T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASTELLOY X SÜPER ALAŞIMININ DELİNMESİNDE NANO PARTİKÜL KATKILI KESME YAĞLARININ İŞLEME PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

EMİNE ŞİRİN

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. TURGAY KIVAK

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASTELLOY X SÜPER ALAŞIMININ DELİNMESİNDE NANO PARTİKÜL KATKILI KESME YAĞLARININ İŞLEME PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Emine ŞİRİN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Turgay KIVAK

Düzce Üniversitesi

Eş Danışmanı

Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM

Erciyes Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Turgay KIVAK
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY
Karabük Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Şenol MERT
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yakup TURGUT
Gazi Üniversitesi _____

Doç. Dr. Engin NAS
Düzce Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 12/03/2021

BEYAN

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

12 Mart 2021

Emine ŞİRİN

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim ve bu tez çalışmam süresince her türlü destek ve yardımları için çok değerli danışmanlarım; Doç. Dr. Turgay KIVAK'a ve Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerde kullanılan dinamometrenin temini için destek sunan değerli Hocalarım, Prof. Dr. Ulvi ŞEKER ve Prof. Dr. İhsan KORKUT'a şükranlarımı sunarım.

Beni herzaman destekleyen aileme, hayatımı paylaştığım sevgili eşim Dr. Şenol ŞİRİN'e, oğullarım Mustafa Berk ve Furkan Mert'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez çalışmamı, Erciyes Üniversitesi FBA-2019-8834 numaralı projeyle destekleyen Erciyes Üniversitesi Rektörlüğüne ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimine teşekkürlerimi sunuyorum.

12 Mart 2021 **Emine ŞİRİN**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ x

KISALTMALAR xi

SİMGELER xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xiv

EXTENDED ABSTRACT xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. HASTELLOY X SÜPER ALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR 5

2.2. MMY NANO MMY VE HİBRİD NANO MMY KESME KOŞULLARI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR 6

2.3. LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ 17

3. SÜPER ALAŞIM MALZEMELER 20

3.1. SÜPER ALAŞIMLARIN SINIFLANDIRILMASI 20

3.1.1. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar 21

3.1.2. Demir Esaslı Süper Alaşımlar 23

3.1.3. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar 24

3.2. SÜPER ALAŞIMLARIN ÜRETİM YÖNTEMLERİ 25

3.3. SÜPER ALAŞIMLARIN UYGULAMA ALANLARI 26

3.4. NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ 29

3.5. SÜPER ALAŞIM HASTELLOY X 29

4. DELİK DELME 31

4.1. DELİK DELME İŞLEMİ 31

4.2. DELİK DELME İŞLEMİNDE TEMEL PARAMETRELER 34

4.3. DELİK DELME İŞLEMİNDE KUVVET VE MOMENTLER 36

4.3.1. Kuvvetlerin ve Momentin Hesaplanması 36

4.3.2. Delik Delme Kuvvetlerini Etkileyen Faktörler 38

4.4. DELİK DELME İŞLEMLERİNDE DELİK KALİTESİ 39

4.4.1. Delik Yüzeylerinin Kalitesi 39

4.4.1.1. Yüzey Pürüzlülüğü *40*

4.4.1.2. Çaptan Sapma *40*

4.4.1.3. Dairesellikten Sapma (Ovalite) *41*

4.4.1.4. Silindiriklikten Sapma (Eksenel Kaçıklık) *42*

4.5. DELİK DELME İŞLEMİNDE TAKIM AŞINMASI 42

4.6. DELİK DELME İŞLEMİNDE ÇAPAK OLUŞUMU 44

5. METAL İŞLEMEDE SOĞUTMA YAĞLAMA 48
5.1. METAL İŞLEMEDE SOĞUTMA/YAĞLAMA YÖNTEMLERİ 49
5.2. METAL İŞLEMEDE SÜRDÜRÜLEBİLİR SOĞUTMA/YAĞLAMA YÖNTEMLERİ 51
5.2.1. Minimum Miktarda Yağlama Yöntemi 53
5.2.1.1. İçten (Dâhili) Minimum Miktarda Yağlama Sistemi 53
5.2.1.2. Dıştan (Harici) Minimum Miktarda Yağlama Sistemi 54
5.2.2. Nano Partikül Katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Nano MMY) Yöntemi 56
5.2.2.1. Nano Akışkanların Hazırlanması 56
6. MATERYAL METOT 59
6.1. DENEYLERDE KULLANILAN İŞ PARÇASI VE EKİPMANLAR 59
6.1.1. İş Parçası 59
6.1.1.1. İş Parçası Boyutları ve Tezgâha Bağlanması 59
6.1.2. Kesici Takım 61
6.1.3. Takım Tezgâhı 62
6.1.4. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi 62
6.1.4.1. Deneylerde Kullanılan Bitkisel Esaslı Yağ 63
6.1.4.2. Deneylerde Kullanılan Nano Partikül Tozlar 64
6.1.4.3. Deneylerde Kullanılan Yüzey Aktif Maddeler 65
6.1.5. Nano Akışkan Hazırlama Süreci 66
6.2. ÖLÇÜM VE ANALİZ CİHAZLARI 67
6.2.1. Akışkanların Viskozite ve pH Ölçümleri 68
6.2.2. Akışkanların Termal İletkenlik Ölçümleri 69
6.2.3. Akışkanların Temas Açısı ve Yüzey Gerilimi Ölçümleri 70
6.2.4. İtme Kuvveti ve Moment Ölçümleri 71
6.2.5. Kesme Sıcaklığı Ölçümleri 72
6.2.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri 73
6.2.7. Delik Çapı Dairesellikten Sapma ve Silindiriklikten Sapma Ölçümleri . 75
6.2.8. Çapak Yüksekliği Ölçümleri 77
6.2.9. Takım Aşınması Ölçümleri 78
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 80
7.1. SAF YAĞ VE NANO AKIŞKANLARIN VİSKOZİTE VE pH SONUÇLARI 80
7.2. SAF YAĞ VE NANO AKIŞKANLARIN TERMAL İLETKENLİK SONUÇLARI 82
7.3. SAF YAĞ VE NANO AKIŞKANLARIN TEMAS AÇISI VE YÜZEY GERİLİMİ SONUÇLARI 83
7.4. İTME KUVVETİ VE MOMENT SONUÇLARI 87
7.5. KESME SICAKLIĞI SONUÇLARI 91
7.6. DELİK KALİTESİ SONUÇLARI 93
7.6.1. Yüzey Pürüzlülüğü ve Yüzey Topografyası Sonuçları 93
7.6.2. Delik Çap Değişim Sonuçları 98
7.6.3. Dairesellikten Sapma Sonuçları 99
7.6.4. Silindiriklikten Sapma Sonuçları 101
7.7. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİ SONUÇLARI 103

7.8. TAKIM AŞINMASI VE TAKIM ÖMRÜ SONUÇLARI 105
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 112
8.1. ÖNERİLER 115
9. KAYNAKLAR 116
10. EKLER 127
10.1. EK 1: DENEYLERDE KULLANILAN HASTELLOY X SÜPER ALAŞIMININ SERTİFİKASI 127
ÖZGEÇMİŞ 130

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Sırası ile γ ve γ' fazlarının kafes yapıları. 22
Şekil 3.2. Süper alaşımların uygulama alanları. 27
Şekil 3.3. Nikel esaslı süper alaşımların uçak motorlarında kullanıldığı yerler. 28
Şekil 3.4. Gaz türbinli motora ait bölümler. 29
Şekil 4.1. Delik delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması 31
Şekil 4.2. Delik delme işleminde talaş kaldırma süresinin diğer işleme süreleriyle karşılaştırılması 32
Şekil 4.3. Delik delmede boy/çap ilişkisi a) Derin delik b) Kısa delik..... 33
Şekil 4.4. Delik delme işleminde a) Takımın dönmesi b) Takımın ilerlemesi 34
Şekil 4.5. Delme işlemlerinde a) Talaş genişliği b) Kesici kenar başına ilerleme 35
Şekil 4.6. Delmede toplam delik derinliği 36
Şekil 4.7. Delme esnasında takım ucunu etkileyen kuvvetler a) İtme kuvveti b) İlerleme ve radyal kuvvet..... 37
Şekil 4.8. Dairesellik ölçümlerinde kullanılan LSC metodu. 41
Şekil 4.9. Kesici takımın aşınma safhaları..... 43
Şekil 4.10. Serbest yüzeyde oluşan aşınmanın gösterimi 44
Şekil 4.11. Delik delmede çapak oluşumu a) Düzenli çapak b) Süreksiz çapak c) Taç çapak 47
Şekil 4.12. Çapak çeşitleri a) Düzenli b) Süreksiz c) Taç. 47
Şekil 5.1. Metal işlemede kullanılan kesme sıvılarının etkileri. 49
Şekil 5.2. Metal işleme sıvılarında aranan özellikler. 49
Şekil 5.3. Metal işlemede kullanılan soğutma/yağlama yöntemleri. 50
Şekil 5.4. Sürdürülebilir imalat süreçleri 51
Şekil 5.5. Genel üretim maliyetleri 52
Şekil 5.6. Kesici takım içinden uygulanan MMY yöntemi. 53
Şekil 5.7. İçten MMY uygulamaları a) Tek kanallı b) Çift kanallı. 54
Şekil 5.8. Dıştan MMY uygulaması. 55
Şekil 5.9. Dıştan MMY uygulamaları a) Tek kanallı b) Çift kanallı. 55
Şekil 5.10. Nano akışkan hazırlama prosesi a) Tek adım yöntemi b) İki adım yöntemi 57
Şekil 6.1. İtme kuvveti, moment ve delik kalitesi deneylerinde kullanılan iş parçası a) Hastelloy X malzeme boyutları b) Bağlama kalıbının dinamometre üzerine yerleşimi. 60
Şekil 6.2. Kesme sıcaklığı ve takım aşınması deneylerinde kullanılan iş parçası a) Hastelloy X malzeme boyutları b) CNC dik işleme mengenesine iş parçasının bağlanması. 61
Şekil 6.3. Deneylerde kullanılan kesici takım a) Boyutları b) Görseli. 62
Şekil 6.4. Deney seti kurulumu..... 63
Şekil 6.5. Nano partiküllere ait SEM görüntüleri ve elemental analiz a) hBN b) GNP. 65
Şekil 6.6. Yüzey aktif maddelere ait SEM görüntüleri ve elemental analiz a) SDS b) Gam Arabik. 66
Şekil 6.7. Nano akışkan hazırlama aşamaları. 67
Şekil 6.8. Akışkanların viskozite ölçüm prosesi a) Nano akışkan ısıtmada kullanılan manyetik karıştırıcı b) Viskozite ölçüm cihazı. 68
Şekil 6.9. pH ölçümü. 69

Şekil 6.10. Termal iletkenlik ölçümü..... 70
Şekil 6.11. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümü..... 71
Şekil 6.12. 9257-A tipi dinamometrenin teknik özellikleri. 72
Şekil 6.13. 5070A01100 tip amplifikatörün teknik özellikleri. 72
Şekil 6.14. Kesme sıcaklığının ölçülmesi..... 73
Şekil 6.15. Yüzey pürüzlülük ölçümü a) Ölçüm için hazırlanan Hastelloy X iş parçası b) Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı. 74
Şekil 6.16. Optik profilometre ölçümü. 75
Şekil 6.17. Deliklerin çap, dairesellik ve silindiriklikten sapma ölçümleri a) CMM cihazı b) CMM ölçüm ayrıntısı. 76
Şekil 6.18. Çapak yüksekliği ölçümleri a) Dijital yükseklik ölçüm cihazı b) Çapak yüksekliği ölçümü. 77
Şekil 6.19. Takım aşınması ölçümü a) Dijital mikroskop b) Yanak aşınması ölçümü... 78
Şekil 6.20. Takım aşınma mekanizmalarının tespitinde kullanılan SEM cihazı. 79
Şekil 7.1. Saf yağ ve farklı nano akışkanların viskozite ve pH sonuçları..... 80
Şekil 7.2. Saf yağ ve farklı nano akışkanların termal iletkenlik ölçüm sonuçları. 82
Şekil 7.3. Saf yağ ve farklı nano akışkanlar için temas açısı sonuçları a) Saf yağ b) hBN/GNP-SDS c) hBN-SDS d) hBN/GNP e) hBN f) GNP g) hBN-GA h) GNP-SDS i) GNP-GA j) hBN/GNP-GA. 85
Şekil 7.4. Saf yağ ve farklı nano akışkanlar için temas açısı sonuçları. 86
Şekil 7.5. Saf yağ ve farklı nano akışkanlar için yüzey gerilimi sonuçları..... 86
Şekil 7.6. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında itme kuvveti değerleri..... 88
Şekil 7.7. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında moment değerleri..... 89
Şekil 7.8. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında kesme sıcaklığı değerleri..... 92
Şekil 7.9. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında yüzey pürüzlülüğü değerleri. 94
Şekil 7.10. Farklı kesme koşulları altında delik yüzeyinin yüzey topografyası ve 2D analizi a) hBN/GNP-SDS b) hBN-SDS, c) hBN/GNP, d) hBN/GNP-GA e) hBN f) hBN-GA g) GNP-SDS h) GNP i) MMY j) GNP-GA k) kuru (kesme parametreleri, Vc 20 m/dak, f 0,06 mm/dev). 97
Şekil 7.11. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında delik çapı değerleri..... 98
Şekil 7.12. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında dairesellikten sapma değerleri. 100
Şekil 7.13. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında silindiriklikten sapma değerleri. 102
Şekil 7.14. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında çapak yüksekliği değerleri. 103
Şekil 7.15. Delik çıkışındaki oluşumlar a) Çapak b) Delik kapağı..... 104
Şekil 7.16. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında delik sayısına bağlı olarak maksimum yanak aşınma değeri (kesme parametreleri, Vc 20 m/dak, f 0,06 mm/dev). 106
Şekil 7.17. Farklı kesme koşulları altında aşınmış matkabın SEM görüntüleri a) Kuru b) MMY c) hBN/GNP-SDS d) hBN-SDS e) hBN-GA f) hBN g) GNP h) hBN-GA i) GNP-SDS j) GNP-GA k) hBN/GNP-GA 110

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Süper alaşımların sınıflandırılması 21
Çizelge 3.2. Ticari olarak Ni esaslı süper alaşımlar. 23
Çizelge 3.3. Alaşım elementlerinin süper alaşımlar üzerindeki etkileri 26
Çizelge 3.4. Hastelloy X süper alaşımının kimyasal bileşimi. 30
Çizelge 3.5. Hastelloy X fiziksel ve mekanik özellikleri. 30
Çizelge 4.1. Matkap aşınmaları, muhtemel sebepleri ve çözüm önerileri. 44
Çizelge 6.1. Hastelloy X süper alaşımının kimyasal içeriği (%). 59
Çizelge 6.2. Hastelloy X süper alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri 59
Çizelge 6.3. CNC dik işleme tezgâhının özellikleri. 62
Çizelge 6.4. MMY cihazına ait teknik özellikler. 63
Çizelge 6.5. Bitkisel esaslı yağa ait özellikler. 64
Çizelge 6.6. Nano partiküllere ait özellikler. 65
Çizelge 6.7. Hazırlanan nano akışkanlara ait kodlamalar. 67
Çizelge 6.8. Viskozite ölçüm cihazına ait özellikler. 69
Çizelge 6.9. Termal iletkenlik ölçüm cihazına ait teknik özellikler. 70
Çizelge 6.10. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçüm cihazına ait özellikler. 71
Çizelge 6.11. Termal kameraya ait teknik özellikler. 73
Çizelge 6.12. Yüzey pürüzlülük cihazına ait teknik özellikler. 74
Çizelge 6.13. Optik profilometre cihazına ait teknik özellikler. 75
Çizelge 6.14. CMM cihazına ait teknik özellikler. 76
Çizelge 6.15. Dijital yükseklik ölçüm cihazına ait teknik özellikler. 77
Çizelge 6.16. Dijital polarize mikroskopa ait teknik özellikler. 78
Çizelge 6.17. SEM cihazına ait teknik özellikler. 79
Çizelge 7.1. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarına bağlı matkapların elemental analiz sonuçları. 111

KISALTMALAR

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AlCrN	Aluminium Chromium Nitride (Alüminyum Krom Nitrür)
Al_2O_3	Aluminium Oxide (Alüminyum Oksit)
AlTiN	Aluminium Titanium Nitride (Alüminyum Titanyum Nitrür)
BUE	Built-Up-Edge (Talaş Yapışması)
CFD	Computational Flow Dynamics (Hesaplamalı Akış Dinamiği)
CMM	Coordinate Measuring Machine (Koordinat Ölçüm Cihazı)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Nümerik Kontrol)
CNT	Carbon Nanotube (Karbon Nano Tüp)
CVD	Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
CuO	Copper Oxide (Bakır Oksit)
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis
EG	Ethylene Glycol (Etilen Glikol)
GA	Gum Arabic (Gam Arabik)
GNP	Graphene (Grafen)
Hibrid Nano MMY	Hibrid Nanopartikül Katkılı Minimum Miktarda Yağlama
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
IT	ISO Toleransı
LSC	Least Square Circle (En Küçük Merkez Daire)
MMY	Minimum Miktarda Yağlama
Mono Nano MMY	Mono Nano partikül katkılı Minimum Miktarda Yağlama
MRS	Minimum Radial Devitation (Minimum Radyal Sapma)
MWCNT	Multi Walled Carbon Nanotube (Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp)
Nano MMY	Nanopartikül Katkılı Minimum Miktarda Yağlama
PVD	Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
SEM / TEM	Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
SDS	Sodium Dodecly Sulfate (Sodyum Dodecil Sülfat)
SiC	Silicon Carbide (Silisyum Karbür)
SiO_2	Silicon Dioxide (Silikon Dioksit)
TiAlN	Titanium Aluminium Nitride (Titanyum Alüminyum Nitrür)
TiN	Titanium Nitride (Titanyum Nitrür)
ZnO	Zinc Oxide (Çinko Oksit)
ZrO_2	Zirconium Oxide (Zirkonyum Oksit)

SİMGELER

A	Talaş kesit alanı, (mm^2)
ap	Radyal talaş derinliği, (mm)
D	Kesici takım çapı, (mm)
f	Devir başına ilerleme, (mm/dev)
f_z	Diş başına ilerleme, (mm/z)
F_a	Eksenel kuvvet, (N)
F_{nz}	Bileşke kuvvet, (N)
F_{rz}	Radyal kuvvet, (N)
F_{sz}	İtme kuvveti, (N)
F_{vz}	İlerleme kuvveti, (N)
h	Matkap ucu yüksekliği, (mm)
hBN	Hegzagonal Bor Nitrür
HRB	Rockwell B sertliği
HRC	Rockwell C sertliği
GNP	Grafen
k_s	Özgül kesme kuvveti, (N)
L	Delik derinliği, (mm)
M_s	Toplam kesme momenti, (Nm)
M_{sz}	İtme momenti, (Nm)
n	Devir sayısı, (dev/dak)
N	Newton
nm	Nanometre
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, (µm)
Vc	Kesme hızı, (m/dak)
VB	Kesici takım yanak aşınma değeri, (mm)
VB_{maks}	Kesici takım maksimum yanak aşınma değeri, (mm)
Vf	İlerleme hızı, (mm/dak)
T	Efektif işleme zamanı, (dak)
φ	Matkap uç açısı, (derece)
β	Helis açısı, (derece)

ÖZET

HASTELLOY X SÜPER ALAŞIMININ DELİNMESİNDE NANO PARTİKÜL KATKILI KESME YAĞLARININ İŞLEME PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Emine ŞİRİN
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Danışman: Doç. Dr. Turgay KIVAK
Mart 2021, 129 sayfa

Metal işleme operasyonlarında kullanılan kesme sıvısı çevreyi, insan sağlığını ve toplam üretim maliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden, kullanılan kesme sıvısının miktarının azaltılması veya ekolojik olarak adlandırılan yöntemlerin tercih edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ekolojik soğutma/yağlama yöntemlerinin incelendiği bu çalışmada, nikel esaslı Hastelloy X süper alaşımının delinmesinde kuru, MMY, Mono ve Hibrid Nano MMY soğutma/yağlama koşullarının itme kuvveti, moment, delik kalitesi (yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, dairesellikten sapma ve silindiriklikten sapma), kesme sıcaklığı, çapak yüksekliği, takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Nano akışkanlar, kesme yağı içerisine hacimce %0,6 grafen nanoplatelet (GNP) ve hegzagonal bor nitrür (hBN) nano partikülleri eklenerek hazırlanmıştır. Homojen, stabil karışım elde etme adına karışım içerisine ağırlıkça %0,25 Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) ve Gam Arabik (GA) yüzey aktif maddeleri eklenmiştir. Delme deneylerinde kesici takım olarak 5 mm çapında TiAlN kaplamalı karbür matkaplar, işleme parametresi olarak, iki farklı kesme hızı (20 ve 30 m/dak), iki farklı ilerleme (0,04 ve 0,06 mm/dev) ve sabit delme derinliği (13,5 mm) kullanılmıştır. İtme kuvveti, moment, delik kalitesi, çapak yüksekliği ve takım aşınması bakımından en iyi sonuçlar SDS ilaveli hBN/GNP hibrid kesme koşulunda elde edilirken, kesme sıcaklığı için en iyi sonuç yüzey aktif madde eklenmeyen hBN/GNP hibrid kesme koşulunda elde edilmiştir. Kuru kesme koşulunda 10 delik sonunda matkapta yanak aşınması değeri 0,281 mm ölçülürken, hBN/GNP-SDS kesme koşulunda 60 delik sonunda 0,135 mm olarak ölçülmüştür. Takım aşınması bakımından hBN/GNP-SDS kesme koşulu kuru kesme koşuluna göre %51,96 oranında iyileşme göstermiştir. En iyi işleme performansını mono nano akışkanlar arasında hBN-SDS kesme koşulu, hibrid nano akışkanlar arasında hBN/GNP-SDS kesme koşulu göstermiştir. Ayrıca, SDS yüzey aktif maddesinin işleme performansı açısından GA'ya göre daha üstün performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Delik Delme, Hastelloy X, Minimum Miktarda Yağlama (MMY), Mono ve Hibrid Nano Akışkan, Yüzey Aktif Madde.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NANOPARTICLE ADDED CUTTING OILS ON MACHINING PERFORMANCE IN THE DRILLING OF HASTELLOY X SUPER ALLOY

Emine ŞİRİN
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Turgay KIVAK
March 2021, 129 pages

The cutting fluid used in metal cutting operations shows adversely affects on the environment, human health and total production costs. For this purpose, it is important to the amount of cutting fluid need to be minimized or ecological cooling/lubrication methods can be prefer. In this study, ecological cooling/lubrication methods were examined and effects of dry, MQL, Mono and Hybrid Nano MQL cooling/lubrication conditions on thrust force, torque, hole quality (surface roughness, diameter deviations, roundness and cylindricity), cutting temperature, burr height, tool wear and tool life were investigated when drilling of nickel based super alloy Hastelloy X. Nanofluids were prepared by adding 0.6 vol% graphene nanoplatelets (GNP) and hexagonal boron nitride (hBN) nanoparticles. Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) and Gum Arabic (GA) added by 0.25 wt% as surfactants into the nanofluids for homogeneous and stable mixtures. In drilling experiment, 5 mm diameter TiAlN coated carbide drills as cutting tools, two different cutting speeds (20 and 30 m/min), two different feed rates (0.04 and 0.06 mm/rev) and a costant drilling depth (13.5 mm) was used. The best cutting force, torgue, hole quality, burr height, and tool wear results were obtained under SDS added hBN/GNP hybrid cutting condition whereas the best cutting temperature results were achieved under hBN/GNP hybrid cutting condition without surfactants. The maximum flank wear of the drill was measured as 0.281 mm after 10 holes under dry cutting condition, whereas the minimum flank wear was measured as 0.135 mm after 60 holes under hBN/GNP-SDS cutting condition. The hBN/GNP-SDS cutting condition improved by 51.96% compared to the dry cutting condition in terms of tool wear. The hBN-SDS showed better cutting performance among the mono nanofluids cutting condition, while the hBN/GNP-SDS showed better cutting performance among the hybrid nano fluids cutting condition. Also, when the surfactants added to nanofluids were evaluated, it was determined that the SDS performed better than the GA in terms of cutting performance.

Keywords: Drilling, Hastelloy X, Minimum Quantity Lubrication (MQL), Mono and Hybrid Nanofluids, Surfactant.

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NANOPARTICLE ADDED CUTTING OILS ON MACHINING PERFORMANCE IN THE DRILLING OF HASTELLOY X SUPER ALLOY

Emine ŞİRİN
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Turgay KIVAK
March 2021, 129 pages

1. INTRODUCTION

Nickel based super alloys show superior performance under hard machining conditions. These superior performances are due to its properties such as wear resistance, high toughness, corrosion and thermal fatigue resistance especially at high temperatures. Due to all these superior properties they exhibit, these alloys are widely used in many critical areas i.e., gas turbines, power plants, nuclear power systems, marine equipment, food industry, chemical and petrochemical industry, especially in the space and aerospace industry. Hastelloy X is in the group of nickel-based super alloys, and it is used to a wide range today. Hastelloy X is especially preferred in applications requiring high temperature resistance such as gas turbine engine combustion chambers, jet engine exhaust components and combustion chambers. Hastelloy X super alloy is very important for aircraft and/or similar high-temperature applications because of its extraordinary strength, oxidation resistance, and corrosion resistance, even at 1200 ºC. However, these properties that make these similar super alloy materials advantageous in application present constraints for manufacturers during the cutting process. In the other words, the combined effects of low thermal conductivity and thermal diffusivity, high temperature resistance, the tendency to harden during cutting, and high tool-workpiece affinity put this material in the class of difficult-to-cut materials. Therefore, it is important to use the cooling lubrication method for machining the super alloys.

2. MATERIALS AND METHODS

Measurements and parameters applied in drilling of Hastelloy X super alloy are given below step by step.

1. The drilling experiments were carried out with two different sizes of Hastelloy X super alloy. Before the experiments, Hastelloy X super alloy work piece were prepared in dimensions of 100 × 80 × 13.5 mm for thrust force and drill quality measurement, while second work piece were prepared in dimensions of 150 ×100 × 13.5 mm for cutting temperature and tool wear measurement.
2. The nanofluid mixture were prepared by adding GNP, hBN nanoparticles, and SDS, GA surfactant into the vegetable based cutting oil.
3. As the cutting parameters, Vc 20 and 30 m/min cutting speed, f 0.04 and 0.06 mm/rev feed rate, and 13.5 mm through hole drilling depth were chosen.
4. Before the drilling experiments, viscosity, pH, thermal conductivity, surface tension, and contact angle (wettability) of the nanofluids were measured.
5. The viscosity measurements were measured by AND SV-10 viscometer.
6. The pH measurements were measured by Sartorius PT-10P pH meter.
7. The thermal conductivity measurements were measured by the Hot Disk TPS2500s device.
8. The surface tension and contact angle measurements were measured by the Theta Lite device.
9. Dry, MQL, Mono Nano MQL and Hybrid Nano MQL were choosen as cutting conditions.
10. The drilling experiments were carried out on the Delta SEIKI vertical CNC machine.
11. All MQL conditions are performed in the SKF Vario model MQL device.
12. The thrust forces were measured by Kistler 9257B dynamometer.
13. The maximum cutting temperature were measured by Optris PI 450 infrared thermal camera.
14. Hole diameter, circularity and cylindricity measurements were measured by the Dea Pioneer model CMM device.
15. Burr height measurements were measured by the Mahr Digimar CX1 digital height measuring device.
16. Marsurf PS 10 device were used in surface roughness measurement.
17. Cutting tool wear rate were measured by Dino Lite AM 4113ZT digital microscope.
18. FEI Quanta FEG 250 SEM device was used in cutting tool wear mechanism measurement.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

- The use of surfactant significantly increased the viscosity and pH values of both the mono and hybrid nanofluids.
- The highest thermal conductivity value (0.1953 W/mK) was obtained under the hBN/GNP hybrid nanofluid cutting condition.
- The best results with regard to thrust force, hole quality, burr height, and tool wear were obtained under SDS added hBN/GNP hybrid cutting condition.
- The best results for cutting temperature were achieved under the hBN/GNP hybrid cutting condition without surfactants.
- The maximum flank wear of the drill was measured as 0.281 mm after 10 holes under dry cutting condition, whereas the minimum flank wear was measured as 0.135 mm after 60 holes under hBN/GNP-SDS cutting condition. The hBN/GNP-SDS cutting condition improved by 51.96% compared to the dry cutting condition in terms of tool wear.
- The hBN-SDS cutting condition showed the better performance among the mono nanofluids.
- The hBN/GNP-SDS cutting condition showed the better performance among the hybrid nanofluids.
- When the surfactants added to nanofluids were evaluated, it was determined that the SDS performed better than the GA in terms of cutting performance.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

As a result of the nanofluid experiments, it has been determined that mono and hybrid nanofluid cutting conditions have positive results in terms of machining performance when drilling Hastelloy X super alloy. Hybrid Nano MQL cutting condition, one of the ecological and environmental cooling/lubrication methods, showed the best cutting performance in drilling of Hastelloy X super alloy, while the hBN/GNP-SDS cutting condition showed the best performance among of the hybrid cutting.

1. GİRİŞ

Nikel esaslı süper alaşımlar, ağır çalışma koşullarında üstün performans göstermektedirler. Bu üstün performansları, özellikle yüksek sıcaklıklarda üstün aşınma direnci, yüksek tokluk, korozyon ve termal yorulma dayanımları gibi özelliklerine bağlıdır [1]. Sergiledikleri tüm bu üstün özellikler nedeniyle bu alaşımlar, uzay ve havacılık sanayi başta olmak üzere, gaz türbinlerinde, enerji santrallerinde, nükleer güç sistemlerinde, deniz ekipmanlarında, gıda endüstrisinde, kimya ve petrokimya endüstrisi gibi birçok kritik alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [2]. Hastelloy X, nikel esaslı süper alaşımlar grubunda olup, günümüzde kullanımı gittikçe artan önemli malzemeler arasındadır. Özellikle, gaz türbini motor yanma odaları, jet motorlarının egzoz bileşenleri ve yanma odaları gibi yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedirler. Hastelloy X süper alaşımı, diğer süper alaşımlar gibi, içeriğinde sert karbürler barındırmakta ve aşınmaya karşı yüksek direnç göstermektedir [3]. Sahip olduğu tüm bu özellikler Hastelloy X süper alaşımını işlenmesi zor malzeme grubuna sokmaktadır. Özellikle ağır işleme koşullarında metal işleme operasyonlarıyla işlenmesinde kesici takıma ekstra aşırı yükler binebilmektedir. İşleme esnasında çıkan talaşlar, kesici takıma yapışarak kaynaklanabilmekte ve özellikle aşınma mekanizmalarının etkinliğini artırarak kesici takım ömrünü düşürebilmektedir. Hastelloy X gibi işlenebililiği zor malzeme grubunda yer alan malzemelerin metal işleme operasyonlarıyla şekillendirilmesinde işleme verimliliğinin artırılması son derece önemlidir. Metal işleme operasyonlarında işleme verimliliğini ve kesici takım ömrünü artırmak için kesme sıvısı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Metal işleme operasyonlarında kullanılan kesme sıvılarının soğutma, yağlama, talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırma, sürtünme kaynaklı oluşan ısıyı kontrol altına alma, kesme işlemini kolaylaştırma, yüzey kalitesini artırma ve talaşın iş parçasına yapışmasını önleme gibi kritik görevleri vardır [4]–[6]. Buna karşın, petrol bazlı olması, bertaraf maliyetinin yüksek olması, toksik olması ve biyolojik olarak parçalanamaması sebebiyle kesme sıvılarının insan sağlığı ve çevre açısından olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Petrol bazlı ve kimyasal olarak parçalanamayan kesme sıvılarına hava yolu ile uzun süre maruz kalındığında cilt hastalıkları (dermatit, egzama, cilt kanseri vb.), solunum yolu

hastalıkları (gırtlak kanseri, astım vb.), deri yoluyla alındığında ise karaciğerde toksik oluşumu gibi birçok yan etkileri görülebilmektedir [6], [7]. Metal işleme sıvılarının sahip olduğu tüm bu olumsuz etkiler, araştırmacıları alternatif yöntemlere sevk etmektedir. Son yıllarda özellikle sürdürülebilir imalat kavramının daha fazla duyulmasıyla, metal işleme sıvılarının kullanımını azaltan veya tümüyle ortadan kaldıran alternatif ekolojik soğutma/yağlama yöntemleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Ekolojik soğutma/yağlama yöntemleri kuru, minimum miktarda yağlama (MMY), nano partikül katkılı minimum miktarda yağlama (Nano MMY), hibrid minimum miktarda yağlama (Hibrid Nano MMY), hava ile soğutma, yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik soğutma şeklinde sıralanabilir.

Kuru işleme, üretim maliyetleri ve çevre duyarlılığı açısından etkili bir yöntem olarak bilinmektedir. Fakat özellikle ağır işleme koşullarında, işleme verimliliği açısından yetersiz bir yöntem olduğundan pek tercih edilmemektedir [7]. Kesme sıvısı kullanımını azaltmak ve kuru kesme yönteminin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için yarı kuru işleme olarak da adlandırılan minimum miktarda yağlama yöntemi kullanılmaktadır. MMY yöntemi, bir nozul yardımıyla çok az miktarda (10 ~ 100 mL/saat) kesme sıvısının basınçlı hava ile sis buharı şeklinde kesme bölgesine uygulanması şeklinde tanımlanabilir. Sis buharı içerisinde yer alan yağ zerrecikleri, kesici takım ile iş parçası ara yüzeyinde bariyer şeklinde ince bir yağlayıcı film tabakası oluşturarak etkili bir soğutma/yağlama sağlamaktadır [8], [9]. MMY yöntemi çok az miktarda kesme yağı kullanılması bakımından insan sağlığı ve çevre açısından ıslak kesme yöntemine göre daha fazla tercih edilen bir yöntemdir. Ancak ağırlaşan işleme koşullarında verimliliğin ve kesme yağının tribolojik etkilerinin artırılması amacıyla kesme yağı içerisine nano boyutlarda (genel olarak 1 ~ 100 nm) katı halde partiküller eklenmektedir.

Katı halde nano partiküllerin, bir akışkan içerisine farklı oranlarda eklenmesi ile hazırlanan karışımlara nano akışkan karışımlar adı verilmektedir. MMY yönteminde kullanılan kesme yağlarının, performanslarının iyileştirilmesi ve termal iletim katsayılarının artırılması amacıyla karışıma katı haldeki nano partiküller hacimce veya ağırlıkça eklenmektedir. Kesme bölgesine yüksek basınç altında ve farklı karışım oranlarında kesme yağı ile birlikte gönderilen nano partiküller, termal iletkenlik özelliğini artırmakta, yağın yağlayıcılık özelliklerini iyileştirmekte, kesici takım ve iş parçası ara yüzeyinde koruyucu ince bir yağlayıcı film tabakası oluşturmaktadır. Bu sayede nano akışkanlar kesme işlemi esnasında oluşan sıcaklığın iş parçasına nüfuz etmesini

engelleyebilmekte, kesme kuvveti, yüzey kalitesi, takım aşınması ve takım ömrü bakımından ciddi iyileşmeler sağlayabilmektedirler [10]. Nano akışkan karışımlar, içerisine metal olarak Cu, Ni, Al ve Ag, metal oksit olarak Al_2O_3, ZrO_2, CuO, SiO_2, ZnO ve bileşik olarak ise SiC, MoS_2, hegzagonal Bor Nitrür (hBN), karbon nano tüp (CNT), grafit, grafen nanoplatelet (GNP) vb. farklı özeliklere sahip nano partiküller eklenerek hazırlanmaktadırlar [11]. Son zamanlarda araştırma konularından bir diğeri de nano partiküllerin her birinin farklı üstün özelliklerinin bir araya getirildiği Hibrid Nano MMY yöntemidir. En az iki farklı nano partikülün aynı anda kesme sıvısına eklenerek hazırlandığı hibrid nano akışkanlar, sadece bir nano partikülün eklenerek hazırlandığı mono nano akışkanlara göre daha üstün soğutma/yağlama özellikleri sergileyebilmektedirler. Kesici takım-iş parçası ara yüzeyinde oluşan etkin tribo film tabakası sayesinde sürtünmenin ve kesme sıcaklığının azaltılmasıyla, iş parçası yüzey kalitesinde, kesme kuvvetlerinde ve takım ömründe önemli iyileşmeler sağlayarak üretim maliyetlerini de azaltmaktadır [12]. Hem Mono Nano MMY hemde Hibrid Nano MMY yönteminin tüm işleme operasyonlarında kuru, ıslak ve MMY yöntemine göre daha etkili bir yöntem olduğu bilinmektedir.

Matkapla delik delme işlemi metal işleme operasyonlarından biri olup özellikle havacılık ve uzay sanayinde diğer metal işleme operasyonlarına göre geniş uygulama alanına sahiptir. Matkapla delme işlemi yarı kapalı bir alanda gerçekleştiği için özellikle talaşın kesme bölgesinden tahliyesi ve delik bölgesinde etkili bir soğutmanın sağlanabilmesi açısından zor bir işleme prosesidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde Hastelloy X ile ilgili yapılan çalışmaların ağırlıklı olarak tornalama ve frezeleme üzerine olduğu görülmekle beraber delik delme üzerine yapılan bir çalışmaya rastlanamamıştır.

Ayrıca, nano akışkanların kullanımıyla ilgili çalışmaların çoğu mono nano akışkanlara odaklanmış ve işleme yöntemi olarak tornalama ve frezeleme tercih edilmiştir. Özellikle delik delme operasyonlarında mono nano akışkanların ve hibrid nano akışkanların kullanıldığı çalışmaların yeterli düzeyde olmadığı görülmüştür. Dahası nano akışkan karışımların topaklanma veya çökelme gibi olumsuz etkilerine karşı eklenen yüzey aktif maddelerin, işlenebilirlik üzerindeki etkisinin literatürde yeterli düzeyde çalışılmadığı anlaşılmıştır. Nano akışkanlara yüzey aktif madde eklenen çalışmalarda ise genellikle stabilite, reolojik ve termofiziksel özelliklerini test etmeye odaklanılmıştır. Bu çalışmada, mono ve hibrit nano akışkanların ve stabilite için eklenen yüzey aktif maddelerin işleme performansı üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelemesi amaçlanmıştır.

Çalışmada, işleme yöntemi olarak delme ve deney malzemesi olarak nikel esaslı süper alaşım olan Hastelloy X seçilmiştir. Nano akışkan karışımlar, GNP ve hBN katı nano partiküllerinin hacimce %0,6 oranında bitkisel esaslı kesme yağına eklenmesiyle hazırlanmıştır. Stabil karışımlar elde edebilme adına nano akışkanlara ağırlıkça %0,25 oranında SDS ve/veya GA yüzey aktif maddeleri eklenmiştir. Performans kriterleri olarak itme kuvveti, moment, delik kalitesi (yüzey pürüzlülüğü, yüzey topografyası, çaptan sapma, dairesellikten sapma ve silindiriklikten sapma), kesme sıcaklığı, takım aşınması ve takım ömrü ele alınmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. HASTELLOY X SÜPER ALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Uzun ve arkadaşları, Hastelloy X süper alaşım malzemesini kriyojenik işlem görmüş CVD ve PVD kaplamalı kesici takımlarla kuru kesme koşulunda tornalamışlar ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve takım ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tornalama deneyleri esnasında kesme parametresi olarak dört farklı kesme hızı (60, 70, 95 ve 120 m/dak), üç farklı ilerleme (0,10, 0,15 ve 0,20 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0,75 mm) seçilmiştir. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar, kesme hızı ve ilerlemenin artması ile kesme kuvvetinin de arttığını iddia etmişlerdir. Ayrıca, CVD kaplamalı takımlarla elde edilen kesme kuvvetlerinin PVD kaplamalı takımlara kıyasla daha düşük olduğunu söylemişlerdir. Takım ömrü açısından en iyi sonuç ise kriyojenik işlem görmüş CVD kaplamalı takımlarla elde edilmiştir [3].

Altın, Hastelloy X süper alaşım malzemesini CVD ve PVD kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür kesici takımlarla kuru kesme koşulunda tornalamış ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemiştir. Taguchi L_{18} deney tasarımı kullanılan deneylerde kesme parametresi olarak dört farklı kesme hızı (50, 65, 80 ve 100 m/dak), iki farklı ilerleme (0,1 ve 0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0,15 mm) seçilmiştir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacı, CVD kaplamalı takımların, PVD kaplamalı takımlara göre; yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetinde daha iyi performans gösterdiğini iddia etmiştir [13].

Altın başka bir çalışmada Hastelloy X ile Inconel 625 malzemesini CVD ve PVD kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür kesici takımlarla kuru kesme koşulunda tornalamış ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemiştir. Tornalama deneyleri esnasında kesme parametresi olarak dört farklı kesme hızı (50, 65, 80 ve 100 m/dak), iki farklı ilerleme (0,1 ve 0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0,15 mm) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonunda araştırmacı, Hastelloy X malzemesinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin, Inconel 625 malzemesinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine göre daha yüksek çıktığını tespit etmiştir [14].

Christopher ve Schmitz yaptıkları çalışmada, Hastelloy X süper alaşım malzemesini MMY ve kriyojenik (CO_2) kesme koşullarında frezelemişler ve işleme parametrelerinin kesme sıcaklığı, kesme kuvveti, takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Frezeleme deneyleri üç farklı kesme hızı (44, 50 ve 71 m/dak), sabit ilerleme (0,05 mm/diş), sabit eksenel kesme derinliği (4 mm) ve sabit radyal kesme derinliğinde (2 mm) yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, kesme sıcaklığı açısından en iyi sonuç kriyojenik (CO_2) kesme koşulunda elde edilirken, takım ömrü ve kesme kuvvetleri açısından en iyi sonucun MMY kesme koşulunda elde edildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, kriyojenik kesme koşulunda, kesici kenarda biriken talaşların kesme kuvvetini ve kesici takım aşınmasını artırdığını iddia etmişlerdir [15].

Chao ve arkadaşları Hastelloy X süper alaşım malzemesini PVD kaplamalı kesici takımlarla kuru kesme koşulunda tornalamışlar ve işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini genetik algoritma modeli ile optimize etmişlerdir. Tornalama deneyleri esnasında kesme parametresi olarak beş farklı kesme hızı (20, 32,16, 50, 67,84 ve 80 m/dak), beş farklı ilerleme (0,08, 0,1, 0,14, 0,18 ve 0,2 mm/dev) ve beş farklı kesme derinliği (0,1, 0,38, 0,8, 1,22 ve 1,5 mm) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucunda, yüzey pürüzlülüğü açısından en uygun işleme parametrelerini 40 m/dak kesme hızı, 0,18 mm/dev ilerleme ve 0,5 mm kesme derinliği olarak tespit etmişlerdir. Dahası, deneysel çalışma sonuçlarından elde edilen veriler ile genetik algoritma modelinden elde edilen verilerin birbiriyle benzerlik gösterdiğini iddia etmişlerdir [16].

2.2. MMY NANO MMY VE HİBRİD NANO MMY KESME KOŞULLARI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Rahim ve Sasahara, Inconel 718 süper alaşım malzemesini AlTiN kaplamalı 14 mm çapında matkapla MMY kesme koşulunda delmişler ve işleme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Delme deneyleri esnasında kesme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (30, 40 ve 50 m/dak), iki farklı ilerleme (0,05 ve 0,10 mm/dev) ve sabit delme derinliği (20 mm) seçilmiştir. Delme deneylerinde kesme yağı olarak ester yağı ve palmiye yağı kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, palmiye yağının sentetik ester yağına göre viskozitesinin daha yüksek ve yağlayıcılık özelliğinin daha iyi olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca palmiye yağı kullanılarak yapılan MMY deneylerinin, tüm kesme parametrelerinde, mikro sertlik ve yüzey kalitesi açısından iyileşme

gösterdiğini tespit etmişlerdir [17].

Zhang ve arkadaşları Inconel 718 alaşım malzemesini kuru ve MMY kesme koşullarında frezelemişler ve kesme koşullarının kesici takım ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Frezeleme deneylerinde işleme parametresi olarak sabit kesme hızı (55 m/dak), sabit ilerleme (0,1 mm/diş), sabit eksenel kesme derinliği (0,5 mm) ve sabit radyal kesme derinliği (1 mm) seçilmiştir. MMY kesme koşulunda Bescut 173 sentetik bitkisel kesme yağı, 8 mL/saat akış hızı ve 0,15 MPa basınçla kesme bölgesine gönderilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre, MMY kesme koşulunun kuru kesme koşuluna göre takım ömrünü %57 artırdığını iddia etmişlerdir [18].

Wang ve arkadaşları süper alaşım malzemelerinden Inconel 182 malzemesini kuru ve MMY kesme koşullarında frezelemişler ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İşleme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (80, 120 ve 160 m/dak), üç farklı ilerleme (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/diş), üç farklı kesme derinliği (0,5, 1 ve 1,5 mm), sabit akış hızı (125 mL/saat) ve sabit basınç (0,7 MPa) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonuçlarına göre; Inconel 182 süper alaşımının MMY kesme koşulunda işlenmesiyle, kuru kesmeye göre kesme kuvvetlerinde, yüzey pürüzlülük değerlerinde ve üretim maliyetlerinde azalma, takım ömründe ise artış olduğunu tespit etmişlerdir [19].

Kasım ve arkadaşları Inconel 718 (42 HRc) süper alaşım malzemesini 16 mm çapında TiAlN/AlCrN kaplamalı kesici takımla MMY kesme koşulunda frezelemişler ve işleme parametlerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Frezeleme deneylerinde işleme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (100, 120 ve 140 m/dak), üç farklı ilerleme (0,1, 0,15 ve 0,2 mm/diş), üç farklı kesme derinliği (0,50, 0,75 ve 1 mm) ve sabit akış hızı (50 mL/saat) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucunda, takım ömrü açısından en uygun parametrenin 100 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/diş ilerleme ve 0,75 mm kesme derinliği, yüzey pürüzlülüğü açısından en uygun parametrenin ise 140 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/diş ilerleme ve 1 mm kesme derinliği olduğunu tespit etmişlerdir [20].

Biermann ve Lovkov alüminyum alaşımlı malzemeyi 10 mm çapında içten soğutmalı kaplamasız karbür matkapla MMY kesme koşulunda delmişler ve işleme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak dört farklı ilerleme (1, 2, 3 ve 4 mm/dev), sabit kesme hızı (175

m/dak), delik derinliği (300 mm yatay olarak) ve MMY basıncı (15 bar) seçilmiştir. Deneylerde derin delik uygulamalarında MMY kesme koşulunda kullanabilmek için iki strateji üzerinde durmuşlardır. Birinci strateji, işleme esnasında daha düşük ısı oluşmasını sağlamak ve yüksek işleme verimliliği sağlamak; ikinci strateji derin deliklerde yön kontrolünü sağlayarak ölçü sapmasını minimize eden bir teknik geliştirmektir. Araştırmacılar deney sonuçlarına göre en iyi performansın, düşük ilerleme değerinde uzun rampalı deliklerde elde edildiği ifade etmişlerdir [21].

Oezkaya ve arkadaşları Inconel 718 malzemeyi 6,8 mm çapında sementit karbür matkapla, MMY kesme koşulunda delmişler ve işleme parametrelerinin takım ömrü ve delik kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak sabit kesme hızı (35 m/dak), sabit ilerleme (0,10 m/dev), sabit delme derinliği (34 mm) seçilmiştir. Deneylerde (%5) kontrasyonlu emülsiyonla, üç farklı yağ basıncı (25, 40 ve 60 bar), iki farklı içten soğutma kanal çapı (1 ve 1,25 mm) seçilmiştir. Deneylerde takımdaki soğutma kanalı çapı ve sıvı basıncının etkilerini hesaplamalı akış dinamiği (CFD) simülasyonu ile analiz etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, yüksek basınçlı yağ kullanımının takım ömrü ve delik kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiği iddia etmişlerdir [22].

