). The Effects of MQL and Dry Environments on Tool Wear, Cutting Temperature, and Power Consumption during End Milling of AISI 1040 Steel. *Metals*, 11(11), 1674.

Sarıkaya, M. (2016). Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy. *Journal of Cleaner Production*, 133, 172-181.

Smoxh. (2023). Kesici Uç. Erişim Tarihi: 19.11.2023.  
<https://www.smoxh.com.tr/tr/urunler/detay/ST90-APKT-1003.-ISO/291>.

Swain, S., Kumar, R., Panigrahi, I., Sahoo, A.K. and Panda, A. (2022). Machinability performance investigation in CNC turning of Ti-6Al-4V alloy: Dry versus iron-aluminium oil coupled MQL machining comparison. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 5(4), 496-509.

Şap, S., Uzun, M., Usca, Ü. A., Pimenov, D. Y, Giasin, K. ve Wojciechowski, S. (2022). Ti-B-SiCp takviyeli Cu hibrit kompozitlerin kuru tornalamada işlenebilirliğinin incelenmesi. *Malzeme Araştırmaları ve Teknolojisi Dergisi*, 18, 1474-1487.

Şap, S. (2022). Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Ti-B-Sic takviyeli cu metal matrisli kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl.

Şap, S., Usca, Ü. A., Uzun, M., Kuntoğlu, M., Salur, E. ve Pimenov, D. Y. (2022). Hibrit Kompozitlerin İşlenmesinde Soğutma ve Yağlama Stratejilerinin Tribolojik Karakteristiklere Etkisinin Araştırılması. *Yağlayıcılar*. 10(4): 63.

Şap, E., Usca, Ü. A. ve Şap, S. (2023). Inconel-800 Süperalaşımının Çevre Dostu Frezelenmesinin İşlenebilirlik Parametreleri ve Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkileri. *Uluslararası J. of Precis. Müh. ve Manuf.-Green Tech*.

Şap, S. (2022). AISI 5140 Islah Çeliğinin Minimum Miktarda Yağlama Ortamı Altında Frezelenmesinin Takım Aşınması Üzerindeki Etkileri. *International Scientific Research and Inovation Congress (ISARCH)*, (s. 915-925).

Şap, S., Usca, Ü. A., Tarih, Y. S. ve ark. (2024). PPS Kompozitlerin İşlenmesinde Selüloz Esaslı Biyobozunur Nano Kristallerin Yeni Kullanımı: Çevreci İşlemeye Yönelik Bir Yaklaşım. *Uluslararası J. of Precis. Müh. ve Manuf.-Green Tech*. 11,1-19.

Şenyüz, G. (2008). 304 kalite paslanmaz çelik ve galvaniz sacların biçimlendirme kabiliyetlerinin çeşitli yönleri ile incelenerek karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şirin, Ş. (2020). Sürdürülebilir İmalat İçin Inconel X-750 Süper Alaşımının Frezelenmesinde Yenilikçi Soğutma/Yağlama Tekniklerinin İşleme Performansı Üzerindeki Etkileri. Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Şirin, Ş. and Kıvak, T. (2021). Effects of hybrid nanofluids on machining performance in MQL-milling of Inconel X-750 superalloy . *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 163-176.

Şirin, Ş. (2022). 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*, 76, 428–443.

Tetteknik. (2023). Testo 885 Termal Kamera. Erişim Tarihi: 22.11.2023.  
<https://www.testteknik.com/urun/testo-885-x1-termal-kamera/>.

Testo. (2023). Testo 885 Termal Kamera. Erişim Tarihi: 27.12.2023.  
[https://static-int.testo.com/media/cb/4f/b8ff74d13fd1/testo-885-TR\\_small.pdf](https://static-int.testo.com/media/cb/4f/b8ff74d13fd1/testo-885-TR_small.pdf).

Tezmaksan. (2023). CNC Freze Tezgahı. Erişim Tarihi: 27.12.2023.  
<https://tezmaksan.com/tr/urun/cnc/cnc-isleme-merkezi/dik-isleme-merkezi/dahlih-mcv-860>.

Thakur, A. and Gangopadhyay, S. (2016). Dry machining of nickel-based super alloy as a sustainable alternative using TiN/TiAlN coated tool. *Journal of Cleaner Production*, 129, 256-268.

Tokgöz, B. (2021). Ark kaynağı ile birleştirilen AISI 316L östenitik paslanmaz çelik levhaların içyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hatay.

Ubuy. (2023). Dijital Ölçüm Kamerası. Erişim Tarihi: 30.11.2023.  
<https://www.ubuy.com.tr/tr/product/2JCEFXO-insize-ism-pm200sb-digital-measuring-microscope>.

Usca, Ü. A., Uzun, M., Şap, S., Giasin, K., Pimenov, D. Y. and Prakash, C. (2022). Determination of machinability metrics of AISI 5140 steel for gear manufacturing using different cooling lubrication conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 893–904.

Usca, Ü. A. (2023). Selüloz Nanokristal Esaslı Nanoakışkanın Öğütme Performansına Etkisi: Dillimax 690T'nin İncelenmesi. *Polimerler*, 15(23), 4521.

Usca, Ü. A., Şap, S. ve Uzun, M. (2023). Cu Matris Kompozit Malzemelerin Kriyojenik LN<sub>2</sub> ve Minimum Miktarda Yağlama Altında Bilgisayar Sayısal Kontrollü Frezeleme ile İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi. *J. of Materi Eng ve Perform* 32,2417–2431.

Uzun, M., Usca, Ü. A., Kuntoğlu, M. ve ark. (2022). AISI X210Cr12 çeliğinin frezelenmesi sırasında takım yolu stratejilerinin işleme süresi, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi. *Int J Adv Manuf Technol* 119,2709–2720.

Velmurugan, K. V. and Mani, N. (2023). Influence of hBN nanofluid MQL on machining characteristics in turning of Inconel 625.

Virdi, R. L., Chatha, S. S. and Singh, H. (2021). Experimental investigations on the tribological and lubrication behaviour of minimum quantity lubrication technique in grinding of Inconel 718 alloy. *Tribology International*, 153(106581).

Yanartaş, S. (2023). Nano-gümüş ve h-BN katkılı yağların MQL ve sürekli akış yöntemleri kullanılarak tribolojik performans odaklı incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Yeşiltaş, A. S. (2022). Saf titanyum (GR2) ve ferritik (430) paslanmaz çelik levhaların difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., Erzincanlı, F., Uygur, İ. and Sarıkaya, M. (2017). Determination of mql parameters contributing to sustainable machining in the milling of nickel-base superalloy Waspaloy. (4667-4681, Dü.) Arabian Journal for Science and Engineering, 42(11), 466.

Yıldırım, Y. (2019). 316L kaliteye sahip paslanmaz çelik tellerin tel çekme ve parlak tavlama proseslerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.