Mathew ve Vijayaraghavan intermetalik titanyum alüminyum alaşımı malzemeyi 4 mm çapında TiAlN kaplamalı karbür matkapla kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarında delmişler ve kesme koşullarının itme kuvveti, moment ve talaş şekli üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak sabit kesme hızı (72 m/dak), ilerleme (0,01 mm/dev), delme derinliği (36 mm), MMY akış hızı (200 mL/saat) ve basıncı (6 bar) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda MMY kesme koşulunun, kuru kesme koşuluna göre itme kuvveti, moment ve talaş şekli açısından daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir [23].

Taşdelen ve arkadaşları, çökelme ile sertleştirilmiş çelik malzemeyi kaplamalı matkapla ıslak, kuru, hava ve MMY kesme koşullarında delmişler ve kesme koşullarının yüzey pürüzlülük, itme kuvveti, moment ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak, sabit kesme hızı (155 m/dak), sabit ilerleme (0,11 mm/dev), sabit delme derinliği (33 mm) ve üç farklı MMY akış hızı (5, 15 ve 23 mL/saat) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucunda yüzey pürüzlülüğü açısından en uygun kesme koşulunun 15 mL/saat akış hızına sahip MMY olduğunu ve itme kuvveti ve moment değeri açısından en uygun kesme koşulunun ıslak kesme

olduğunu tespit etmişlerdir [24].

Heinemann ve arkadaşları, karbon çeliği malzemeyi 1,5 mm çapında kaplamalı ve kaplamasız matkapla kuru ve MMY kesme koşullarında delmişler ve kesme koşullarının takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak, üç farklı yağ türü (sentetik ester, sentetik ester + %20 alkol, sentetik ester + %40 su), sabit kesme hızı (26 m/dak), sabit ilerleme (0,26 mm/dev), sabit delme derinliği (15 mm) ve sabit akış hızı (18 mL/saat) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda MMY kesme koşulunun yüksek soğutma kapasitesinden dolayı takım aşınmasını azaltarak takımın ömrünü artırdığını iddia etmişlerdir. En uygun yağ türünün sentetik ester + %20 alkol karışımı olduğunu tespit etmişlerdir [25].

Coz ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımına MMY kesme koşulunda delik delme, AA 7075 alüminyum alaşımına kuru kesme koşulunda frezeleme işlemi uygulayarak, işleme parametrelerinin ve malzeme türünün, kesme sıcaklığı ve moment değerleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Delme deneyleri 10 mm çapında kaplamasız karbür kesici takımla iki farklı kesme hızında (30 ve 35 m/dak), dört farklı ilerlemede (0,1, 0,12, 0,14 ve 0,16 mm/dev) ve sabit delme derinliğinde (20 mm) gerçekleştirilmiştir. Frezeleme deneyleri ise AlTiN ve elmas kaplamalı kesici takımla sabit kesme hızında (700 m/dak), sabit ilerlemede (0,20 mm/diş), sabit eksenel kesme derinliğinde (4 mm) ve sabit radyal kesme derinliğinde (8 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonunda en düşük sıcaklık değeri alüminyum alaşımının delinmesinde tespit edilirken, en yüksek sıcaklık değerini titanyum alaşımının frezelemesinde tespit etmişlerdir [26].

Yıldırım ve arkadaşları nikel esaslı Waspaloy süper alaşımını kaplamasız takımlarla MMY kesme koşulunda frezelemişler ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Frezeleme deneylerinde işleme parametresi olarak, dört farklı MMY akış hızı (25, 50, 75 ve 100 mL/saat), dört farklı yağ türü (mineral, sentetik, mineral-sentetik ve bitkisel esaslı), iki farklı nozul mesafesi (25 ve 50 mm), sabit kesme hızı (45 m/dak), sabit ilerleme (0,1 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0,5 mm) seçilmiştir. Araştırmacılar Taguchi L_{16} deney tasarımı kullanılarak gerçekleştirdikleri deneysel çalışma sonucunda, kesme kuvveti ve takım ömrü bakımından en optimum parametreyi bitkisel esaslı yağ, 100 mL/saat akış hızı ve 25 mm nozul mesafesi olarak tespit etmişlerdir [9].

Kılıçkap ve arkadaşları AISI 1045 çelik malzemeyi 8 mm çapında TiN kaplamalı HSS

matkapla kuru, hava ve MMY kesme koşullarında delmişler ve işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerleri üzerine etkilerini genetik algoritma modeli ile optimize etmişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (5, 10 ve 15 m/dak) ve üç farklı ilerleme (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/dev) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda yüzey pürüzlülüğü için optimum parametrelerin, MMY kesme koşulu 10 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme olduğunu tespit etmişlerdir [27].

Sharma ve Sidhu AISI D2 soğuk iş takım çeliği malzemeyi kuru ve MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve kesme koşullarının kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (79, 96 ve 130 m/dak), üç farklı ilerleme (0,05, 0,10 ve 0,16 mm/dev), sabit kesme derinliği (1mm) ve sabit hava basıncı (5 bar) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü açısından MMY kesme koşulunun kuru kesme koşuluna göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir [28].

Costa ve arkadaşları 38Mn56 mikro alaşımlı çelik malzemeyi 10 mm çapında TiAlN kaplamalı HSS matkapla kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarında delmişler ve işleme parametrelerinin çapak yüksekliği ve çapak şekli üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak, iki farklı kesme hızı (45 ve 60 m/dak), sabit ilerleme (0,25 mm/dev), sabit delme derinliği (30 mm) ve sabit MMY akış hızı (30 mL/saat) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda çapak yüksekliği bakımından kuru kesme koşulunun MMY kesme koşuluna göre daha olumlu sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, kuru ve ıslak kesme koşulunda düzgün çapak oluşurken, MMY kesme koşulunda taç ve süreksiz çapak oluştuğunu gözlemlemişlerdir [29].

Yıldırım ve arkadaşları Waspolloy süper alaşım malzemeyi PVD, CVD kaplamalı ve kaplamasız kesici takımla kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarında frezelemişler ve işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Frezeleme deneylerinde işleme parametresi olarak, üç farklı kesme hızı (30, 45 ve 60 m/dak), üç farklı ilerleme (0,1, 0,15 ve 0,2 mm/dev), sabit kesme derinliği (0,5 mm), sabit MMY akış hızı (100 mL/saat) ve sabit basınç (8 bar) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda takım ömrü açısından en uygun işleme parametresinin PVD kaplamalı kesici takım, ıslak kesme koşulu, 30 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme olduğunu tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü açısından en uygun işleme parametresinin PVD kaplamalı kesici takım ıslak kesme koşulu ve 45 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme olduğunu tespit etmişlerdir [30].

MMY ile yapılan soğutma/yağlama koşullarının daha da iyileştirilmesi, termal iletkenliğin artırılarak kesme bölgesinde oluşan ısının azaltılması ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla Nano MMY yöntemi kullanılmaktadır. Nano MMY yönteminde kullanılan nano akışkanlar, baz sıvının içerisine belli oranlarda (hacimce veya ağırlıkça) genellikle 1-100 nm boyutlarında nanopartiküller eklenerek hazırlanmaktadır [31]. Aşağıda Mono Nano MMY ve Hibrid Nano MMY yönteminin kesme koşulu olarak kullanıldığı çalışmalara örnekler verilmektedir.

Bertolini ve arkadaşları Inconel 718 malzemesini PVD yöntemiyle TiAlN kaplamalı kesici takımla MMY ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tornalama deneylerinde lamel yapılı 5 µm genişliğinde, 16 µm uzunluğunda GNP partiküller kullanmışlardır. Nano akışkanlar GNP nano partiküllerinin ağırlıkça %0,1, 0,5, 0,8 oranında kesme yağına eklenmesiyle elde edilmiştir. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak sabit kesme hızı (70 m/dak), sabit ilerleme (0,2 mm/dev) kesme derinliği (0,2 mm) ve iki farklı MMY akış hızı (80 ve130 mL/saat) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda kesici takımda oluşan en düşük aşınma miktarının ağırlıkça %0,8 GNP ilaveli Nano MMY kesme koşulunda ve 130 mL/saat akış hızında elde edildiğini ifade etmişlerdir [32].

Fitrina ve arkadaşları DPSCM 435H malzemeye 11,3 mm çapında kaplamalı karbür matkapla ıslak ve Nano MMY kesme koşulunda delik delmişler ve işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve talaş yapısına etkilerini incelemişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak sabit kesme hızı (72 m/dak), sabit ilerleme (150 mm/dak), sabit delme derinliği (22 mm) ve sabit MMY akış hızı (250 mL/saat) seçilmiştir. Nano akışkan karışımlar 13 nm boyutlarında Al_2O_3 nano partiküllerin, hacimce %1,2 oranında kesme sıvısına eklenmesiyle hazırlanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, yüzey pürüzlülüğü açısından Nano MMY kesme koşulu oldukça iyi performans gösterirken, kesme sıcaklığı ve talaş yapısı açısından ıslak kesme koşulunun daha iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir [33].

Chatha ve arkadaşları, Alüminyum 6063 alaşımını 6 mm çapında HSS matkapla kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında delik delmişler ve kesme koşullarının itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak iki farklı kesme hızı (30 ve 53,7 m/dak), sabit ilerleme (60 mm/dak) ve sabit delme derinliği (20 mm) seçilmiştir. Nano akışkan

karışımlar 20 nm boyutlarında Al_2O_3 nano partiküllerinin hacimce %1,5 oranında bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle hazırlanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, nano akışkanların kesici takım yüzeyinde yağlayıcı film tabakası oluşturarak sürtünmeyi ve aşınmayı azaltması sebebiyle, Nano MMY kesme koşulunun diğer kesme koşullarına göre, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından oldukça iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir [34].

Kim ve arkadaşları; Ti6Al4V malzemeyi 0,5 mm çapında tungsten karbür kesici takımla kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında frezelemişler ve kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş oluşumu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, 35 ve 50 nm boyutunda elmas nano partiküllerin ağırlıkça %1 oranında kesme yağına eklenmesiyle hazırlanmıştır. Mikro frezeleme deneylerinde işleme parametresi olarak üç farklı ilerleme (1, 3 ve 5 mm/diş), sabit kesme derinliği (0,1 mm), sabit akış hızı (10 mL/saat) ve sabit basınç (0,15 MPa) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucuna göre, 35 nm boyutunda Nano MMY kesme koşulunun kuru ve MMY kesme koşuluna göre kesme kuvveti, yüzey kalitesi ve talaş oluşumu açısından önemli iyileşme sağladığını iddia etmişlerdir [35].

Prasad ve Srikant AISI 1040 malzemeyi HSS ve kaplamasız karbür kesici takımlarla kuru, ıslak, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve kesme koşullarının, kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerine etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, 80 nm boyutunda grafit nano partiküllerinin hacimce farklı oranlarda (%0,1, 0,3 ve 0,5) bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle elde edilmiştir. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak sabit kesme hızı (105 m/dak), sabit ilerleme (0,14 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (1 mm) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonuçlarına göre, Nano MMY kesme koşulunun diğer kesme koşullarına göre, kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması değerlerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, nano partikül konstrasyon oranının artmasıyla kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin iyileştiğini iddia etmişlerdir [36].

Şirin ve arkadaşları Inconel X 750 süper alaşım malzemesini seramik kesici takımla kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında frezelemişler ve kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, kesme kuvveti ve takım aşınması üzerine etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, hBN nano partiküllerinin hacimce %0,5 oranında bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle elde edilmiştir. Frezeleme deneylerinde işleme

parametresi olarak üç farklı kesme hızı (500, 600 ve 700 m/dak), üç farklı ilerleme (0,025, 0,05 ve 0,075 mm/dev) ve sabit eksenel kesme derinliği (0,5 mm) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucunda kesme sıcaklığı, kesme kuvveti ve yüzey topografyası bakımından Nano MMY kesme koşulunun kuru ve MMY kesme koşuluna göre önemli iyileşmeler sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü değerinin kuru kesme koşuluna göre MMY kesme koşulunda %39, Nano MMY kesme koşulunda %47,2 oranında azaldığını iddia etmişlerdir [37].

Günan ve arkadaşları Hastelloy C276 süper alaşım malzemesini CVD kaplamalı karbür kesici takımla Nano MMY kesme koşulunda frezelemişler ve kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, 18 nm boyutlarında Al_2O_3 nano partiküllerin hacimce %0,5, 0,1 ve 1,5 oranlarında, bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle hazırlanmıştır. Frezeleme deneylerinde işleme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (60, 75 ve 90 m/dak), üç farklı ilerleme (0,10, 0,15 ve 0,20 mm/dev), sabit akış hızı (100 mL/saat) ve sabit basınç (8 bar) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda kesme hızı ve ilerlemenin artmasıyla takım ömrü değerinde azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, takım ömrü açısından hacimce %1 oranında Al_2O_3 ilaveli Nano MMY kesme koşulunda, %0,5 oranında Al_2O_3 ilaveli Nano MMY kesme koşuluna göre %23 oranında iyileşme olduğunu iddia etmişlerdir [38].

Kıvak ve arkadaşları Ni-Hard malzemeyi PVD kaplamalı seramik kesici takımla kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, Grafen ve MWCNT nano partiküllerin hacimce %0,8 oranında, bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle hazırlanmıştır. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak dört farklı kesme hızı (60, 100, 140 ve 180 m/dak), dört farklı ilerleme (0,04, 0,08, 0,12 ve 0,16 mm/dev), sabit kesme derinliği (1 mm), sabit akış hızı (100 mL/saat) ve sabit basınç (8 bar) seçilmiştir. Araştırmacılar, deneysel çalışma sonucunda kuru kesme koşuluna göre GNP ilaveli Nano MMY kesme koşulunun yüzey pürüzlülüğünü %19,24 oranında azalttığını ifade etmişlerdir. Ek olarak, takım aşınması bakımından kuru kesme koşuluna göre MMY kesme koşulunda %69 oranında azalma olduğunu iddia etmişlerdir [39].

Öndin ve arkadaşları PH 13-8 paslanmaz çelik malzemeyi PVD TiAlN karbür kesici takımla kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve kesme

koşullarının yüzey pürüzlülüğü, yüzey topografyası, kesme sıcaklığı ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, MWCNT nano partiküllerin hacimce %0,6 oranında, bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle hazırlanmıştır. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (120, 180 ve 240 m/dak), üç farklı ilerleme (0,1, 0,15 ve 0,20 mm/dev), sabit akış hızı (80 mL/saat) ve sabit basınç (8 bar) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğünde kuru kesme koşuluna göre MMY kesme koşulunda %5, Nano MMY kesme koşulunda %12 oranında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, takım aşınmasında kuru kesme koşuluna göre MMY kesme koşulunda %40,2, Nano MMY kesme koşulunda %69 oranında oranında azalma olduğunu iddia etmişlerdir [40].

Singh ve arkadaşları, AISI 304 paslanmaz çelik malzemeyi kaplamalı karbür kesici takımla MMY, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve kesme koşullarının kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, 45 nm boyutlarında Al_2O_3 ve 15 nm boyutlarında Al_2O_3 + Grafen nano partiküllerin hacimce %0,25, 0,75 ve 1,25 oranlarında, bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle hazırlanmıştır. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak, üç farklı kesme hızı (60, 90 ve 120 m/dak),üç farklı ilerleme (0,08, 0,12 ve 0,16 mm/dev) ve üç farklı kesme derinliği (0,6, 0,9 ve 1,2 mm) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonunda, Hibrid Nano MMY kesme koşulunun MMY kesme koşuluna göre, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerini önemli ölçüde iyileştirdiğini iddia etmişlerdir [41].

Singh ve arkadaşları, Inconel 625 süper alaşım malzemesini kuru, ıslak ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve kesme koşullarının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bitkisel esaslı yağa ağırlıkça %0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5 oranlarında, 10-15 nm çapında 1-5 μm uzunluğunda MWCNT eklenerek nano akışkan karışımlar elde edilmiştir. Araştırmacılar, elde ettikleri nano akışkanlarla yaptıkları ön deneylerde en uygun karışım oranının %1 olduğunu tespit etmişlerdir. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak, beş farklı kesme hızı (16,48, 25, 37,5, 50 ve 58,52 m/dak), beş farklı ilerleme (0,05, 0,07, 0,1, 0,13 ve 0,15 mm/dev) ve beş farklı kesme derinliği (0,13, 0,2, 0,3, 0,4 ve 0,47 mm) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucunda, Nano MMY kesme koşulunun kuru ve ıslak kesme koşuluna göre takım aşınması değerini sırasıyla %18,17 ve 4,54 oranında azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, Nano MMY kesme koşulunun, kuru ve ıslak kesme koşullarına göre yüzey

kalitesini sırasıyla %15,58 ve %5,48 oranında iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [42].

Talib ve Rahim 1213 karbon çeliği malzemeye M6 kılavuzla Nano MMY kesme koşulunda diş açma işlemi uygulamışlar ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve moment üzerine etkilerini incelemişlerdir. Hint fıstığı yağı içerisine ağırlıkça (%0, 0,05, 0,1 ve 0,5) oranlarında hBN nano partikülleri ekleyerek nano akışkan karışımlar elde edilmiştir. Deneylerde işleme parametresi olarak sabit devir (400 dev/dak), sabit ilerleme (1 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (12 mm) değerleri seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucuna göre, kesme kuvveti ve moment açısından ağırlıkça %0,05 hBN katkılı Nano MMY kesme koşulunun en uygun kesme koşulu olduğunu iddia etmişlerdir [43].

Yıldırım ve arkadaşları, Inconel 625 süper alaşımını kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve işleme parametrelerinin kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, bitkisel esaslı yağ içerisine hacimce %0,5 ve 1 oranında ve 70 nm boyutlarında hBN nano partiküllerin eklenmesiyle elde edilmiştir. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak, dört farklı kesme hızı (40, 60, 80 ve 100 m/dak), dört farklı ilerleme (0,075, 0,100, 0,125 ve 0,150 mm/dev), sabit kesme derinliği (0,8 mm), sabit MMY akış hızı (50 mL/saat) ve sabit basınç (8 bar) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonuçlarına göre, takım ömrü, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü bakımından hacimce %0,5 hBN katkılı Nano MMY kesme koşulunun diğer kesme koşullarına göre daha iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir. Ayrıca, kesme sıcaklığına göre hacimce %1 hBN katkılı Nano MMY kesme koşulunun daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir [44].

Talib ve Rahim başka bir çalışmada, AISI 1045 çeliğini, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, hint fıstığı yağına ağırlıkça %0,05, 0,1 ve 0,5 oranında hBN nano partiküllerin eklenmesiyle elde edilmiştir. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak, sabit kesme hızı (300 m/dak), sabit ilerleme (0,02 mm/dev), sabit kesme derinliği (1 mm), sabit MMY akış hızı (0,16 L/saat) ve sabit basınç (0,4 MPa) seçilmiştir. Hint fıstığı yağına eklenen hBN nano partikül konsantrasyon oranının artmasıyla, tribolojik özelliklerde iyileşmenin olduğunu söylemişlerdir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre, ağırlıkça %0,05 hBN Nano MMY kesme koşulunun kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlüğü, takım aşınması ve takım ömründe diğer kesme koşullarına göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir [45].

Musavi ve arkadaşları A286 süper alaşım malzemesini, ıslak, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş formu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, kesme yağına hacimce %0,1, 0,4, 0,7 ve 1 oranında 40 nm çapında Cuo ve 20 nm çapında SiO_2 partiküllerin eklenmesiyle hazırlanmıştır. Ayrıca stabil bir karışım elde etme adına karışıma nano partikül ağırlığının 1/10 oranında SDS yüzey aktif maddesi eklenmiştir. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak, üç farklı kesme hızı (45, 70 ve 95 m/dak), üç farklı ilerleme (0,12, 0,22 ve 0,32 mm/dev), sabit kesme derinliği (1 mm), sabit MMY akış hızı (150 cm^3/saat) ve sabit basınç (600 kPa) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucunda, yüzey aktif madde kullanılan Nano MMY kesme koşulunun yüzey aktif madde kullanılmayan kesme koşuluna oranla yüzey kalitesini %4 ~ 14 oranında iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, küresel yapısından dolayı daha iyi yağlayıcılık özelliği gösteren Cuo Nano MMY kesme koşulunun diğer kesme koşullarına göre yüzey kalitesi açısından daha iyi sonuçlar verdiğini iddia etmişlerdir [46].

Hegab ve arkadaşları, Inconel 718 süper alaşım malzemesini MMY ve Nano MMY kesme koşullarında tornalamışlar ve işleme parametrelerinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, kesme yağına ağırlıkça %2 ve %4 oranında 13-20 nm çapında 10-30 μm uzunluğunda MWCNT ve 20 nm boyutlarında Al_2O_3 nano partiküller ve 0,2 gr SDS yüzey aktif madde eklenmesiyle elde edilmiştir. Tornalama deneylerinde işleme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (40, 50 ve 60 m/dak), üç farklı ilerleme (0,2, 0,3 ve 0,4 mm/dev), sabit kesme derinliği (0,2 mm), sabit MMY akış hızı (40 mL/saat) ve sabit basınç (0,5 MPa) seçilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, takım aşınması bakımından Nano MMY kesme koşulunun MMY kesme koşulundan daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Nano MMY kesme koşullarından MWCNT ilaveli Nano MMY kesme koşulunun, Al_2O_3 ilaveli Nano MMY kesme koşulundan daha iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir [47].

Şirin ve Kıvak Inconel X-750 süper alaşım malzemesini TiAlN kaplamalı kesici takımla, kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında frezelemişler ve kesme koşullarının kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, hBN, Grafit ve MoS_2 (80 nm boyutunda) nano partiküllerin farklı oranlarda (hacimce %0,25, 0,50, 0,75 ve 1) bitkisel esaslı yağa karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Frezeleme deneylerinde işleme parametresi olarak, sabit kesme hızı (45 m/dak), sabit ilerleme (0,1 mm/dev), sabit

eksenel kesme derinliği (0,5 mm), sabit radyal kesme derinliği (15 mm), sabit MMY akış hızı (50 mL/saat) ve sabit basınç (8 bar) seçilmiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucunda tüm nano akışkanlar için optimum konsantrasyon oranının hacimce %0,50 olduğunu ifade etmişlerdir. İşleme performansı bakımından hBN katkılı Nano MMY kesme koşulunun diğer kesme koşullarına göre önemli derecede iyileşme sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ömrü bakımından en iyi sonuçların hacimce %50 hBN katkılı nano akışkan ile elde edilirken, kesme sıcaklığı bakımından en iyi sonuçların hacimce %0,25 MoS_2 katkılı nano akışkan ile elde edildiğini belirtmişlerdir [12].

Pal ve arkadaşları AISI 321 malzemeyi MMY ve Nano MMY kesme koşullarında delmişler ve kesme koşullarının itme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, Grafen nano partiküllerin farklı oranlarda (ağırlıkça %0,5, 0,1 ve 1,5) bitkisel esaslı yağa karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Delme deneylerinde işleme parametresi olarak sabit kesme hızı (7,91 m/dak), sabit ilerleme (0,125 mm/dev), sabit delme derinliği (30 mm), sabit MMY akış hızı (120 mL/saat) ve sabit basınç (6 bar) seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucuna göre 30 delik sonunda ağırlıkça %1,5 GNP ilaveli Nano MMY kesme koşulunun, MMY kesme koşuluna göre itme kuvvetini %27,4, momenti %64,9 oranında ve yüzey pürüzlülüğünü %33,8 oranında iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [48].

2.3. LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ

Literatürde araştırılan soğutma/yağlama yöntemleri;

- Kuru,
- Konvansiyonel (Islak),
- Minimum Miktarda Yağlama (MMY),
- Mono Nano partikül katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Mono Nano MMY),
- Hibrid Nano partikül katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Hibrid Nano MMY) şeklinde sıralanabilir.

Literatürde incelenen çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler maddeler halinde verilmektedir.

- Hastelloy X süper alaşımının delinebilirliği üzerine kapsamlı herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmüştür.
- MMY kesme koşulları, kesme sıvısının basınçlı hava ile karıştırılarak aerosol sis buharı şeklinde kesme bölgesine gönderildiği bir soğutma/yağlama yöntemidir.
- MMY kesme koşulları kuru kesme koşullarına göre itme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması bakımından daha iyi performans göstermiştir.
- Nano MMY kesme koşulları, MMY kesme koşullarının işleme performansının iyileştirilmesi için kesme sıvılarının içine 1-100 nm boyutunda nano partiküller eklenmesiyle oluşturulmuştur.
- Nano MMY kesme koşulları, itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve takım ömründe kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarına göre daha iyi performans göstermiştir.
- Yüzey aktif madde eklenen nano akışkanlar işleme performansı açısından daha etkili sonuçlar göstermiştir.
- Hibrid nano akışkan karışımlar, kesme sıvısına en az iki nano partikülün eklenmesiyle elde edilmiştir.
- Hibrid nano akışkanların, tek nano partikül eklenerek hazırlanan mono nano akışkan karışımlara göre, tribolojik performansları daha iyi çıkmıştır.
- Hibrid Nano MMY koşulları, MMY ve Mono Nano MMY koşullarına göre, kesme sıcaklığı, itme kuvveti ve takım aşınmasında daha iyi sonuçlar vermiştir.

Literatürdeki çalışmalar irdelendiğinde, özellikle hibrid kesme koşullarının kullanıldığı çalışmalarının sayısının oldukça az olduğu tespit edilmiştir. Mono ve hibrid nano akışkanların derinlemesine incelendiği işlenebilirlik çalışmalarının ise yetersiz kaldığı görülmüştür. Ayrıca yüzey aktif madde eklenmesiyle nano akışkanların tribolojik performansı üzerinde etkilerinin yeterli düzeyde irdelenmediği de anlaşılmıştır. Hastelloy X süper alaşımının delinmesi üzerine ise henüz kapsamlı bir çalışmanın yapılmadığı gözlemlenmiştir.

Yapılan bu çalışmayla Hastelloy X süper alaşım malzemesi delinerek kesme parametrelerinin kuru, MMY, Mono Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşulları

üzerine etkileri incelenmiştir. Yüzey aktif madde eklenen nano akışkanların işleme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların özellikle nikel esaslı süper alaşımların işlenebilirliği hakkında genel olarak yol gösterici olacağı düşünülmektedir. Özellikle milli servetimiz olan bor mineralinin soğutma/yağlama alanında kullanımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, soğutma/yağlama yöntemi ve kesme parametrelerinin, itme kuvvetleri, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, delik kalitesi, takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkileri değerlendirilecektir.

3. SÜPER ALAŞIM MALZEMELER

Süper alaşımlar, ilk olarak 1950-1970 arasında östenitik paslanmaz çelikten faydalanılarak geliştirilmiştir. Teknolojinin gelişmesine paralel bir şekilde farklı malzemeler bir araya getirilerek daha üstün mekanik özellikler kazandırılmıştır. Geliştirilen süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda yüksek performans gerektiren uçak, gemi, roket tahrik sistemleri, petro kimya, nükleer reaktörler, turbo şarj motorları, türbin motorları ve denizaltı uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [49], [50], [51].

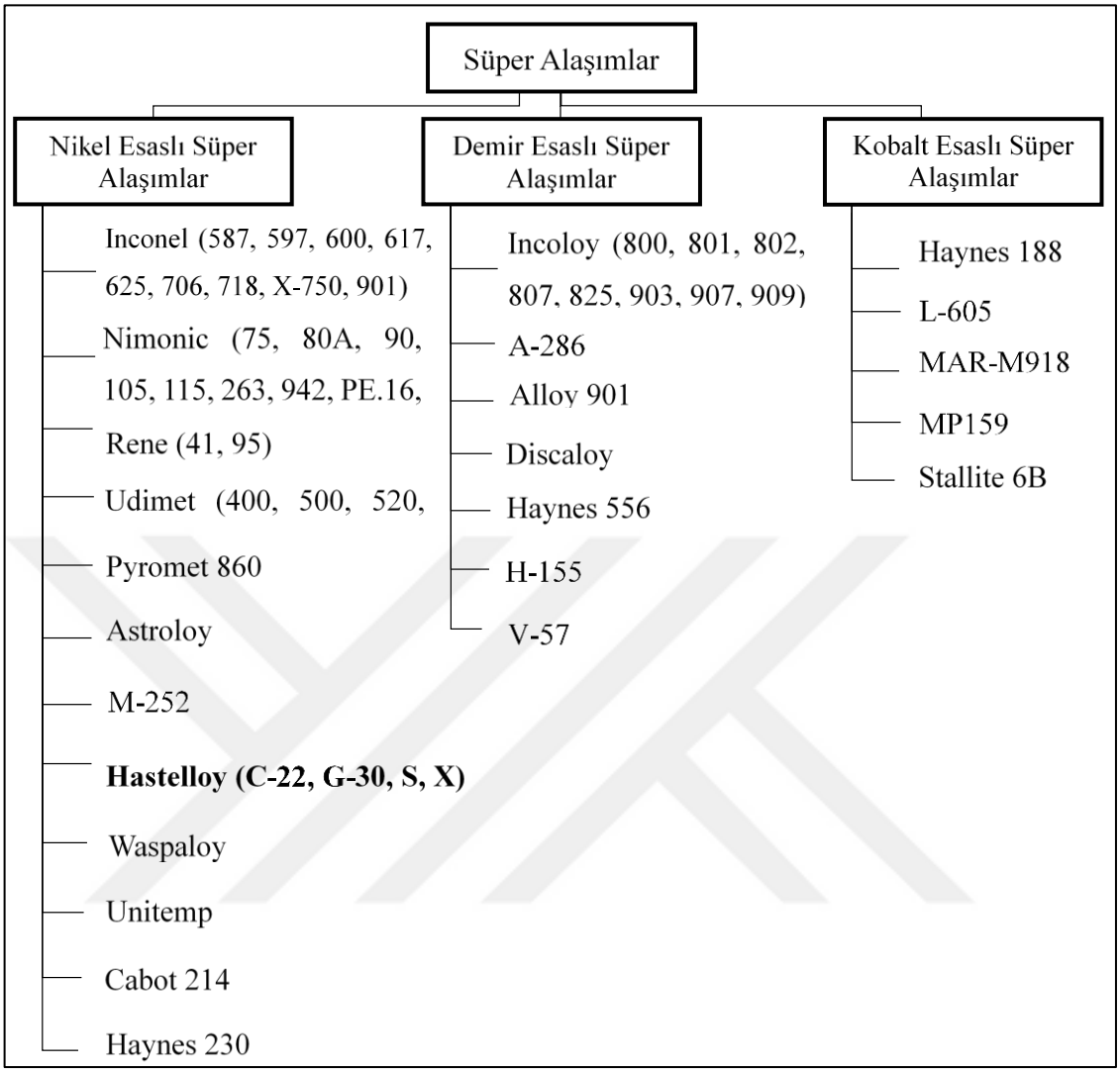
Süper alaşımların en önemli özellikleri; 650 °C'nin üstündeki sıcaklıklara uzun süre dayanmaları ve sıcaklığa bağlı olarak oluşan korozyon dayanımlarıdır [52]. Yüksek özgül mukavemet, yüksek elastikiyet modülü, yüksek aşınma dayanımı özellikleri ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıkta bile muhafaza edebilmeleri süper alaşım malzemelerini metal ve metal alaşımlarından daha üstün yapmaktadır [53].

Süper alaşımlar, yapılarındaki östenit fazının yüzey merkezli kübik kristal yapıda bulunmasından dolayı ve aynı zamanda yapılarında çökelti ile sertleştirme görevi gören fazlar bulundurmaları sebebiyle de yüksek dayanım özelliği gösterirler [54].

3.1. SÜPER ALAŞIMLARIN SINIFLANDIRILMASI

Süper alaşımlar, diğer alaşımlardan farklı olarak yüksek sıcaklıklarda şiddetli mekanik gerilmelere ve yüzey yapısı değişimlerine karşı üretilmiş ısıl direnci yüksek, demir (Fe), nikel (Ni) ya da kobalt (Co) esaslı alaşımlardır [55]. Süper alaşımların sınıflandırılması Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Ni, Fe ve Co esaslı süper alaşımlar östenitik yüzey merkezli kübik bir yapı gösterirler ve alaşımının esasını oluşturan baskın element oranına göre sınıflandırılırlar. Süper alaşımlar türünü belirleyen yukarıda üç elementin yanında krom (Cr), wolfram (W), molibden (Mo), niyobyum (Nb) ve tantalyum (Ta) gibi mikro yapıyı etkiyen elementleri de içerir [56]. Çizelge 3.1'de süper alaşımların sınıflandırılması verilmiştir.

Çizelge 3.1. Süper alaşımların sınıflandırılması [1].



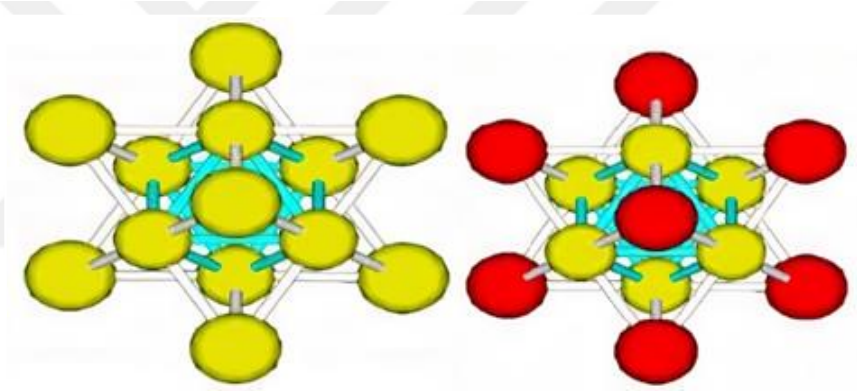
3.1.1. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Ni; ergime sıcaklığı 1453 °C ve yoğunluğu 8,9 gr/cm^3 elementtir. Ni esaslı süper alaşımların yapısında, %50 ~ 70 oranında Ni bulundurmaktadır. Ana alaşım elementi olan Ni'nin başlıca özellikleri, YMK yapıda östenitik Ni matrisin yüksek faz kararlılığı ve alaşımlandırılma yeteneğinin olmasıdır. Bunun dışında Ni yüzey kararlılığı ve oksidasyon direnci Cr ve alüminyum (Al) ilavesi ile geliştirilmiştir [54]. Ni esaslı süper alaşımlara çökelme sertleşmesi işlemi uygulanabilir [57].

Ni esaslı süper alaşımlar, özellikle > 650 °C sıcaklıklarda, mekanik dayanım açısından paslanmaz çeliklerden daha üstündür [58]. Yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti ve korozyon direnci çok yüksektir. Ni esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklıklarda korozyona, mekanik ve termal yorulmalara, mekanik ve termal şoklara, sürünmeye ve

aşınmaya dayanıklı olmaları, ağır şartlarda tercih edilmelerini sağlar [51].

Inconel, Nimonic ve Hastelloy gibi Ni esaslı süper alaşımlarda Fe içeriği küçük oranlardan yaklaşık %35'e kadar değişen oranlarda bulunur. Birçok Ni esaslı alaşım, dayanım veya korozyon direncini arttırmak için küçük miktarlarda Al, titanyum (Ti), Nb, Mo ve W içerir. Ni ve Cr ilavesi, bu alaşımlara önemli derecede oksidasyon dayanımı kazandırır [59]. Ni esaslı süper alaşımlar, ana matrisi oluşturan yüksek orandaki Ni ile kararlı bir içyapı ve indirgeyici ortamlarda da korozyon dayanımı kazanırlar. Ni esaslı süper alaşımlarda alüminyum ve titanyum elementlerinin toplam miktarı atomik olarak %10'u geçmez. Bu alaşım elementleri, gama (γ) ve asal gama (γ') olarak adlandırılan iki fazlı bir içyapı oluştururlar. γ' fazı malzemeye yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve üstün sünme dayanımı kazandırmaktadır. Şekil 3.1'de γ ve γ' fazlarının kafes yapıları verilmiştir. Şekil 3.1'de yer alan sarı atomlar nikeli, kırmızı atomlar alüminyum veya titanyumu belirtmektedir.



a) b)

Şekil 3.1. Kafes yapıları a) γ fazı b) γ' fazı.

Genellikle metallerin çekme dayanımı ve akma sınırı gibi mukavemet değerleri artan sıcaklık ile azalmaktadır. Bunun nedeni; sıcaklığın artmasıyla oluşan ısıl aktivasyon enerjisinin dislokasyonların engelleri aşmasını daha kolaylaştırmasıdır. Ni esaslı süper alaşımlarda ise, içerdiği intermetalik γ' fazı nedeniyle sıcaklığa karşı dayanımları daha fazladır. Ni esaslı alaşımlarda çekme dayanımı ve akma sınırı gibi mukavemet değerleri 600 °C'yi geçtikten sonra azalmaya başlar [60].

Ni esaslı alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda çalışan uçak parçalarında, kimyasal fabrika donatımı ve kimyasal donanımlar gibi çeşitli yerlerde kullanılmaktadır. Ni esaslı süper alaşımların kullanıldığı yerler;

• Uçak ve endüstriyel gaz türbinlerinde,

• Roket motorları,

• Buhar türbinli güç tesisleri,

• Gaz türbinleri,

• Tıbbi uygulamalar,

• Uzay araçları,

• Nükleer reaktörler,

• Kimyasal çalışma alanları şeklindedir [50], [59].

Ticari olarak Ni esaslı süper alaşımların sınıflandırılması aşağıdaki gibidir [49].

Çizelge 3.2. Ticari olarak Ni esaslı süper alaşımlar.

Inconel (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750, 901)
Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.11, PE.16, PK.33)
Rene (41, 95)
Udimet (409, 500, 520, 630, 700, 710, 720)
Pyromet(860)
Hastelloy (**X**, S, C22, G)
Waspaloy
Haynes (230)
Cabit (214)
M-252
Unitemp AF2-IDA6

Endüstride geniş bir kullanım alanı bulunan olan bu alaşımların sahip olduğu özellikler;

• Yüksek ısıl gerilim,

• Yüksek sertlik,

• Yüksek kesme kuvvetine gerek duyan işleme gerilmesi ve yüksek pekleşme,

• Yüksek ısılara sebebiyet veren düşük termal iletkenlik,

• Yüksek oranda aşındırıcı karbür zerreciklerinin varlığı,

• Takım üzerine kaynama eğilimi ve yığıntı talaş (BUE) oluşumu şeklinde sıralanabilir [61], [62].

3.1.2. Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Ana element olarak Fe'nin yanında önemli miktarda Cr, Ni ve çok az miktarda da Mo

veya W içeren alaşımlar Fe esaslı alaşımlardır. Bu grup alaşımlar karbür, intermetalik çökelme veya katı-eriyik ile mukavemetlendirilir. İntermetalik çökelti genellikle γ' Ni_3 (Al, Ti) fazıdır. Bu grubun Ni, Cr oranları ve mukavemetlendirme mekanizmaları, paslanmaz çeliklerden farklıdır. Paslanmaz çelikler %12 ~ 25 Cr ve %0 ~ 20 Ni içerirken, Fe esaslı süper alaşımlar ise %25 ~ 35 arasında Ni içermektedir. İçeriğinde yüksek oranda Fe içeren birçok süper alaşım olmasına rağmen, hepsi Fe esaslı süper alaşım grubunda değildir. Çünkü bu süper alaşımlar Fe, Ni, Cr, Co, az miktarda Mo, W ve Nb gibi elementlerin karmaşık kombinasyonlarıdır. Bu duruma örnek verecek olursak, katı-eriyik dayanımlı %16 Fe ve %49 Ni içeren Hastelloy X ile γ" mukavemetlenen %18,5 Fe ve %52,5 Ni içeren Inconel 718 alaşımları verilebilir. Bu alaşımlar, Fe içeren Ni esaslı süper alaşımlardır. γ' mukavemetlenen Inconel 901 süper alaşımı, %42,5 Ni ve %36 Fe içeren ni esaslı veya karmaşık Fe-Ni-Cr esaslı bir süper alaşımdır. Bu alaşım yüksek dayanımına ek olarak, sürekli düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Karmaşık bileşimli katı-eriyik dayanımlı alaşıma örnek olarak Multimet (N-155) alaşımı da verilebilir. Bu alaşım %21 Cr, %20 Ni, %20 Co, %32,5 Fe, %3 Mo, %2,5 W ve %1 Nb içermektedir [58].

Malzemenin mekanik özelliğinin belirlenmesinde yüzey merkezli kübik kafes yapısına sahip matriste alaşım elementlerine bağlı olarak çökelen fazlar etkin rol oynarlar. Fe esaslı süper alaşımlar ve katı solüsyon takviyeli alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri düşük dayanım özelliğinden dolayı süper alaşımların en zayıflarıdır. Ancak Fe esaslı süper alaşımların en büyük avantajı fiyatının diğer süper alaşımlara oranla daha ekonomik olmasıdır [53], [63], [64].

3.1.3. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar

Co esaslı süper alaşımlar, ana element olarak Co içermektedir. Co yanında önemli miktarda Ni, Cr, W az miktarda Mo, Nb, Ta, Ti ve bazen Fe gibi elementler de bileşime ilave edilmektedir. Ortalama 1175 °C'lere kadar mükemmel oksidasyon direnci ve yüksek mukavemete sahiptirler. Co esaslı süper alaşımlar, katı eriyik ve karbür fazları tarafından mukavemetlendirilir [53], [58], [65]. Karbür fazlarına bağlı olarak %0,4 ila %0,85 karbon (C) içerirler. Oluşan karbürler Co esaslı malzemelerin dayanımını artırmaktadır. Bu nedenle malzeme içerisindeki C miktarı oldukça yüksektir [66].

Co esaslı süper alaşımlar genellikle gaz türbinlerinde yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerde, nükleer reaktör parçalarında, cerrahi implantlarda, tutuşturuculardа, buhar türbinlerinde, statik kanat uygulamalarında, geçiş kanallarında ve fırın parçalarında

kullanılmaktadır [64], [66].

Fiyatlarının yüksek olmasına rağmen son yıllarda Co esaslı süper alaşımların başlıca tercih edilme nedenleri şunlardır;

- Ergime sıcaklığının yüksek olması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda, Fe ve Ni esaslı süper alaşımlara kıyasla daha yüksek dayanım gösterirler,
- Bileşimlerindeki yüksek Cr ilavesiyle mükemmel sıcak korozyon dirençleri fazla olduğu için gaz türbinleri için uygun malzemelerdir,
- Termal yorulma dirençleri Ni esaslı süper alaşımlara göre çok daha iyidir,
- Özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan ve dönen parçalarda kullanılmaktadırlar,
- Kaynak edilebilme özelliğine sahiptirler [53], [57].

3.2. SÜPER ALAŞIMLARIN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

1940'larda süper alaşımlar dövme yöntemi ile üretilmekteyken, 1950'lerin ortasında dövme ile üretilen süper alaşımlar zamanla geçtikçe eş eksenli döküm yapıları olarak üretilmeye başlanmıştır. Tane yapılarından ötürü yüksek sıcaklıkta sürünme dayanımı sınırlı olduğundan kullanım sıcaklıkları 1000 $^{\circ}$C'nin altındadır. Döküm teknolojisindeki gelişmeler ile yönlü katılaştırma ve tek kristal üretimi gibi yöntemler ile süper alaşımların kullanım ömrü ve kullanım sıcaklıkları 1000 $^{\circ}$C'nin üzerine çıkarılmıştır. Alaşımlardan beklenen oksidasyon direnci, sürünme ömrü ve mikro yapısal kararlılık için kontrollü atmosferde döküm şartları oluşturulmuştur [54].

Bitmiş ürün elde etmek için kullanılacak üretim yöntemi parçaların mekanik özelliklerini etkilemektedir. Döküm veya dövme yöntemiyle üretilen süper alaşım malzemeler arasında farklar bulunmaktadır.

Dövme alaşımlar, başlangıçta döküm kaba kütüklerden oluşan ve sonrasında şekillendirilebilmesi için ısıtılarak deformasyona uğratılan alaşımlardır. Dövme alaşımlar, döküm alaşımların katılaşma esnasında karşılaştığı ayrışma olayına uğramadıkları için daha özdeş bir yapıya sahiptir. Döküm süper alaşımlar kaba tane yapısına sahiptir ve sürünme ve kopma özellikleri daha iyidir. Dövme süper alaşımlar ise ince tane yapısına sahiptir ve çekme ve yorulma özellikleri daha iyidir. Dövme süper alaşımlar döküm süper alaşımlara göre daha sünektir. Bu nedenle en iyi süneklik değerleri ikincil işlemler ile elde edilir [54]. Dövme süper alaşımların çoğu, Cr elementi bakımından zengin olduğu için yüksek korozyon direncine sahiptirler. Dökme süper

alaşımlarda ise, başlangıçta Cr miktarı fazlayken sonraları süper alaşımların yüksek sıcaklık dayanımını arttıran diğer alaşım elementlerinin ilavesi sebebiyle azalmıştır [67].

Dövme süper alaşımların bileşimleri, döküm süper alaşımların bileşimleriyle karşılaştırıldığında, çeşitli farklılıklar görülür. Dövme süper alaşımlarda fazı sertleştirme amacıyla kullanılan Al ve Ti elementleri ilavesi düşük oranlarda yapılırken, Renyum (Re) ile Ta elementleri kullanılmaz. Bazı durumlarda önemli miktarda Fe ve bir miktar Nb ilave edilir ve Cr içeriği ise döküm süper alaşımlardan genellikle en az %15 daha fazladır [51].

Çizelge 3.3'te süper alaşımlara ilave edilen alaşım elementlerinin, malzeme özelliklerine etkileri verilmiştir.

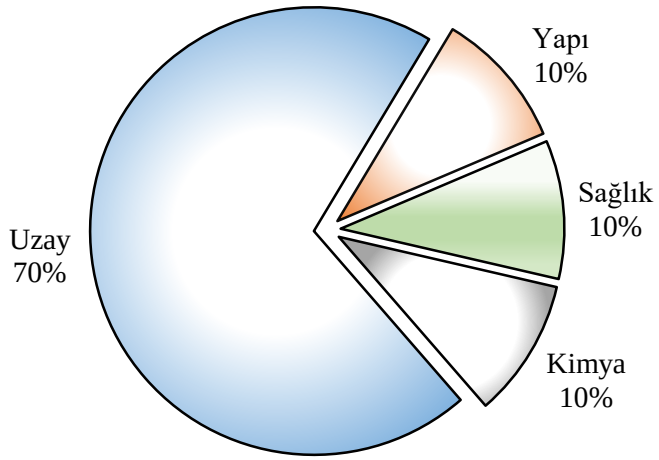
Çizelge 3.3. Alaşım elementlerinin süper alaşımlar üzerindeki etkileri [67].

Element Etkileri	**Fe Esaslı**	**Co Esaslı**	**Ni Esaslı**
Katı çözelti mukavemetlendirici	Cr, Mo	Nb, Cr, Mo, Ni, W, Ta	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
YMK matris stabilize edici	C, W, Ni	Ni	-
MC tipi karbür oluşturucu	Ti	Ti, Ta, Nb	W, Ta, Ti, Mo, Nb
M_7C_3 tipi karbür oluşturucu	-	Cr	Cr
$M_{23}C_6$ tipi karbür oluşturucu	Cr	Cr	Cr, Mo, W
M_6C tipi karbür oluşturucu	Mo	Mo, W	Mo, W
M (CN) tipi karbür oluşturucu	C, N	C, N	C, N
γ' –Ni_3 (Al, T) oluşturucu	Al, Ti, Ni	-	Al, T,
Hegzagonal η (Ni_3Ti) oluşumunu geciktirici	Al, Zr	-	Al, Ti
γ' fazının çözünme sıcaklığı yükseltici	-	-	Co
γ' fazının çözünme sıcaklığını düşürücü	-	-	Cr
γ' irileşmesini geciktirici	-	-	Re
Sertleştirici çökeltiler ve/veya arametaller	Al, Ti, Nb	Al, Mo, W, Ta, Ti	Al, Ti, Nb
γ" (Ni_3Nb) oluşturucu	-	-	Nb
Oksitlenme direnci artırıcı	Cr	Al, Cr	Al, Cr
Sıcak korozyon direnci geliştirici	La, Y	La, Y, Th	La, Th
Sülfidasyon direnci artırıcı	Cr	Cr	Cr
Kopma sünekliğini artırıcı	B	B, Zr	B, Zr
Tane sınırı segregasyonu neden olucu	-	-	B, C, Zr
İşlenebilirlik artırıcı	-	Ni3Ti	-
Ara sıcaklık sünekliği geliştirici	-	-	Hf
Karbürlerin genel çökelticileri	P	-	-

3.3. SÜPER ALAŞIMLARIN UYGULAMA ALANLARI

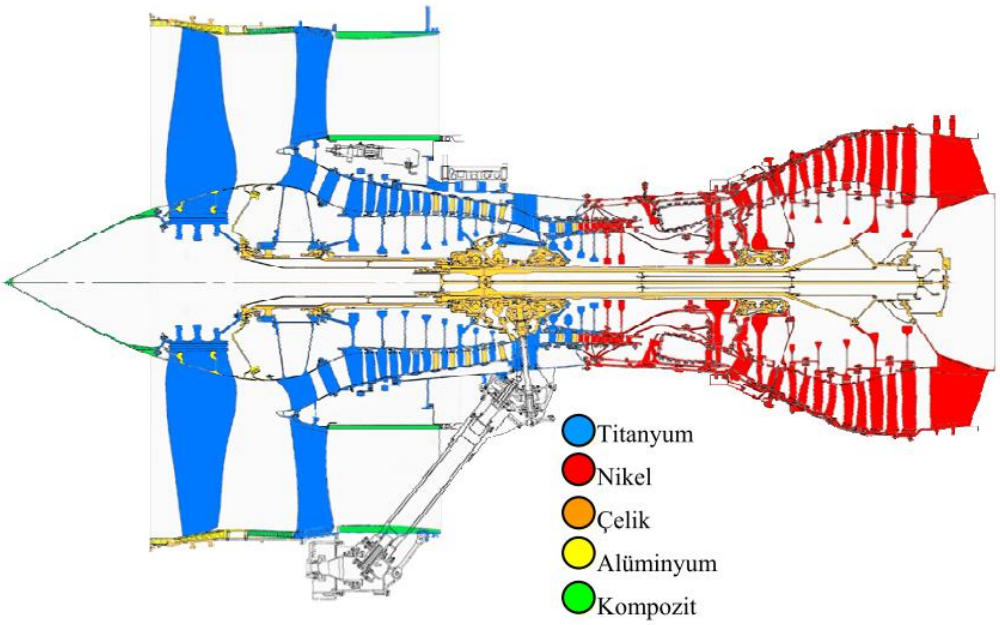
Süper alaşımlar, Ni, Fe ve Co esaslı alaşımlar olup, yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri mekanik özellikleri ve metalürjik kararlılıkları sayesinde son yıllarda geniş kullanımı olan malzeme grubu olarak bilinmektedirler [68]. Süper alaşımlar, yüksek mukavemeti ve yapısal kararlılığı nedeniyle yüksek çalışma sıcaklıklarının oluştuğu havacılık sanayi ve nükleer enerji santrallerinde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük ısıl genleşme, elektriksel direnç ve termal şoklara gösterdiği direnç gibi özelliklerden dolayı geniş endüstriyel alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Süper alaşımlar, artan bilgi ve teknoloji sayesinde günümüzde 80'den fazla çeşittedirler [69]. Şekil 3.2'de süper alaşımlara ait kullanım alanları yüzde olarak verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere süper alaşımların en yaygın kullanımı uzay endüstrisindedir [70].



Şekil 3.2. Süper alaşımların uygulama alanları.

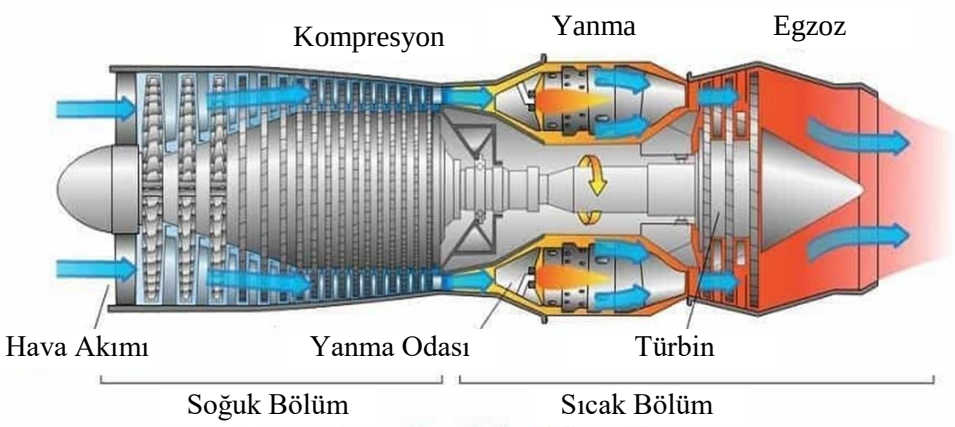
Ni esaslı süper alaşımlar sahip oldukları çok iyi korozyon ve oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda kırılma ve sürünme dayanım özellikleri sayesinde özellikle uçak motorlarının ağırlık olarak %50'sini oluşturmaktadır. Şekil 3.3'te Ni esaslı alaşımların uçak motorlarında kullanıldığı yerler gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Nikel esaslı süper alaşımların uçak motorlarında kullanıldığı yerler.

Süper alaşımların genel kullanım alanları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

- Uçak/endüstriyel gaz türbin parçaları (Şekil 3.4); diskler, civatalar, şaftlar, uçak pervaneleri, kanatçıklar, yakma hücreleri, geri iticiler,
- Buhar türbini parçaları: civatalar, pervaneler, baca gazı ilave ısıtıcıları,
- Otomotiv parçaları: turbo kompresörler, egzoz valfleri,
- Metal işleme malzemeleri: yüksek sıcaklığa dayanıklı iş takımları ve kalıpları, döküm kalıpları,
- Medikal ekipmanlarda: dişçilikte, protez cihazlarda,
- Uzay araçlarında: aerodinamik olarak ısıltılmış yüzeylerde, roket motor parçalarında,
- Isıl işlem ekipmanlarında: bağlama aparatları, taşıma bantları,
- Nükleer güç sistemlerinde: kontrol çubuğu sürme mekanizmaları, supaplarda,
- Kimya ve petrokimya endüstrilerde: civatalarda, valflerde, reaksiyon kazanlarında, borularda, pompalarda [54].



Şekil 3.4. Gaz türbinli motora ait bölümler.

3.4. NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ

Süper alaşımlar, yapısında Fe, Ni, Co, ilave olarak yüksek miktarlarda Cr ve az miktarda da yüksek sıcaklıkta ergiyen Mo, W, Al ve Ti içeren alaşımları barındırdığından işlenebilirlik açısından zor malzemeler gurubundadırlar [71]. Ni esaslı malzeme grubunun işlenebilirliğinin çok zor olması, üretim maliyetlerini ciddi oranda artırmaktadır. Ni esaslı malzemelerin şekillendirilmesi esnasında zorluk yaşansa da, 700-800 °C'ler gibi yüksek sıcaklıklarda bile korozyona ve aşınmaya karşı inanılmaz bir dayanım göstermesi, bu malzeme grubunu tercih sebebi yapmaktadır [49], [70]. Diğer Ni esaslı süper alaşım malzemelerde olduğu gibi, Hastelloy X'in şekillendirilmesi esnasında da mekanik ve termal yüklerin çok fazla olması nedeniyle, kesici takımlarda çok yüksek oranlarda aşınmalar meydana gelmektedir. Kesici takım aşınmasının hızlı olması nedeniyle takım ömrü azalmakta ve takım değişimi çok kısa sürelerde yapılmaktadır. Takım değişim süreleri kısa tutulmazsa, hızlı aşınmalar sonucunda takımda kırılmalar olmakta ve bu durum iş parçası ve takım tezgâhına da olası zararlar verebilmektedir [72].

3.5. SÜPER ALAŞIM HASTELLOY X

Ni esaslı süper alaşımlardan, Hastelloy X alaşımı 1200 °C'ye kadar yüksek oksidasyon direnci, yüksek sıcaklık mukavemeti ve düşük işlenebilirlik özelliklerini bir arada bulunduran bir malzemedir. Gaz türbin motorlarının kanal geçiş parçalarında, alev tüpünün gömlek parçalarında, yanma enjektör parçalarında ve son yakıcılarda alev tutucu parçalarında, egzoz borularında ve kabin ısıtıcılarında kullanılmaktadır. Ayrıca endüstriyel fırınlarda kullanılması tavsiye edilmektedir. Çünkü Hastelloy X süper alaşımı

oksitleyici, indirgenmiş ve nötr atmosferlere karşı çok dirençlidir. Hastelloy X alaşımı, susturucu, katalizör destek ızgaraları, fırın yönlendirme plakaları ve hızlı kurutucu bileşenleri için kimyasal işleme endüstrisinde de kullanılmaktadır [13], [16], [73]. Hastelloy X'in içeriğinde bulunan özellikle Ni, Co, Cr, Ti gibi elementler işlenebilirliğini zorlaştırmaktadır [3].

Hastelloy X alaşımı, 16000 saat 650, 760 ve 870 °C sıcaklıklara uzun süre maruz kaldıktan sonra dahi iyi süneklik göstermektedir. Hastelloy X alaşımı mükemmel şekil alma ve kaynak edilebilme özelliklerine sahiptir. Tüm parçayı istenilen sıcaklığa getirmek için yeterli bir süre boyunca 1177 °C'de tutulması şartıyla, dövme veya başka şekilde sıcak işlenebilir. İyi sünekliğinin bir sonucu olarak, Hastelloy X alaşımına soğuk şekillendirme ile şekil verilebilir. Bütün sıcak veya soğuk şekil verilmiş malzemeler, en iyi özelliklerin sağlanması için tavlanarak hızla soğutulmalıdır [73].

Deneylerde kullanılacak, Ni esaslı Hastelloy X süper alaşımına ait kimyasal bileşim, Çizelge 3.4'te ve fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.5'te yer almaktadır.

Çizelge 3.4. Hastelloy X süper alaşımının kimyasal bileşimi.

Element Adı	**Sembol**	**Alaşımdaki Miktarı (%)**
Nikel	Ni	46,7
Krom	Cr	22,6
Demir	Fe	18,72
Molibden	Mo	8,98
Titanyum	Ti	0,02
Alüminyum	Al	0,14
Mangan	Mn	0,51
Silisyum	Si	0,30
Karbon	C	0,05
Bakır	Cu	0,14
Kobalt	Co	0,67
Tungsten	W	0,53
Fosfor	P	0,015
Diğer		0,625

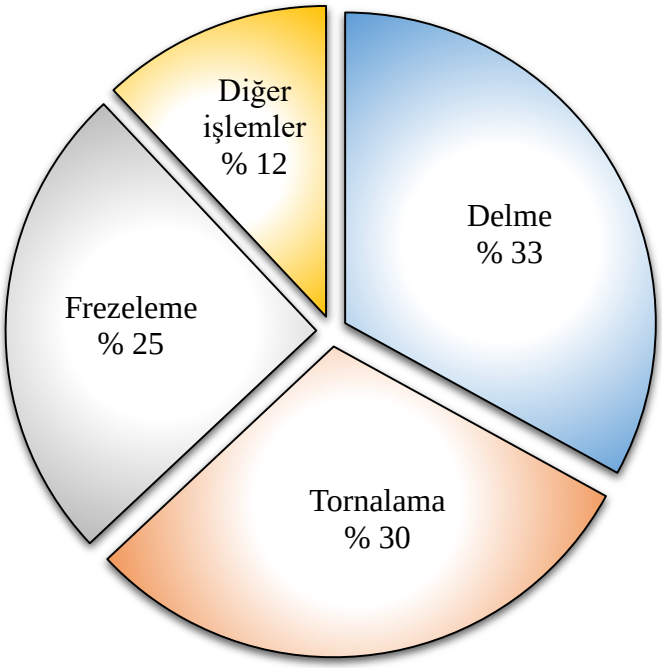
Çizelge 3.5. Hastelloy X fiziksel ve mekanik özellikleri.

Erime Aralığı (°C)	1260 ~ 1355
Elastikiyet Modülü (GPa)	207
Sertlik (HRB)	87,1
Termal İletkenlik (W/m-K)	9,1
Çekme Dayanımı (MPa)	732,2
Akma Dayanımı (MPa)	319,2
Uzama (%)	54,4
Yoğunluk (gr/cm^3)	8,22

4. DELİK DELME

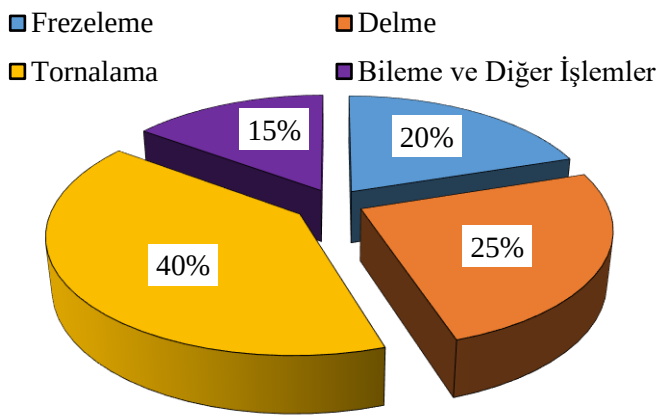
4.1. DELİK DELME İŞLEMİ

Delik delme, imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan talaş kaldırma işlemlerinden biridir. Delik delme işlemiyle diğer talaş kaldırma işlemleri karşılaştırıldığında, delik delme işleminin yaklaşık %33'lük uygulanma oranı ile en yaygın kullanılan talaş kaldırma işlemi olduğu Şekil 4.1'de görülmektedir [74].



Şekil 4.1. Delik delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması [74].

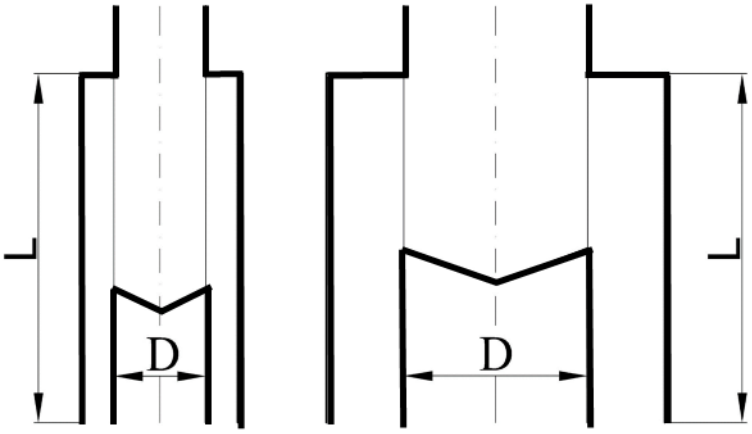
Talaş kaldırma işlemlerinde harcanan sürenin %25'i delme işlemi olarak tezgâhta geçirilmektedir [74]. Talaş kaldırma süreleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Delik delme işleminde talaş kaldırma süresinin diğer işleme süreleriyle karşılaştırılması [74].

Delik delme işlemi, matkap adı verilen kesici takımın kendi etrafında dönerken aynı zamanda eksenel doğrultuda ilerlemesi ile iş parçasından talaş kaldırmak suretiyle yaptığı silindirik boşluk açma olarak tanımlanabilir [75]. Delik delme, esas itibariyle iki hareketin bir bileşimidir. Bu hareketler ana dönme hareketi ile doğrusal ilerleme hareketleridir [76]. Delme işleminde matkap adını taşıyan takım hem dönme, hem de ilerleme hareketi yapar [77].

Delik delme işlemlerini kendi içinde farklı sınıflara ayırmak mümkündür. Delik delme, delik büyütme, fatura açma (kademeli delik işleme) ve raybalama gibi talaş kaldırma işlemleri olarak sınıflandırılabilir. Bu işlemlerde doğrusal ilerleme hareketi ve dönme hareketi ortak noktadır. Delme işlemlerinde delik boyu/çap oranı 3 ve daha düşük olan deliklere kısa delik, delik boyu/çap oranı 4 ~ 10 arasında olan deliklere normal delik, delik boyu/çap oranı 10 ve daha büyük ise bu deliklere de derin delik adı verilir. Kısa delik ve derin delik delme işlemleri birbirinden farklılık göstermektedir. Derin delik delme, delik çap ölçüsünün 150 katı derinliğe kadar deliklerin delinebilmesine olanak sağlayan, uzmanlık isteyen bir yöntemdir [78]. Delik delmede boy/çap ilişkisi Şekil 4.3'te verilmiştir.



a) b)

Şekil 4.3. Delik delmede boy/çap ilişkisi a) Derin delik b) Kısa delik [75].

Delme işlemi talaş kaldırma prosesleri arasında genelde en son uygulanan bir işlemdir. Tornalama ve frezeleme işlemleri ile delme işlemleri karşılaştırıldığında, işlemlerin kinematik ve dinamik yapısının benzer olup talaş akışı ve kesme sıcaklığı dağılımının aynı şekilde olduğu görülür. Talaşlı imalatta özellikle talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması en çok problem yaşanan işleme türü, delik delme işlemidir. Delme işleminde talaş oluşumu kapalı alanda oluşur [79]. Çıkan talaşın tahliyesi ve kesme sıvısının uygulanması, diğer talaş kaldırma işlemlerine göre çok daha zor olmaktadır. Delme işlemlerinde matkap ile iş parçası ara yüzeylerinde sürtünmenin çok daha büyük olması ve talaş açısının ağız boyunca değişmesi nedeniyle, ağız boyunca değişken şartlar oluşmaktadır. Bu nedenle, matkapla talaş kaldırma işlemi, tek ağızlı takımlarla gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerine göre çok daha karmaşık ve ağır koşullarda meydana geldiği bilinmektedir. Ağır işleme koşullarının meydana geldiği delme işleminde, matkaplar için farklı takım geometrisi ve takım malzemesi geliştirilmiştir [74].

Uygun delik kalitesinin elde edilmesi, talaş kırma işleminin ve talaş tahliyesinin yeterli düzeyde sağlanması için matkap uç geometrisini ve kesme parametrelerini işlenecek malzemeye uygun seçmeliyiz. Uygun olmayan kesme parametreleri çok kısa veya kalın talaşlara ve itme kuvvetlerinin artmasına neden olur. Yüksek itme kuvvetleri ise matkabın delik ekseninden sapmasına ve titreşime neden olur. Kesme parametrelerinin ve iş parçası cinsine göre talaş oluşumu farklılık gösterir. Düşük kesme hızında ve ilerleme miktarında daha kapalı formlu ve yumuşak talaş oluşurken, yüksek kesme ve ilerleme hızında ise daha açık formlu ve sert talaşlar oluşmaktadır. Bu nedenle delik delme işleminde uzun, düz, dolaşık veya çok kısa talaşların tahliyesinde yaşanan zorluklar sonucu, delik yüzey

kalitesi bozulur ve talaş sıkışmaları görülür. Oluşan talaşın virgül veya spiral şeklinde olması ve matkabın helis kanallarına yapışmadan delikten kolayca tahliye olması delik delme işleminde ideal talaş şekli olarak tanımlanmaktadır [80] .

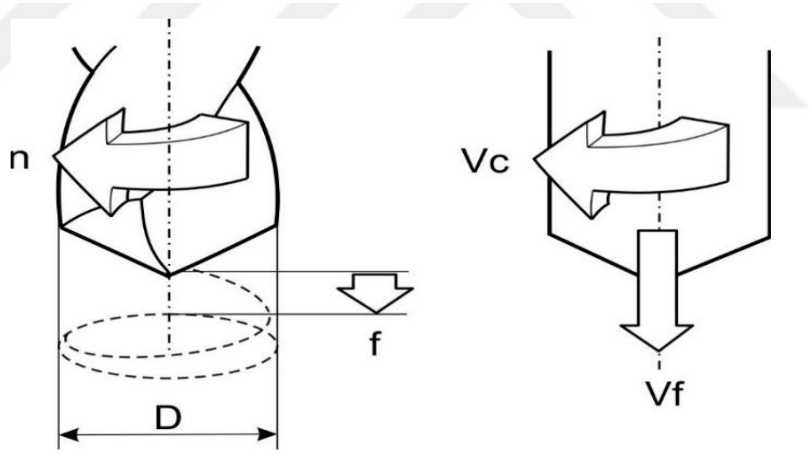
4.2. DELİK DELME İŞLEMİNDE TEMEL PARAMETRELER

Kesme Hızı (Vc)

Talaş kaldırma işlemlerinde kesme hızı bir dakikada kesicinin metre cinsinden aldığı yol olarak ifade edilmekle birlikte aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$V_c = (D \times \pi \times n) / 1000 \text{ m/dak} \quad (3.1)$$

Delme işlemi için kesme hızı (Vc), çevresel hızdan yararlanılarak belirlenir, bu hız dakikadaki devir sayısı olarak tanımlanmaktadır. Matkap bir dönüşte, çevresi kadar bir daire çizer. Eğer çap (D) mm cinsinden verilmişse, kesme hızının m/dak cinsinden ifade edilebilmesi için sonuç 1000'e bölünür [76]. Şekil 4.4'te takımın dönmesi ve ilerlemesine ait görsel bulunmaktadır.



a) b)

Şekil 4.4. Delik delme işleminde a) Takımın dönmesi b) Takımın ilerlemesi [75].

İlerleme Hızı (Vf)

İlerleme hızı veya parçaya nüfuziyet hızı (mm/dak) birim zamanda alınan yol alarak ifade edilir. Ayrıca takımın iş parçasına göre veya iş parçasının takıma göre ilerlemesidir. Bu aynı zamanda tezgâhın veya tablanın ilerleme hızı olarak da bilinir. İlerleme hızı aşağıdaki formül ile hesaplanır.

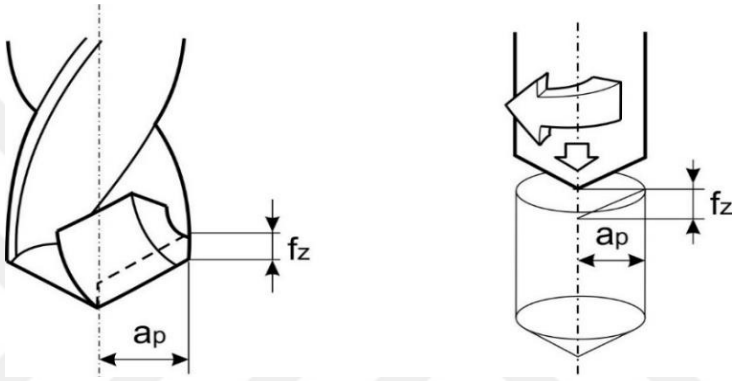
$$V_f = f \times n \text{ mm/dak} \quad (3.2)$$

Devir başına ilerleme (f, mm/dev) ilerleme hızını hesaplamak için kullanılan bir büyüklük olup takım veya iş parçasının bir devirdeki ilerlemesidir.

Talaş Genişliği (ap)

Delik delmede talaş genişliği veya radyal talaş genişliği (ap, mm) matkabın temasta olduğu iş parçası yüzeyidir ve tornalamada olduğu gibi yarıçap cinsinden ifade edilir. Talaş genişliği aşağıdaki formül ile hesaplanır. Şekil 4.5'te talaş genişliği gösterilmektedir.

$$a_p = (D - d) / 2 \text{ mm} \tag{3.3}$$



a) b)

Şekil 4.5. Delme işlemlerinde a) Talaş genişliği b) Kesici kenar başına ilerleme.

Talaş Kesit Alanı (A)

Takımda birden fazla kesici kenar olduğundan (z kesici kenar sayısı) talaş kesit alanının (A, mm^2) tanımında kenar başına ilerleme (fz, mm/z) değeri kullanılır. Bu alan bir kesici kenar tarafından kaldırılan malzemenin alanıdır ve radyal talaş derinliği ile kesici kenar başına ilerlemenin çarpımına eşittir. Şekil 4.5'te kenar başına ilerleme değeri gösterilmektedir. Talaş kesit alanı aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$fz = f/z \text{ mm/kenar} \tag{3.4}$$

$$A = a_p \times f_z \text{ mm}^2 \tag{3.5}$$

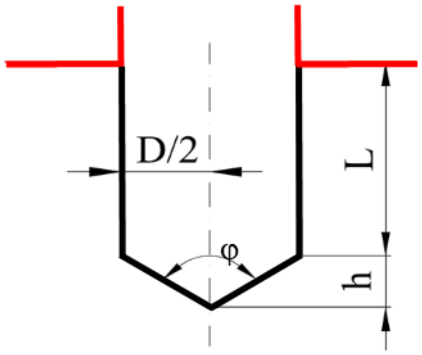
Talaş Hacmi (V)

Talaş hacmi (V, mm^3/dak) veya birim zamanda kaldırılan talaş hacmi hesaplanabilir. Burada talaş hacmi, kesme hızı ile talaş kesit alanının çarpımıdır. Kesme hızı (m/dak) cinsinden ifade edilirse, talaş debisinin (mm^3/dak) cinsinden de edilebilmesi için sonuç 1000 ile çarpılır. Talaş hacmi aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$V = A \times Vc \times 1000 \ \ mm^3/dak \tag{3.6}$$

Efektif İşleme Zamanı (T)

İlerleme uzunluğunun (L + h, mm) ilerleme hızına bölünmesi sonucunda (T, dak) efektif işleme zamanı elde edilir. Delinmiş olan boy ve takımın ilerlediği uzunluk delik derinliği ile matkap ucu yüksekliğinin toplamına eşittir (Şekil 4.6) [75].



Şekil 4.6. Delmede toplam delik derinliği [75].

Toplam delik derinliği ve efektif işleme zamanı aşağıdaki formüller ile hesaplanır.

$$h = D / 2 \times \cot (\varphi / 2) \ \ mm \tag{3.7}$$

$$T = (L + h) / Vf \ dak \tag{3.8}$$

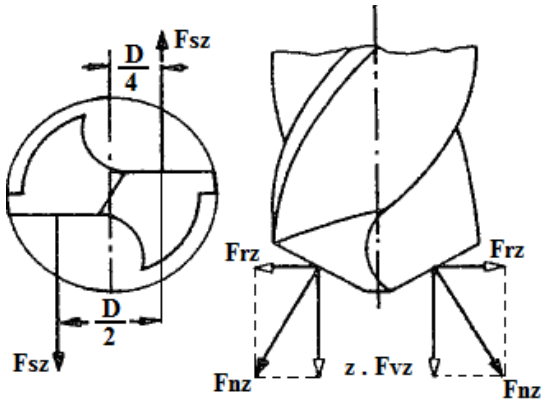
4.3. DELİK DELME İŞLEMİNDE KUVVET VE MOMENTLER

Delik delme işleminde matkap, delik boyunca ilerlemek ve talaş kaldırmak için enerji harcar. Matkabın kesici kenarları talaş kaldırmaya başladığı an kesme kuvvetleri matkabın kesici kenarlarına etki etmeye başlar ve bu işlem için bir miktarda güç gereklidir.

4.3.1. Kuvvetlerin ve Momentin Hesaplanması

Delme sırasında bir ağza karşılık gelen talaş kaldırma kuvvetlerinin bileşenleri, yani itme kuvveti (F_{sz}), ilerleme kuvveti (F_{vz}) ve radyal kuvveti (F_{rz}) olarak tanımlanmaktadır.

Matkapla delmede meydana gelen kuvvetler Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



a) b)

Şekil 4.7. Delme esnasında takım ucunu etkileyen kuvvetler a) İtme kuvveti b) İlerleme ve radyal kuvvet [77].

Delik delmede matkapta oluşan kesme kuvveti;

F_{vz} : İlerleme kuvveti

F_{rz} : Radyal kuvveti

F_{sz} : İtme kuvveti, olmak üzere üç ayrı kuvvetin etkisiyle oluşmaktadır.

Kesici ağızlara etkiyen radyal kuvvet veya itme kuvveti kesici kenarın her noktasında farklı değer taşır. Bu sebeple kuvvet hesabında ortalama itme kuvveti dikkate alınır. Matkabın tek ağzına gelen itme kuvveti düzeltme faktörleri de göz önüne alınarak;

$$F_{sz} = A_{sz} \times k_s = \frac{ds_z}{2} \times k_s = \frac{ds}{4} \times k_s \text{ N} \quad (3.9)$$

Toplam kuvvet (kesici ağız sayısı 2 olduğu için)

$$F_s = z \times F_{sz} = 2 \times F_{sz} = \text{d} \times s_z \times k_s = \frac{d_s}{2} \times k_s \text{ N} \quad (3.10)$$

elde edilir. Burada;

$k_s = 1{,}2 \times k_{s11} \times h^{-z}$ veya $k_{sh} = k_{s11} \times h^{-z}$ değeri ile $k_s = 1{,}2 \times k_{sh}$ bağıntısı ile hesaplanır. 1,2 matkapla talaş, kaldırma işleminin özelliklerini yansıtan düzeltme faktörüdür.

k_s: Özgül kesme kuvveti (N/mm^2)

İtme kuvvetine bağlı, bir ağıza karşılık gelen kesme momenti,

$$M_{sz} = F_{sz} \times d / 4 \text{ Nmm} \quad (3.11)$$

ve iki ağıza karşılık gelen toplam kesme momenti, $F_s = 2 \times F_{sz}$ ile

$$M_s = z \times F_{sz} \times \frac{d}{4} = 2 \times F_{sz} \times \frac{d}{4} \times k_s = F_s \times \frac{d}{4} \text{ Nmm} \quad (3.12)$$

Yukarıdaki bağıntılardan yola çıkılarak;

$$M_s = \frac{d^2 \times s \times k_s}{8 \times 10^3} \text{ Nmm} \quad (3.13)$$

şeklinde yazılır. Burada birimler; d (mm), s (mm/devir), k_s (N/mm^2) olarak alınır. Ms (Nm) olarak bulunur. Bu bağıntıdan verilen bir Ms (Nm) değerine delinebilecek delik çapı

$$d = \sqrt{\frac{8 \times 10^3 \times M_s}{s \times k_s}} \text{ mm} \quad (3.14)$$

İlerleme $s = z \times s_z$ bağıntısı ile hesaplanır. Toplam ilerleme kuvveti

$$F_v = 2 \times F_{vz} = 2 \times F_{sz} \times \sin x = F_s \times \sin x \text{ N} \quad (3.15)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

İlerleme kuvveti Fv, eksenel kuvvet niteliğindedir. Delik açmada, ana kesme ağızlarında meydana gelen bu kuvvetin yanı sıra, radyal kesme ağzında da, eksenel nitelikte Fz ilerleme kuvveti oluşmaktadır. Şöyle ki, delik açma sırasında matkabı etkileyen ve yenilmesi gereken eksenel kuvvet,

$$Fa = 2 \times F_{vz} + F_1 = F_v + F_1 \quad (3.16)$$

dir. Yapılan deneylere göre eksenel kuvvetinin %40'ı F_v; %57'si F_1 ve geri kalanı (%3) sürtünme kuvvetidir.

Eksenel kuvvet Fa, ilerlemeyi sağlayan elemanları ve özellikle yatakları (rulmanları) zorlamaktadır. Tezgâhın konstrüksiyonu sırasında bu elemanlar, belirli bir eksenel kuvvete (Fa_{maks}) göre hesaplanır. Çalışma sırasında $Fa > Fa_{maks}$ olursa, ilerlemeyi sağlayan elemanlar ve özellikle rulmanlar çabuk bozulur. Ayrıca Fa kuvveti takımı burkulmaya zorlar. Fa_{maks}'ın değeri tezgâh kataloğunda verilir [77].

4.3.2. Delik Delme Kuvvetlerini Etkileyen Faktörler

Delik delme işleminde takıma gelen kuvvet ve momentlerin büyüklüğü birçok faktöre bağlı olarak değişir. Bunlar;

• Kesme hızı,

• İlerleme miktarı,

• Talaş-takım temas boyu,

• Delik derinliği,

• Matkap geometrisi,

- Çapı,
- Ağız sayısı,
- Uç açıları (ψ, γ, α…),
- Relatif kesici kenar yüksekliği,
- Helis açısı (β),
- Öz kalınlığı.

• İşlenen malzemenin özelliği,

• Tezgâh özellikleri,

• Talaş şekli,

• Soğutma sıvısı olarak sıralanabilir [81].

4.4. DELİK DELME İŞLEMLERİNDE DELİK KALİTESİ

Delme işlemi, makine parçalarının montajı esnasında en fazla kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden biridir. Makine parçalarının hassas çalışabilmesi ve üretimde verimliliğin arttırılabilmesi için delme esnasında oluşan geometrik sapma, titreşim, çapak ve yüzey pürüzlülüğü gibi istenmeyen durumların en aza indirgenmesi gerekmektedir [82].

Delik kalitesini belirleyen unsurları aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz.

- Delik yüzeylerinin kalitesi,
- Çaptan sapma (ölçüden sapma),
- Dairesellikten sapma (ovalite),
- Silindiriklikten sapma (eksenel kaçıklık).

4.4.1. Delik Yüzeylerinin Kalitesi

Malzemelerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli kriterlerden birisi işlenen yüzeylerden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleridir. İyi bir yüzey pürüzlülük değeri; bitmiş ürünün tribolojik özelliklerinde, yorulma dayanımında, korozyon

direncinde ve estetik görünümünde iyileşmeler sağlamaktadır. Birbiri üzerinde hareket eden parçaların yüzey kalitesi ve pürüzlülüğü bu parçaların performansında önemli rol oynar.

4.4.1.1. *Yüzey Pürüzlülüğü*

Yüzey pürüzlülüğü işlenen yüzeylerin kalite karakteristiği veya imalat yöntemleriyle işlenen yüzeylerde küçük aralıklardaki düzensizlikler olarak da tanımlanmaktadır [83]. Diğer bir deyişle pürüzlülük yüzeyin mikro yapısıdır. Yüzey düzensizlikleri ve dalgalılık yüzey pürüzlülüğü olarak uygulanır ve W + R_{maks} grafiği gerçek yüzey kalitesini gösterir [84].

Delik iç yüzeylerinde bazı problemlerin oluşması üretimde zaman kaybı oluşturmaktadır. Bu yüzden delik delme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünün ölçümü önemli bir yer tutmaktadır [85]. Özellikle, havacılık sanayisindeki uygulamalarda delik yüzey kalitesi büyük önem arz etmektedir. Delik yüzey pürüzlülüğü ve çap doğruluğu, delik kalitesini belirten parametrelerdir [86], [87]. Delik kalitesinin ve matkap performansının belirlenmesinde, kesme parametreleri ve matkap malzemeleri önemli etkiye sahiptir. Delik delme işleminin gerçekleştirilmesi esnasında yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra çapak oluşumu, çap değişimi, ölçü tamlığı, dairesellik ve silindiriklikten sapma gibi etkenler de ön plana çıkmaktadır [88].

Yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörler;

- Kesici takımdaki titreşimler,
- Kesici takım geometrisi,
- İşlenen iş parçasında medyana gelen titreşim ve balans,
- İlerleme miktarı,
- Kesme hızı,
- Talaş derinliği,
- Kesici ucun üzerine talaşın yapışması (BUE),
- İşlenen malzemenin süreksiz talaş vermesi şeklinde sıralanabilir [89].

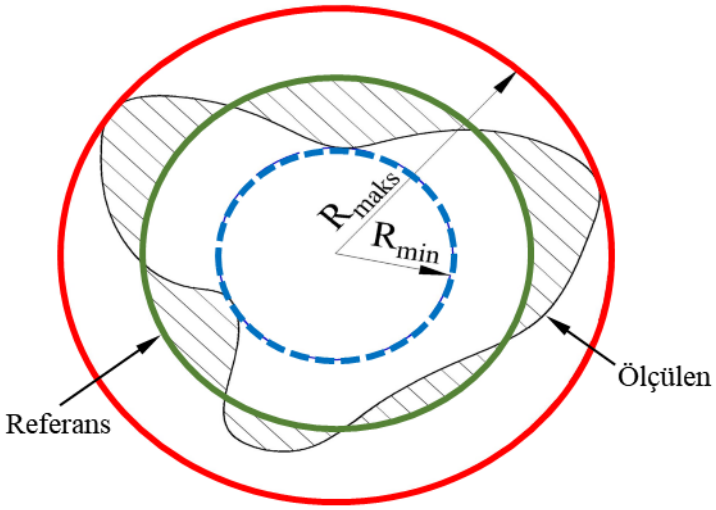
4.4.1.2. *Çaptan Sapma*

Delik delme işleminde delik yüzeylerinin kalitesinin yanında delik çap ölçülerinin geometrik toleranslar içerisinde olması önemli noktalardan biridir. Matkap ile doğrudan delinmiş bir delikte, delik çapının istenen toleranslar içerisinde ölçü tamlığı sağlaması

oldukça güçtür. İstenilen ölçü tamlığını sağlamak için genellikle delik büyütme ve raybalama gibi ikincil işlemler yaygın olarak uygulanmaktadır. Ancak ikinci bir işlem işleme maliyetini arttırarak olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu açıdan deliğin istenilen ölçü tamlığında bir defada üretilmesi son derece önemlidir. Özellikle havacılık ve uzay sanayi gibi hassas çalışılan alanlarda kullanılan delikler için ölçü tamlığı çok önemli bir noktadır [86]. Delik çaplarının tolerans dahilinde anma çapına en yakın değerlerde olması beklenir. İstenen çaptan daha büyük veya küçük çaplı delikler üretiliyorsa, bunun nedeni genellikle matkabın merkezden sapmış olması ve termal genleşmeye uğramasıdır. Ayrıca ilerlemenin çok yüksek olması, bağlama rijitliğinin olmaması işleme esnasında matkap formunun bozulması, iş parçasına ilk girişte matkabın iş parçasına tam dalamaması matkabın ve makinenin titreşimi gibi etkiler de delikte ölçü tamlığını etkileyen etmenlerdir [75], [90].

4.4.1.3. *Dairesellikten Sapma (Ovalite)*

Dairesellikten sapma belirli bir merkez noktadan ölçülen en büyük ve en küçük yarıçap farkıdır. Delik merkezi minimum radyal sapma (MRS), en küçük merkez daire (LSC) gibi metodlarla belirlenmektedir. MRS metodu merkez noktayı en küçük radyal sapmanın olduğu nokta olarak kabul etmektedir. LSC metodu gibi yaygın kullanılan metotlar vardır. LSC metodunda merkez nokta, radyal koordinatlarının kareleri toplamı en küçük olan nokta olarak kabul edilmektedir [91]. Şekil 4.8'de dairesellik ölçümünde kullanılan LSC metodu gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Dairesellik ölçümlerinde kullanılan LSC metodu [92].

Dairesellikten sapma ve delik kalitesi, tezgâhın ve iş parçasının bağlantısının rijit

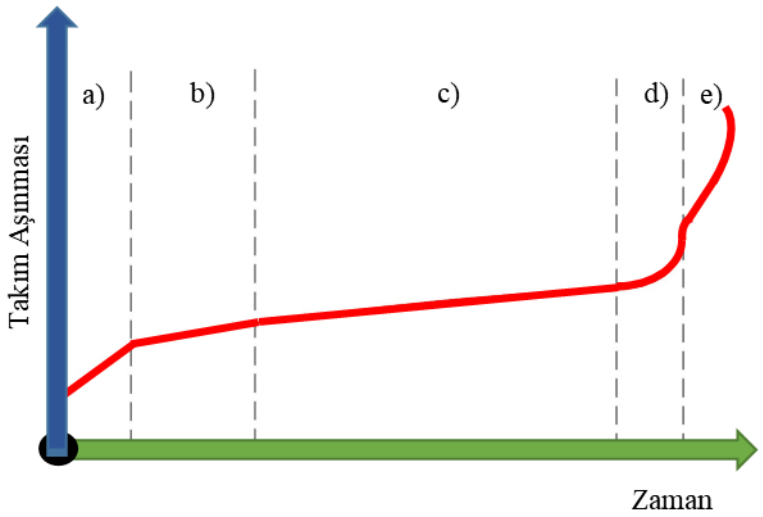
olmaması, kesme parametrelerinin uygun olmaması, soğutma işleminin yetersiz olması ve titreşim gibi olumsuz etmenlerden etkilenmektedir. Kesme sıvısı temini yetersiz olabilir veya talaş tahliyesinin düzensiz olduğu durumlarda talaş kontrolü yeterince iyi olmayabilir. Kesici takımın deliğe ilk girişteki dinamik kararsızlığından dolayı delik girişindeki çap ve dairesellikten sapma değerlerinin delik çıkışına göre daha yüksek olduğu ifade edilmektedir. Deliğin giriş ve çıkışı boyunca bu değerlerde ki azalmalar delme işlemine başlayan matkabın delik çıkışına kadar kılavuzluk etmesinden kaynaklanmaktadır [93], [94].

4.4.1.4. *Silindiriklikten Sapma (Eksenel Kaçıklık)*

Delik çapı, dairesellik ve silindiriklik gibi parametreler delik kalitesinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Silindirikliten sapma deliğin çeşitli faktörlerin etkisiyle düşey ilerleme ekseninden kaçıklığı olarak ifade edilebilir. Özellikle delik boyunun delik çapına oranının (L/D) büyük olduğu derin delik uygulamalarında bu kriter daha önemli olmaktadır. Eksenel kuvvetin büyümesi, ana mildeki sehimi arttırarak eksenel kaçıklığın büyümesine sebep olmaktadır. Delme işlemlerinde oluşan talaşın dışarı atılması ve termal genleşmeler delik kalitesini etkileyen unsurlardandır. Kesme sıvısı kullanımı hem talaşın dışarı atılmasını kolaylaştırmakta hem de kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı kontrol altına alarak delik kalitesini artırmaktadır [90].

4.5. DELİK DELME İŞLEMİNDE TAKIM AŞINMASI

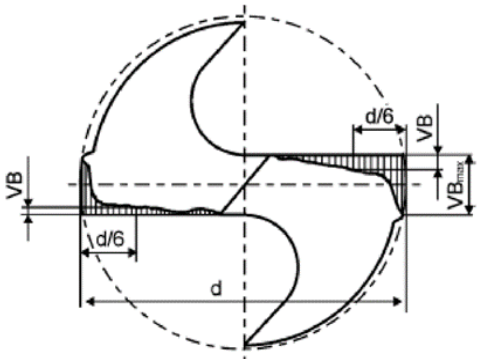
Kesici takımda özellikle matkaplardaki aşınma, başlangıçta yavaş zamanla ivme kazanarak artan bir olaydır. Aslında, kesici takım operasyona başladığı andan itibaren aşınma sürecine girmiş olur. Aşınma ilerledikçe kesici kuvvetler artar; daha fazla ısı ortaya çıkar, sonuç olarak aşınma hızlanır. Aşınma, takımın kesici uçlarının özelliklerini kaybetmesine yol açar [95]. Takımda oluşan aşınmanın safhaları Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kesici takımın aşınma safhaları a) Başlangıçtaki aşınma b) Zayıf aşınma c) Kabul edilebilir aşınma d) Aşırı aşınma e) Kesici ömrünü tamamlaması [96].

Delik delme işlemlerinde, uygun kesme parametrelerinin tespit edilmesi efektif takım açılarını ve delik kalitesini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, ilerlemenin artması, helis açısını arttıracak ve boşluk açısını azaltacaktır. Boşluk açısının azalması da takımın ana serbest yüzeyi ile işlenen yüzey arasındaki sürtünmeyi arttırarak, serbest yüzey aşınmasını artırmaktadır [97]. Matkaplarda aşınma, serbest yüzeylerde serbest yüzey aşınması, köşelerin yuvarlanması, kesici kenarla zırhın birleştiği noktada zırhın aşınması, krater aşınması ve radyal ağız (enine kenar) aşınması şeklinde oluşur [98].

Aşınma, genellikle kesici kenarın zırh ile birleştiği noktada başlar, kesici ağızlar ve serbest yüzeylerde gelişir. Kesici ağızlarda aşınmanın artması, serbest yüzeylerde boşluk açısının kaybolmasına ve konik yüzey oluşumuna neden olur. Oluşan bu konik yüzey, serbest yüzeylerde aşınma şeritlerini (VB) temsil eder (Şekil 4.10). Serbest yüzeylerdeki aşınma, kesme işleminden daha çok sürtünme ve zorlamalara dönüşerek, ısı oluşumunu arttırır ve aşınmayı hızlandırarak takımı köreltir [98]. Şekil 4.10'da VB serbest yüzey aşınma şerit genişliğini, VB_{maks} maksimum aşınmayı ve d ise matkap çapını ifade etmektedir.

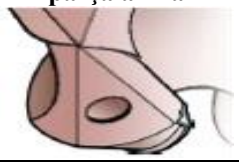
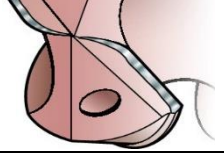
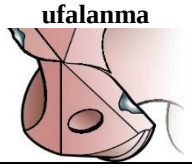


Şekil 4.10. Serbest yüzeyde oluşan aşınmanın gösterimi [99].

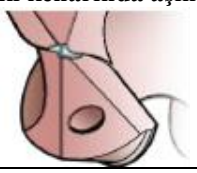
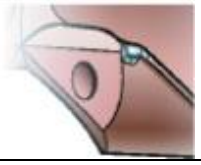
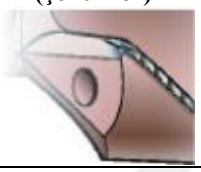
Oluşan aşınma değerleri kabul edilen aşınma sınırını aştığında, delik kalitesinin (yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, dairesellikten sapma, silindiriklik sapma) bozulmasına neden olur. Delme işlemlerinde kullanılan matkapların, kesme işlemi sırasında oluşan mekanik (moment, itme kuvvetleri), ısıl, kimyasal ve abrasif yüklere dayanabilmesi için bazı özellikleri taşıması gerekmektedir [75].

Matkaplarda meydana gelen aşınmalar, muhtemel sebepleri ve çözüm önerileri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Matkap aşınmaları, muhtemel sebepleri ve çözüm önerileri [100].

Aşınma Türü	Muhtemel Sebepler	Çözüm Önerisi
Kenarda talaş yığılması 	➢ Düşük kesme hızı ➢ Kaplamanın olmaması ➢ Kesme sıvısının yağ içeriğinin düşük olması	➢ Kesme hızı artırılabilir ➢ Daha keskin kesme kenarı kullanılabilir ➢ Kaplamalı kesici takım kullanılabilir ➢ Kesme sıvısının yağ içeriği artırılabilir
Kesme kenarın köşesinde parçalanma 	➢ Yüksek radyal sapma ➢ Aralıklı kesme ➢ Yetersiz kesme sıvısı ➢ Uygun olmayan takım tutucu	➢ Radyal sapma kontrol edilebilir ➢ İlerleme azaltılabilir ➢ Kesme sıvısı debisi kontrol edilebilir ➢ Uygun takım tutucu seçilebilir
Kesme kenarında aşınma 	➢ Yüksek kesme hızı ➢ Düşük ilerleme ➢ Yumuşak kalite kesici takım ➢ Yetersiz kesme sıvısı	➢ Kesme hızı azaltılabilir ➢ İlerleme artırılabilir ➢ Sert kalite bir matkap kullanılabilir ➢ Kesme sıvısı debisi ve akışı kontrol edilebilir
Kesme kenarında ufalanma 	➢ Düzensiz kesme koşulları ➢ Aşınmış takım ➢ Kesici takım kalitesi çok sert	➢ Düzenek kontrol edilebilir ➢ Matkap değiştirilebilir ➢ Yumuşak kalite bir matkap kullanılabilir

Çizelge 4.1. (devam) Matkap aşınmaları, muhtemel sebepleri ve çözüm önerileri [100].

Dairesel kısımda aşınma 	➢ Yüksek radyal sapma ➢ Kesme sıvısı çok az ➢ Kesme hızı çok yüksek ➢ Abrasif malzeme	➢ Radyal sapma kontrol edilebilir ➢ Yeterli miktarda kesme sıvısı kullanılabilir ➢ Kesme hızı azaltılabilir ➢ Daha sert bir kalite kullanılabilir
Keski kenarında aşınma 	➢ Düşük kesme hızı ➢ Yüksek ilerleme ➢ Küçük keski kenarı	➢ Kesme hızı artırılabilir ➢ İlerleme azaltılabilir ➢ Kesici takım ölçüleri kontrol edilebilir
Plastik deformasyon 	➢ Yüksek kesme parametreleri ➢ Yetersiz kesme sıvısı debisi ➢ Yumuşak kalite bir matkap	➢ Kesme parametreleri azaltılabilir ➢ Kesme sıvısı debisi artırılabilir ➢ Daha sert bir kalite matkap kullanılabilir
Termal çatlaklar (çentikler) 	➢ Düzensiz miktarda kesme sıvısı	➢ Kesme sıvısı akışı ve debisi kontrol edilebilir ➢ Kesme sıvısı tankında yeterli miktarda kesme sıvısı ile doldurulabilir
Takımın kırılması 	➢ Aşırı radyal salgı oluşması ➢ Düzensiz kesme koşulları ➢ Yüksek ilerleme ➢ Talaş sıkışması ➢ Yetersiz iş mili gücü	➢ Salgı kontrol edilebilir ➢ Kesme koşulları kontrol edilebilir ➢ İlerleme azaltılabilir ➢ Kesme sıvısı akışı kontrol edilebilir ➢ Kesme parametrelerini kontrol edilebilir

4.6. DELİK DELME İŞLEMİNDE ÇAPAK OLUŞUMU

İmalatta, çapak alma ve bitirme işlemleri iş parçasını üretmek için gereken toplam maliyeti artırdığı için çapak oluşumu istenmeyen bir durumdur. Delik delme sürecinde çapaklar deliklerin giriş ve çıkışlarında oluşur. Delik girişlerindeki çapaklar malzemenin plastik akışına, delik çıkışındaki çapaklar ise deliğin merkezindeki yüksek sıkıştırma oranından dolayı malzemenin yapısına bağlıdır. Delik delme sürecinde çapak oluşumunu etkileyen ana faktörler [101];

Matkap: Geometri (uç açısı, helis açısı vb.), aşınma, simetri, çap ve kesici takım malzemesi.

İşlenen parça: Malzemenin özellikleri (sertlik, süneklik ve mekanik dayanım), kalınlık ve geometri.

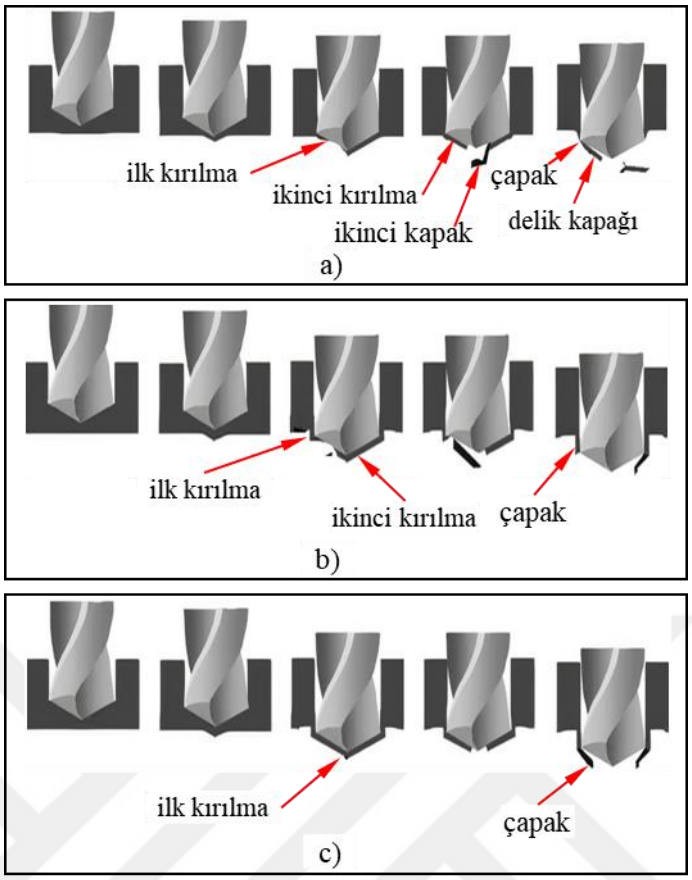
İşleme şartları: Makine-takım-iş parçasının rijitliği (titreşim), kesme hızı, ilerleme ve soğutma sıvısı kullanımıdır.

Delik sonundaki oluşan çapaklar üç çeşittir.

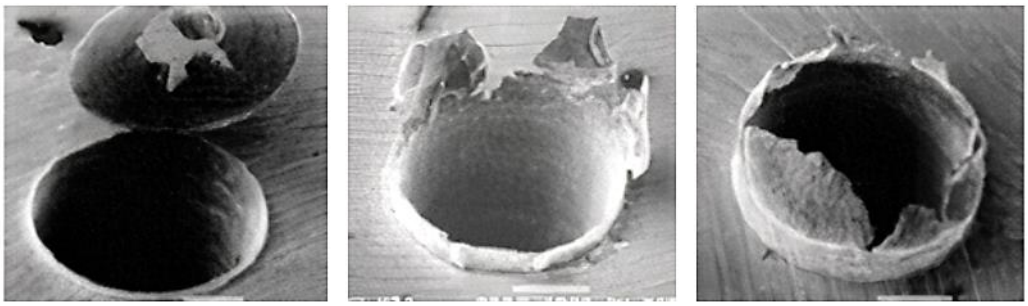
Düzenli Çapak: Küçük ve düzgün yükseklik ve kalınlığa sahip delik çevresinde oluşan çapak çeşididir. Kesici kenar iş parçasının çıkış yüzeyine geldiğinde matkabın merkezinde plastik deformasyon sayesinde kesmeden bükmeye geçiş başlar. Kesici kenarının altındaki malzeme plastik deformasyona uğrarken, kesici kenarın yakınındaki malzeme kesilerek çıkarılır. Matkap ilerledikçe plastik deformasyon bölgesi, matkabın merkezinden kenarına doğru genişler. Genellikle şapka şeklinde olanlar delme işlemi sırasında dökülebilir ya da kolaylıkla kaldırılabilir (Şekil 4.11).

Taç Çapak: Delik etrafında daha büyük ve düzensiz bir yüksekliğe sahip çapak çeşididir. Yüksek ilerlemeye bağlı olarak oluşan yüksek eksenel kuvvet plastik deformasyona bağlı olarak taç çapakları oluşturur. Plastik deformasyonla kırılgan hale gelen malzeme tabakası başlangıç kırığı da denilen taç çapakları meydana getirir. Düzenli, süreksiz ve taç çapak Şekil 4.12'de görülmektedir.

Süreksiz Çapak: Düzenli çapak ve taç çapak arasındaki geçiş kademesinde oluşan bir çapak türüdür. İlk ve ikinci kırıklar, düzenli çapağa benzer kesici kenarların ucuna yakın ve çıkış yüzeyinin orta bölgesinde aynı anda oluşur. Matkap ilerledikçe, kesici kenardaki gerilim, malzemede kırık oluşumunu sağlayan gerilimden daha yüksek çıkar ve taç çapak şeklini oluşturur (Şekil 4.11) [102], [37].



Şekil 4.11. Delik delmede çapak oluşumu a) Düzenli çapak b) Süreksiz çapak c) Taç çapak [102].



a) b) c)

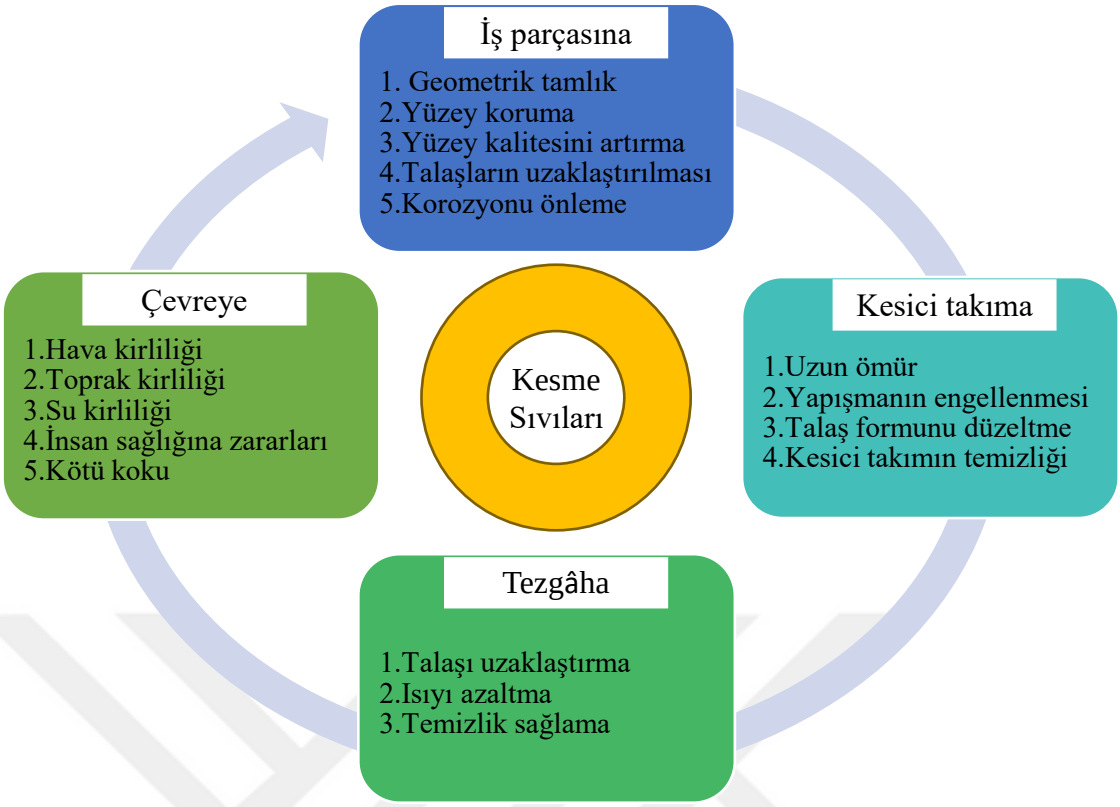
Şekil 4.12. Çapak çeşitleri a) Düzenli b) Süreksiz c) Taç [102].

5. METAL İŞLEMEDE SOĞUTMA YAĞLAMA

Günümüzde kesme sıvıları talaşlı imalat endüstrisindeki performans gereksinimlerini karşılamak için özel olarak oluşturulmuş yağ, su ve kimyasal katkıların karışımları haline gelmiştir. Kesme sıvıları genel olarak kesme yağları ve su bazlı kesme sıvıları olarak iki gruptan oluşmaktadır. Uygulamaların %80 ~ 90'ında kullanılan su bazlı kesme sıvılarını ise suda çözünen yağ esaslı kesme sıvısı, sentetik ve yarı sentetik kesme sıvıları oluşturur [103].

Talaşlı imalat esnasında oluşan ısının kontrol altına alınması ve kesici takımların performansını artırmak için kesme sıvıları kullanılmaktadır. Ayrıca verimliliğin ve işleme kalitesinin artmasında kesme sıvıları önemli görevler üstlenmektedir. Talaşlı imalatta yüksek verimlilik için yüksek kesme ve ilerleme hızları kullanılmaktadır. Bunun sonucunda yüksek kesme sıcaklıkları ortaya çıkarak takım ömrünü azaltıp parça kalitesini düşürmektedir. Genel olarak metal kesme işleminde, kesme sıvısı, iş parçası yüzeyinin ve kesici takımın soğutulması, talaşların kesme bölgesinden uzaklaştırılması ve kesici takım iş parçası arasının yağlanması özellikleri sayesinde talaşlı imalat işleminin performansına olumlu katkı yapar [104], [105]. Şekil 5.1'de kesme sıvılarının etkileri verilmiştir.

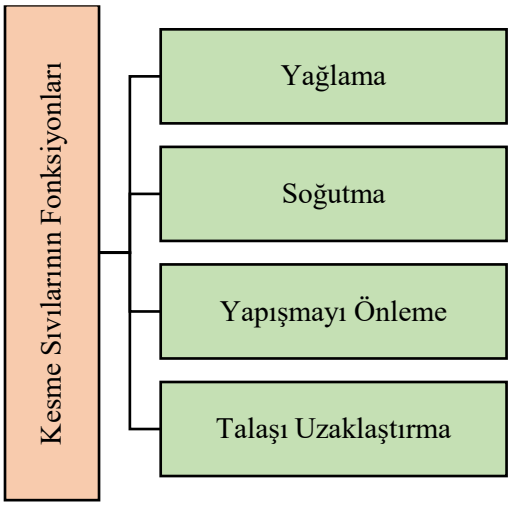
Kesme sıvıları iş parçası yüzeylerinde oluşturduğu film tabakasının yağlayıcılık etkisiyle tezgâh güç tüketimi azaltıp kesme bölgesinde oluşan gerilimi de düşürmektedir. Ayrıca oluşan bu tribo film tabakası sürtünmeyi azaltarak işleme verimliliğini ve yüzey kalitesini artırmaktadır [12].



Şekil 5.1. Metal işlemede kullanılan kesme sıvılarının etkileri [106].

5.1. METAL İŞLEMEDE SOĞUTMA/YAĞLAMA YÖNTEMLERİ

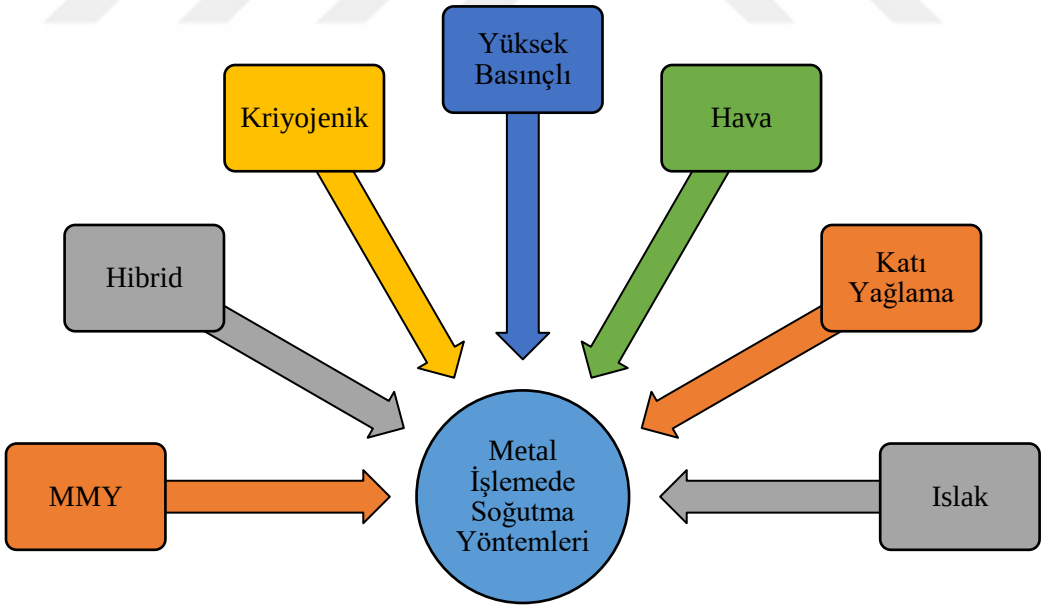
Dünya genelinde metal işleme endüstrisinde kullanılan kesme sıvılarının büyük çoğunluğu petrol esaslıdır. İşleme esnasında kullanılan kesme sıvısı maliyetleri, tüm üretim maliyetlerinin %10 ~ 17'sini oluşturmaktadırlar [107]. Metal işleme sıvılarında aranan bazı özellikler, Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Metal işleme sıvılarında aranan özellikler.

Kesme sıvılarının soğutma, yağlama, talaşı uzaklaştırma ve talaşın yapışmasını önleme gibi önemli fonksiyonları vardır. Kesme sıvılarının soğutma fonksiyonu işleme esnasında sürtünmeden dolayı kesme bölgesinde oluşan yüksek ısıyı önleyerek işleme performansını artırmaktadır [83]. Yağlayıcılık fonksiyonu, kesici takım-iş parçası-talaş ara yüzeylerine nüfuz ederek tribo film tabakası oluşumuna, sürtünmenin azaltılmasına ve böylece kesme sıcaklıklarının düşürülmesine yardımcı olmaktadır [4]. Kesme sıvılarının talaşları kesme bölgesinden uzaklaştırma fonksiyonu, talaşla birlikte bir miktar ısıyı da uzaklaştırarak işlenen yüzeyi korumada etkilidir [5]. Kesme sıvılarının soğutma, yağlama ve talaşın uzaklaştırılması fonksiyonlarının yanında yapışmayı önleme fonksiyonu gibi özelliği de bulunmaktadır. Kesme sıvılarının içeriğine eklenen bazı kimyasal maddeler sayesinde kesme bölgesi daha da kayganlaşarak, talaşın yapışma olasılığı azaltılmaktadır [6].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte endüstriyel uygulamalarda işlenebilirliği zor olan malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Teknolojideki bu gelişmelerle birlikte metal işlemede kullanılan soğutma yağlama yöntemlerinin kullanımı önem kazanmıştır. Şekil 5.3'te metal işlemede kullanılan soğutma yağlama yöntemleri verilmiştir.



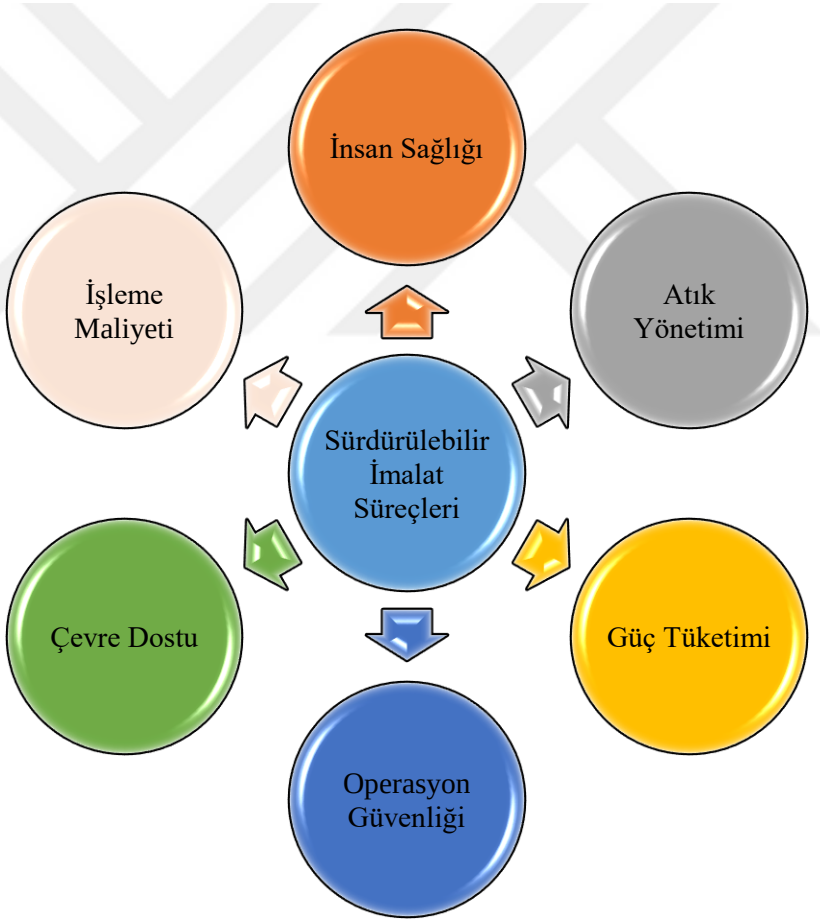
Şekil 5.3. Metal işlemede kullanılan soğutma/yağlama yöntemleri [108].

Metal işlemede kullanılan konvansiyonel soğutma/yağlama yönteminin toksik olması, çevreye ve çalışana verdiği zararlar, işleme performansı üzerindeki etkisinin yetersiz

kalması gibi dezavantajları yüzünden sürdürülebilir soğutma/yağlama yöntemlerinin geliştirilme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

5.2. METAL İŞLEMEDE SÜRDÜRÜLEBİLİR SOĞUTMA/YAĞLAMA YÖNTEMLERİ

Sürdürülebilirlik, ekolojik sistemlerin fonksiyonlarını, süreçlerini ve üretkenliğini gelecekte de devam ettirebilme özelliği olarak tarif edilmektedir [109]. Sürdürülebilir üretim ise gelecek nesiller için tehdit oluşturmayan bir eylemdir. Talaşlı imalat teknolojisinin amacı yüksek boyutsal doğruluk, mümkün olan en düşük maliyet ve aynı zamanda temiz, çevre dostu ve sürdürülebilir bir işleme sürecidir. Şekil 5.4'te sürdürülebilir imalat süreçleri verilmiştir.



Şekil 5.4. Sürdürülebilir imalat süreçleri [110].

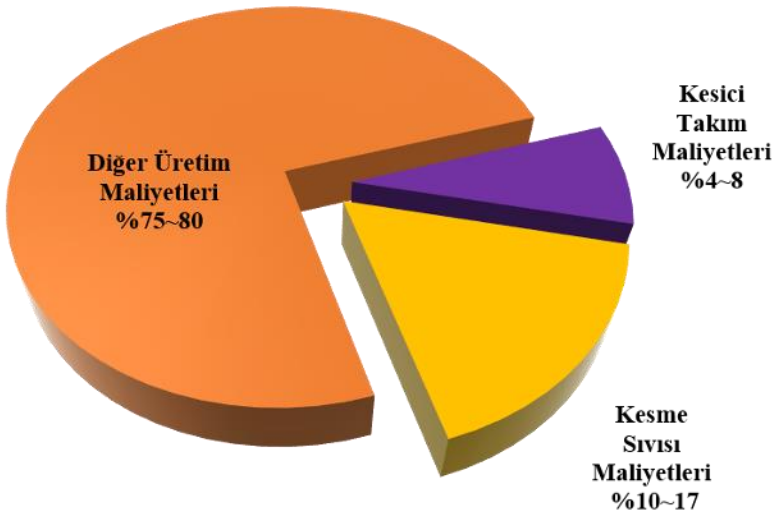
Sürdürülebilirlik performansını geliştirmenin yolu enerji tüketiminin azaltılması, endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi endüstriyel kaynaklar ile doğal kaynakların uygun miktarda kullanımı ve soğutma/yağlama teknolojisindeki gelişmelerdir. Bu

noktadan hareketle sürdürülebilir imalat için soğutma stratejilerinin geliştirilmesi temel bir gerekliliktir [111].

Metal işleme süreçleri, küresel ekonominin büyümesine katkıda bulunan önemli bir üretim faaliyetidir. Metal işleme proseslerindeki araştırma ve geliştirme (ar-ge), hem gelişmiş takım malzemeleri, daha yüksek verimlilik ve kalite yoluyla gelişmiş güvenli işleme performanslarına sahipken, hem de çevre dostu ve güvenilir teknolojiler daha temiz, daha sağlıklı olmak için giderek daha önemli hale gelmektedir [112].

Kesme sıvıları kesici takım, talaş, iş parçası ara yüzeylerinde tribo film tabakası oluşturarak, yağlama ve soğutma işlemi yapmakta, termal kaynaklı oluşabilecek aşınmaları ve mekanik arızaları önleyerek kesici takım ömrünü uzatmakta ve yüzey kalitesini artırmada önemli bir rol oynadığı için tercih edilmektedir. Ancak kesme sıvısılarının maliyetlerinin fazla olması, ek olarak bertaraf maliyetinin olması, çevreye ve çalışan sağlığına verdiği zararlar gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu olumsuz etkilerden dolayı kesme sıvılarının kullanımının azaltılması bir gereklilik olmuştur. Bu yüzden kuru, MMY, Nano MMY ve kriyojenik soğutma gibi çevre dostu alternatif yöntemler büyük önem kazanmaktadır.

Şekil 5.5'te metal işlemede kullanılan kesme sıvılarının maliyetleri verilmiştir. Talaşlı imalatta kullanılan kesici takım maliyetleri toplam üretim maliyetlerinin %4 ~ 8'ini oluştururken, kesme sıvılarının toplam üretim maliyetlerinin %10 ~ 17'sini oluşturmaktadır.



Şekil 5.5. Genel üretim maliyetleri [113].

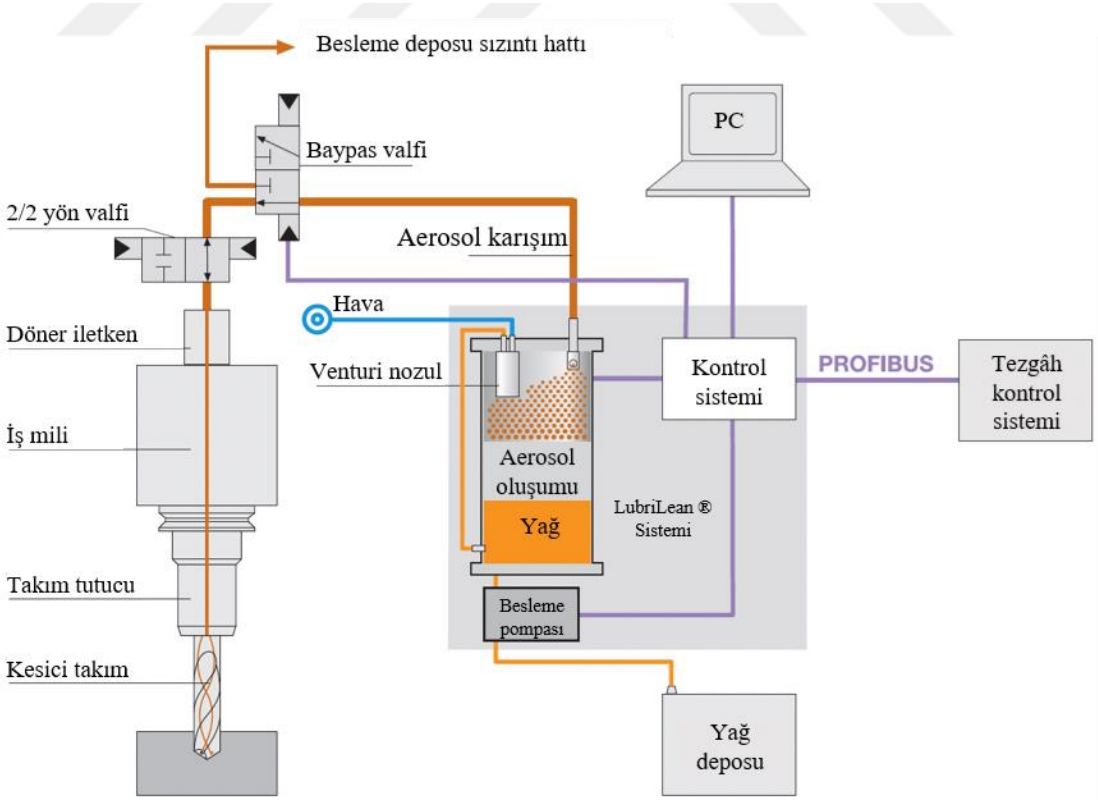
5.2.1. Minimum Miktarda Yağlama Yöntemi

Kesme sıvısı kullanımını azaltmak için uygulanan yöntemlerden biri de minimum miktarda yağlama (yarı kuru işleme olarak da adlandırılan) yöntemidir. MMY yöntemi, bir nozul yardımıyla, çok az miktarda (10 ~ 100 mL/saat) kesme sıvısının basınçlı hava ile aerosol şeklinde kesme bölgesine uygulanması yöntemidir [9]. MMY yöntemi iş parçası ve kesici takım arasında bir yağ filmi oluşturarak kesici takım ve iş parçası arasında oluşan ısıyı azaltmaktadır. MMY yöntemi çok az miktarda kesme yağı kullanılması bakımından, insan sağlığı ve çevre açısından geleneksel kesme yöntemine göre daha tercih edilebilir bir yöntemdir [8].

Minimum Miktarda Yağlama (MMY) tekniği içten (dâhili) ve dıştan (harici) olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir.

5.2.1.1. *İçten (Dâhili) Minimum Miktarda Yağlama Sistemi*

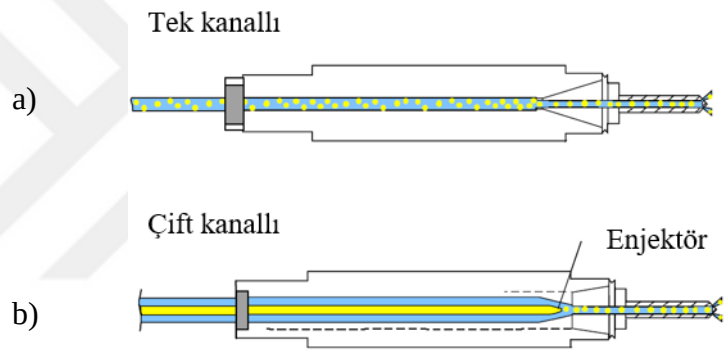
İçten MMY uygulamalarında kesme sıvısı takımın içindeki kanallar vasıtasıyla kesme bölgesine ulaştırılır. Bu yöntemde soğutmayı kompresörden gelen basınçlı hava, yağlamayı ise MMY sistemi içerisindeki yağ zerrecikleri sağlamaktadır [107]. Şekil 5.6'da kesici takım içinden uygulanan MMY yöntemi görseli bulunmaktadır.



Şekil 5.6. Kesici takım içinden uygulanan MMY yöntemi.

İçten MMY sistemi kendi içinde tek kanallı ve çift kanallı olmak üzere ikiye ayrılır. Tek kanallı sistemde, yağ-hava karışımı dışarıda hazırlanarak püskürtülür, çift kanallı sistemde ise yağ ve hava ayrı bir şekilde gelerek takım içinde karıştırılır. Şekil 5.7'de tek ve çift kanallı MMY yöntemi görseli bulunmaktadır. İçten MMY sistemlerinde aeresol oluşumu sayesinde damlacıkların büyüklüğü 0,3 ~ 1µm'ye kadar düşürülebilmektedir. Küçük damlacıkların oluşturduğu aeresollar keskin dönüşler ya da yüksek hızda dönen millerden geçerek istenilen yağlama noktasına özelliğini kaybetmeden ulaşabilmektedirler [81].

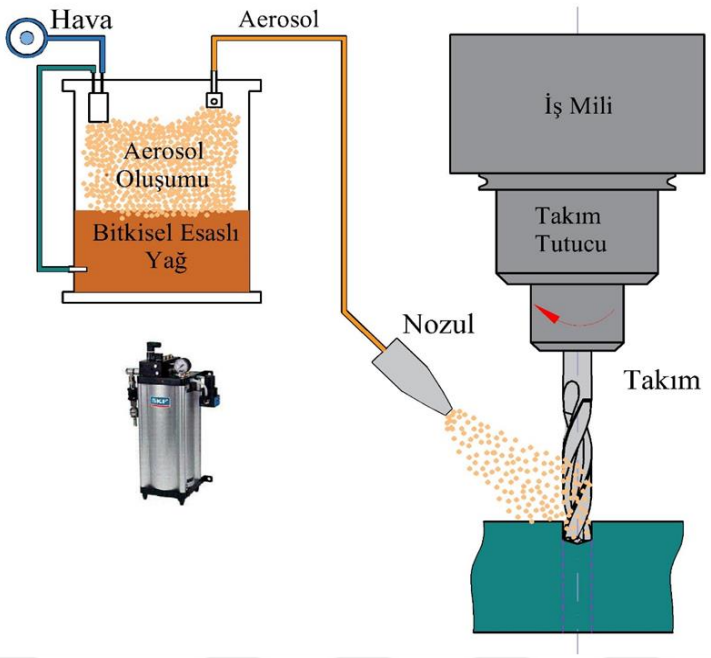
İçten MMY sistemi uzunluk/çap (l/d) oranının daha büyük olduğu delme, raybalama ve diş açma işlemlerinde verimli bir yöntemdir. Bu yöntemle takımın içinden püskürtülen sıvı kesme kenarına ulaşır. Özellikle derin delik delme işlemlerinde, büyük l/d oranı içten minimum miktarda yağlamayı vazgeçilmez hale getirmektedir [114].



Şekil 5.7. İçten MMY uygulamaları a) Tek kanallı b) Çift kanallı [115].

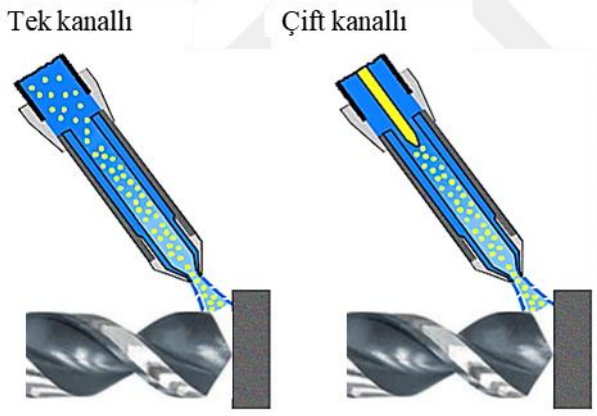
5.2.1.2. *Dıştan (Harici) Minimum Miktarda Yağlama Sistemi*

Dıştan MMY uygulamalarında (Şekil 5.8) kesme sıvısı basınçlı hava ile birlikte özel hortumlarla taşınarak bir nozul yardımıyla dışarıdan kesme bölgesine ulaştırılır [81].



Şekil 5.8. Dıştan MMY uygulaması.

Dıştan uygulanan MMY yönteminde de tek ve çift kanallı olarak iki farklı şekilde yağlama yapılır (Şekil 5.9).



a) b)

Şekil 5.9. Dıştan MMY uygulamaları a) Tek kanallı b) Çift kanallı [106].

Dıştan tek kanallı MMY uygulamalarında yağ ve hava dış ortamda hazırlanarak, bir veya birden fazla nozul yardımıyla kesme bölgesine gönderilir. Çift kanallı MMY uygulamalarında ise yağ ve hava farklı kanallarla sabit açı ve mesafede konumlandırılan nozulun içerisinde karışarak kesme bölgesine gönderilir. Dıştan MMY yöntemi; frezeleme tornalama kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. Delme, raybalama ve diş açma gibi işlemlerde sadece uzunluk/çap oranı $l/d < 3$ olduğu durumlarda dıştan MMY yöntemi daha kullanışlıdır [81]. Derin deliklerde l/d oranı 3'ün çok üzerinde olduğundan, içten

MMY uygulamasının kullanılması gerekmektedir [83], [114].

5.2.2. Nano Partikül Katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Nano MMY) Yöntemi

Nano akışkanlar nanometre (nm) ölçülerinde (genellikle<100 nm) nano partiküllerin hacimce veya ağırlıkça bir baz sıvıya karıştırılmasıyla elde edilir. Nano akışkanlar içerisine metal olarak Cu, Ni, Al ve Ag, metal oksit olarak Al_2O_3, ZrO_2, CuO, SiO_2, ZnO ve bileşik olarak SiC, MoS_2, hegzagonal Bor Nitrür (hBN), karbon nano tüp (CNT), grafit ve benzeri farklı özeliklere sahip katı nano partiküller eklenerek hazırlanmaktadırlar [11]. Baz sıvı olarak genelikle su, etilen glikol (EG), sentetik yağ, bitkisel esaslı yağ aseton, decene vb. kullanılır [116].

Kesme bölgesine yüksek basınç altında ve farklı karışım oranlarında nano akışkanların içerisinde gönderilen nano partiküller, termal iletkenlik özelliğini artırmakta, enerji verimliliği sağlamakta, kesici takım ve iş parçası yüzeyinde koruyucu ince bir tabaka oluşturmaktadırlar. Bu sayede kesme esnasında oluşan sıcaklığın iş parçasına yayılması engellenerek, kesme kuvveti, yüzey kalitesi, takım aşınması ve ömrü bakımından ciddi iyileşmeler sağlanabilmektedir [10].

5.2.2.1. *Nano Akışkanların Hazırlanması*

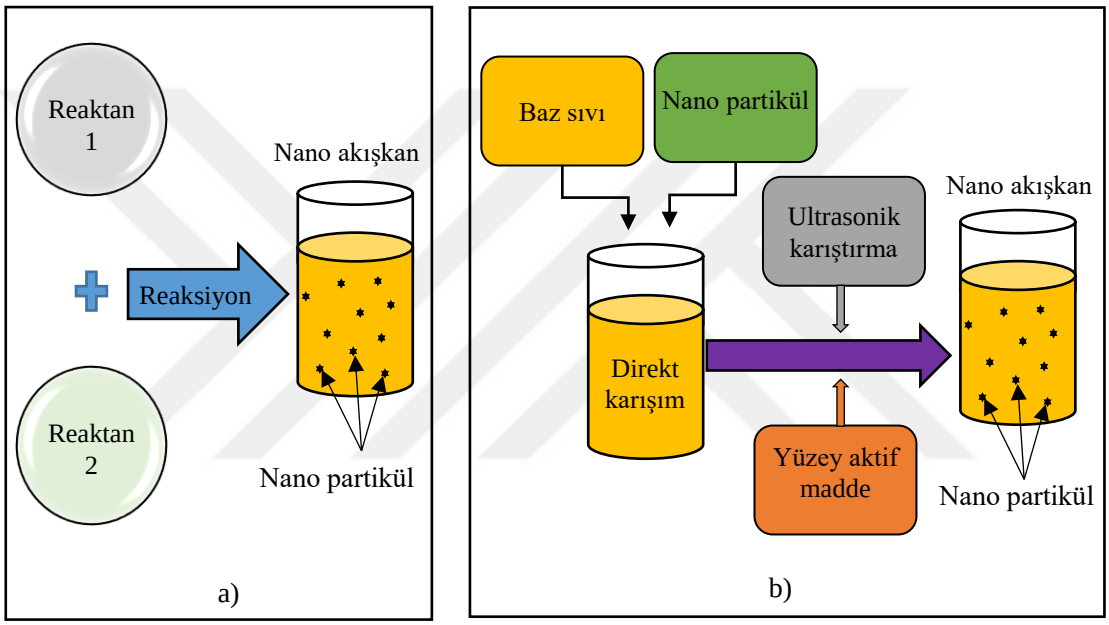
Nano akışkan elde edilmesinde iki çeşit yöntem kullanılır. Bunlardan biri tek adım yöntemi diğeri ise iki adım yöntemidir [117].

Tek adım yöntemi, nano partiküllerin doğrudan fiziksel buhar biriktirme tekniği veya sıvı kimyasal yöntemle sentezlenerek nano akışkan hazırlandığı bir işlemdir. Tek adım yöntemi, parçacıkların akışkan içinde aynı anda eklenmesi ve dağıtılmasından oluşur. Bu yöntemde, kurutma, depolama, taşıma ve nano partiküllerin dispersiyonu işlemlerinden kaçınılmakta, bu yüzden nano partiküllerin birikmesi minimuma indirgenmekte ve akışkanların kararlılığı artmaktadır. Tek adım yöntemi istenmeyen parçacık birikimini önlemede oldukça iyidir [117], [118].

Tek adım yönteminde, homojen bir şekilde dağılmış nano partiküller hazırlanabilir ve partiküller baz akışkan içinde stabil bir şekilde süspansiyon haline getirilebilir. Ancak tek adım yönteminin bazı dezavantajları vardır. Bunlardan ön önemlisi kalıntı reaktiflerin tamamlanmayan reaksiyonlar veya kararlılık nedeniyle nano akışkan içinde kalmasıdır. Bu safsızlık etkisini ortadan kaldırmadan nano partikül etkisini açıklamak zordur. Bir diğeri yalnızca düşük buhar basınçlı sıvıların işlemle uyumlu olmasıdır. Bu kıstas,

yöntemin uygulanmasını sınırlar [117], [118].

İki adım yöntemi, nano partiküllerin baz sıvı içinde dağıtılarak nano akışkanların hazırlandığı bir işlemdir. Nano partiküller, nano lifler veya bu yöntemde kullanılan nano tüpler ilk önce durağan gaz yoğunlaşması, kimyasal buhar biriktirme, mekanik alaşımlama veya diğer uygun tekniklerle kuru bir toz halinde üretilir ve daha sonra ikinci bir işlem adımında bu nano boyutlu tozlar bir akışkan içine dağıtılır [117]. Dağıtma işleminde genellikle, ultrasonik ekipman kullanılarak parçacıklar yoğun bir şekilde dağıtılır ve parçacıkların topaklanması azaltılır [119]. Şekil 5.10'da nano akışkan hazırlama da tek adım ve iki adım yöntemi anlatılmaktadır.



Şekil 5.10. Nano akışkan hazırlama prosesi a) Tek adım yöntemi b) İki adım yöntemi [120].

Bu iki yöntem nano akışkanların hazırlanmasını nano partiküllerin hazırlanmasından ayırır. Sonuç olarak, nano partiküllerin topaklanması her iki aşamada, özellikle nano partiküllerin kurutulması, depolanması ve taşınması sürecinde gerçekleşebilir. Topaklanma, nano partiküllerin yalnızca mikro kanallara yerleşmesine ve tıkanmasına neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda termal iletkenliği de azaltmaktadır. Ultrasonik karıştırma veya yüzey aktif maddelerin sıvılara eklenmesi gibi basit teknikler, partikül topaklanmasını en aza indirmek ve dağılım davranışını iyileştirmek için sıklıkla kullanılır. Yüzey aktif maddelerinin kullanılmasının ana nedeni, nano akışkanın stabilitesinin arttırılması ve daha hidrofilik hale getirilmesidir. Ayrıca nano akışkanlara yüzey aktif madde eklenmesiyle nano partiküller arasındaki itici kuvvetler artmakta ve

nano akışkanın homojenliği artmaktadır [121], [122], [123].

Nano partikül sentez teknikleri, birkaç şirket tarafından hâlihazırda endüstriyel üretim seviyelerine yükseltildiğinden, bu tozların kullanımına dayanan iki aşamalı sentez yöntemlerinin kullanılmasında potansiyel ekonomik avantajlar vardır. Ancak çözülmesi gereken önemli sorunlardan biri hazırlanan nano akışkanların kararlılığıdır [117].

Hazırlanan bu nano akışkanlar mono nano akışkanlar ve hibrid nano akışkanlar ismini almaktadır.

Mono nano akışkanlar baz sıvı içerisine tek bir nano partikülün eklenmesiyle hazırlanırken, hibrid nano akışkanlar farklı üstün özellikleri olan nano partiküllerin baz sıvıya eklenmesiyle hazırlanmaktadır. En az iki farklı nano partikülün kesme sıvısına eklenerek hazırlandığı hibrid nano akışkanlar, sadece bir nano partikülün eklenerek hazırlandığı mono nano akışkanlara göre daha üstün soğutma/yağlama özellikleri sergilemektedirler. Hibrid nano akışkanlara eklenen nano partiküller farklı özellik ve şekillere sahip oldukları için daha üstün özellik gösterebilmektedirler. Kesici takım-iş parçası yüzeyinde oluşan sürtünmenin ve kesme sıcaklığının azaltılmasını sağlayan tribo film tabakası, iş parçası yüzey kalitesinde, kuvvetlerde ve takım ömründe önemli iyileşmeler sağlayarak üretim maliyetlerini de düşürmektedir [12].

6. MATERYAL METOT

Delme deneylerinde Nikel esaslı süper alaşım grubunda bulunan Hastelloy X süper alaşımı kullanılmıştır. Kuru, MMY, Nano MMY, Hibrid Nano MMY kesme koşullarının itme kuvveti, moment, delik kalitesi, kesme sıcaklığı, çapak yüksekliği, takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanılan nano akışkanlar bitkisel esaslı yağa hacimce %0,6 hBN ve GNP nano tozlarının ve ağırlıkça %0,25 oranında SDS ve GA yüzey aktif maddelerin eklenmesiyle elde edilmiştir. Deneyler iki farklı kesme hızında (20 ve 30 m/dak), iki farklı ilerlemede (0,04 ve 0,06 mm/dev) ve sabit delme derinliğinde (13,5 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan iş parçası malzemesi, kesici takım, takım tezgâhı, soğutma/yağlama sistemleri, deneysel prosedürün hazırlanma süreci, deneysel çalışmada yapılan ölçümler ve deney sonuçlarının analiz edilmesi aşağıda bölümler halinde detaylı olarak açıklanmıştır.

6.1. DENEYLERDE KULLANILAN İŞ PARÇASI VE EKİPMANLAR

6.1.1. İş Parçası

Delme deneylerinde Hastelloy X süper alaşım malzemesi kullanılmış olup, kimyasal bileşimi Çizelge 6.1'de fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Hastelloy X süper alaşımının kimyasal içeriği (%).

Ni %	**Cr** %	**Fe** %	**Mo** %	**Ti** %	**Al** %	**Mn** %	**Si** %	**C** %	**Cu** %	**Co** %	**Diğer** %
46,7	22,6	18,72	8,98	0,02	0,14	0,51	0,30	0,05	0,14	0,67	1,17

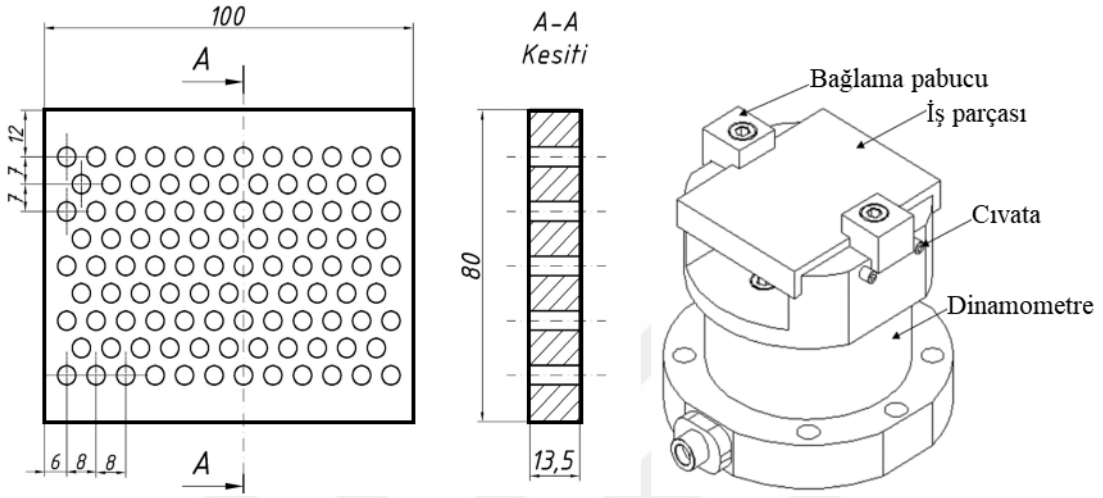
Çizelge 6.2. Hastelloy X süper alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.

Erime Sıcaklığı (°C)	**Elastikiyet Modülü** (GPa)	**Özgül Isı** (J/kg-K)	**Sertlik** (HRB)	**Çekme Dayanımı** (MPa)	**Akma Dayanımı** (MPa)	**Termal İletkenlik** (W/m-K)	**Yoğunluk** (gr/cm^3)	**Uzama** (%)
1260-1355	207	486	87,1	732,2	319,2	9,1	8,22	54,4

6.1.1.1. *İş Parçası Boyutları ve Tezgâha Bağlanması*

Hastelloy X süper alaşım iş parçası numuneleri, 200 × 1000 mm ebatlarında plakadan

kesilerek hazırlanmıştır. Malzeme kimyasal kararlılığının ve mikroyapısının etkilenmemesi için kesim işlemi tel erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir. İtme kuvveti ve delik kalite deneylerinde 100 × 80 × 13,5 mm ebatlarında Hastelloy X süper alaşım malzemesi kullanılmıştır. Deneyler iş parçası malzemesinin dinamometre için özel tasarlanan bağlama kalıbına [124] bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. İş parçası ve bağlama kalıbının dinamometre üzerine yerleşimi Şekil 6.1'de verilmiştir.

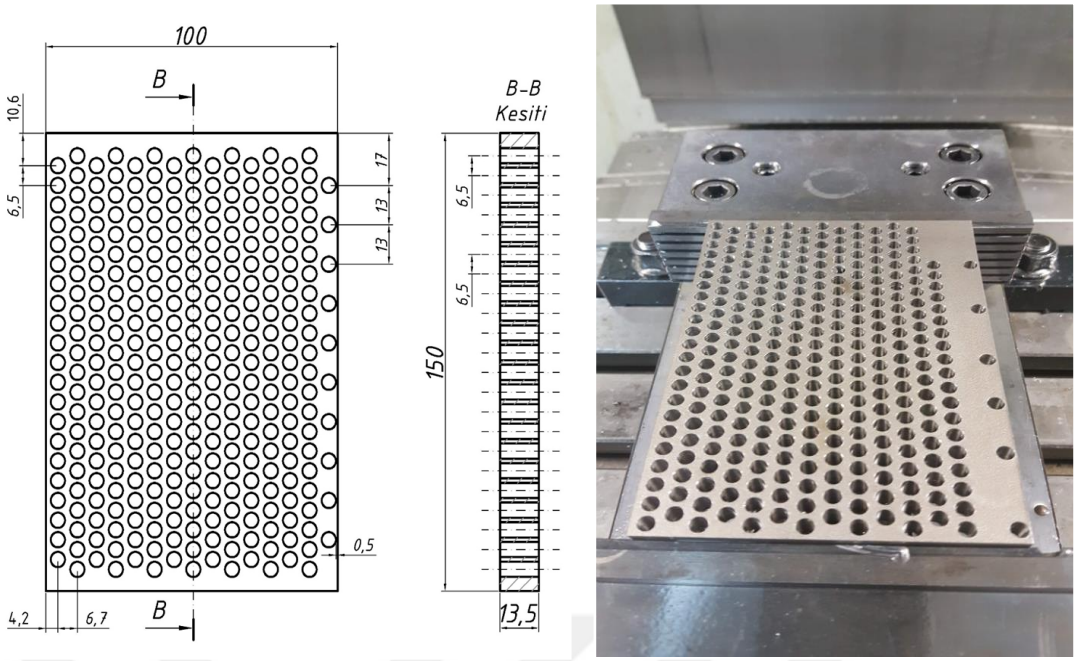


a) b)

Şekil 6.1. İtme kuvveti, moment ve delik kalitesi deneylerinde kullanılan iş parçası a) Hastelloy X malzeme boyutları b) Bağlama kalıbının dinamometre üzerine yerleşimi.

Kesme sıcaklığı ve takım aşınması deneylerinde ise 150 × 100 × 13,5 mm ebatlarında Hastelloy X süper alaşımı malzemesi kullanılmıştır. Deneyler, iş parçası malzemesinin CNC dik işleme merkezinin mengenesine bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.2).

Tüm deneylerde delikler, parça yüzeyine mümkün olduğu kadar eşit aralıklarda yerleştirilerek, delik etrafındaki ısı ve sertliğin olabildiğince eşit dağıtılması amaçlanmıştır.



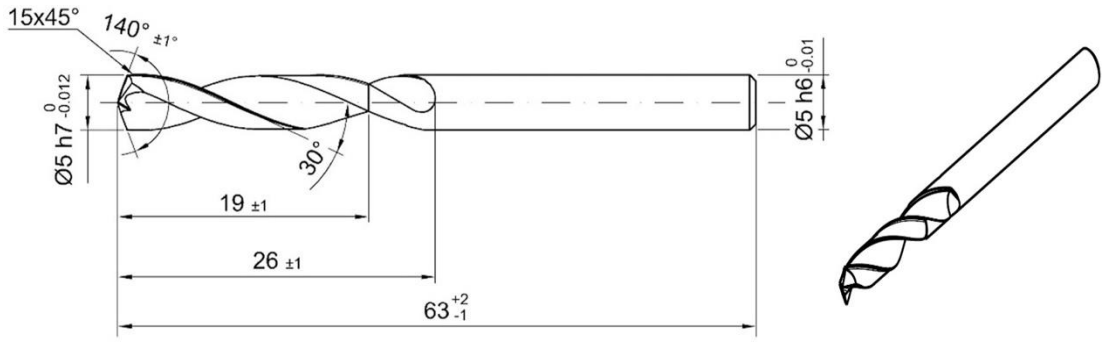
a) b)

Şekil 6.2. Kesme sıcaklığı ve takım aşınması deneylerinde kullanılan iş parçası a) Hastelloy X malzeme boyutları b) CNC dik işleme mengenesine iş parçasının bağlanması.

Delme işleminde ideal delik boyu delme çapının üç katı ya da üç katından daha düşük olması şartına göre delme boyu 13,5 mm olarak belirlenmiş olup, tüm deneylerde numuneler üzerine boydan boya (açık) delikler delinmiştir.

6.1.2. Kesici Takım

Deneylerde Taegutec firması tarafından Q5x26-Q5H6x63 koduyla üretilen 5 mm çapında 140° uç açısı ve 30° helis açısına sahip TTT.7035.139.01 kalite TiAlN kaplı matkaplar kullanılmıştır. TiAlN kaplama malzemesi yüksek sıcak sertlik, düşük ısı iletkenliği, yüksek oksidasyon direnci ve yüksek aşınma direnci gibi bazı üstün özellikleri nedeniyle özellikle süper alaşımların delme operasyonlarında tercih edilmektedir. Delme deneylerinde her bir işleme parametresinde yeni bir kesici takım kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan matkapların boyutları ve görseli Şekil 6.3'te verilmiştir.



a) b)

Şekil 6.3. Deneylerde kullanılan matkap a) Boyutları b) Görseli.

6.1.3. Takım Tezgâhı

Delme deneylerinde, Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan DELTA SEIKI CNC-1050 A marka CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. CNC dik işleme tezgâhına ait teknik özellikler Çizelge 6.3'te verilmiştir.

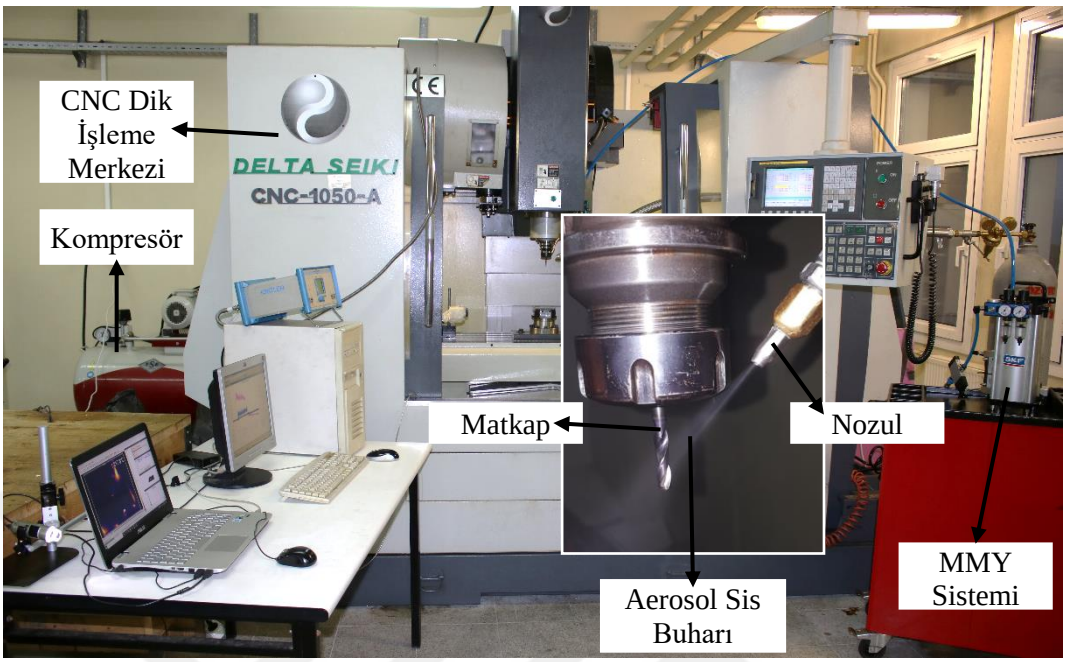
Çizelge 6.3. CNC dik işleme tezgâhının özellikleri.

Özellik	**Açıklama**
Markası	DELTA SEIKI CNC-1050 A
Tabla ölçüsü	1270 × 400 mm
Maksimum iş parçası ağırlığı	500 kg
Maksimum devir sayısı	10000 dev/dak
Kesici bağlama hane sayısı	24 Adet
Fener mili motor gücü	11 kW
İşletim sistemi	Fanuc OM

6.1.4. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

MMY yönteminde, bir nozul yardımıyla çok az miktarda (10 ~ 100 mL/saat) kesme sıvısı basınçlı hava ile sis buharı şeklinde kesme bölgesine gönderilmektedir. Deneylerde kesme yağlarının kesme bölgesine gönderilmesinde SKF marka Vario model harici Minimum Miktarda Yağlama sistemi kullanılmıştır. MMY sistemi yağ haznesi, her deney sonrası temizlenerek sonraki deney için hazır hale getirilmiştir. Tüm deneylerde MMY sistemi hava basıncı 8 bar ve akış hızı 50 mL/saat olacak şekilde sabit tutulmuştur. Ayrıca MMY sistemindeki akışkanın kesme bölgesine tatbik edilmesinde 2 mm çapında nozul kullanılmış olup, tüm deneylerde nozul matkapla dikeyde 30 derece açı yapacak şekilde 20 mm mesafede konumlandırılmıştır.

Deneylerde kullanılan MMY sistemi Şekil 6.4'te MMY cihazına ait teknik özellikler ise Çizelge 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Deney seti kurulumu.

Çizelge 6.4. MMY cihazına ait teknik özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Model	SKF Vario
Gövde	Metal
Kapasite (L)	1,8
Takım İçi Yağlama Desteği	Var
Takım Dışı Yağlama Desteği	Var
Hava Basıncı (bar)	Min. 6, Maks. 8
Çalıştırma	Manuel Sürgülü Vana
Yağ Seviyesi İzleme	Var
Akış metre	Yok
Basınç metre	Yok
Çıkış Sayısı	1 - 3
Hava Tüketimi (L/dak)	15 - 300
Yağ Miktarı (mL/saat)	1 - 150
Ağız Pozisyonu	Dikey
Boş Ağırlık (kg)	6,1

6.1.4.1. *Deneylerde Kullanılan Bitkisel Esaslı Yağ*

MMY sisteminde ve nano akışkan hazırlamada baz sıvı olarak biyolojik olarak parçalanabilen çevre dostu bitkisel esaslı yağ kullanılmıştır. Belgin firmasından temin edilen bitkisel esaslı yağa ait özellikler Çizelge 6.5'te verilmiştir.

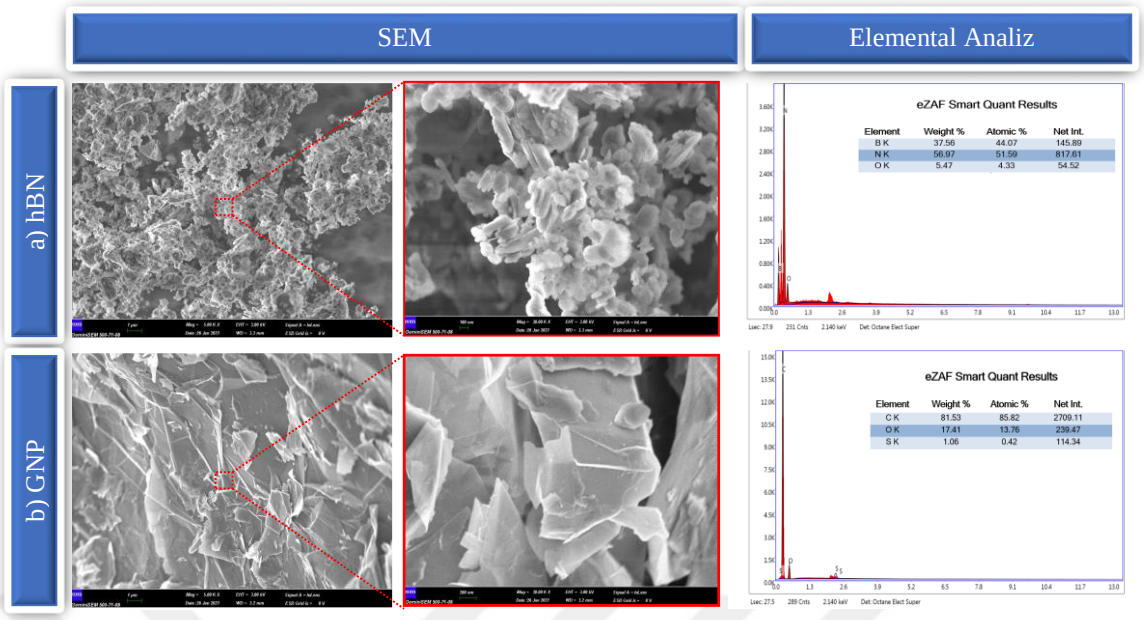
Çizelge 6.5. Bitkisel esaslı yağa ait özellikler.

Kesme Yağı	**Yoğunluk** (20 °C, gr/mL)	**Bakır Korozyonu** (3s, 100 ºC)	**Kırılma İndisi** (nD_{20})	**Viskozite** (40 °C, MPa.s)	**Parlama Noktası** (°C)	**Görünüş**
Cuttex SYN 5	0,895	1a	1,46	5,16	170	Açık Sarı Berrak

6.1.4.2. *Deneylerde Kullanılan Nano Partikül Tozlar*

Nano akışkanlar, yağlayıcılık özelliğini ve termal iletim katsayısını artırmak amacıyla baz sıvı içerisine hacimce veya ağırlıkça katı haldeki nano partiküllerin eklenmesiyle elde edilmektedir. Nano akışkan içerisine eklenen nano partiküller, termal iletkenlik özelliğini artırmakta, enerji verimliliği sağlamakta, kesici takım ve iş parçası yüzeyinde koruyucu ince bir yağlayıcı tabaka oluşturmaktadırlar. Bu sayede kesme esnasında kesme bölgesinde sıcaklık oluşumunu ve bu sıcaklığın yayılmasını önleyerek, itme kuvveti, yüzey kalitesi, takım aşınması ve takım ömrü bakımından ciddi iyileşmeler sağlanabilmektedir [10]. Bu çalışmada nano akışkan karışımları hazırlamak için küresel formlu ve altıgen kristal kafes yapısına sahip ortalama 80 nm boyutunda hBN ve 5 nm kalınlığında, 30 μm çapında katmanlı yapıya sahip GNP nano partikül tozlar kullanılmıştır. Mono nano akışkanlar hazırlanırken nano partikül tozlar kesme yağı içerisine hacimce %0,6 oranında eklenmiştir. Hibrid nano akışkanlar için ise hacimce %0,6 oranında olacak şekilde (%0,3 hBN + %0,3 GNP) her iki tozdan eşit oranda eklenmiştir.

Beyaz grafit olarak da bilinen hBN nano partikül tozları, kimyasal kararlılığı ve yüksek erime sıcaklığı nedeniyle kesme sırasında metalin erimesinden etkilenmeyen küresel şekilli altıgen kristal yapıya sahiptir [125]. Bu kristal yapı, düşük sürtünme katsayısı ile mükemmel yağlama özellikleri sağlar. Daha iyi yağlama ve ısıl iletkenlik sağlamasından dolayı ağır işleme koşullarında üstün performans göstermektedirler [126]. GNP yüksek ısıl ve elektriksel iletkenliği sayesinde yağlayıcılık ve kararlılık özellikleri ile üstün performans göstermektedir [127]. Nano akışkan hazırlamada kullanılan nano partiküllere ait SEM görüntüleri ve elemental analizleri Şekil 6.5'te, özellikler ise Çizelge 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.5. Nano partiküllere ait SEM görüntüleri ve elemental analiz a) hBN b) GNP.

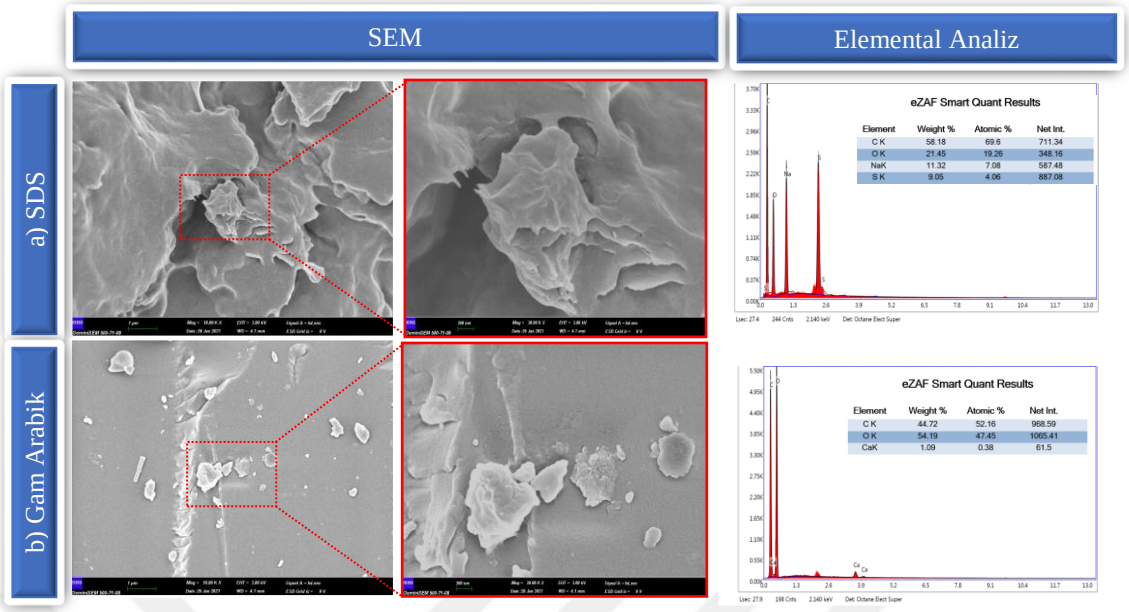
Çizelge 6.6. Nano partiküllere ait özellikler.

Partikül tipi	**Boyut** (nm ve µm)	**Saflık** (%)	**Yoğunluk** (gr/cm^3)	**Nano partikül şekli**	**Görünüş**
hBN	70 ~ 90 nm	99,85	2,30	Küresel	Beyaz
GNP	Kalınlık 5 nm Çap 30 µm	99,90	2,25	Katmanlı	Gri

6.1.4.3. *Deneylerde Kullanılan Yüzey Aktif Maddeler*

Nano akışkanları hazırlama aşamasında, homojen bir karışım oluşturmak ve yüzey gerilimini azaltmak için karışıma bazı ilave kimyasallar (yüzey aktif maddeler gibi) eklenebilir. Yüzey aktif maddeler nano partikülleri askıda tutarak homojen karışım oluşturabilir ve kümeleşmeyi önleyerek nano akışkanların uzun süre stabil kalmasını sağlayabilir [128], [129].

Bu çalışmada Sodium Dodesil Sulfat (SDS) ve Gam Arabik (GA) olmak üzere 2 farklı yüzey aktif madde kullanılmıştır. Yüzey aktif maddeler -325 mesh boyutunda ve %99,95 saflıktadır. Yüzey aktif madde oranları literatürdeki çalışmalara paralel olarak ağırlıkça %0,25 oranında kullanılmıştır [130], [131]. Şekil 6.6'da nano akışkanlara ilave edilen yüzey aktif maddelere ait SEM görüntüleri ve elemental analizleri verilmiştir.

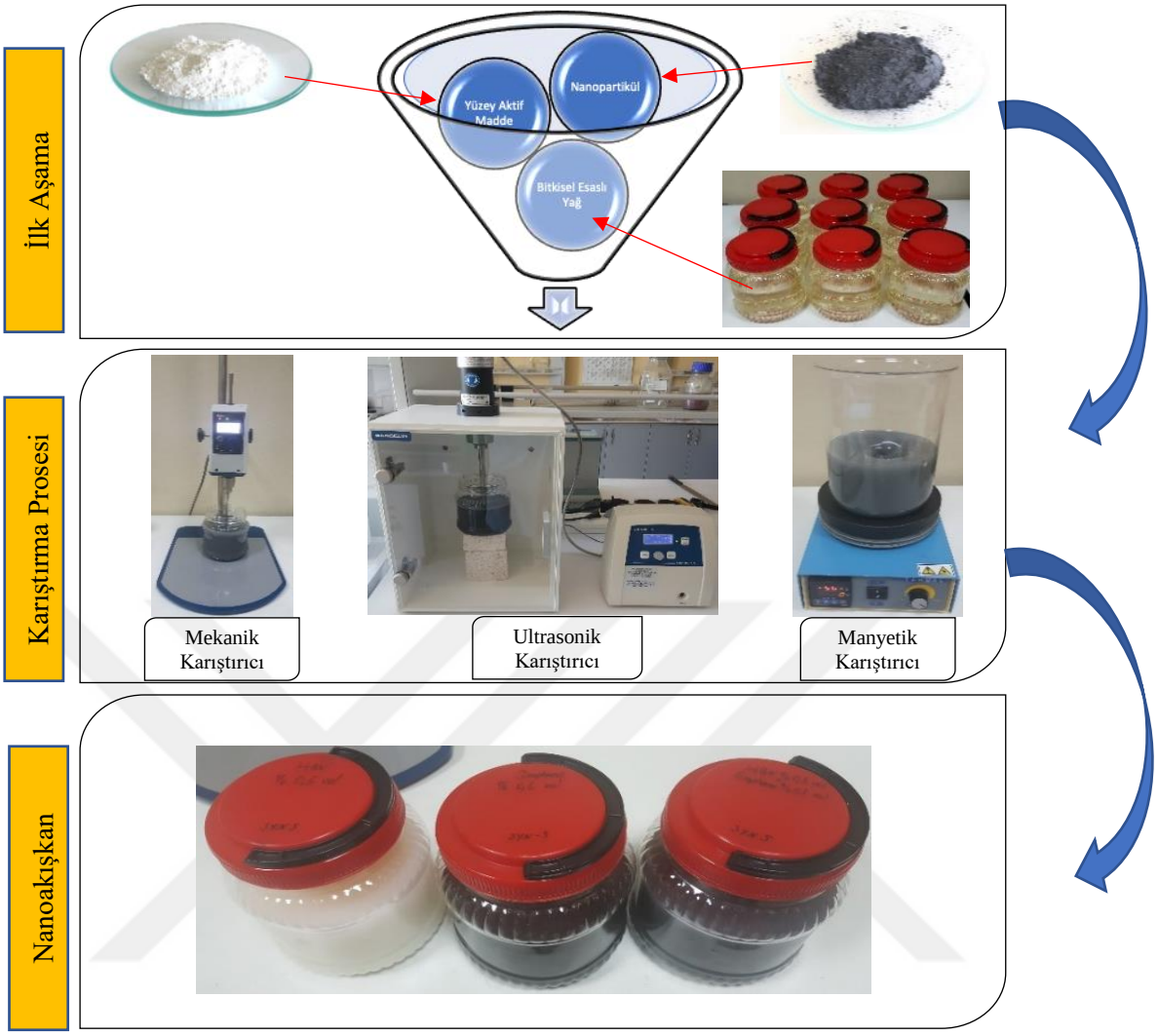


Şekil 6.6. Yüzey aktif maddelere ait SEM görüntüleri ve elemental analiz a) SDS b) Gam Arabik.

6.1.5. Nano Akışkan Hazırlama Süreci

Nano akışkanların hazırlanmasında tek adım yöntemi ve iki adım yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Nano akışkan hazırlamada uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle, iki adım yöntemi daha çok tercih edilmektedir. İki adım yönteminde hazırlanan katı nano partiküller doğrudan baz sıvı içerisine aktarılarak çeşitli karıştırma yöntemleriyle karıştırılırlar [132]. Bu çalışmada da nano akışkanlar, avantajları nedeniyle iki adım yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır.

İki adım yönteminde homojen karışım elde edebilmek için ultrasonik banyo, mekanik karıştırıcı, manyetik karıştırıcı gibi farklı cihazlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada homojen karışım elde edebilmek için önce yüzey aktif maddeler kademeli olarak kesme yağına eklenerek mekanik bir karıştırıcıda karıştırılmış daha sonra nano partiküller kademeli olarak eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Literetürde de yüzey aktif madde ilave edilen nano akışkan karışımlar benzer şekilde hazırlanmıştır [133]. Nano akışkanlar, ilk olarak mekanik karıştırıcıda (Daihan HS-100D) 750 dev/dak'da 1 saat, daha sonra ultrasonik homojenizatörde (Bandelin Sonopuls HD-3200) 200W maksimum çıkış gücünde ve 20 kHz frekansta 30 dakika ve son olarak manyetik bir karıştırıcı (Termal N11151M) ile 1500 dev/dak'da 2 saat karıştırılarak hazırlanmıştır. Nano akışkan hazırlama aşamaları Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. Nano akışkan hazırlama aşamaları.

Hazırlanan nano akışkanlar dikkatli bir şeklilde kodlanmıştır. Çizelge 6.7'de hazırlanan nano akışkanlara ait kodlamalar bulunmaktadır.

Çizelge 6.7. Hazırlanan nano akışkanlara ait kodlamalar.

Kodlama	Eklenen nano partikül	Eklenen yüzey aktif madde
Saf yağ	-	-
hBN	hBN (hacimce %0,6)	-
hBN-GA	hBN (hacimce %0,6)	Gam Arabik (ağırlıkça %0,25)
hBN-SDS	hBN (hacimce %0,6)	SDS (ağırlıkça %0,25)
GNP	GNP(hacimce %0,6)	-
GNP-GA	GNP (hacimce %0,6)	Gam Arabik (ağırlıkça %0,25)
GNP-SDS	GNP (hacimce %0,6)	SDS (ağırlıkça %0,25)
hBN/GNP	hBN+GNP (hacimce %0,3 + hacimce %0,3)	-
GNP-SDS	GNP (hacimce %0,6)	SDS (ağırlıkça %0,25)
hBN/GNP	hBN+GNP (hacimce %0,3 + hacimce %0,3)	-

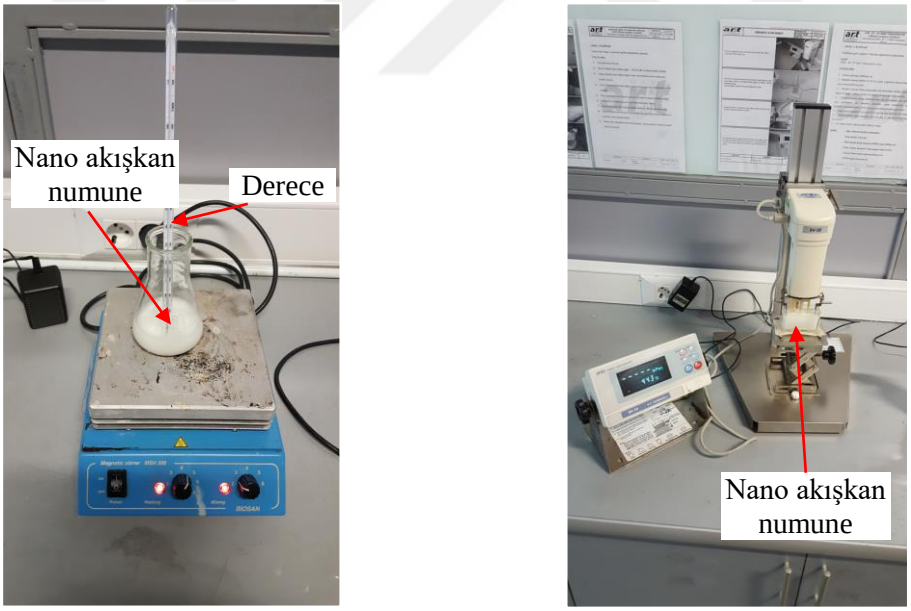
Çizelge 6.7. (devam) Hazırlanan nano akışkanlara ait kodlamalar.

hBN/GNP-GA	hBN+GNP (hacimce %0,3 + hacimce %0,3)	Gam Arabik (ağırlıkça %0,25)
hBN/GNP-SDS	hBN+GNP (hacimce %0,3 + hacimce %0,3)	SDS (ağırlıkça %0,25)

6.2. ÖLÇÜM VE ANALİZ CİHAZLARI

6.2.1. Akışkanların Viskozite ve pH Ölçümleri

Nano akışkanların viskozite ve pH değerleri yağlama ve soğutma fonksiyonlarını doğrudan etkilediği için son derece önemlidir [12], [132], [134]. Bu nedenle çalışmada kullanılan saf yağ ve nano akışkanların viskozite ve pH değerleri ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan saf yağ ve nano akışkanların viskoziteleri 40 °C'de sabit sıcaklıkta AND SV-10 viskozite ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Saf yağ ve nano akışkan karışımları 40 °C sıcaklığa ulaştırmada, Biosan MSH 300 manyetik ısıtmalı karıştırıcı kullanılmıştır. Akışkanların viskozite ölçümü Şekil 6.8'de, viskozite ölçüm cihazına ait teknik özellikler ise Çizelge 6.8'de verilmiştir.



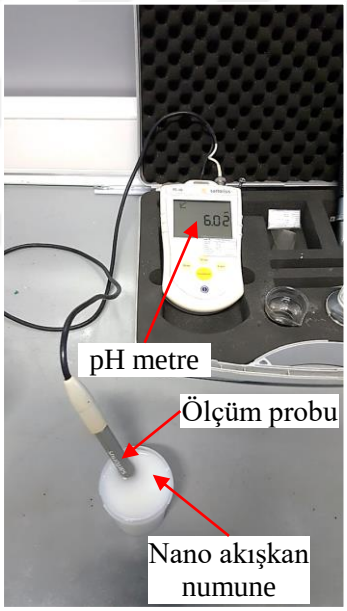
a) b)

Şekil 6.8. Akışkanların viskozite ölçüm prosesi a) Akışkan ısıtmada kullanılan manyetik karıştırıcı b) Viskozite ölçüm cihazı.

Çizelge 6.8. Viskozite ölçüm cihazına ait özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Ölçüm Aralığı (MPa.s)	0,3 ~ 10000
Hassasiyet	%1
Çalışma Ortam Sıcaklığı (°C)	10 ~ 40
Titreşim Frekansı (Hz)	30
Ölçüm Metodu	Tuning Fork Titreşim Metodu
Sıcaklık Ölçümü (°C)	0 ~ 160 / 0,1
Ara yüz	RS-232C

Nano akışkanların pH değeri akışkanın homojenliği hakkında bilgi vermektedir. pH değerinin yüksek olması, daha homojen bir karışım olduğunu ifade etmektedir [135]. Deneylerde kullanılan saf yağ ve nano akışkanların pH değerleri Sartorius PT-10P pH ölçer ile ölçülmüştür. pH ölçerin ölçüm aralığı 0 ~ 15 pH olup ölçüm hassasiyeti 0,01'dir. Nano akışkanların pH ölçümü Şekil 6.9'da gösterilmektedir.

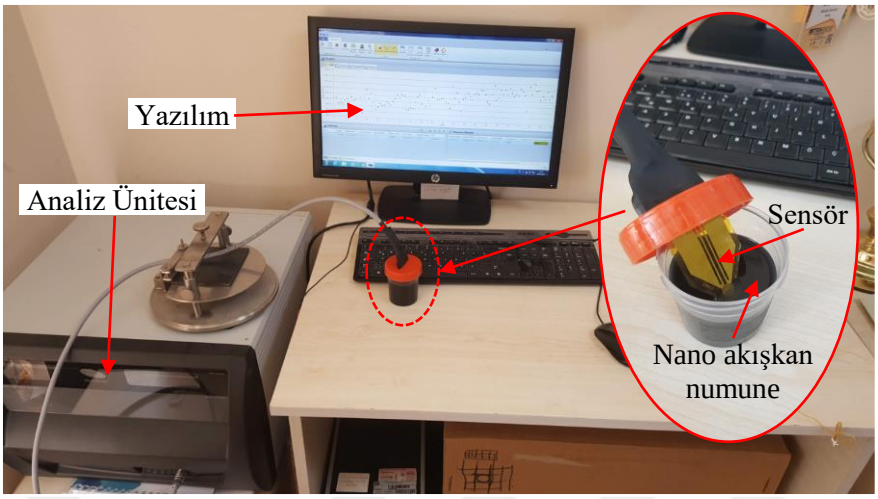


Şekil 6.9. pH ölçümü.

6.2.2. Akışkanların Termal İletkenlik Ölçümleri

Bitkisel esaslı yağ ve nano akışkanların termal iletkenlikleri, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Hot Disk TPS 2500s termal analiz cihazı kullanılarak, 23 ˚C sabit sıcaklıkta ölçülmüştür. Ölçümler sıcak disk yöntemiyle sıvılar için tasarlanan 5465 kodlu, yarıçapı 3,2 mm olan sensör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Termal iletkenlik ölçümü Şekil 6.10'da ve termal iletkenlik analiz cihazına ait teknik özellikler ise Çizelge 6.9'da verilmiştir.



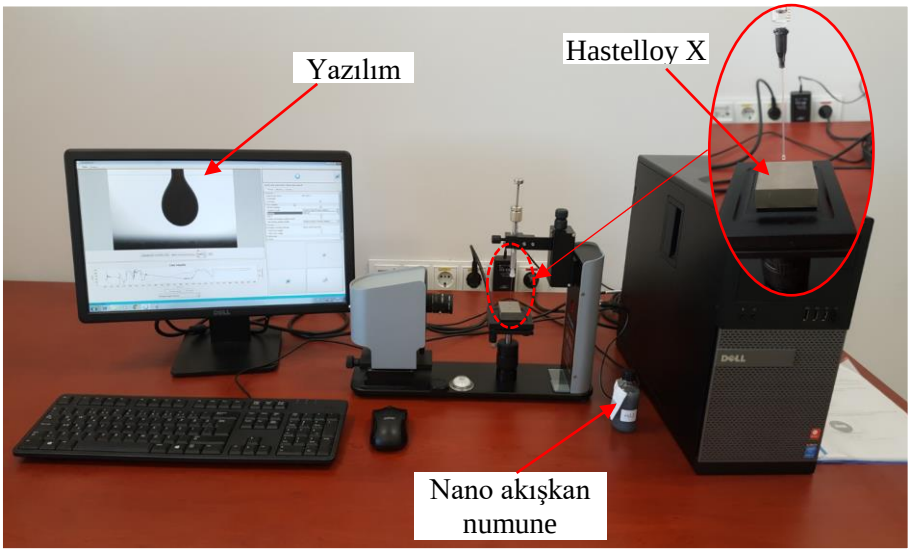
Şekil 6.10. Termal iletkenlik ölçümü.

Çizelge 6.9. Termal iletkenlik ölçüm cihazına ait teknik özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Termal iletkenlik (W/m/K)	0,005 ~ 1800
Termal difüzite (mm^2/sn)	0,1 ~ 1200
Özgül ısı kapasitesi (MJ/m^3K)	5'e kadar
Ölçüm zamanı (sn)	1 ~ 1280
Tekrarlanabilirlik	Tipik olarak %1'den az
Doğruluk	%5'ten daha iyi (termal iletkenlik)
Sıcaklık aralığı (°C)	-23 ~ 1000

6.2.3. Akışkanların Temas Açısı ve Yüzey Gerilimi Ölçümleri

Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümlerinde Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknolojik Araştırma ve Uygulama Merkezi Laboratuvarında bulunan Theta Lite model (Biolin Scientific Attension - İsveç) temas açısı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yüzey gerilimi ölçümü asılı damla tekniği, temas açısı ölçümü durağan damla tekniği kullanılarak yapılmıştır. Durağan damla tekniği, hızlı ve doğru ıslanabilirlik testi için kullanılan standart bir yöntemdir. Bu yöntemle, biriken damla iş parçası yüzeyinde uzanır ve damlacık, katı yüzey ve damlacığı çevreleyen faz olmak üzere bu üç faktörün etkisine bağlı olarak oluşan temas açısı ölçülmektedir [136]. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümleri Şekil 6.11'de ve yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümünde kullanılan cihaza ait özellikler ise Çizelge 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.11. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümü.

Çizelge 6.10. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçüm cihazına ait özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Temas açısı ölçüm aralığı (°)	0 ~ 180
Temas açısı ölçüm hassasiyeti (°)	± 0,1
Yüzey gerilimi ölçüm aralığı (mN/m)	0,01 ~ 2000
Yüzey gerilimi ölçüm hassasiyeti (mN/m)	± 0,01
Maksimum ölçüm hızı (fps)	2068
Maksimum çözünürlük (piksel)	1280 × 1024

6.2.4. İtme Kuvveti ve Moment Ölçümleri

Delik delme işleminde itme kuvveti ve moment (tork) değerleri delme işleminin verimliliğini etkilemektedir. Artan itme kuvveti ve moment değerleri güç tüketimi ve toplam üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. İtme kuvveti ölçümleri Kistler 9257-A tipi dinamometre ile yapılmıştır. İtme kuvveti ölçümlerinin sağlıklı biçimde yapılabilmesi için iş parçası bağlama kalıbı ile dinamometre üzerine bağlanmıştır. Dinamometreden gelen sinyaller Kistler 5070-A tipi çok kanallı amplifikatör ile veri okuma kartına aktarılarak, Kistler Dynoware yazılımı ile sayısal değerlere dönüştürülmüştür (Şekil 6.4). Deneyler sırasında titreşim ve salgının önlenmesi için matkap ucu ve takım tutucu arasındaki mesafe 26 mm'ye sabitlenmiştir. Dinamometreye ait teknik özellikler Şekil 6.12'de, amplifikatöre ait teknik özellikler ise Şekil 6.13'te verilmiştir.



Ölçüm Aralığı (kN)	Fx, Fy Fz	-5….5 -5….5 -5….20
Moment (Nm)	Mz	-200…200
Hassasiyet (pC/N)	Fx, Fy	-7,8
Hassasiyet (pC/N)	Fz	-3,5
Hassasiyet (pC/Nmm)	Mz	-160
Kapasitans (pF)	Fx, Fy, Fz	185
Kapasitans (pF)	Mz	420
Doğrusallık (FSO)		%≤±1
Histerezis (FSO)		%≤1
Çap (mm)		100
Yükseklik (mm)		70
Ağırlık (kg)		4,2

Şekil 6.12. 9257-A tipi dinamometrenin teknik özellikleri.



Kanal sayısı	8
Açıklama	19” rank
Bağlantı	Fischer 9 pol. Neg.
Ölçüm aralığı (pC)	-± 200..200000
Frekans aralığı (kHz)	-0… > 45
Çıktı sinyali (V)	± 10
Güç (V)	100…240
Arayüz	RS-232C

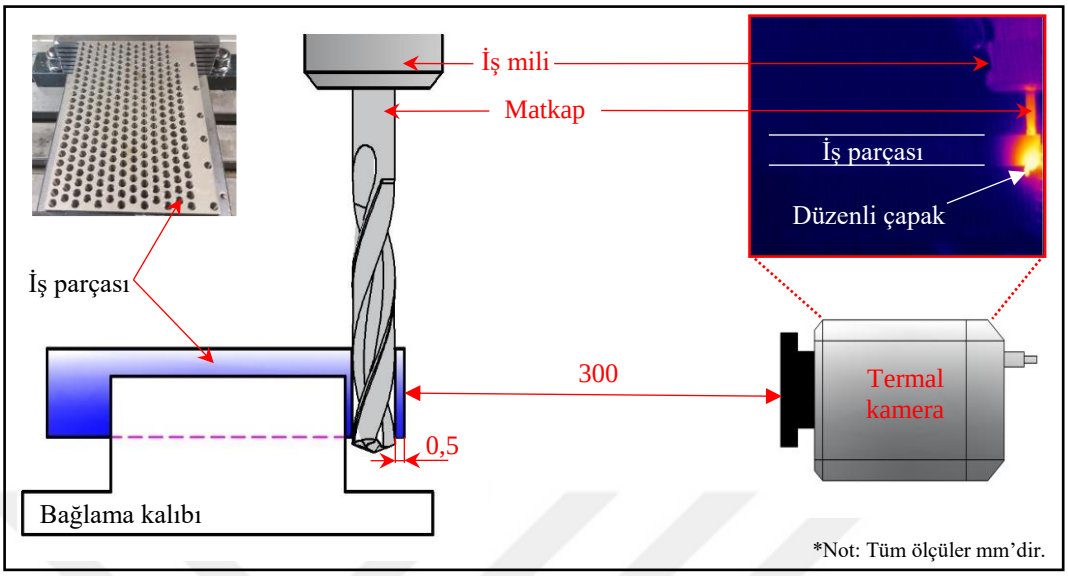
Şekil 6.13. 5070A01100 tip amplifikatörün teknik özellikleri.

6.2.5. Kesme Sıcaklığı Ölçümleri

Kesme bölgesinde oluşan sıcaklık, iş parçası yüzey kalitesini ve kesici takım aşınmasını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Özellikle delik delme gibi yarı kapalı ortamda gerçekleşen karmaşık işlemlerde kesme sıcaklığı daha da önem kazanmaktadır. Delme işlemi sırasında talaş sıkışması kesme bölgesindeki oluşan sıcaklığı artırmakla beraber, matkap kesme yüzeylerine talaşların yapışmasına kesici takımın hızla aşınarak ömrünü tamamlamasına neden olmaktadır. Bu nedenle delme işlemlerinde oluşan sıcaklığın kontrol altına alınması son derece önem arz etmektedir [26].

Kesme bölgesindeki oluşan maksimum sıcaklığın ölçülmesinde Optris marka PI 450 model kızılötesi termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera ile sıcaklık ölçümünde emisivite değeri önem taşımaktadır. Hastelloy X için kızılötesi kamera üreticisinin tavsiye ettiği 0,5 emisivite değeri alınmıştır. Optris Connect adlı yazılım programıyla kesme bölgesinde oluşan sıcaklık online olarak görüntülenip kayıt altına alınmıştır.

Sıcaklık ölçümü Şekil 6.14'te ve termal kameraya ait teknik özellikler ise Çizelge 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.14. Kesme sıcaklığının ölçülmesi.

Çizelge 6.11. Termal kameraya ait teknik özellikler.

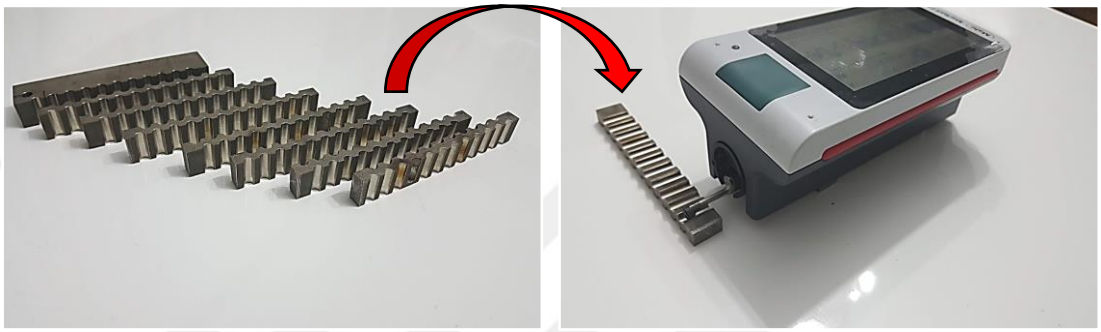
Özellik	**Açıklama**
Marka / Model	Optris / PI 450
Sıcaklık Aralığı (°C)	-20 ~ 900
Spektral Aralık (µm)	7,5 ~ 13
Çerçeve Hızı (Hz)	80
Termal Hassasiyet (mK)	40
Optik Çözünürlük (piksel)	382 × 288
Ağırlık (gr)	320

Sıcaklık ölçümünde termal kamera kesme bölgesinden 300 mm uzaklığa yerleştirilerek, iş parçası yan yüzeyine 0,5 mm mesafede delikler delinerek maksimum sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

6.2.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey kalitesi ürün kalitesini ve ürünün kullanım ömrünü etkilediği için işlenebilirlik ve özellikle delik için önemli kriterlerden biridir. Delme işlemlerinde en önemli problem olan delme boyuna bağlı olarak zorlaşan talaş tahliyesi, talaşın delik içerisinde sıkışmasına ve dolayısıyla da yüzey kalitesinin bozulmasına, hatta takımın kırılmasına sebep olmaktadır [137].

İstenilen yüzey kalitesinin elde edilmesinde, uygun kesici takımın, kesme parametrelerinin ve soğutma koşullarının seçilmesi önemli rol oynamaktadır. Delme işlemlerinde ikinci bir işlem olmadan istenilen yüzey pürüzlülük değerinin elde edilmesi üretim maliyetlerini ve işleme zamanını düşürmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Mahr Marsurf PS 10 taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü Şekil 6.15'te ve yüzey pürüzlülük cihazına ait teknik özellikler Çizelge 6.12'de verilmiştir.



a) b)

Şekil 6.15. Yüzey pürüzlülük ölçümü a) Ölçüm için hazırlanan Hastelloy X iş parçası b) Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

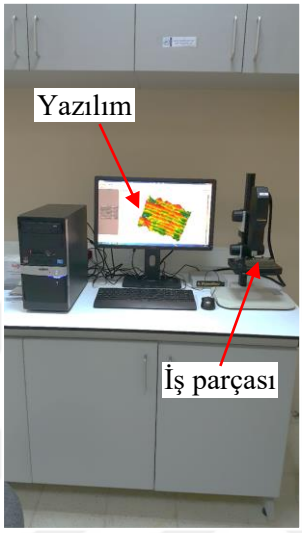
Çizelge 6.12. Yüzey pürüzlülük cihazına ait teknik özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Marka Model	Mahr Marsurf PS 10
Ölçme Kuvveti (N)	0,00075
Ölçme Prensibi	Tarama Ucu Yöntemi
Girdi	Endüktif Destekli Prob
Ölçüm Aralığı (mm)	0,350
Ölçüm Birimleri	metrik/inç
Profil Çözünürlüğü (nm)	8
Uç Malzemesi	Elmas
Tarama Ucu (µm)	2
Örnekleme Uzunluğu Sayısı	1-16
Hareket Uzunluğu (mm)	1, 2, 4, 8, 12, 16
Hareket Değerlendirme Uzunluğu (mm)	1,25, 4,0, 12,5
Ölçülebilen Parametreler	Ra, Rz, Rmaks
Kalibrasyon İşlevi	Dinamik
Ağırlık (gr)	500
Boyutlar (mm)	160 × 77 × 50

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinden önce iş parçası delik eksenine paralel olarak tel erezyon tezgâhında kesilmiştir. Her delik için delik eksenine paralel olarak 3 farklı noktadan

ölçüm yapılarak bu ölçümlerin ortalaması alınıp ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri elde edilmiştir.

Delik yüzeylerinin 3D yüzey topografyası Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar ve Uygulama Merkezinde bulunan Phase View marka optik profilometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Optik profilometre ölçümü Şekil 6.16'da, cihaza ait teknik özellikler ise Çizelge 6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.16. Optik profilometre ölçümü.

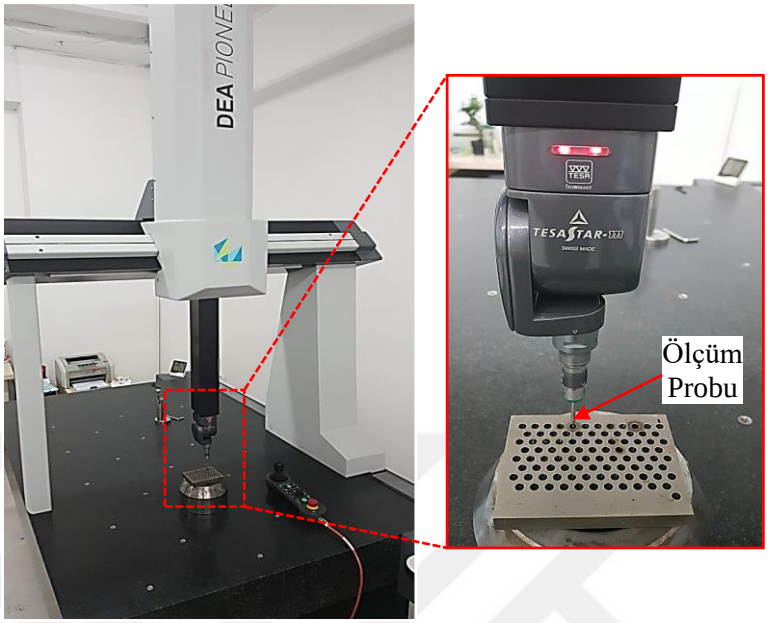
Çizelge 6.13. Optik profilometre cihazına ait teknik özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Marka/Model	PhaseView/WaveGauge
Objektif Çap Aralığı (mm)	0,5 ~ 20
Kamera Pikseli (um)	6,45 × 6,45
Güç Aralığı (D)	-20…+20
Güç Doğruluğu	%0,1…0,3
Güç Çözünürlüğü D	0,01
Doğruluk	%2
Işık Dalga Boyu (nm)	535

6.2.7. Delik Çapı Dairesellikten Sapma ve Silindiriklikten Sapma Ölçümleri

Delik kalitesini yüzey pürüzlülüğü, delik çapı, dairesellikten sapma (ovalite), silindiriklikten sapma (eksenel kaçıklık) gibi değerler belirlemektedir. Delik kalitesi kesici takım, iş parçası, kesme parametreleri ve soğutma koşulları gibi etmenlerden etkilenmektedir.

Delinen deliklerin çap, dairesellik ve silindiriklikten sapma ölçümleri Dea Pioneer marka üç boyutlu CMM (Coordinate Measuring Machine) cihazında yapılmıştır (Şekil 6.17). Çizelge 6.14'te CMM cihazına ait özellikler verilmiştir.



a) b)

Şekil 6.17. Deliklerin çap, dairesellik ve silindiriklikten sapma ölçümleri a) CMM cihazı b) Probla ölçüm.

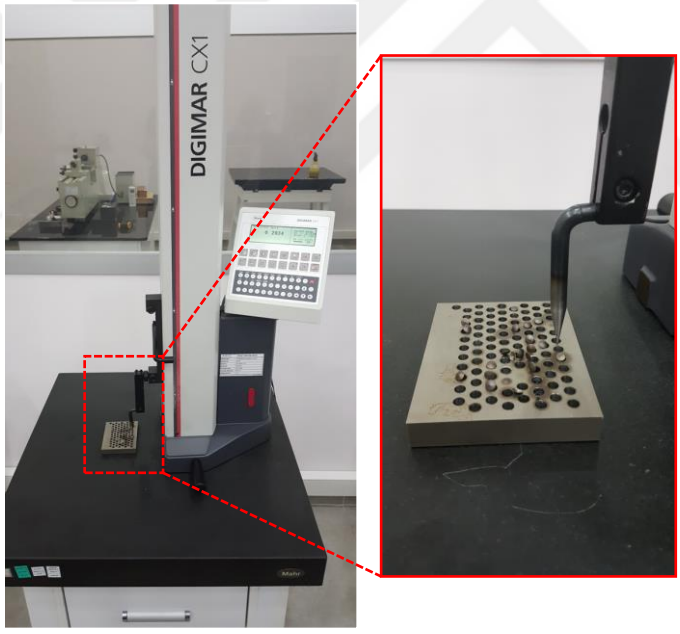
Çizelge 6.14. CMM cihazına ait teknik özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Ölçüm Aralığı X, Y, Z (mm)	800, 1200, 600
Ölçüm Hatası (µm), L (mm)	2,8 + 3,5 × L/1000
Yazılım	PC - Dmis CAD ++
Prop çapı (mm)	2
Kalibrasyon Küresi	Var

CMM cihazı ölçüm öncesinde kalibre edilerek ölçümlerin doğruluğu sağlanmıştır. 5 mm çapında delinen deliklerin, çaptan sapma, dairesellikten sapma ve silindiriklikten sapma ölçümleri 13,5 mm delik boyunca yüzeye göre üç farklı noktadan (iş parçası yüzeyinden itibaren 3, 6 ve 9 mm derinliklerde) ölçüldü. Sonuçların doğruluğu için ölçümler üç tekrarlı yapılarak gerçekleştirildi. Üç ölçümün ortalama değeri alınarak çaptan sapma, dairesellikten sapma ve silindiriklikten sapma değerleri tespit edilmiştir. Dairesellikten sapma ölçümlerinde merkez noktanın belirlenmesinde LSC metodu (Least Square Circle - En Küçük Merkez Daire) kullanılmıştır.

6.2.8. Çapak Yüksekliği Ölçümleri

Çapaklar işleme operasyonlarında istenmeyen malzeme çıkıntıları olarak ifade edilebilirler. Özellikle delme operasyonlarında, delik giriş ve çıkışlarında çapak oluşumlarına rastlanmaktadır. Girişte oluşan çapak iş parçası malzemesinin plastik akışıyla oluşmaktadır. Çıkışta oluşan çapak ise iş parçası malzemesinin yüksek sıkıştırma oranıyla delik merkezine yığılmasıyla oluşmaktadır. Çapak oluşumları matkap geometrisine, simetrisine, çapına, matkap malzemesine, iş parçası malzeme özelliğine, kalınlığına, işleme şartlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir [137], [138]. Dolayısıyla delme operasyonlarında çapak oluşumlarının kontrolü büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada tüm kesme koşulları altında delik çıkışında oluşan çapak yükseklikleri ölçülmüştür. Şekil 6.18'de görüldüğü gibi çapak yükseklikleri ölçümleri Mahr CX1 dijital yükseklik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Dijital yükseklik ölçüm cihazına ait teknik özellikler Çizelge 6.15'te yer almaktadır.



a) b)

Şekil 6.18. Çapak yüksekliği ölçümleri a) Dijital yükseklik ölçüm cihazı b) Çapak yüksekliği ölçümü.

Çizelge 6.15. Dijital yükseklik ölçüm cihazına ait teknik özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Ölçüm yüksekliği (mm)	600
Tekrarlanabilirlik (µm)	0,5
Ölçüm hatası (µm) L (mm)	(2 + L / 600)

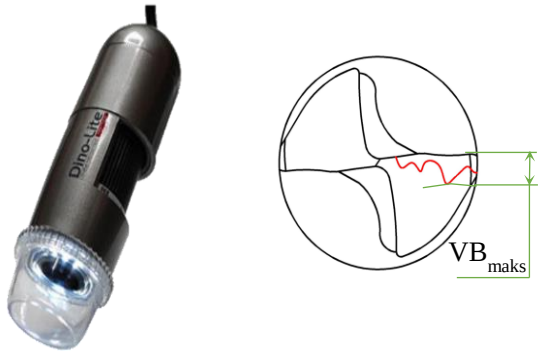
Çizege 6.15. (devam) Dijital yükseklik ölçüm cihazına ait teknik özellikler.

Ölçme kuvveti (N)	1 ± 0,2
Çalışma sıcaklığı (°C)	10 ~ 40
Boyutlar (mm)	240 × 250 × 985
Ağırlık (kg)	29

6.2.9. Takım Aşınması Ölçümleri

Makine imalat sektöründe iş, zaman, kalite üçgeninde takım maliyetleri önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle delme işlemlerinde BUE formunun oluşmasıyla takım kesici kenarları hızla aşınmakta, itme kuvveti ve moment değerlerini artırmaktadır. Bunun neticesinde ise takım ömrü nihayete ermekte ve işleme prosesi sekteye uğramaktadır [139]. Dolayısıyla kesici takım aşınmasının ve ömrünün kontrol altına alınarak takip edilmesi özellikle yarı kapalı bir alanda işleme olarak tabir edilen, delme operasyonlarında son derece önemlidir. Delme işlemlerinde oluşan talaşın tahliyesi sırasında yüzeyde oluşan çizilmelerin sonucunda ise yüzey kalitesi kötüleşmektedir. Kesme sıvısı kullanımında ise soğutma/yağlamanın da etkisiyle takım aşınması düşük mertebelerde olmakta işlenen yüzeylerin kalitesinde iyileşmeler olmaktadır [140].

Takım aşınma ölçümlerinde, aşınma mekanizma ve tiplerinin belirlenmesinde Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan, Dino-Lite marka AM 4113ZT model polarize dijital mikroskop kullanılmıştır. Dijital polarize mikroskop Şekil 6.19'da, cihaza ait teknik özellikler ise Çizelge 6.16'da verilmiştir.



a) b)

Şekil 6.19. Takım aşınması ölçümü a) Dijital mikroskop b) Takım aşınması ölçümü.

Çizelge 6.16. Dijital polarize mikroskopa ait teknik özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Marka / Model	DinoLite / AM413ZT
Çözünürlük (mega piksel)	1,3 (1280 × 1024)

Çizelge 6.16. (devam) Dijital polarize mikroskopa ait teknik özellikler.

Büyütme Özelliği	10x ~ 70x ve 200x
Bağlantı	USB 2,0
LED Işık Sayısı (adet)	8
LED Işık Açma/Kapama	Evet
LED Işık Rengi	Beyaz
Mikroskop Malzemesi	Kompozit
Dokunmatik Fotoğraf Çekimi	Evet
Görüntü Hızı (fps)	Saniyede 30 kare, 1,3M de 15
Kalibrasyon Özelliği	Var
Ölçüm	Evet (Çizgi, Yarıçap, Daire, 3 Noktadan daire)
Ağırlık (gr)	105
Ölçü (Uzunluk × Çap cm)	10,5 × 3,2

Kesici takımda oluşan aşınma mekanizmalarının ve aşınma tiplerinin analizinde, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar ve Uygulama Merkezinde (DÜBİT) bulunan FEI marka Quanta FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM cihazı Şekil 6.20'de, cihaza ait teknik özellikler ise Çizelge 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.20. Takım aşınma mekanizmalarının tespitinde kullanılan SEM cihazı.

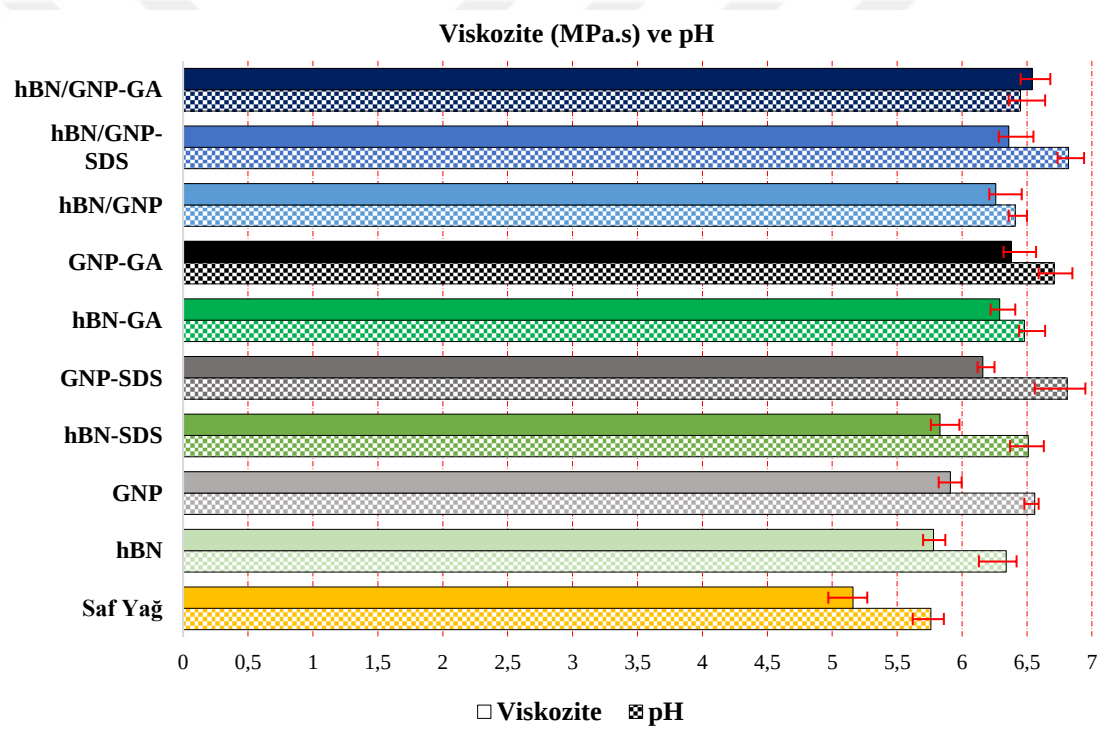
Çizelge 6.17. SEM cihazına ait teknik özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Güç voltaj (V)	230
Frekans (Hz)	50 veya 60 (± %1)
Maksimum Çalışma Aralığı (°C)	15 ~ 25
Kapak Genişliği (cm)	87,5
Ağırlık (kg)	450
Tavsiye Edilen Kuru Nitrojen Oranı	0,7 ~ 0,8 bar ve azami 10 L/dak
Akustik (dbC)	68
Kamera Çözünürlüğü (piksel)	4096 × 3536 (yaklaşık 14 MP)
Sistem Kontrolü	Klavye, joystick

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. SAF YAĞ VE NANO AKIŞKANLARIN VİSKOZİTE VE pH SONUÇLARI

Kesme sıvısı olarak kullanılan nano akışkanların kesme bölgesine nüfuziyeti açısından düşük viskoziteye sahip olması istenir. Özellikle MMY sisteminde yağın daha iyi pülverize olabilmesi ve sis bulutu oluşturabilmesi için viskozite kritik bir öneme sahiptir [12]. Bu amaçla çalışmada kullanılan saf yağa, mono ve hibrid nano akışkanlara ait viskozite ve pH ölçümleri yapılmış olup sonuçları Şekil 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.1. Saf yağ ve farklı nano akışkanların viskozite ve pH sonuçları.

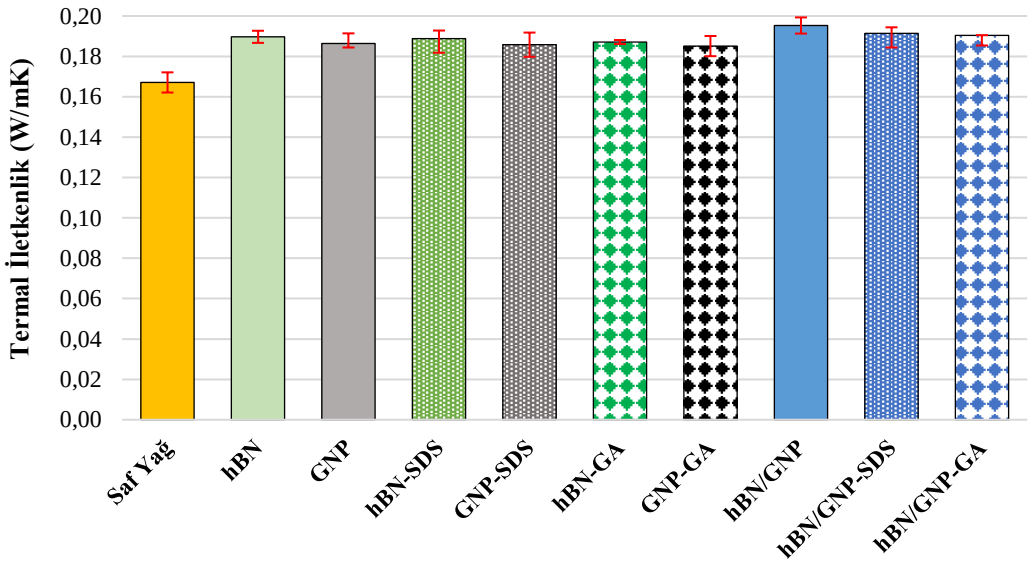
Şekil 7.1'de görüldüğü gibi en düşük viskozite (5,16 MPa.s) ve pH (5,76) değerine saf yağ sahiptir. Baz sıvıya nano partikül eklenmesiyle tüm nano akışkanların viskozite ve pH değerinin arttığı görülmüştür. Örneğin hBN ve GNP mono nano akışkanlarının viskozite değerlerinin saf yağa göre sırasıyla %10,72 ve %12,69 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Mono ve hibrid nano akışkanlar birbiri ile kıyaslandığında, hBN/GNP hibrid nano akışkanın viskozite değerinin hem hBN (%7,66) hem de GNP (%5,59) mono nano akışkan karışımlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum,

farklı geometrik şekillere sahip hBN ve GNP nano partiküllerin bir araya gelerek, karışımın viskozite değerini yükselttiği şeklinde izah edilebilir.

Hibrid nano akışkanlar kendi içinde kıyaslandığında hBN/GNP-GA nano akışkanın en yüksek viskozite değerine (6,54 MPa.s) sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde hBN ve GNP mono nano akışkanlarının pH değerinin saf yağa göre sırasıyla %9,14 ve %12,19 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Mono nano akışkanlar arasında hBN nano akışkanın daha düşük viskozite ve pH değerine sahip olması küresel yapıdaki hBN nano tozların özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüzey aktif madde kullanımı hem mono hem de hibrid nano akışkanların viskozite ve pH değerlerini önemli ölçüde artırmıştır. Eklenen GA yüzey aktif madde hBN ve GNP mono akışkanında viskoziteyi %8,10 ve %7,36 oranında artırırken hibrid nano akışkanda %4,28 oranında artırdığı görülmüştür. SDS yüzey aktif maddesi ise hBN ve GNP mono akışkanında pH değerini %2,61 ve %3,67 artırırken hibrid nano akışkanında ise %6,01 oranında artırmıştır. En yüksek pH değeri SDS ilaveli hBN/GNP (6,82) hibrid nano akışkanında ölçülürken, en düşük pH değeri saf yağda (5,76) ölçülmüştür. hBN/GNP-SDS nano akışkanın pH değeri saf yağa göre %15,54 oranında artış göstermiştir. Elde edilen süspansiyonlara ait pH değerleri hBN/GNP-SDS > GNP-SDS > GNP-GA > GNP > hBN-SDS > hBN- GA > hBN/GNP-GA > hBN/GNP > hBN şeklinde sıralanabilir. Nano akışkanlara ait pH değerleri karışımın homojenliği hakkında bilgi vermekle birlikte, en yüksek pH değerinin daha homojen bir karışıma sahip olduğu kabul edilir [135]. Saf yağa nano partikül ilavesiyle pH ve viskozite değerinin arttığı, aynı şekilde hibrid nano akışkanların viskozitelerinin de artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum nano akışkanların Brown random kuvvetine ve zayıf Van der Waals bağlarına atfedilebilir. Nano akışkanların içerisindeki nano partiküllerin durmadan hareket etmesini sağlayarak homojenliğini etkileyen Brown random kuvveti, viskozite değerini etkileyen kuvvetlerden biridir. Brown random kuvveti özellikle 100 nm boyutunun altındaki nano partiküllerde daha etkili olmaktadır. Ayrıca nano partikülün şekli, boyutu ve karışım oranı da Brown random kuvvetini etkilemektedir [134]. Yapılan çalışmalar da bu duruma benzer eğilim göstermekte olup, baz sıvıya nano partikül ilavesiyle pH ve viskozite değerinin arttığı ifade edilmiştir [12], [44], [135].

7.2. SAF YAĞ VE NANO AKIŞKANLARIN TERMAL İLETKENLİK SONUÇLARI

Nano akışkan içerisine eklenen nano partiküllerin genellikle boyutları (1-100 nm) küçük ve termal iletim katsayıları yüksektir. Bu nano partiküller baz sıvı içerisine eklendiğinde karışımın termal iletkenliğini de önemli ölçüde artırmaktadır. Nano akışkan içinde asılı duran nano partiküller, Brown kuvvetinin etkisiyle sürekli ve düzensiz hareket ederler. Nano partiküllerin hareketinin sonucu oluşan Brownian hareketi ve ısı difüzyonu, nano partiküller ve baz sıvı arasında mikro konveksiyona neden olur. Bu mikro konveksiyon, nano partiküller ve baz sıvı arasındaki enerji aktarımını daha da artırır, böylece nano akışkanın termal iletkenliğini artırmış olur. Dahası, nano partiküller üzerinde çevreli sıvı filmler, nano partiküller arasındaki Van der Waals kuvvetinin etki alanı içinde karşılıklı çekim yapar [141]. Bu karşılıklı çekim, nano partiküllerin çökelmesini engellemekte ve sıvı film moleküllerinin bir düzen içinde katı partiküller ile doğrudan temas etmesini sağlamaktadır. Ayrıca, bu çekim ve temasın etkisiyle nano partiküller arasındaki termal direnç azalarak, nano partiküllerin termal iletkenliği artmaktadır [142]. Bir başka ifadeyle Van der Waals kuvvetinin yüksek olması nano partiküllerin çekim gücünü arttıracağından çökelmesini ve topaklanmasını artırabilmektedir. Bundan dolayıdır ki nano partiküllerin Van der Waals çekim kuvvetlerinin zayıf olması istenen bir durumdur [12]. Saf yağa ve farklı nano akışkan karışımlara ait termal iletkenlik ölçüm sonuçları Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2. Saf yağ ve farklı nano akışkanların termal iletkenlik ölçüm sonuçları.

Şekil 7.2'de yer alan termal iletkenlik sonuçları incelendiğinde saf yağa nano partikül ilavesiyle, nano akışkanların termal iletkenlik değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere mono nano akışkanlar kendi arasında değerlendirdiğinde hBN nano akışkanın termal iletkenlik değeri (0,1897 W/mK) GNP nano akışkanına (0,1864 W/mK) göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum küresel yapıdaki hBN nano tozlarının özelliğinden ve düşük Van der Waals kuvvetinden kaynaklanmaktadır. En yüksek termal iletkenlik değeri hibrid hBN/GNP kesme koşulunda elde edilirken (0,1953 W/mK), en düşük termal iletkenlik saf yağda (0,1671 W/mK) elde edilmiştir. Bir başka ifadeyle, hBN/GNP kesme koşulunun termal iletkenlik değeri saf yağa göre %14,44 oranında artış göstermiştir. hBN/GNP kesme koşulunu sırasıyla hBN/GNP-SDS > hBN/GNP-GA > hBN > hBN-SDS > hBN-GA > GNP > GNP-SDS > GNP-GA kesme koşulları takip etmektedir. Burada hBN, GNP ve hBN/GNP nano akışkanlarına yüzey aktif madde eklenmesiyle termal iletkenlikte düşme olduğu görülmüştür. Nano akışkanlara yüzey aktif madde eklenmesiyle termal iletkenlikte oluşan düşme yüzey aktif maddenin sahip olduğu alkil zinciri uzunluğuna bağlıdır [133]. Nano partiküllerin kendi başlarına termal iletkenlikleri yüksek olduğundan, eklendiği karışımın termal iletkenliğini artırmaktadırlar [12], [31], [141]. Ancak, nano akışkanlara yüzey aktif madde ilavesinin karışımın termal iletkenliğinde düşüşe, viskozite değerinde artışa sebep olduğu yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir [141]. Bu çalışmada da benzer bir durum olup, yüzey aktif madde ilavesiyle termal iletkenlik değerleri düşüş eğilimi göstermiştir. Örneğin hBN nano akışkanına GA yüzey aktif madde ilavesinin termal iletkenliği %1,37 oranında düşürdüğü, SDS ilavesinin ise %0,48 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu durum tüm karışımlarda benzer bir eğilim göstererek GA, SDS'ye göre termal iletkenlik değerlerinin daha fazla düşüşüne neden olmuştur. SDS yüzey aktif maddesinin hem yağlama hem de tribolojik performanslarının GA'ya göre daha üstün olması bu durumu doğrular niteliktedir (Şekil 7.2 ve Şekil 7.3).

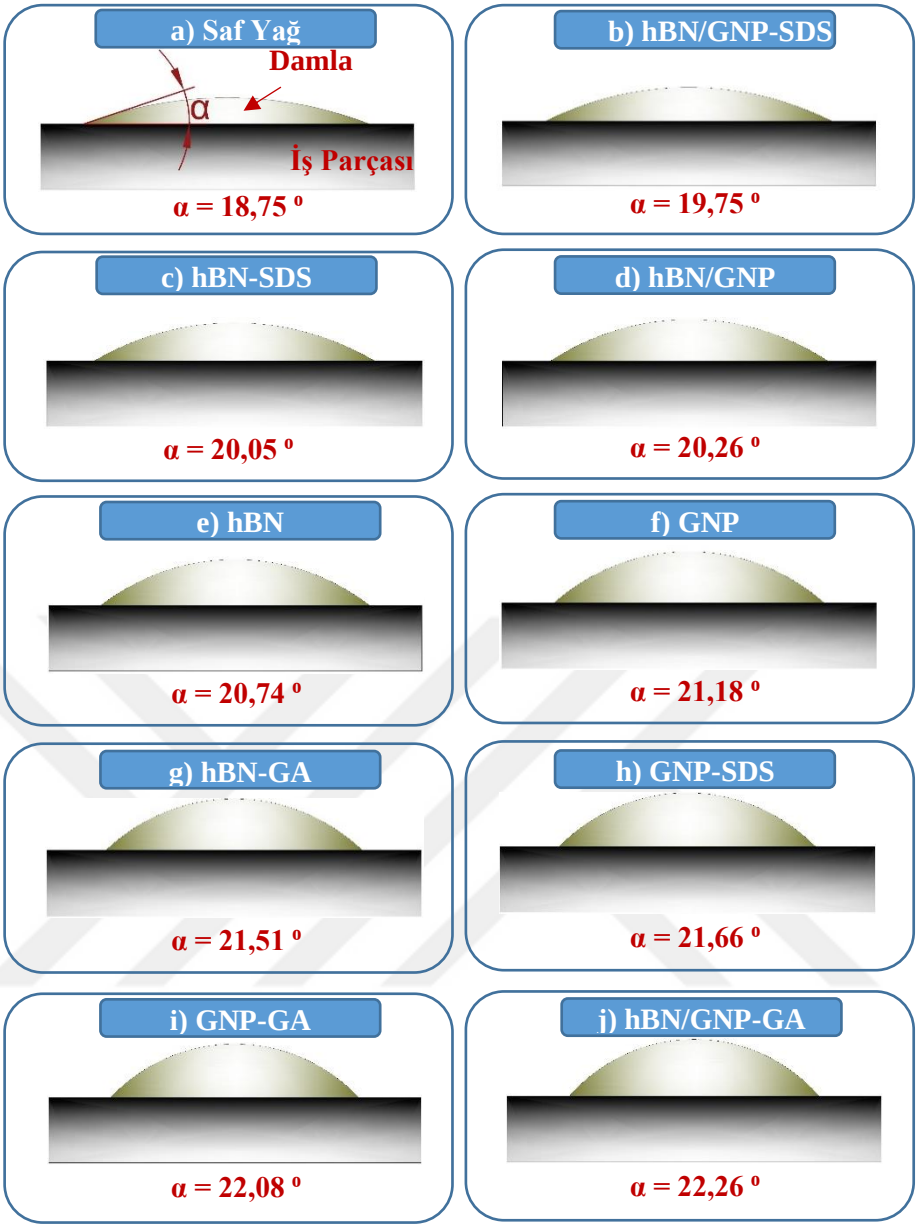
7.3. SAF YAĞ VE NANO AKIŞKANLARIN TEMAS AÇISI VE YÜZEY GERİLİMİ SONUÇLARI

Islanabilirlik, sıvının yayılma, nüfuz etme, kesici takım ve iş parçasını kaplama yeteneği olarak adlandırılır ve sıvının işlenebilirlik performansını etkileyebilmektedir. Sıvıların katı yüzeyler için afinitesi (çekim gücü, ilgisi), sıvının ıslatma kabiliyeti olarak ifade edilir. Sabit bir sıvı hacminin yüzeye daha fazla yayılmasıyla sıvının yüzeyle yaptığı

temas açısı azalmaktadır. Zayıf afiniteye sahip olan sıvılar kendilerini boncuklar halinde topladıkları için temas açısı artmakta ve ıslanabilirlik özelliği zayıflamaktadır [143].

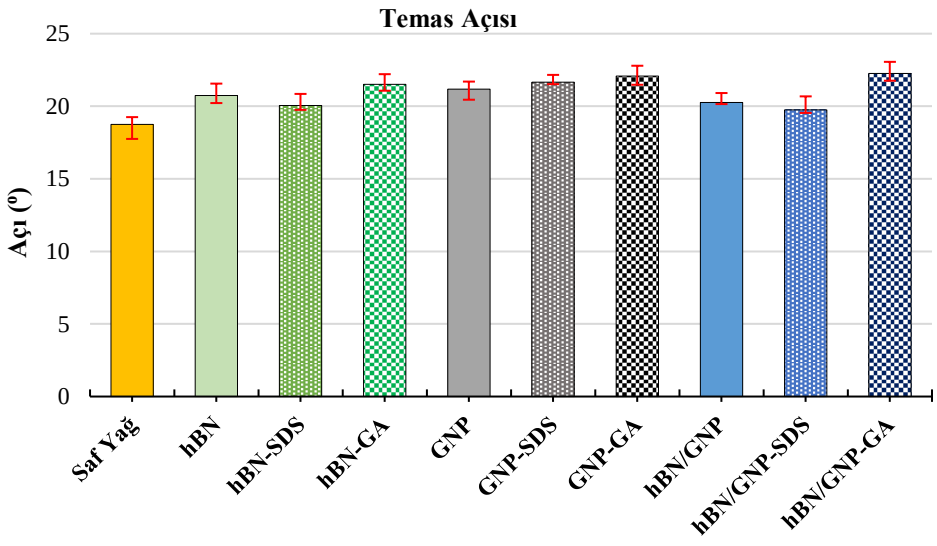
MMY yöntemiyle kesme bölgesine gönderilen yağlayıcı damlacıklar, takım ve iş parçası arasına girerek soğutma yağlama sağlamaktadırlar. Damlacıkların durumu, temas açısıyla ifade edilebilmektedir. Damlacığın yayılma alanı ne kadar genişse temas açısı o kadar küçük çıkmaktadır. Daha geniş bir yayılma alanı yağlama etkisini artıracak ve işleme performansında iyileşmeler sağlayacaktır. Başka bir ifadeyle temas açısı, ıslanabilirlik olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada kullanılan saf yağın ve farklı nano akışkanların temas açısı ölçüm sonuçları Şekil 7.3'te verilmiştir.

Şekil 7.3'te saf yağın ve farklı nano akışkanların temas açısı sonuçları görülmektedir. En düşük temas açısı saf yağa aittir (18,75 º). hBN ve GNP nano akışkanları karşılaştırıldığında hBN nano partiküllerinin ilave edildiği nano akışkanların temas açısı değerlerinin nispeten daha düşük çıktığı görülmektedir. Saf yağa göre hBN ve GNP mono nano akışkanlarının temas açılarının sırasıyla %9,59 ve %11,47 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Saf yağa göre en yüksek temas açısı %15,77 artışla hBN/GNP-GA nano akışkan karışımında (22,26 º) ölçülürken, en düşük temas açısı ise sadece %5,06 artışla hBN/GNP-SDS nano akışkan karışımında (19,75 º) ölçülmüştür. Temas açısını nano partikülün boyutu, şekli, özelliği ve karışım oranı etkileyebilmektedir. Nano akışkanın temas açısının düşük olması iş parçası yüzeyine daha iyi nüfuz etmesini sağlayarak işleme performansını artırmaktadır. Yüzey aktif maddeler kendi aralarında karşılaştırıldığında ise GA, SDS ye göre temas açısını daha fazla artırmıştır. Başka bir deyişle SDS ile hazırlanan süspansiyonların ıslanabilirlik özellikleri GA ile hazırlananlara göre daha iyi performans göstermiştir. Musavia yapmış olduğu çalışmada SDS kullanılarak hazırlanan nano akışkanın, SDS kullanılmadan hazırlanan nano akışkana göre daha iyi işleme performansı gösterdiğini iddia etmiştir [46]. Yine yapılan başka bir çalışmada ise yazarlar CNT katkılı nano akışkanlara SDS ilave edilerek hazırlanan karışımların, daha homojen özellik göstererek karışımın stabilitesini artırdığını tespit etmişlerdir [128].

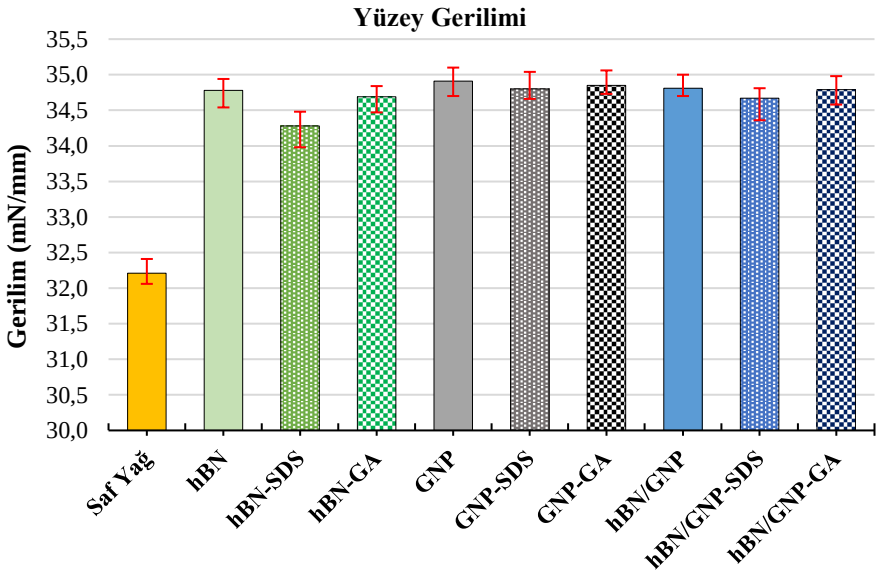


Şekil 7.3. Saf yağ ve farklı nano akışkanlar için temas açısı sonuçları a) Saf yağ b) hBN/GNP-SDS c) hBN-SDS d) hBN/GNP e) hBN f) GNP g) hBN-GA h) GNP-SDS i) GNP-GA j) hBN/GNP-GA.

Damlacığın yüzey gerilimi temas açısıyla etkileşim içindedir. Yüzey gerilimi nano akışkanların ıslanabilirlik kabiliyeti için önemli bir rol oynar. Yüzey gerilimindeki azalmanın sıvının yüzey ile yaptığı temas açısını küçülterek sıvının daha geniş bir alana yayılmasını sağlayarak, sıvının ıslatma kabiliyetini artırdığı literatürde belirlenmiştir [129], [144]. Çalışmada kullanılan saf yağın ve farklı nano akışkan karışımların temas açısı sonuçları Şekil 7.4'te ve yüzey gerilim sonuçları Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.4. Saf yağ ve farklı nano akışkanlar için temas açısı sonuçları.



Şekil 7.5. Saf yağ ve farklı nano akışkanlar için yüzey gerilimi sonuçları.

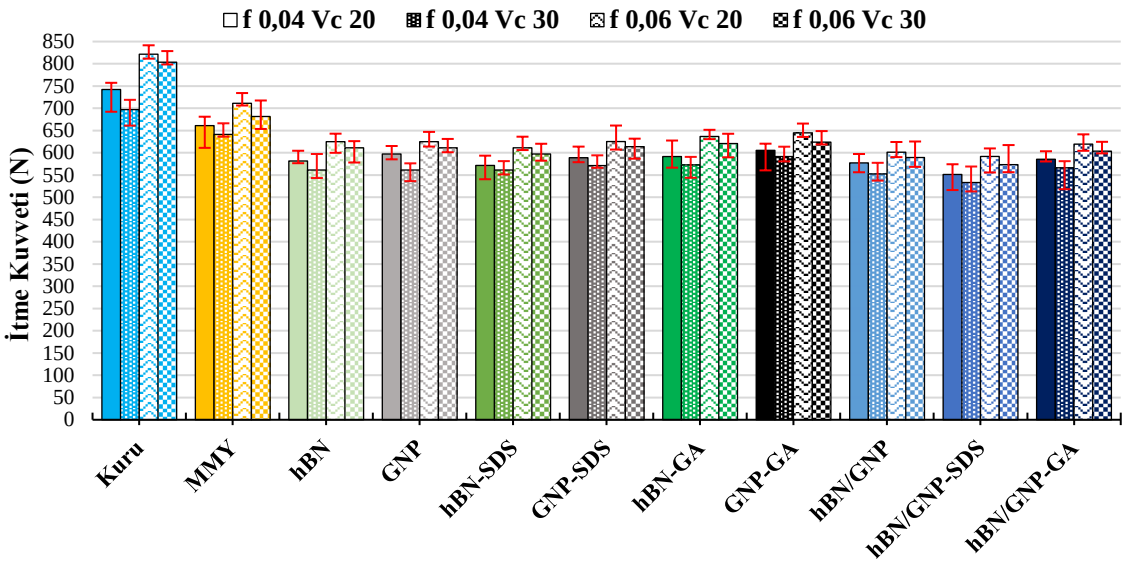
Saf yağa nano partikül ve yüzey aktif madde ilavesi yüzey gerilim değerlerini artırmıştır. En düşük yüzey gerilimi saf yağda elde edilirken (32,21 mN/mm), en yüksek yüzey gerilimi değeri ise GNP nano akışkanında (34,94 mN/mm) elde edilmiştir. hBN ve GNP nano akışkanları karşılaştırıldığında hBN nano partiküllerinin ilave edildiği nano akışkanların yüzey gerilim değerleri daha düşük çıkmıştır. Saf yağa göre hBN, hBN-SDS ve hBN-GA sırasıyla yüzey gerilimini %7,39, %6,04 ve %7,15 oranında arttırırken GNP, GNP-SDS ve GNP-GA sırasıyla %7,73, %7,44 ve %7,58 oranında artırmıştır. Yüzey aktif madde ilavesiyle beklendiği üzere nano akışkan karışımların yüzey gerilimlerinde düşüş

gözlenmiştir. Uzun zincirli yüzey aktif madde molekülleri nano partiküle bağlandıklarında, nano partikül ile nano partikülü çevreleyen sıvı molekülleri arasında bir katman oluştururlar. Bu katmanlar ise parçacıklar arasındaki potansiyel enerjiyi artırarak aralarında itici bir kuvvet uygulamaktadır. Bu da nano akışkanların yüzey geriliminin azalmasına neden olmakta ve nano partiküllerin birbirine yaklaşarak çökelme ve topaklanma oluşumlarını geciktirmektedir. Tanvir ve arkadaşları yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etmişlerdir [129].

Viskozite, pH, termal iletkenlik, temas açısı ve yüzey gerilimi sonuçları bütün olarak değerlendirildiğinde; nano akışkan karışımlara yüzey aktif madde ilavesinin viskozite değerini artırdığı (Şekil 7.1) ve termal iletkenlik katsayısını düşürdüğü (Şekil 7.2) görülmüştür. Ayrıca temas açısı hibrid nano akışkanlarda, mono nano akışkanlara göre nispeten daha düşük çıkarak ıslanabilirlik özelliğinin daha etkin olduğu görülmüştür. Ancak hBN/GNP-GA hibrid nano akışkanında en yüksek temas açısı değeri elde edilmiştir. Bu durumun ise hBN/GNP-GA hibrid nano akışkanının viskozite değerine bağlı olarak (Şekil 7.1) artış gösterdiği tahmin edilmektedir. Şirin ve Kıvak tarafından yapılan bir çalışmada MMY sisteminde kullanılan yağ ve nano akışkana ait viskozite değerinin, termal iletkenlikten daha önemli bir rol oynadığı ve işleme performansını daha fazla etkilediği vurgulanmıştır [12].

7.4. İTME KUVVETİ VE MOMENT SONUÇLARI

Delik delme işleminde itme kuvveti ve moment değerleri delme işleminin verimliliğini etkilemektedir. Artan itme kuvveti ve moment değerleri güç tüketimiyle toplam üretim maliyetlerinin artmasına neden olurlar. Bu nedenle işleme verimliliği değerlendirilirken itme kuvveti ve moment değerlerinin analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarında Hastelloy X süper alaşımının farklı ilerleme ve kesme hızlarında delinmesinde elde edilen itme kuvveti değerleri Şekil 7.6'da verilmiştir.



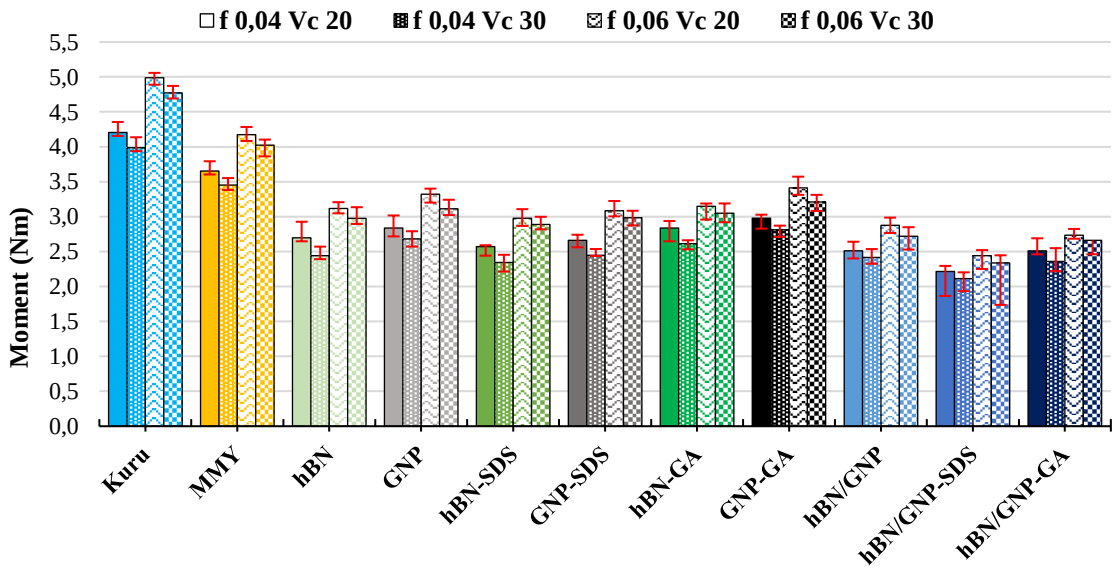
Şekil 7.6. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında itme kuvveti değerleri.

Şekil 7.6'da yer alan itme kuvvetleri değerleri incelendiğinde en düşük itme kuvvetinin (533,2 N), hBN/GNP-SDS kesme koşulunda Vc 30 m/dak kesme hızı ve f 0,04 mm/dev ilerlemede elde edildiği anlaşılmaktadır. En yüksek itme kuvveti (821,6 N) ise kuru kesme koşulunda Vc 20 m/dak kesme hızı ve f 0,06 mm/dev ilerleme değerinde elde edilmiştir. Bir başka ifadeyle hBN/GNP-SDS kesme koşulunda elde edilen kuvvet değeri, kuru kesme koşuluna göre %23,51 azalma göstermiştir. Bu durum hBN/GNP-SDS nano akışkanının nano akışkanlar arasında en düşük temas açısı değerine sahip (Şekil 7.4) olmasına bağlanabilir. Zira temas açısının düşük olmasıyla daha fazla alana yayılan nano akışkan damlacıkları yağın yağlayıcılık özelliğini önemli ölçüde artırarak işleme performansının iyileştirilmesini sağlamıştır. Ayrıca nano akışkanların üstün yağlayıcılık, ıslanabilirlik ve nano partikül mekanizmaları (tamir, parlatma, yuvarlanma, katmanlar arası kayma vb.) özelliği ile de bu durum desteklenebilir. Nano partiküller iş parçası yüzeyinde bulunan küçük çatlaklara yerleşerek tamir mekanizması özelliği göstermektedir. Lamel yapılı GNP partikülleri arasına küresel yapılı hBN partiküllerinin yuvarlanarak katmanlar arası kayma etkisi oluşturması hibrid nano akışkan kesme koşullarının daha etkili olmalarını sağlamıştır. Kullanılan kesme sıvılarındaki yağlama özelliği takım/talaş ara yüzeyinde ince bir yağ film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltmakta, soğutma özelliği ise kesme bölgesindeki sıcaklıkları düşürmektedir [18], [44], [145]. Nano akışkanların yağlama kabiliyetinin artması, sürtünmeyi azaltarak itme kuvvetlerinin de düşmesine sebep olmaktadır. Benzer şekilde yapılan başka bir delik

çalışmasında da GNP ilaveli Nano MMY kesme koşulunun konvansiyonel kesme koşuluna göre itme kuvvetlerini önemli oranda düşürdüğü görülmüştür [146]. Ayrıca Şirin ve Kıvak Nano MMY kesme koşulunun kuvvetleri düşürmede son derece etkili olduğunu iddia etmiştir [12].

Kesme hızı arttıkça itme kuvveti düşüş gösterirken, ilerlemenin artmasıyla itme kuvvetleri artış göstermiştir. Kesme hızındaki artışla itme kuvvetlerinde meydana gelen bu düşüşe, kısmen takım-talaş temas alanındaki azalma, kısmen de kesme hızındaki artışla birlikte sıcaklıktaki artışın malzemenin akma mukavemetini düşürmesinin sebep olduğu düşünülmektedir. Delme esnasında itme kuvvetinin büyüklüğünü belirleyen en önemli parametrelerden biri de ilerlemedir [138]. Dolayısıyla ilerlemedeki artışın itme kuvvetini artırması beklenen bir durumdur. Buradan hareketle yapılan bu çalışmada itme kuvveti üzerinde ilerlemenin kesme hızından daha etkili olduğunu söylemek mümkündür.

Delme işleminde momenti belirleyen en önemli kuvvet bileşenlerinden birinin itme kuvveti (Fz) olduğu düşünülürse, momentteki değişimin itme kuvvetindeki değişimle paralellik göstermesi kaçınılmazdır. Ancak sürtünmenin ve diğer kuvvet bileşenlerinin etkisini görebilmek için momentteki değişimin değerlendirilmesi gerekmektedir. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarında Hastelloy X süper alaşımının farklı ilerleme ve kesme hızlarında delinmesinde elde edilen moment değerleri, Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.7. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında moment değerleri.

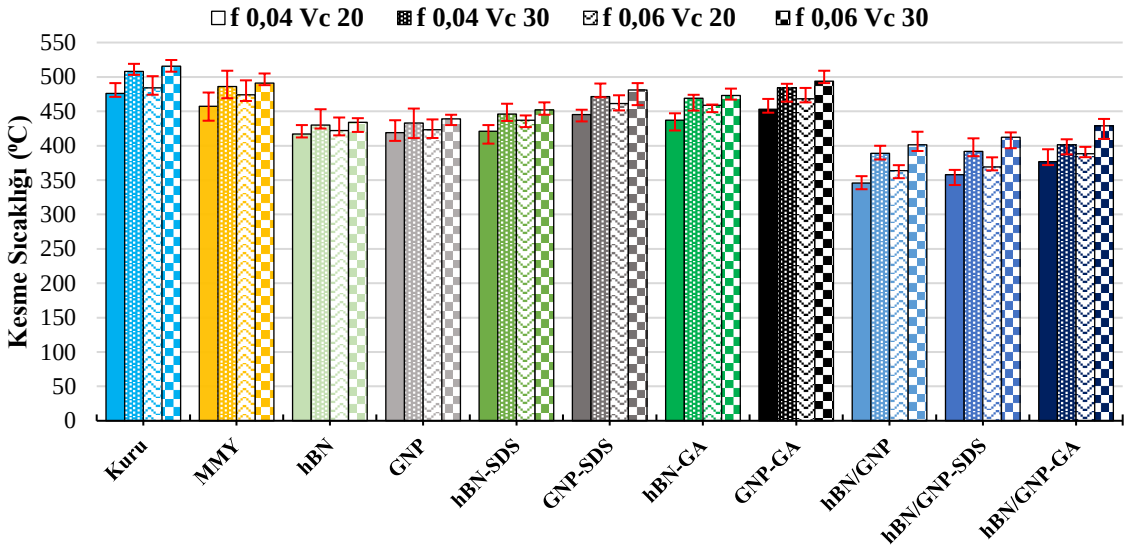
Şekil 7.7 incelendiğinde moment değerlerindeki değişimin itme kuvvetlerindeki değişimle paralellik gösterdiği görülmektedir. En düşük moment değeri hBN/GNP-SDS kesme koşulunda Vc 30 m/dak kesme hızı ve f 0,04 mm/dev ilerlemede (2,113 Nm) elde edilmiştir. hBN/GNP-SDS kesme koşulunda kuru kesmeye göre moment değerinde %46,99 oranla neredeyse yarı yarıya bir azalma gözlemlenmiştir. Bu durumun diğer karışımlara göre hBN/GNP-SDS nano akışkanının sahip olduğu düşük temas açısının (19,75 º) takım-talaş temas noktasındaki sürtünmeyi azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 7.4). En yüksek moment değeri kuru kesme koşulunda Vc 20 m/dak kesme hızı ve f 0,06 mm/dev ilerleme değerinde elde edilmiştir (4,988 Nm). Bu olay, kuru kesme koşulunda hiçbir soğutucu ve yağlayıcının kullanılmamasından kaynaklanan aşırı BUE oluşumu ile açıklanabilir (Şekil 7.17 a). BUE oluşumu kesici kenarın yuvarlanmaya başlamasıyla kesme özelliğini yitirmesine sebep olur [139]. Nano akışkan kesme koşullarında ise hem kuru hem de MMY kesme koşullarına göre moment değerlerinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 7.7'de mono nano akışkanlar arasında moment değişimleri incelenmeye devam edildiğinde, performans bakımından en iyi nano akışkan kesme koşulu kuru kesme koşuluna göre %41,19, MMY kesme koşuluna göre %32,10 azalmayla hBN-SDS olmuştur. Bunu sırasıyla hBN, GNP-SDS, hBN-GA, GNP, GNP-GA nano akışkan kesme koşulları izlemiştir. Mono nano akışkanlar içerisinde hBN nano partikül katkılı nano akışkan kesme koşulları düşük moment değerleri ile ön plana çıkmaktadır. Bu durumun hBN nano partikülünün küresel şeklinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Küresel yapılı hBN nano partikülü ilave edilen nano akışkanlar matkap ve iş parçası arasında rulman yuvarlanma etkisi oluşturmaktadır. Bu rulman yuvarlanma etkisi sayesinde sürtünme azalmakta ve bunun sonucu olarak da itme kuvvetlerini de azaltmaktadır. Hibrid nano akışkan kesme koşulları incelendiğinde hBN/GNP-SDS nano akışkan kesme koşulu kuru kesme koşuluna göre %46,99 ve MMY kesme koşuluna göre %38,79 azalma sağlamıştır. Bunu hBN/GNP-GA ve hBN/GNP kesme koşulları takip etmektedir. hBN/GNP-SDS hibrid nano akışkanı, hBN ve GNP nano partiküllerinin üstün özelliklerini içerisinde barındırmasının yanı sıra SDS yüzey aktif madde ihtiva etmesiyle daha homojen bir karışım olmuştur. Bu durum Şekil 7.1'de yer alan pH değerleriyle desteklenebilir. Şöyle ki hBN/GNP-SDS hibrid nano akışkanı 6,82 pH değeriyle diğer karışımlara göre daha yüksek pH'a sahip olmasıyla daha homojen bir karışım oluşturmuştur. Yapılan çalışmalarda da nano akışkanların pH değerinin 8,5 ~ 9,5 arasında olmasının veya bu aralığa yakın bir değerde olmasının daha homojen bir karışım oluşturacağı ifade edilmiştir [147].

Zira bu değerlere en yakın hBN/GNP-SDS hibrid nano akışkanıdır. Dolayısıyla hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulu diğer karışımlara göre nispeten daha homojen olması, (Şekil 7.1) ıslanabilirlik özelliğinin daha iyi olması (Şekil 7.4) ve nano akışkan mekanizmalarının (özellikle katmanlar arası kayma) etkinliği sayesinde itme kuvveti ve moment bakımından daha iyi performans göstermiştir. Birbiriyle sürekli temas halinde bulunan takım-talaş-iş parçası ara yüzeylerinde etkili olan yağlayıcı film tabakası sürtünmeyi azaltmaya, bunun neticesi olarak da kuvvetlerde ve momentte düşüşe neden olabilmektedir.

İtme kuvvetlerinde olduğu gibi kesme hızındaki artışla moment değerlerindeki düşüşün, kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların malzemenin akma mukavemetini düşürmesinden kaynaklandığı söylenebilir. İlerleme değeri, itme kuvvetlerinde olduğu gibi moment üzerinde de etkili olmuştur. İlerleme değerindeki artışın momenti de arttırdığı ifade edilebilir. İlerlemedeki artış talaş kalınlığının artmasına, buna bağlı olarak daha küçük bir özgül itme kuvvetinin oluşmasına neden olmaktadır. Ancak artan ilerleme aynı zamanda talaş alanını da artırmaktadır. Bu durum daha büyük itme kuvveti ve moment oluşumuna yol açmaktadır. Yapılan başka bir çalışmada, bu çalışmayı destekler nitelikte olup, Inconel 718 in delinmesinde kuru kesme koşulunun geleneksel kesme koşuluna göre itme kuvvetleri ve moment değerlerini önemli oranda artırdığını ifade etmişlerdir [139].

7.5. KESME SICAKLIĞI SONUÇLARI

Kesme bölgesinde oluşan sıcaklık, iş parçası yüzey kalitesini ve kesici takım aşınma mekanizmalarını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Hele ki delik delme gibi yarı kapalı ortamda gerçekleşen işlemlerde kesme sıcaklığı daha da önem kazanmaktadır. Şöyle ki delme işlemi sırasında talaş sıkışması kesme bölgesindeki oluşan sıcaklığı artırmakla beraber, matkap kesme yüzeylerine talaşların yapışmasına ve adhezyon mekanizmasının hızla gelişmesine neden olmaktadır. Bu da aşınmayı hızlandırarak kesici takımın nihayetinde ömrünü tamamlamasına yol açmaktadır. Bu yüzden özellikle delme işlemlerinde oluşan sıcaklığın kontrol altına alınması son derece önem arz etmektedir [26]. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarında Hastelloy X süper alaşımının farklı ilerleme ve kesme hızlarında delinmesinde elde edilen kesme sıcaklık değerleri Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.8. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında kesme sıcaklığı değerleri.

Şekil 7.8 incelendiğinde en düşük sıcaklık değerinin 345,7 ºC ile hBN/GNP kesme koşulunda, f 0,04 mm/dev ilerleme ve Vc 20 m/dak kesme hızında elde edildiği, en yüksek kesme sıcaklık değerinin ise beklendiği üzere 515,6 ºC ile kuru kesme koşulunda f 0,06 mm/dev ilerleme ve Vc 30 m/dak kesme hızında elde edildiği anlaşılmaktadır. Kesme sıcaklığı değeri hBN/GNP kesme koşulunda kuru kesme koşuluna göre %27,37 oranında azalma göstermiştir. Bu durum küresel yapıdaki hBN ve lamel yapıdaki GNP nano partikülleriyle hazırlanan hibrid nano akışkanların, oluşturduğu tamir, parlatma, yuvarlanma, katmanlar arası kayma, yastıklama mekanizmalarının etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nano akışkanlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde hibrid nano akışkanların kesme sıcaklığı değerlerinin, mono nano akışkanlara göre nispeten düşük mertebelerde kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise hibrid nano akışkanların sahip olduğu termal iletim katsayısı ile açıklanabilir. Şekil 7.2'de yer alan termal iletkenlik ölçüm sonuçları, bu durumu doğrular niteliktedir. Yüksek termal iletim katsayısına sahip nano akışkanlarla daha düşük mertebelerde kesme sıcaklığı değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu durumda birbirine göre üstün özellik gösteren nano partiküllerin hibrid olarak kullanıldığı süspansiyonların daha etkili bir tribo film tabakası oluşturduğu yorumu yapılabilir. Ancak burada hibrid nano akışkanlara eklenen yüzey aktif maddenin hBN/GNP kesme koşulunda kesme sıcaklığında bir miktar artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Nano akışkanlara eklenen yüzey aktif maddeler nano partiküllerin askıda kalmasını sağlayarak homojen bir karışım oluşmasını sağlayan ajanlar olarak bilinirler.

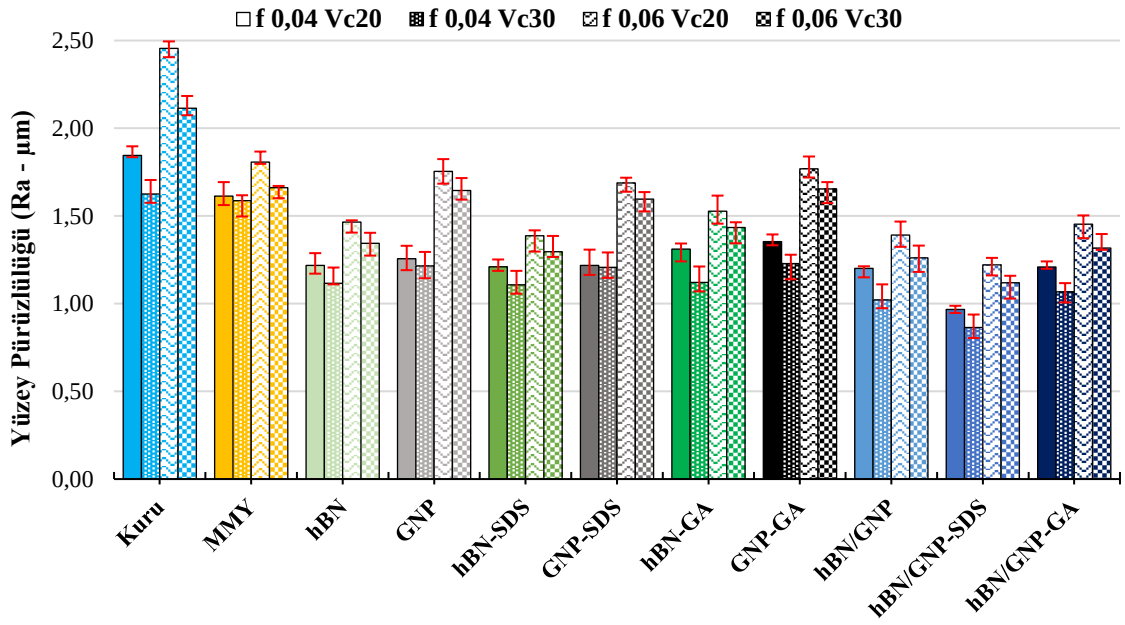
Ne var ki karışıma eklenen her katkı maddesi, karışımın viskozite değerini artırmakta ve kesme bölgesinde oluşan tribo film tabakasını olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Kesme bölgesine gönderilen nano akışkanların viskozite değerinin yüksek olması, nano akışkanların kesici takım, iş parçası ve talaş ara yüzeylerine yerleşmesini zorlaştırarak tribo film tabakasının yetersiz kalmasını sağlamaktadır. Benzer şekilde yapılan araştırmalarda bu durum ele alınmış ve artan viskozite değerinin ıslanabilirlik özelliğinde azalmaya ve kesme bölgesinde sürtünmede artışa neden olduğu ifade edilmiştir [44].

Kesme hızının ve ilerlemenin artmasıyla kesme sıcaklığı da artış göstermiştir. Kesme hızının artması beklendiği üzere kesme sıcaklığı üzerinde ilerlemeye göre daha fazla etkiye sahiptir. Zamana bağlı olarak daha fazla süre sürtünmeye maruz kalan matkapta daha fazla sıcaklık artışı gözlemlenir. Benzer şekilde yapılan çalışmalarda bu durum ifade edilmiştir [138], [139].

7.6. DELİK KALİTESİ SONUÇLARI

7.6.1. Yüzey Pürüzlülüğü ve Yüzey Topografyası Sonuçları

Yüzey kalitesi, malzemelerin kullanım ömrünü doğrudan etkilediği için işlenebilirlik ve özellikle delik delme için önemli kalite göstergelerinden biridir. Delme işlemlerinde en önemli problem olan delme boyuna bağlı olarak zorlaşan talaş tahliyesi, talaşın delik içerisinde sıkışmasına ve dolayısıyla da yüzey kalitesinin bozulmasına, hatta takımın kırılmasına sebep olmaktadır [137]. Bu yüzden yüzey kalitesinin ölçülmesi ve takibi önemlidir. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarında Hastelloy X süper alaşımının farklı ilerleme ve kesme hızlarında delinmesinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 7.9'da verilmiştir.



Şekil 7.9. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Şekil 7.9 incelendiğinde en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değeri (2,455 µm) kuru kesme koşulunda f 0,06 mm/dev ilerleme Vc 20 m/dak kesme hızında elde edilirken en düşük yüzey pürüzlülük değeri (0,864 µm) %64,81 azalmayla f 0,04 mm/dev ilerleme Vc 30 m/dak kesme hızında hBN/GNP-SDS kesme koşulunda elde edilmiştir. Tüm nano akışkan kesme koşulları yüzey pürüzlülük değerleri bakımından, kuru ve MMY kesme koşuluna göre daha iyi performans göstermiştir. Mono nano akışkanlar içerisinde ise en iyi performansı sırasıyla hBN-SDS, hBN, hBN-GA, GNP-SDS, GNP ve GNP-GA nano akışkan kesme koşulları göstermiştir. hBN katkılı mono ve hibrid nano akışkanların, itme kuvveti (Şekil 7.6) ve kesme sıcaklığında (Şekil 7.8) olduğu gibi yüzey pürüzlülüğünde de daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır. Özellikle delik delme işlemlerinde nano akışkanların içerisinde yer alan nano partiküller, yastıklama etkisi göstermekte ve bu nedenle matkap ile iş parçası arasında koruyucu bir yastık bariyer oluşturmaktadır. Bu da matkabın kesici kenarlarının aşınmasını önleyebilmektedir. Nano akışkan kesme koşullarında, matkapla iş parçası ara yüzeyinde oluşan yastıklama etkisi sayesinde yüzey bütünlüğü korunarak daha iyi yüzey kalitesi elde edildiği düşünülmektedir.

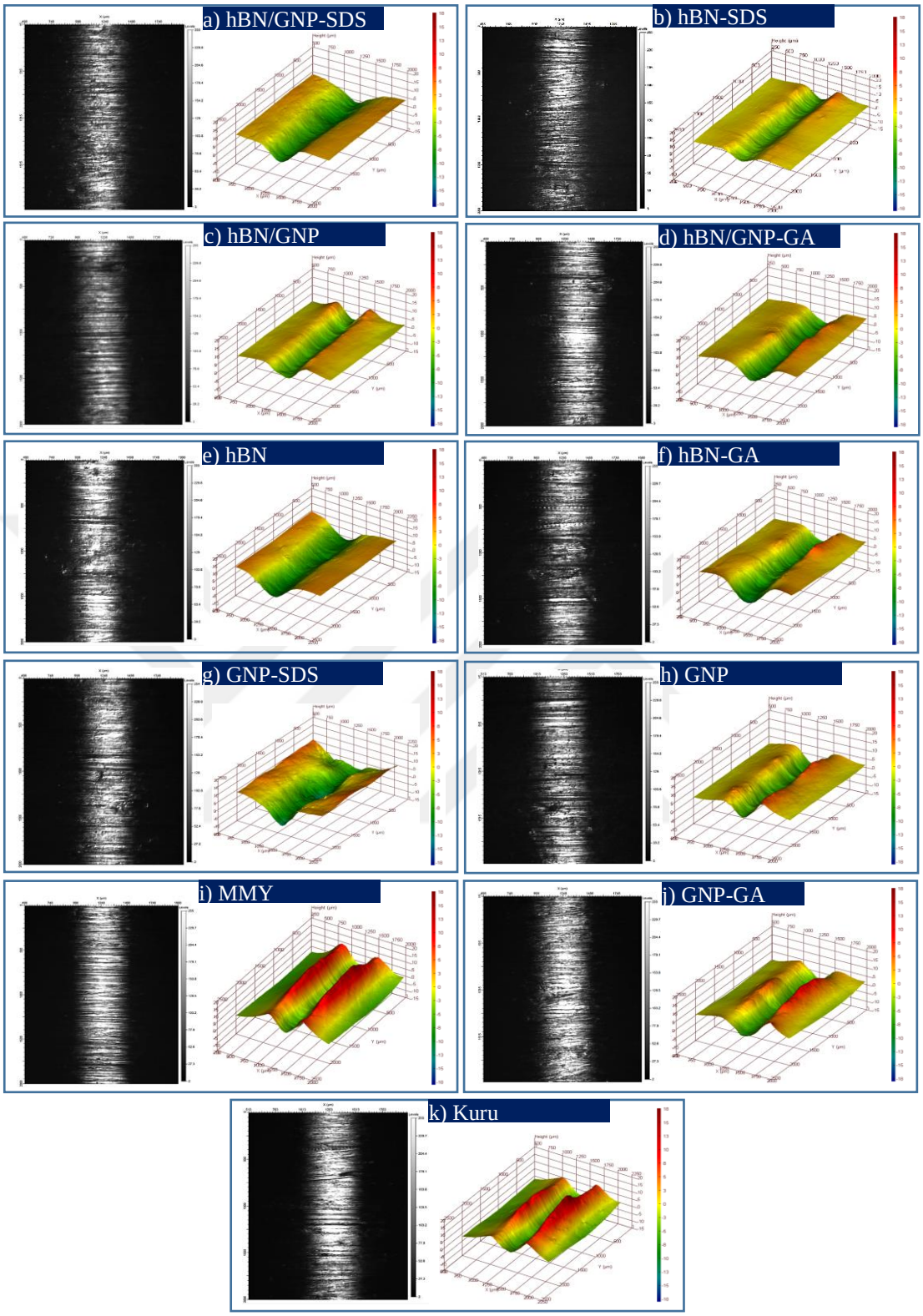
Hibrid kesme koşulları incelendiğinde, hBN/GNP-SDS kesme koşulunda yüzey pürüzlülük değeri sırasıyla kuru ve MMY kesme koşuluna göre %46,83 ve %45,56 oranında azalma göstermiştir. Bunu sırasıyla hBN/GNP ve hBN/GNP-GA kesme koşulu takip etmiştir. Burada asıl etkinin hBN/GNP-SDS hibrid nano akışkan yağ zerreciklerinin

yüzeye daha iyi yayılması neticesinde temas açısının düşük olması dolayısıyla iyi ıslanabilirlik özelliği sergilemesinden kaynakladığı düşünülmektedir. Şekil 7.9'da yer alan yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları, Şekil 7.4'te yer alan temas açısı sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Temas açısı düşük olan nano akışkanların yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Yüzey pürüzlülük değerindeki bu düşüş hibrid nano akışkanlarda küresel ve lamel formdaki nano partiküllerin üstün özelliklerinin birleşmesiyle izah edilebilir. Şekil 7.10'daki delinen yüzeylere ait topografya ve 2D yüzey analizleri de bu durumu doğrulamaktadır. En düşük Ra değerine sahip hBN/GNP-SDS kesme koşulunda oluşan işleme şekillerinin (çukur ve tümsekler) diğer koşullara göre daha düşük mertebelerde olduğu görülmektedir. Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 birlikte incelenmeye devam edildiğinde, hBN nano partikülü ile hazırlanan karışımların yüzey pürüzlülük ve topografya üzerine daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır. Burada asıl etkinin ise hBN katı nano partiküllerinin küresel şekillerinden ve atomlar arası zayıf Van der Waals bağlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Van der Waals bağlarının zayıf olması nispeten diğer karışımlara göre homojen bir karışım oluşmasına ve yağlama/soğutma performansının etkinliğinin artmasına yol açmıştır. Nano partikül eklenerek hazırlanan süspansiyon karışımlarda tamir, parlatma, yuvarlanma ve yastıklama etki mekanizmaları oluşturarak kesme bölgesinde sürtünmenin azalmasına ve yağlayıcı film tabakasının etkin şekilde oluşmasına yardımcı olmaktadırlar [12], [39], [44]. hBN nano partiküllerinin şekilleri sayesinde bu mekanizmalar daha etkili oluşabilmektedir. Pal ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Nano MMY kesme koşulunun delik yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde düşürdüğü tespit edilmiştir [48]. Shuang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Nano MMY kesme koşulunun takım iş parçası arasında daha etkili bir yağlayıcılık sağladığı, kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürdüğü, iş parçası yüzey kalitesinde iyileşmeler sağladığı iddia edilmiştir [146]. Şekil 7.7'de yer alan moment sonuçları da Şekil 7.9'da yer alan Ra ölçüm sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Moment değerinin düşük olması özellikle kapalı ortamda gerçekleşen delik delme işleminde, takım-talaş-iş parçası arasında gelişen sürtünme hakkında önemli ipuçları vermektedir. Nano partiküllerin gösterdiği sürtünme azaltıcı davranış, takım-iş parçası ara yüzeyindeki sürtünme mekanizmasını etkili bir şekilde en aza indirgeyerek, oluşan kuvvetleri ve yüzey kalitesini iyileştirmeye katkı sağlamaktadır [34].

Kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinde düşüşler görülmektedir. Bu

durum artan kesme hızına bağlı olarak kesme bölgesinde yüksek sıcaklık oluşumu sebebiyle Built Up Edge (BUE) formunun azalmasına bağlanabilir. Özellikle yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme değerlerinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri daha düşük çıkmaktadır [139].

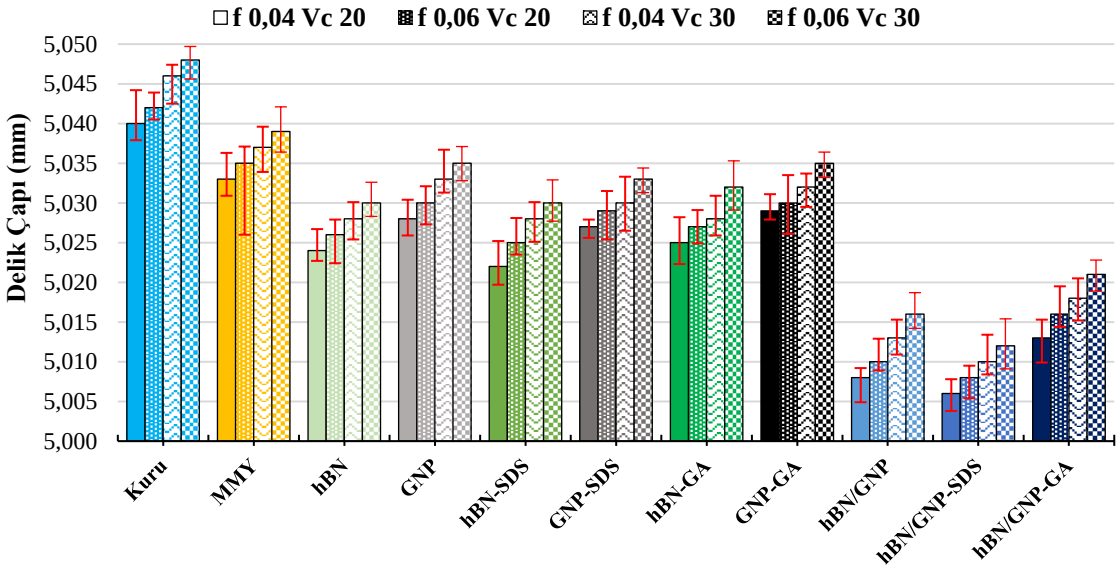
İstenilen yüzey kalitesinin elde edilmesinde en önemli işleme parametrelerinden biri de ilerleme değeri olup, genellikle artan ilerleme değerleri yüzey kalitesinin azalmasına sebep olmaktadır. Artan ilerleme değeri ile birim zamanda kaldırılan talaş hacmi artmakta ve buna bağlı olarak da itme kuvvetleri de büyümektedir [138].



Şekil 7.10. Farklı kesme koşulları altında delik yüzeyinin yüzey topografyası ve 2D analizi a) hBN/GNP-SDS b) hBN-SDS c) hBN/GNP d) hBN/GNP-GA e) hBN f) hBN-GA g) GNP-SDS h) GNP i) MMY j) GNP-GA k) kuru (kesme parametreleri, Vc 20 m/dak, f 0,06 mm/dev).

7.6.2. Delik Çap Değişim Sonuçları

Talaşlı imalatta, ölçü tamlığını sağlamak amacıyla delik çapının istenilen toleranslar dahilinde delinmesi zor proseslerden biridir. Özellikle delik büyütme ve raybalama gibi ikinci bir işlem olmadan istenilen delik çapını tek seferde elde etmek oldukça zordur. Deliğin bir defada istenilen ölçü tamlığında delinmesi, işleme maliyetlerini düşürerek ekonomik üretim açısından önemlidir [86]. Bu noktadan hareketle kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarında Hastelloy X süper alaşımının farklı ilerleme ve kesme hızlarında delinmesinden sonra ölçülen delik çapı değerleri Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7.11. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında delik çapı değerleri.

Şekil 7.11 incelendiğinde en yüksek delik çapı (5,048 mm) kuru kesme koşulunda ve ağır kesme parametrelerinde (f 0,06 mm/dev ve Vc 30 m/dak) elde edilmiştir. En düşük delik çapı (5,006 mm) ise hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulunda ve en hafif kesme parametrelerinde (f 0,04 mm/dev ve Vc 20 m/dak) elde edilmiştir. Bu durum Şekil 7.4'te yer alan temas açısı ve Şekil 7.9'da yer alan yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Başka bir ifadeyle etkin yağlayıcı film tabaka oluşumu delik çapı sonuçlarıyla da uyum göstermiştir. Hibrid nano akışkanlarda, mono nano akışkanlara nazaran delik çap değişimleri daha düşük oranlarda seyretmiştir. Yine de tüm nano akışkan karışımların kuru ve MMY kesme koşullarından daha iyi sonuçlar gösterdiği anlaşılmaktadır. Nano akışkan karışımların, soğutma/yağlama performansının iyileştirilmesinde veya geliştirilmesinde önemli bir rol üstlendikleri ifade edilebilir.

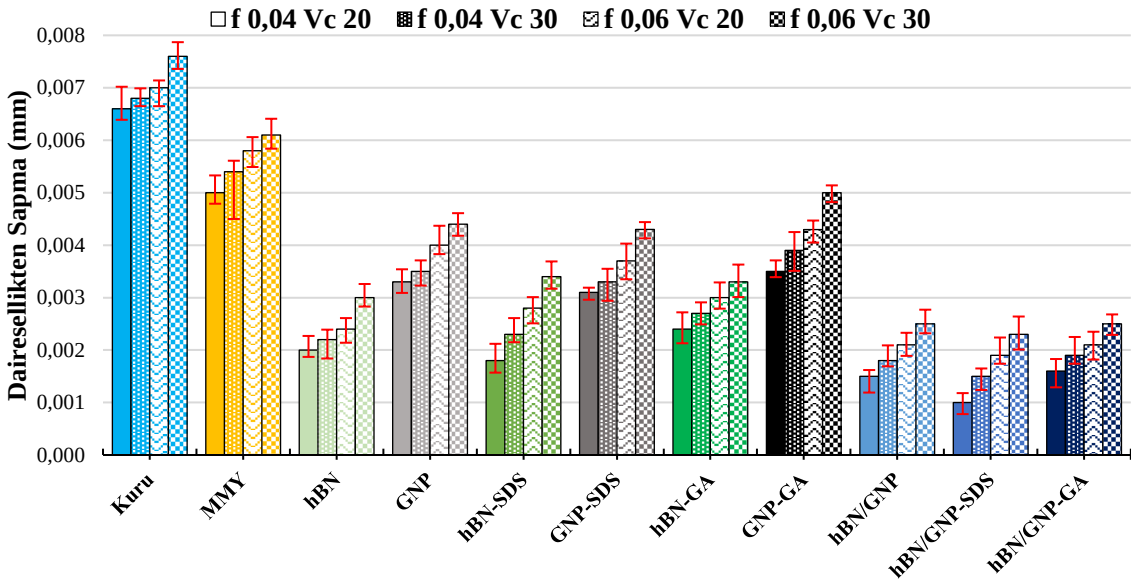
Mono Nano MMY kesme koşullarındaki delik çap değişimleri küçükten büyüğe doğru sıralanacak olursa hBN-SDS, hBN, hBN-GA, GNP-SDS, GNP ve GNP-GA şeklinde sıralanırken, hibrid nano akışkan kesme koşullarında ise hBN/GNP-SDS, hBN/GNP ve hBN/GNP-GA şeklindedir. Nano akışkan karışımlara SDS yüzey aktif madde ilavesi delik çap değişimlerini azaltırken, GA yüzey aktif madde ilavesi ise nispeten artırmıştır. Bu durumun ise homojen karışımlardaki pH değerleriyle (Şekil 7.1) bağlantılı olduğu düşünülmektedir. Genel olarak hBN/GNP-SDS kesme koşulunun, kuru ve MMY kesme koşuluna göre çaptan sapma değerlerinde sırasıyla %75,0 ve %69,23 oranında iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir. Kuru kesme koşulunda elde edilen en büyük çap değeri (5,048 mm) ISO 20286-2 tolerans (IT) kalite sistemine göre IT-10 tolerans değerine karşılık gelmektedir. hBN/GNP-SDS kesme koşulunda elde edilen en küçük çap değeri (5,008 mm) IT tolerans kalite sistemine göre IT-6 tolerans değerine karşılık gelmektedir [148]. Literatürde yer alan çalışmalarda da nano partiküllerin eklenerek hazırlandığı nano akışkanların soğutma/yağlama performansını iyileştirildiklerinden bahsedilmektedir [12], [39], [44], [139]. Nano akışkanların içerisine eklenen nano partiküllerin göstermiş olduğu tamir, parlatma, yuvarlama ve yastıklama mekanizmaları sayesinde nano akışkan koşullarında daha düşük çaptan sapma değerleri elde edildiği düşünülmektedir.

Delme işlemi sonrasında meydana gelen çap değişimleri, kesme hızının artmasıyla artış göstermektedir. Bu durum kesme hızının artışıyla birlikte, artan titreşime bağlı olarak delik kalitesinde bozulmanın ortaya çıkmasıyla açıklanabilir. İlerlemenin artmasıyla delik çaplarının arttığı görülmüştür. Bu durum ilerlemenin artmasıyla itme kuvvetinin kesici takım üzerinde eksenel yükleri artırması neticesinde, delik çaplarında artışa neden olması ile açıklanabilir [138], [149]. Bu durum Şekil 7.6'da yer alan itme kuvveti ve Şekil 7.7'de yer alan moment grafikleriyle açıklanabilir. İtme kuvveti büyük olan kuru kesme koşulunda, delik çap değişimi fazla olurken, en düşük itme kuvveti değerine sahip hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulunda ise çap değişimi en düşük mertebelerde kalmıştır.

7.6.3. Dairesellikten Sapma Sonuçları

Dairesellikten sapma genellikle titreşim, aşınma ve uygun yağlama/soğutmanın yapılamamasının sonucunda ortaya çıkmaktadır. Dairesellikten sapma belirli bir merkez noktadan ölçülen en büyük ve en küçük yarıçap arasındaki fark olarak tanımlanır. Dairesellikten sapmanın değerlendirilmesi, ISO 6318'e göre uluslararası olarak

standartlaştırılmış, “En Küçük Kare Daire” (LSC) yöntemi kullanılarak CMM cihazında ölçülebilmektedir [75]. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarında Hastelloy X süper alaşımının farklı ilerleme ve kesme hızlarında delinmesinden sonra ölçülen dairesellikten sapma değerleri Şekil 7.12’de verilmiştir.



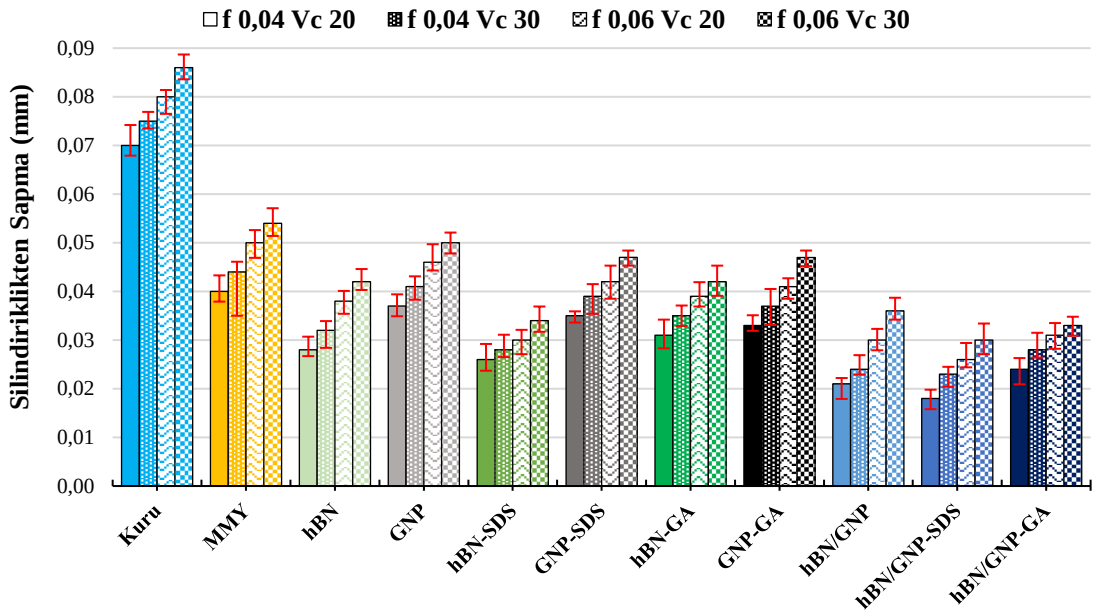
Şekil 7.12. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında dairesellikten sapma değerleri.

Şekil 7.12 incelenecek olursa, Şekil 7.11’deki çap değişimi grafiğinde yer alan bir eğilimin olduğu anlaşılmaktadır. Bu eğilimin aslında kesme sıcaklığı (Şekil 7.8) ile de bir benzerlik gösterdiği ifade edilebilir. Yüksek sıcaklık değerlerinde termal bozulmalara bağlı olarak daha yüksek çap değişimi ve dairesellikten sapma değerleri elde edilmiştir. Kuru ve MMY kesme koşullarında meydana gelen yüksek sıcaklıklar (515,5 ºC ve 491 ºC), dairesellikten sapma ile benzer eğilim göstererek (7,6 µm ve 6,1 µm) en yüksek dairesellikten sapma değerleri yine bu koşullarda elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık değerlerinde matkap kanallarından akan talaş kesici kenarlara yapışma eğilimi göstermektedir [150]. Talaşın matkap yüzeyine dengesiz biçimde yapışmasıyla birlikte (Şekil 7.17 a), matkabın delme çapında ve delik doğrusallığında daha fazla sapma görülebilmektedir. Kuru kesme koşulunda meydana gelen yüksek dairesellikten sapma, MMY koşullarında düşüş eğilimi göstermiş, mono nano akışkan ve son olarak hibrid nano akışkan koşullarında ise düşüş minimum seviyelere inmiştir. Aynı parametrelerde kuru kesme koşulunda 10 delik delinebiliyorken, diğer kesme koşullarında 60 delik delinmesi (Şekil 7.17) de bu durumu doğrular niteliktedir. hBN-SDS kesme koşulunda

dairesellikten sapma değerlerinde kuru ve MMY kesme koşuluna göre, sırasıyla %72,73 ve %64,0 oranında düşüş gözlenmiştir. Mono nano akışkanlardaki bu düşüşler nano akışkan temas açısı ölçümleri sonucunda elde edilen ıslanabilirlik özellikleriyle (Şekil 7.4) ilişkilendirilebilir. Düşük temas açısına sahip nano akışkan karışımlar yüzeylere daha hızlı nüfuz etmekte ve yağlayıcı film tabakasının etkin biçimde oluşmasını sağlayabilmektedirler. Bunun yanında nano partikül mekanizmalarının takım-talaş-iş parçası ara yüzeylerindeki etkinliğinin de bu iyileşmeye katkı sağladığı düşünülmektedir. hBN/GNP-SDS kesme koşulunda ise dairesellikten sapma değerlerinin kuru ve MMY kesme koşuluna göre sırasıyla %84,84 ve %80,0 oranında iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum farklı iki nano partikülün üstün özelliklerinin birleşmesine ve homojen bir karışım oluşturulması için eklenen SDS yüzey aktif maddesinin hibrid nano akışkanların performansını artırmasına bağlanabilir. Dairesellikten sapma değerleri, ilerlemenin artması ile kesme hızına göre daha fazla artış göstermektedir. Bunun nedeni ilerlemeye bağlı olarak matkapta meydana gelen salgının artması ile çap ve dairesellik değerlerini de artırmasıdır. Kıvak, Ti6Al4V malzemenin delinmesinde dairesellikten sapma üzerinde en etkili parametrenin ilerleme olduğunu yaptığı çalışmada belirtmiştir [138]. Sonuç olarak Hastelloy X süper alaşım malzemenin delinmesinde de dairesellikten sapma üzerinde kesme hızına göre en etkili parametrenin ilerleme olduğu söylenebilir (Şekil 7.12).

7.6.4. Silindiriklikten Sapma Sonuçları

Silindiriklik, tüm yüzey noktalarının ortak bir eksenden ne kadar uzaklıkta olduğunu ifade eden bir terimdir. Delme işlemi sonrası silindiriklik kontrolü, iş parçası yüzeyinde izin verilen silindiriklik hatası miktarını sınırlayan geometrik bir toleranstır [26], [151]. Dolayısıyla silindiriklikten sapma, özellikle delme işleminde ele alınması gereken önemli bir geometrik toleranstır. Şekil 7.13'te Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarında Hastelloy X süper alaşımının farklı ilerleme ve kesme hızlarında delinmesinden sonra ölçülen silindiriklikten sapma değerleri verilmiştir.



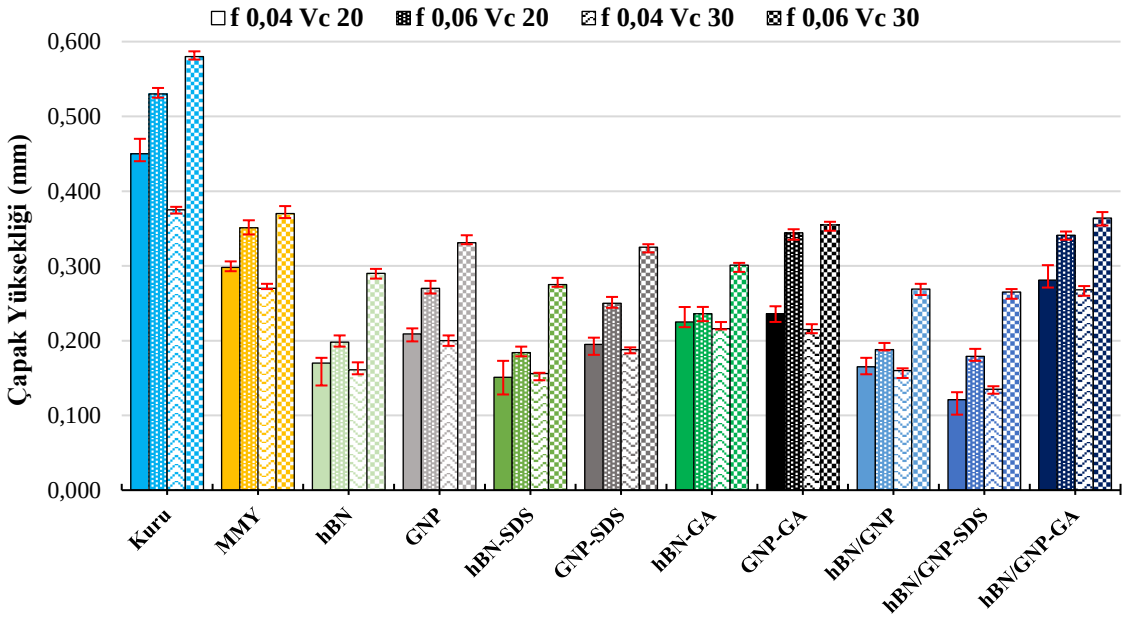
Şekil 7.13. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında silindiriklikten sapma değerleri.

Şekil 7.13 incelendiğinde özellikle kuru kesme koşulunda silindiriklikten sapmanın (86 µm) daha yüksek olduğu görülmektedir. Nano akışkan kesme koşulunda ise kuru ve MMY kesme koşuluna göre daha düşük silindiriklikten sapma değerleri görülmektedir. En düşük silindiriklikten sapma değeri ise (18 µm) hBN/GNP-SDS kesme koşulunda gözlemlenmiştir. hBN/GNP-SDS kesme koşulunda silindiriklikten sapma değerlerinde kuru ve MMY kesme koşuluna göre sırasıyla %74,28 ve %55,0 oranında iyileşme gözlemlenmiştir. Mono nano akışkan kesme koşullarında yine hBN ve SDS katkılı hBN-SDS nano akışkan koşulunun daha iyi performans gösterdiği (26 µm) anlaşılmıştır. Diğer bir ifadeyle hBN-SDS kesme koşulunda, kuru ve MMY kesme koşuluna göre %62,85 ve %35,0 oranında silindiriklik değerlerinde iyileşmeler sağlanmıştır. Bu durum nano akışkanların silindiriklik gibi 3D yüzey tolerans kontrolünde daha üstün performans gösterdiğini ifade etmektedir. Matkabın delme işlemi esnasında maruz kaldığı kuvvetlerden silindiriklik değerlerinin doğrudan etkilendiği düşünülmektedir. Delme prosesinde meydana gelen yüksek kuvvet (Şekil 7.6) ve moment (Şekil 7.7) değerleri bu durumu açıklar niteliktedir. Kesme hızının artmasıyla silindiriklikten sapma değerleri de artmıştır. Artan kesme hızı ile meydana gelen yüksek sıcaklıklar kesici takım ve iş parçasının boyutsal kararlılığını olumsuz yönde etkileyerek silindiriklikten sapma değerini artırdığı düşünülmektedir. İlerlemenin artmasıyla silindiriklikten sapma değeri artmaktadır. Bu durum düşük ilerleme değerlerinde delik içerisinde bekleyen talaşın

meydana getirdiği ilave radyal yüklerden kaynaklanmaktadır. Yüksek ilerleme değerlerinde ilerlemenin artması itme kuvvetini artırarak eksenel kaçıklığın büyümesine neden olmaktadır [90]. Kıvak, Ti6Al4V malzemenin delinmesinde silindiriklikten sapma değerlerinin kesme hızının ve ilerlemenin artmasıyla arttığı sonucunu elde etmiştir [138].

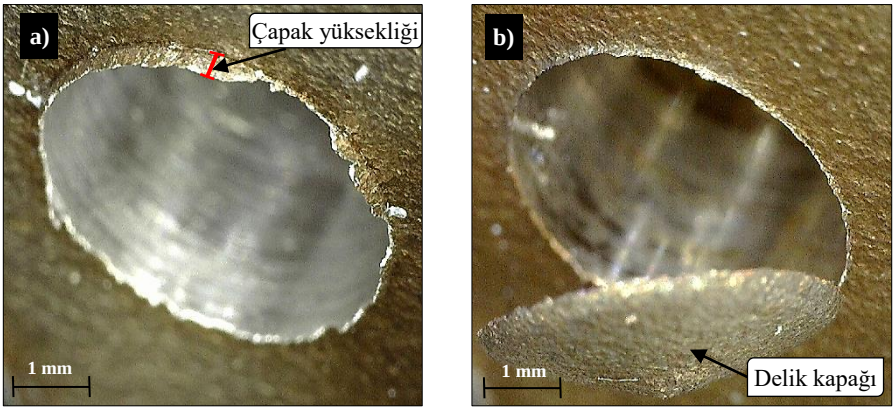
7.7. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİ SONUÇLARI

Çapaklar işleme operasyonlarında istenmeyen malzeme çıkıntıları olarak ifade edilebilirler. Özellikle delme operasyonlarında, delik giriş ve çıkışlarında çapak oluşumlarına rastlanmaktadır. Girişte oluşan çapak iş parçası malzemesinin plastik akışıyla oluşmaktadır. Çıkışta oluşan çapak ise iş parçası malzemesinin yüksek sıkıştırma oranıyla delik merkezine yığılmasıyla oluşmaktadır. Delik delme operasyonlarında daha çok çıkışta oluşan çapak yüksekliği dikkate alınmakla beraber, düzenli çapak oluşumları da meydana gelebilmektedir. Çapak oluşumları matkap geometrisine, simetrisine, çapına, matkap malzemesine, iş parçası malzemesine, kalınlığına, işleme şartlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir [137], [138]. Dolayısıyla delme operasyonlarında çapak yüksekliği oluşumlarının kontrolü büyük önem arz etmektedir. Şekil 7.14'te kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarında Hastelloy X süper alaşımının farklı ilerleme ve kesme hızlarında delinmesinden sonra ölçülen çapak yüksekliği değerleri verilmiştir.



Şekil 7.14. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında çapak yüksekliği değerleri.

Şekil 7.14'te görüleceği üzere en yüksek çapak yüksekliği değeri (0,580 mm), kuru kesme koşulunda en ağır kesme parametresinde (Vc 30 m/dak ve f 0,06 mm/dev) meydana gelmiştir. Bu durum delme işleminde oluşan termo mekanik yüklerin kuru kesme koşulunda daha fazla artış göstermesine bağlanabilir. En düşük çapak yüksekliği değeri (0,121 mm) ise hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulunda en düşük kesme parametresinde (Vc 20 m/dak ve f 0,04 mm/dev) elde edilmiştir. hBN/GNP-SDS kesme koşulunda, Vc 30 m/dak ve f 0,04 mm/dev işleme parametrelerinde oluşan çapak yüksekliği kuru ve MMY kesme koşullarına göre sırasıyla %67,73 ve %55,19 oranında azalma göstermiştir. Şekil 7.14'te yer alan çapak yüksekliği sonuçlarıyla, Şekil 7.8'de yer alan kesme sıcaklığı sonuçları benzerlik göstermektedir. Bir başka deyişle, yüksek sıcaklık değerlerinde daha yüksek çapak oluşumları meydana gelmiştir. Bu tablo tüm kesme koşullarında benzerlik göstermekle beraber mono nano akışkanlar içerisinde en iyi performansı hBN-SDS kesme koşulu göstermiştir. Bunu sırasıyla hBN, GNP-SDS, GNP, hBN-GA ve GNP-GA kesme koşulları takip etmiştir. Bu durum, matkap ile iş parçası arasında yastıklama etkisi başta olmak üzere diğer nano partikül mekanizmaların ve yağın yüksek yağlayıcılık etkisinin sonucu takım talaş temas noktasındaki sürtünmenin azalmasından kaynaklanmaktadır. Nano akışkanların sahip olduğu düşük temas açısı ve yüzey gerilimi özelliği sayesinde çapak yüksekliği oluşumlarının (Şekil 7.15) gecikmesi veya düşük mertebelerde kalması sağlanabilmektedir. Şekil 7.4'te yer alan temas açısı ve yüzey gerilimi grafiği bu durumu destekler niteliktedir. Özetle düşük temas açısına (Şekil 7.4) sahip kesme koşullarında kesme bölgesine basınçla gönderilen yağ zerrecikleri hızlı şekilde yağlayıcı film tabakası oluşturarak ve sürtünmeyi minimize etmede etkili olmuştur.



Şekil 7.15. Delik çıkışındaki oluşumlar a) Çapak b) Delik kapağı.

Şekil 7.15'te deliğin çıkış bölgesi boyunca düzenli çapak oluşumu görülmektedir. Düzenli çapak oluşumunda delik kapağı adı verilen ve genellikle işleme esnasında

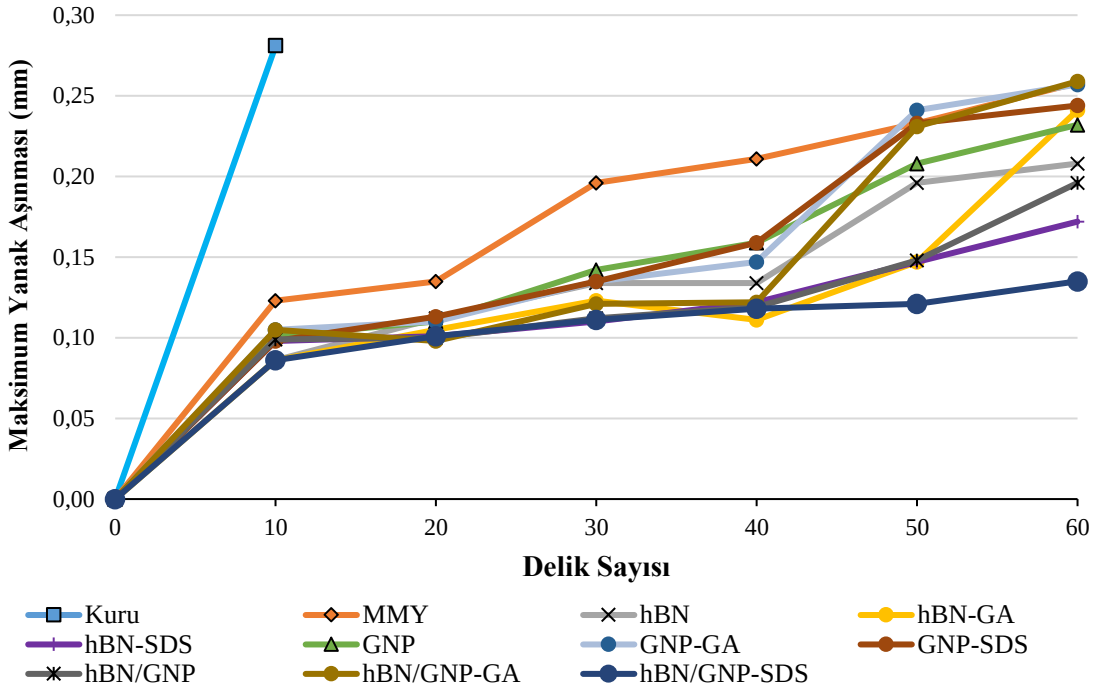
kendiliğinden veya işleme sonrası kolaylıkla iş parçasından ayrılabilen oluşumlar meydana gelebilmektedir. Bu oluşum, genelde matkabın kesme kenarında yığılan talaşın (Şekil 7.17 a, f, h, i, j, k) yüksek oranda baskı oluşturması sonrasında meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla yüksek oranda itme kuvveti oluşumunda daha büyük çapak oluşumlarından bahsetmek mümkündür. Diğer bir ifadeyle takımın maruz kaldığı itme kuvvetinin büyüklüğü çapak yüksekliği büyüklüğünü de etkileyebilmektedir. Şekil 7.6'da itme kuvveti sonuçları bu durumu doğrular niteliktedir. İtme kuvveti değeri büyük olan kuru kesme koşulunda büyük, küçük olan hBN/GNP-SDS kesme koşulunda ise küçük çapak yüksekliği oluşumları meydana gelmiştir. Uçak ve Çiçek, yaptığı çalışmada Inconel 718 malzemenin delinmesinde çapak oluşumunu incelemişlerdir. Yüksek sıcaklık ve soğutma yönteminin çapak yüksekliği oluşumları üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [139].

7.8. TAKIM AŞINMASI VE TAKIM ÖMRÜ SONUÇLARI

Makine imalat sektöründe iş, zaman, kalite üçgeninde takım maliyetleri önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle delme işlemlerinde BUE formunun oluşmasıyla takım kesici kenarları hızla aşınmakta, itme kuvveti ve moment değerleri giderek artış göstermektedir. Bunun neticesinde ise takım ömrü nihayete ermekte ve işleme prosesi sekteye uğramaktadır [139]. Dolayısıyla kesici takım aşınmasının ve takım ömrünün kontrol altına alınarak takip edilmesi özellikle yarı kapalı bir alanda işleme olarak tabir edilen, delme operasyonlarında son derece önemlidir. Kuru kesme koşullarında BUE oluşum eğilimi sebebiyle bozulan takım geometrisinin, düzenli olmayan talaş oluşumuna sebep olduğu söylenebilir. Delme işlemlerinde oluşan bu talaşın tahliyesi sırasında yüzeyde oluşan çizilmelerin sonucunda ise yüzey kalitesi kötüleşmektedir. Kesme sıvısı kullanımında ise soğutma/yağlamanın da etkisiyle takım aşınması düşük oranlarda olmakta ve işlenen yüzeylerin kalitesinde iyileşmeler olmaktadır [138].

Bu çalışmada görülen ana aşınma tipleri yanak aşınması, BUE, kopma, köşe aşınması, adhezyon ve kesici kenar aşınmasıdır. Şekil 7.16'da 60 delik sonunda kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında f 0,06 mm/dev ilerleme ve Vc 20 m/dak kesme hızında elde edilen maksimum yanak aşınması değerleri verilmiştir. Delme işlemi yarı kapalı bir alanda olduğundan müdahale edilmesinde geç kalındığında matkap nihai ömrünü tamamlamış olabilmektedir. Özellikle kuru kesme koşulunda herhangi bir soğutma/yağlama koşulu kullanılmadığından talaşın akması zorlaşmakta ve kesme

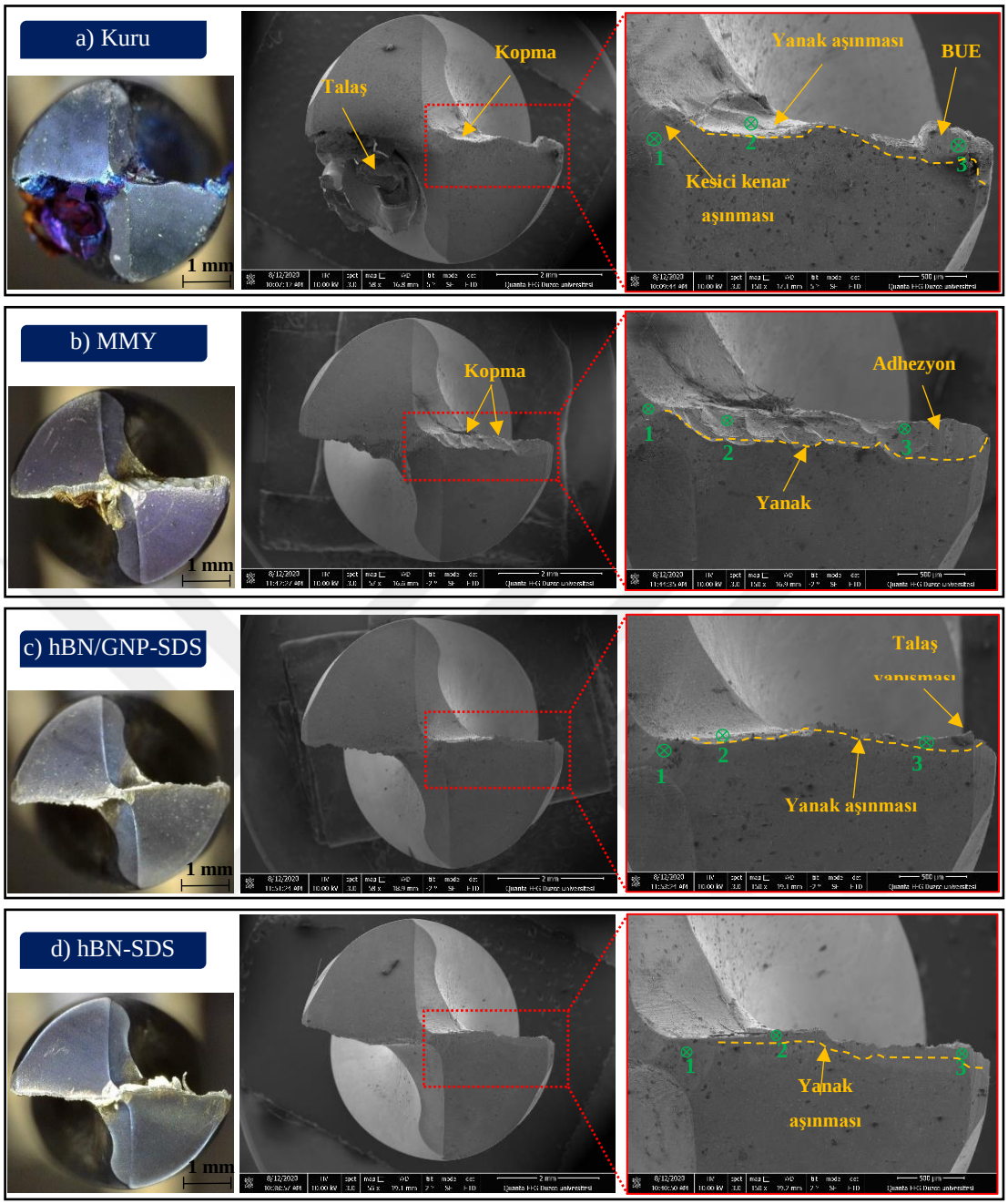
sıcaklıkları istenmeyen seviyelere çıkabilmektedir. Delme işleminde oluşan kesme sıcaklık değerleri incelenecek olursa (Şekil 7.8), kuru kesme koşulunda, f 0,06 mm/dev ilerleme ve Vc 20 m/dak kesme hızında en yüksek kesme sıcaklık değerine (484,1 ºC) ulaşıldığı görülmektedir. Aynı kesme parametrelerinde kuru kesme koşulunda 10 delik delinebilirken, MMY kesme koşulunda ise 60 deliğe kadar ulaşılmıştır. Bu iyileşme MMY sisteminde kesme bölgesine basınçlı hava ile gönderilen aerosol buhar karışımının sürtünmeyi azaltarak delme işlemini kolaylaştırması sayesinde oluşmaktadır.



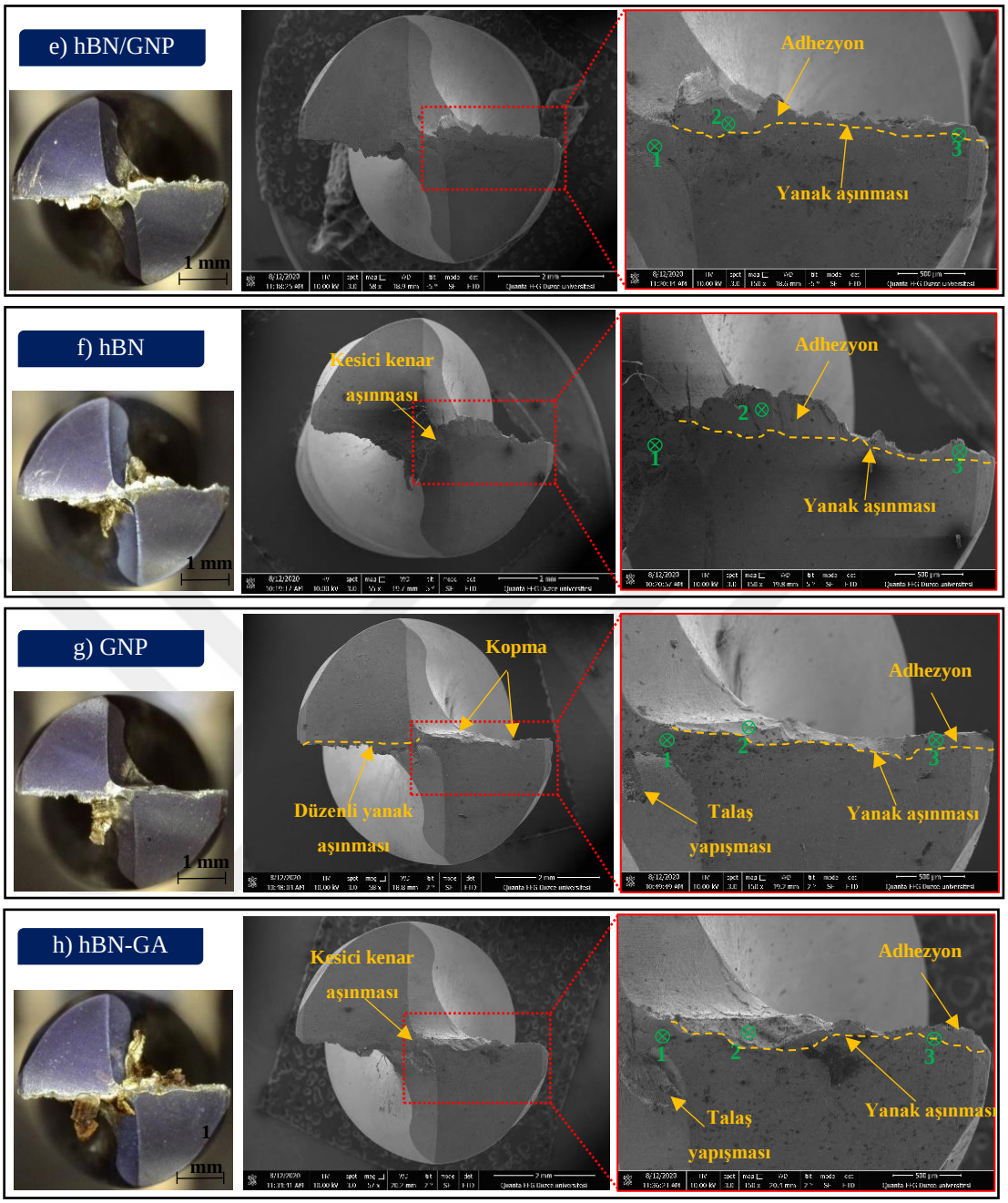
Şekil 7.16. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşulları altında delik sayısına bağlı olarak maksimum yanak aşınma değeri (kesme parametreleri, Vc: 20 m/dak, f: 0,06 mm/dev).

Şekil 7.16 incelendiğinde en düşük yanak aşınması değeri, hBN/GNP-SDS kesme koşulunda elde edilirken, bunu sırasıyla hBN-SDS, hBN-GA, hBN, GNP, hBN-GA, GNP-SDS, GNP-GA, MMY ve hBN/GNP-GA kesme koşulları takip etmiştir. Kuru kesme koşulunda 10 delik sonunda matkapta oluşan yanak aşınması değeri 0,281 mm olarak ölçülürken, hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulunda 60 delik sonunda %51,96 oranında azalarak 0,135 mm olarak ölçülmüştür. Nano partküllerin kesme yağına eklenmesiyle elde edilen nano akışkanlar tamir, yuvarlanma, parlatma, kayma ve yastıklama etkisi gibi mekanizmalar sergilemektedirler. hBN/GNP-SDS kesme koşulunda küresel formlu hBN nano partikülünün, katmanlı GNP parçacıkları arasında

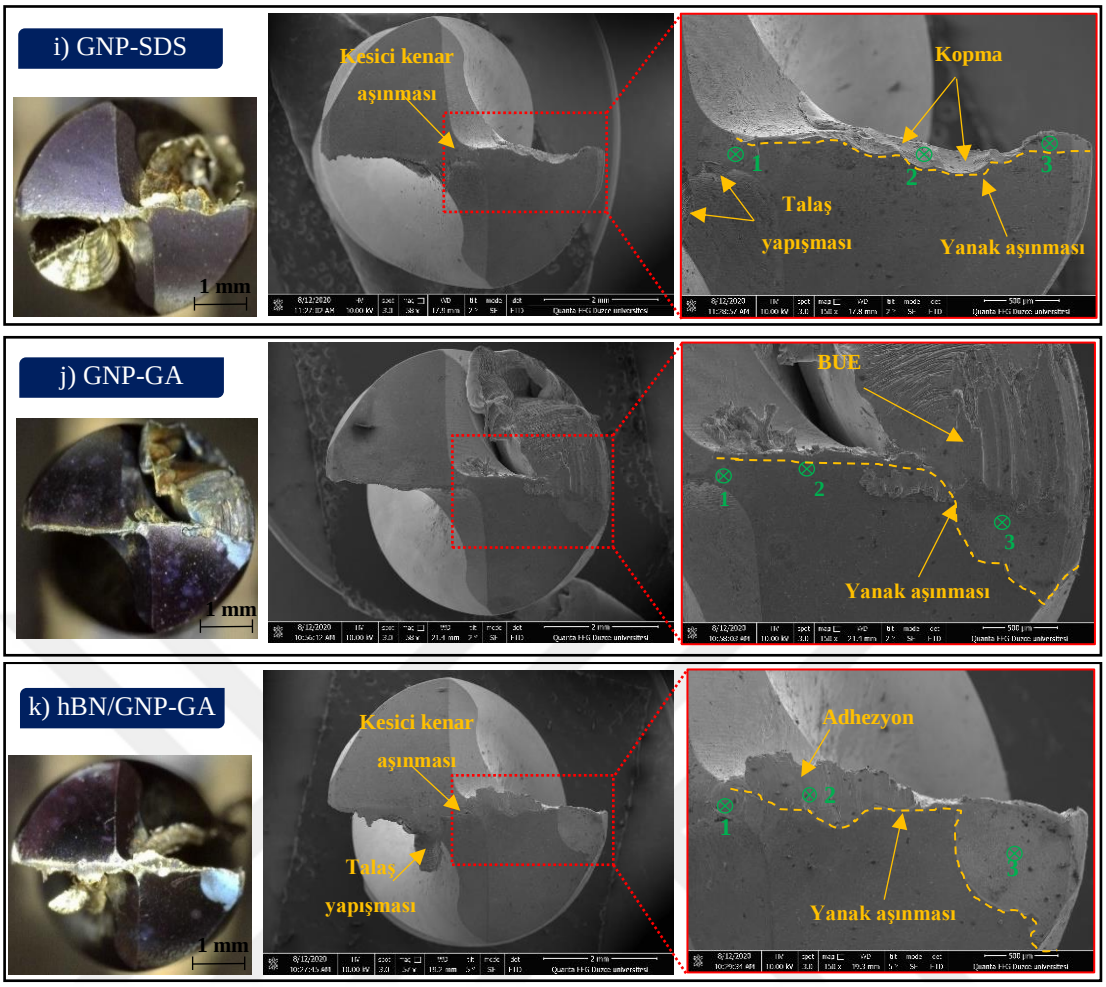
katmanlar arası kayma etkisiyle sürtünmeyi minimize ettiği düşünülmektedir. hBN/GNP-SDS hibrid nano akışkanına SDS yüzey aktif madde ilavesiyle de nispeten homojen bir karışım oluşturması sayesinde aşınmayı geciktirdiği düşünülmektedir. Bu durumu Şekil 7.4'te yer alan temas açısı grafiği destekler niteliktedir. hBN/GNP-SDS hibrid nano akışkanın daha düşük temas açısına sahip olması sebebiyle ıslanabilirlik performansı diğer kesme koşullarına göre daha iyi olduğundan etkin bir yağlayıcı film tabakası oluşturmuştur. Şekil 7.17'de yer alan SEM görüntülerine bakıldığında matkapların aşınan yüzeylerinde, baskın aşınma türünün adhezyon aşınması olduğu söylenebilir. Şekil 7.17 üzerinden alınan EDX noktalarının analiz sonuçları Çizelge 7.1 a3, b3, c3, e3, f2, f3, g3, h3, i3 ve k2 adhezyon aşınmasının varlığını kanıtlar niteliktedir. Matkabın özellikle kesme kenarı ucunda yığılan talaşlar BUE oluşturup ardından ayrılarak takımın aşınmasına ve takımın ömrünü tamamlamasına neden olmaktadır. BUE oluşumları Şekil 7.17 a ve j'de (kuru ve GNP-GA kesme koşulları) açıkça görülmektedir. Adhezyon aşınmasının ilerlemesinden sonra takım giderek ısınmaya ve oluşan BUE formları, takım malzemesiyle birlikte ayrılarak kaplamanın sıyrılmasına veya matkabın hızlı aşınmasına neden olabilmektedir. Şekil 7.17'de SEM görüntüleri incelendiğinde kuru, MMY, GNP, hBN-GA, GNP-SDS, GNP-GA ve hBN/GNP-GA kesme koşullarında kesici takım kaplamasının sıyrıldığı açıkça görülmektedir. Aynı kesme koşullarındaki Çizelge 7.1'de EDX noktalarında (a2, b2, g2, h2, i2, j3 ve k3) yapılan malzeme analizleri bu durumu destekler niteliktedir. Yüzey aktif madde ilaveli nano akışkanlar kendi içinde değerlendirildiğinde SDS ilaveli nano akışkanların GA ilaveli nano akışkanlara göre takım aşınmasını azaltmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.16'da maksimum yanak aşınmaları ve Şekil 7.17'de SEM görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde, takım aşınmasında hBN/GNP-GA kesme koşulunun 60 delik sonunda diğer kesme koşullarına göre daha fazla aşındığı görülmektedir. Şekil 7.4'te temas açısı ölçüm sonuçlarıyla Şekil 7.16'da maksimum yanak aşınması ve Şekil 7.17'de SEM görüntüsü sonuçları örtüşmektedir. Yani temas açısı en düşük olan hBN/GNP-SDS kesme koşulunda en düşük, en yüksek olan hBN/GNP-GA kesme koşulunda ise en yüksek aşınma oranı görülmektedir. Islatma özelliği olarak da ifade edebileceğimiz temas açısı ölçüm sonuçlarına göre, delme işlemi esnasında daha fazla alana yayılan hBN/GNP-SDS yağ damlacıkları üstün yağlayıcılık performansı gösterirken, yayılımı diğer kesme koşullarına göre daha az olan hBN/GNP-GA yağ damlacıkları daha düşük yağlayıcılık performansı göstermiştir. Bitkisel esaslı yağa eklenen nano partiküller sayesinde işlenen yüzeylerdeki ıslatma özelliği gelişmekte ve yüzeydeki sürtünme minimize olmaktadır [152].



Şekil 7.17. Farklı kesme koşulları altında aşınmış matkabın SEM görüntüleri a) Kuru b) MMY c) hBN/GNP-SDS d) hBN-SDS e) hBN-GA f) hBN g) GNP h) hBN-GA i) GNP-SDS j) GNP-GA k) hBN/GNP-GA (a: 10 delik sonunda, b-k: 60 delik sonunda).



Şekil 7.17. (devam) Farklı kesme koşulları altında aşınmış matkabın SEM görüntüleri a) Kuru b) MMY c) hBN/GNP-SDS d) hBN-SDS e) hBN-GA f) hBN g) GNP h) hBN-GA i) GNP-SDS j) GNP-GA k) hBN/GNP-GA (a: 10 delik sonunda, b-k: 60 delik sonunda).



Şekil 7.17. (devam) Farklı kesme koşulları altında aşınmış matkabın SEM görüntüleri a) Kuru b) MMY c) hBN/GNP-SDS d) hBN-SDS e) hBN-GA f) hBN g) GNP h) hBN-GA i) GNP-SDS j) GNP-GA k) hBN/GNP-GA (a: 10 delik sonunda, b-k: 60 delik sonunda).

Şekil 7.17 matkap kesici kenar aşınmaları ve kesici kenarlarda BUE oluşumlarının varlığı, takımın hızlı aşınmasına, itme kuvvetlerinde artışa, yüzey kalitesinde bozulmaya yol açabilmektedir. Öyle ki, kuru ve MMY sistemi altında yapılan deneylere ait SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 7.17 a ve b) talaşların matkap yüzeylerine yapıştığı ve talaşların matkap yüzeyinden ayrılmasıyla ufalanma ve kopma oluşumlarına neden olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek kesme hızı ve ilerleme kombinasyonlarında, birim zamanda çıkarılan talaş miktarının artmasına bağlı olarak sürtünmenin ve sıcaklığın artması, takım aşınmasını artırmıştır [153]. Daha önce yapılan çalışmalarda araştırmacılar, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının takım aşınmasını ciddi oranda azalttığını tespit etmişlerdir [12], [44], [48], [39], [147].

Çizelge 7.1. Kuru, MMY ve farklı nano akışkan kesme koşullarına bağlı matkapların elemental analiz sonuçları.

Kesme Koşulu	**EDX Nok.**	**Elementler** (ağırlıkça %)										
		Ni	**Cr**	**Fe**	**Mo**	**Si**	**C**	**Co**	**W**	**Ti**	**Al**	**N**
a) Kuru	1	39,69	20,14	17,61	9,73	1,68	10,65	-	-	-	0,50	-
	2	-	2,23	-	-	-	9,13	6,17	82,47	-	-	-
	3	42,52	22,98	18,43	8,99	0,80	5,72	-	-	-	0,56	-
b) MMY	1	39,74	20,83	15,90	2,31	0,18	18,97	2,07	-	-	-	-
	2	3,98	1,90	-	-	-	24,54	6,84	62,74	-	-	-
	3	43,42	21,83	18,93	10,05	0,88	4,89	-	-	-	-	-
c) hBN/ GNP-SDS	1	13,90	7,99	6,64	3,46	-	4,98	0,69	-	35,68	22,87	3,79
	2	41,61	20,74	18,43	9,66	0,58	8,34	-	-	-	0,64	-
	3	45,45	21,60	18,35	9,61	0,59	4,40	-	-	-	-	-
d) hBN-SDS	1	43,60	21,25	18,35	9,01	0,39	5,79	1,61	-	-	-	-
	2	44,75	21,44	18,95	9,59	0,70	3,49	1,08	-	-	-	-
	3	45,44	22,34	19,49	9,65	0,63	1,36	1,09	-	-	-	-
e) hBN-GA	1	45,19	21,14	17,80	8,87	0,56	5,44	1,00	-	-	-	-
	2	43,91	21,92	18,73	10,34	0,80	3,58	1,08	-	-	-	-
	3	44,98	22,21	18,88	9,98	0,58	2,55	0,82	-	-	-	-
f) hBN	1	42,38	20,12	17,78	7,35	0,38	11,99	-	-	-	-	-
	2	43,30	21,26	18,60	9,53	0,57	6,74	-	-	-	-	-
	3	30,36	15,94	14,15	6,48	0,55	32,52	-	-	-	-	-
g) GNP	1	40,41	20,03	17,41	8,77	0,59	11,98	0,81	-	-	-	-
	2	4,65	2,33	2,57	-	-	11,44	3,27	75,74	-	-	-
	3	46,31	21,86	18,91	9,87	0,60	1,22	1,23	-	-	-	-
h) hBN-GA	1	46,73	22,65	18,95	8,31	0,65	2,69	-	-	-	-	-
	2	11,23	4,16	5,56	2,59	-	12,16	8,49	55,81	-	-	-
	3	44,07	21,80	18,85	10,31	0,63	2,39	1,68	-	-	-	-
i) GNP-SDS	1	42,81	20,89	18,09	8,35	0,50	8,56	0,80	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	17,04	9,44	73,52	-	-	-
	3	43,78	22,21	18,25	9,98	0,53	5,25	-	-	-	-	-
j) GNP-GA	1	28,14	15,35	12,82	4,54	0,14	39,01	-	-	-	-	-
	2	17,82	15,76	11,35	5,53	0,59	48,95	-	-	-	-	-
	3	-	1,56	-	-	-	17,70	13,79	66,95	-	-	-
k) hBN/ GNP-GA	1	41,85	20,29	17,54	8,14	0,42	11,76	-	-	-	-	-
	2	43,06	21,56	18,61	9,19	0,44	7,14	-	-	-	-	-
	3	-	2,21	-	-	-	4,28	15,98	77,53	-	-	-

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada nikel esaslı Hastelloy X süper alaşımının delinmesinde kuru, MMY, Mono Nano MMY ve Hibrid Nano MMY soğutma/yağlama koşullarının delme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca mono ve hibrid nano akışkanlara yüzey aktif madde ilavesinin işleme performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Nano akışkan karışımlar, Grafen nano platelet (GNP) ve hegzagonal Bor Nitrür (hBN) katı nano partiküllerinin hacimce %0,6 oranında, Sodyum Dodesil Sulfat (SDS) ve Gam Arabik (GA) yüzey aktif maddelerinin ise ağırlıkça %0,25 oranında bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle hazırlanmıştır. Delme deneyleri sabit delme derinliğinde (13,5 mm), iki farklı kesme hızı (20 ve 30 m/dak) ve iki farklı ilerlemede (0,04 ve 0,06 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kesme koşullarının itme kuvveti, moment, delik kalitesi (yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, dairesellikten sapma, silindiriklikten sapma), kesme sıcaklığı, çapak yüksekliği, takım ömrü ve takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen verilerle aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Hazırlanan karışımlarda en yüksek viskozite değeri hBN/GNP-GA hibrid nano akışkanında (6,54 MPa.s) ölçülürken, en düşük viskozite değeri ise saf yağda (5,16 MPa.s) ölçülmüştür. pH ölçüm sonuçlarına göre SDS ilaveli hBN/GNP-SDS (6,82) hibrid nano akışkanında en yüksek ve saf yağda (5,76) ise en düşük pH değerleri olduğu saptanmıştır. Karışımlara eklenen her ek malzeme (yüzey aktif madde gibi) yağlayıcılık performansının temel unsuru olan viskozite değerini yükseltmektedir. GA yüzey aktif maddesinin, SDS yüzey aktif maddesine göre karışımın viskozite değerini daha fazla oranda yükselttiği tespit edilmiştir.
- Termal iletkenliğin en yüksek değeri hibrid hBN/GNP nano akışkanında elde edilirken (0,1953 W/mK), en düşük değeri saf yağda (0,1671 W/mK) elde edilmiştir. Bir başka ifadeyle, hBN/GNP nano akışkanının termal iletkenlik değeri saf yağa göre %14,44 oranında artış göstermiştir. Nano akışkanlara yüzey gerilimini düşürerek homojen karışım elde etme adına eklenen yüzey aktif maddelerin, karışımların termal iletkenlik değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

- İşleme prosesinde kullanılan yağlayıcı ajanların daha fazla alana yayılması istendiğinden yağlayıcılık performansının diğer bir önemli parametresi olan temas açısı değerinin düşük olması beklenmektedir. Çalışmada elde edilen en düşük temas açısı değeri saf yağda (18,75 º) ölçülürken, en büyük temas açısı ise saf yağa göre %15,77 artışla hBN/GNP-GA nano akışkan karışımında (22,26 º) ölçülmüştür. SDS yüzey aktif maddesi GA yüzey aktif maddesine göre göre temas açısını düşürmede en etkili ajan olmuştur. Nano akışkanlar temas açısı bakımından kendi içlerinde değerlendirildiğinde en düşük mono nano akışkan açı değerinin hBN-SDS'de (20,05 º) ve en düşük hibrid nano akışkan açı değerinin ise hBN/GNP-SDS'de (19,75 º) elde edildiği görülmüştür.
- En düşük yüzey gerilimi saf yağda elde edilirken (32,21 mN/mm), en yüksek yüzey gerilimi değeri ise GNP nano akışkanında (34,94 mN/mm) elde edilmiştir. hBN ve GNP mono nano akışkanları karşılaştırıldığında hBN nano partiküllerinin ilave edildiği nano akışkanların yüzey gerilim değerleri daha düşük çıkmıştır. Yüzey geriliminin düşürülmesi adına nano akışkanlara eklenen yüzey aktif maddelere bakıldığında ise SDS yüzey aktif maddesinin GA'ya göre karışımın yüzey gerilimini daha fazla düşürdüğü görülmüştür.
- İtme kuvveti deney sonuçlarına göre, en düşük itme kuvveti ve moment değeri hBN/GNP-SDS kesme koşulunda Vc 30 m/dak kesme hızı ve f 0,04 mm/dev ilerleme değerinde (533,2 N – 2,113 Nm) elde edilirken, en yüksek itme kuvveti ve moment değeri ise kuru kesme koşulunda Vc 20 m/dak kesme hızı ve f 0,06 mm/dev ilerleme değerinde (821,6 N – 4,988 Nm) elde edilmiştir. Yani, hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulunda elde edilen itme kuvveti ve moment değerleri, kuru kesme koşuluna göre sırasıyla %23,51 ve %46,99 oranında azalma eğilimi göstermiştir. SDS yüzey aktif madde ilaveli nano akışkan karışımların ise GA yüzey aktif madde ilaveli nano akışkanlara göre itme kuvveti ve moment değerlerini düşürmede daha etkili olduğu tespit edilmiştir. İtme kuvveti ve moment değerleri kesme hızı arttıkça düşüş gösterirken, ilerlemenin artmasıyla artış göstermiştir.
- Kesme sıcaklığında ise kuru kesme koşulunda f 0,06 mm/dev ilerleme ve Vc 30 m/dak kesme hızında 515,6 ºC ile en yüksek kesme sıcaklığı değeri ölçülürken, hBN/GNP kesme koşulunda f 0,04 mm/dev ilerleme ve Vc 20 m/dak kesme hızında 345,7 ºC ile en düşük kesme sıcaklığı değeri ölçülmüştür. GA yüzey aktif

maddenin karışımlara eklenmesiyle kesme sıcaklığı değerleri SDS yüzey aktif maddesine göre daha fazla artış göstermiştir. Kesme hızının ve ilerlemenin artmasıyla kesme sıcaklığı artış göstermiştir. Kesme sıcaklığı üzerinde kesme hızı ilerlemeye göre daha fazla etki göstermiştir.

- Delik kalitesinde de elde edilen en yüksek Ra değerine (2,455 µm) kuru kesme koşulunda f 0,06 mm/dev ilerleme Vc 20 m/dak kesme hızında ulaşılırken, en düşük Ra değerine (0,864 µm) %64,81 oranında azalmayla f 0,04 mm/dev ilerleme Vc 30 m/dak kesme hızında ve hBN/GNP-SDS kesme koşulunda ulaşılmıştır. Delik çapı, dairesellik, silindiriklik üzerine en yüksek değerler kuru kesme koşulunda elde edilirken, en düşük değerler hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulunda elde edilmiştir. Delik çapı, dairesellik ve silindiriklik değişimlerine bakıldığında ise kuru kesme koşuluna göre sırasıyla %75, %84,84 ve %74,28 oranında düşüşle, en iyi performansı yine hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulu göstermiştir. Kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değeri azalırken, ilerlemenin artmasıyla artmıştır. Yüzey pürüzlülüğü üzerine ilerleme kesme hızından daha etkili olmuştur. Delik çapı, dairesellik ve silindiriklik değerleri kesme hızının ve ilerlemenin artmasıyla artış göstermiştir.
- En yüksek çapak yüksekliği değeri (0,580 mm), kuru kesme koşulunda en ağır işleme parametresinde (Vc 30 m/dak ve f 0,06 mm/dev) meydana gelirken, en düşük çapak yüksekliği değeri %79,14 azalmayla (0,121 mm) hBN/GNP-SDS kesme koşulunda en düşük işleme parametresinde (Vc 20 m/dak ve f 0,04 mm/dev) meydana gelmiştir. hBN-SDS kesme koşulu mono nano akışkanlar içinde en iyi performansı gösterirken, hibrid nano akışkanlar içerisinde hBN/GNP-SDS kesme koşulu en iyi performansı göstermiştir. Kesme hızının artmasıyla çapak yüksekliği değerleri önce bir miktar düşerken sonra artmıştır. İlerlemenin artmasıyla çapak yüksekliği değerleri artış göstermiştir.
- Matkaplarda meydana gelen yanak aşınma değerleri değerlendirildiğinde kuru kesme koşulunda sadece 10 delik sonunda (0,281 mm) en yüksek aşınma değerine ulaşılırken, hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulunda 60 delik sonunda yanak aşınması %51,96 oranında azalarak en düşük (0,135 mm) değerine ulaşmıştır. SDS yüzey aktif madde eklenen nano akışkanlar gerek mono gerekse hibrid kesme koşullarında GA yüzey aktif madde eklenen nano akışkanlara göre daha iyi performans sergilemiştir. Öyle ki nano akışkanlar içerisinde hBN/GNP-GA

kesme koşulunda en kötü takım aşınması elde edilmiştir. Burada yağlayıcılık performansı en düşük bir başka ifadeyle temas açı değeri en yüksek olan hBN/GNP-GA kesme koşulu takım/talaş arayüzeylerinde etkin bir yağlayıcı film tabakası oluşturamadığından, aşınma performansı diğer koşullara göre düşük çıkmıştır.

- hBN/GNP-SDS hibrid kesme koşulu itme kuvveti, moment, delik kalitesi ve takım aşınması gibi neredeyse tüm deneysel sonuçlarda etkili olurken, hBN/GNP kesme koşulunun ise kesme sıcaklığını düşürmede daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Burada takım/talaş arayüzeyine etkin nüfuziyet sağlanmasında viskozite sonuçlarının daha etkin rol oynadığı, düşük viskoziteli ve yüksek termal iletim katsayılı hBN/GNP kesme koşulunun takım/talaş arayüzeyinde yağlayıcı tribo film tabakasının etkinliğiyle kesme sıcaklık değerlerini daha fazla düşürdüğü anlaşılmaktadır.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; Hastelloy X süper alaşımın delinmesinde hBN/GNP-SDS (hBN + GNP + SDS) hibrid nano akışkan kesme koşulunun işleme performansı açısından olumlu sonuçlar sergilediği gözlemlenmiştir. Bununla beraber, Mono Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşulları, kuru ve MMY kesme koşullarına göre; itme kuvveti, moment, kesme sıcaklığı, delik kalitesi, çapak yüksekliği ve takım aşınması bakımından daha iyi performans göstermiştir.

8.1. ÖNERİLER

- Hastelloy X süper alaşımının işlenebilirliği üzerine çalışmaların sayısı az olduğundan bu işlenebilirlik çalışmalarına devam edilebilir.
- MMY sisteminde kesme sıvısı olarak farklı özellikte bitkisel esaslı yağlar test edilebilir.
- Nano partikül olarak hBN ve Grafen dışında farklı nano partiküller kullanılabilir.
- Farklı oranlarda nano partikül eklenerek nano akışkanlar hazırlanabilir.
- SDS ve Gam Arabik dışında farklı yüzey aktif maddeler kullanılabilir.
- Farklı geometri ve kaplamaya sahip kesici takımlar kullanılabilir.

9. KAYNAKLAR

[1] T. M. Pollock ve S. Tin, "Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry microstructure and properties", *Journal of Propulsion Power*, c. 22, sayı. 2, ss. 361–374, 2006.

[2] I. A. Choudhury ve M. A. El-Baradie, "Machinability of nickel-base super alloys: a general review", *Journal of Materials Processing Technology*, c. 77, sayı 1–3, ss. 278–284, 1998.

[3] G. Uzun, S. Yağmur, İ. Korkut ve U. Şeker, "Hastelloy X süper alaşımının tornalanmasında kriyojenik işlem uygulanan PVD ve CVD kaplamalı takımların performansının incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, c. 5, sayı 2, ss. 231–239, 2017.

[4] J. D. Silliman, *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, 2. baskı, Dearborn, Amerika: Society Manufacturing Engineers, 1992, ss. 35–46.

[5] R. B. Aronson, "Machine tool 101: Part 6, machine servers", *Manufacturing Engineering*, c. 6, sayı 1, ss. 47–52, 1994.

[6] M. Dal, "Bitkisel esaslı kesme sıvılarının frezelemedeki performanslarının araştırılması", Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2009.

[7] F. Klocke ve G. Eisenblaetter, "Dry cutting", *CIRP Annals*, c. 46, ss. 519–526, 1997.

[8] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu ve N. R. Dhar, "Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid", *Journal of Materials Processing Technology*, c. 209, sayı 15–16, ss. 5573–5583, 2009.

[9] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya ve F. Erzincanlı, "Determination of MQL parameters contributing to sustainable machining in the milling of nickel-based superalloy Waspaloy", *Arabian Journal for Science Engineering*, c. 42, sayı 11, ss. 4667–4681, 2017.

[10] Y. Hwang, H. S. Park, J. K. Lee ve W. H. Jung, "Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids", *Current Applied Physics*, c. 6, ss. 67–71, 2006.

[11] P. K. Das, "A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids", *Journal of Molecular Liquids*, c.240, ss. 420–446, 2017.

[12] Ş. Şirin ve T. Kıvak, "Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy", *Tribology International*, c. 137, ss. 180–192, 2019.

[13] A. Altin, "Optimization of the turning parameters for the cutting forces in the Hastelloy X superalloy based on the Taguchi method", *Materiali in Tehnologije*,

c. 48, sayı 2, ss. 249–254, 2014.

[14] A. Altin, "A comparative study on optimization of machining parameters by turning aerospace materials according to Taguchi method", *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, c. 8, ss. 1–8, 2017.

[15] C. T. Tyler ve T. L. Schmitz, "Examining the effects of cooling/lubricating conditions on tool wear in milling Hastelloy X", *Proceedings of NAMRI/SME*, c. 42, ss. 435–442, 2014.

[16] C. Yu, J. Guo, Y. Zhang ve J. Li, "Surface roughness regression modeling approach for turning Hastelloy X alloy by genetic algorithms", *ICINA 2010 - 2010 International Conference on Information, Networking and Automation, Proceedings*, Kunming, China, 2010, ss. 416–419.

[17] E. A. Rahim ve H. Sasahara, "An analysis of surface integrity when drilling inconel 718 using palm oil and synthetic ester under MQL condition", *Machining Science and Technology*, c. 15, sayı 1, ss. 76–90, 2011.

[18] S. Zhang, J. F. Li ve Y. W. Wang, "Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions", *Journal of Cleaner Production*, c. 32, ss. 81–87, 2012.

[19] C. Wang, K. Li, M. Chenb ve Z. Liu, "Evaluation of minimum quantity lubrication effects by cutting force signals in face milling of Inconel 182 overlays", *Journal of Cleaner Production*, c. 108, ss. 145–157, 2015.

[20] M. S. Kasim, C. H. Che Haron, J. A. Ghani, M. A. Hadi, R. Izamshah, T. J. S. Anand, ve S. B. Mohamed, "Cost evaluation on performance of a PVD coated cutting tool during end-milling of Inconel 718 under MQL conditions", *Transactions of the IMF*, c. 94, sayı 4, ss. 175–181, 2016.

[21] D. Biermann ve I. Iovkov, "Investigations on the thermal workpiece distortion in MQL deep hole drilling of an aluminium cast alloy", *CIRP Annals*, c. 64, sayı 1, ss. 85–88, 2015.

[22] E. Oezkaya, N. Beer ve D. Biermann, "Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 108, ss. 52–65, 2016.

[23] N. T. Mathew ve L. Vijayaraghavan, "Environmentally friendly drilling of intermetallic titanium aluminide at different aspect ratio", *Journal of Cleaner Production*, c. 141, ss. 439–452, 2017.

[24] B. Tasdelen, T. Wikblom ve S. Ekered, "Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling", *Journal of Materials Processing Technolog*, c. 200, sayı 1–3, ss. 339–346, 2008.

[25] R. Heinemann, S. Hinduja, G. Barrow ve G. Petuelli, "Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 46, sayı 1, ss. 1–6, 2006.

[26] G. Le Coz, M. Marinescu, A. Devillez, D. Dudzinski ve L. Velnom, "Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys", *Applied Thermal Engineering*, c. 36, sayı 1, ss. 434–441, 2012.

[27] E. Kılıçkap, M. Hüseyinoğlu ve A. Yardımeden, "Optimization of drilling

parameters on surface roughness in drilling of AISI 1045 using response surface methodology and genetic algorithm", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 52, sayı 1–4, ss. 79–88, 2011.

[28] J. Sharma ve B. S. Sidhu, "Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil", *Journal of Cleaner Production*, c. 66, ss. 619–623, 2014.

[29] E. S. Costa, M. B. Silva ve A. R. Machado, "Burr produced on the drilling process as a function of tool wear and lubricant-coolant conditions", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 31, sayı 1, ss. 57–63, 2009.

[30] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak ve F. Erzincanlı, "Influence of different cooling methods on tool life, wear mechanisms and surface roughness in the milling of Nickel-based Waspaloy with WC tools", *Arabian Journal for Science Engineering*, c. 44, sayı 9, ss. 7979–7995, 2019.

[31] S. Babita, S. K.Sharma ve S. M. Gupta, "Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: a review", *Experimental Thermal and Fluid Science*, c. 79, ss. 202–212, 2016.

[32] R. Bertolini, A. Ghiotti ve S. Bruschi, "Graphene nanoplatelets as additives to MQL for improving tool life in machining Inconel 718 alloy", *Wear*, c. 1, ss. 203–213, 2021.

[33] S. Fitrina, B. Kristiawan, E. Surojo, A. T. Wijayanta, T. Miyazaki ve S. Koyama, "Influence of minimum quantity lubrication with Al_2O_3 nanoparticles on cutting parameters in drilling process review on application of nanofluid MQL in machining", *AIP Conference Proceedings*, c. 1931, sayı 1, ss. 1–8, 2018.

[34] S. S. Chatha, A. Pal ve T. Singh, "Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication", *Journal of Cleaner Production*, c. 137, ss. 537–545, 2016.

[35] D. H. Kim, P. H. Lee, J. S. Kim, H. Moon ve S. W. Lee, "Experimental study on micro end-milling process of Ti6Al4V using nanofluid minimum quantity lubrication (MQL)", *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, c. 45806, ss. 1–7, 2014.

[36] S. Prasad ve R. R. Srikant, "Performance evaluatıon of nano graphite inclusions in cutting fluids with mql technique in turning of AISI 1040 steel", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, c. 2, sayı 11, ss. 381–393, 2013.

[37] Ş. Şirin, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım ve T. Kıvak, "Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL", *Tribology International*, c. 153, ss. 106673, 2021.

[38] F. Günan, T. Kıvak, Ç. V. Yıldırım ve M. Sarıkaya, "Performance evaluation of MQL with Al_2O_3 mixed nanofluids prepared at different concentrations in milling of Hastelloy C276 alloy", *Journal of Materials Research and Technology*, c. 9, sayı 5, ss. 10386–10400, 2020.

[39] T. Kıvak, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım ve Ş. Şirin, "Study on turning performance of PVD TiN coated Al_2O_3+TiCN ceramic tool under cutting fluid reinforced by nano-sized solid particles", *Journal of Manufacturing Processing*, c. 56, ss. 522–

539, 2020.

[40] O. Öndin, T. Kıvak, M. Sarıkaya ve Ç. V. Yıldırım, "Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel", *Tribology International*, c. 148, ss. 106323, 2020.

[41] R. K. Singh, A. K. Sharma, A. R. Dixit, A. K. Tiwari, A. Pramanik ve A. Mandal, "Performance evaluation of alumina-graphene hybrid nano-cutting fluid in hard turning", *Journal of Cleaner Production*, c. 162, ss. 830–845, 2017.

[42] T. Singh, J. Singh Dureja, M. Dogra ve M. S. Bhatti, "Environment friendly machining of Inconel 625 under nano-fluid minimum quantity lubrication (NMQL)", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, c. 19, sayı 11, ss. 1689–1697, 2018.

[43] N. Talib ve E. A. Rahim, "Performance of modified jatropha oil in combination with hexagonal boron nitride particles as a bio-based lubricant for green machining", *Tribology International*, c. 118, ss. 89–104, 2018.

[44] Ç. V. Yıldırım, M. Sarıkaya, T. Kıvak ve Ş. Şirin, "The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625", *Tribology International*, c. 134, ss. 443–456, 2019.

[45] N. Talib ve E. A. Rahim, "Experimental evaluation of physicochemical properties and tapping torque of hexagonal boron nitride in modified jatropha oils-based as sustainable metalworking fluids", *Journal of Cleaner Production*, c. 171, ss. 743–755, 2018.

[46] S. H. Musavi, B. Davoodi ve S. A. Niknam, "Effects of reinforced nanoparticles with surfactant on surface quality and chip formation morphology in MQL-turning of superalloys", *Journal of Manufacturing Processing*, c. 40, ss. 128–139, 2019.

[47] H. Hegab, U. Umer, M. Soliman ve H. A. Kishawy, "Effects of nano-cutting fluids on tool performance and chip morphology during machining Inconel 718", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 96, sayı 9–12, ss. 3449–3458, 2018.

[48] A. Pal, S. S. Chatha ve H. S. Sidhu, "Experimental investigation on the performance of MQL drilling of AISI 321 stainless steel using nano-graphene enhanced vegetable-oil-based cutting fluid", *Tribology International*, c. 151, ss. 106508, 2020.

[49] E. O. Ezugwu, J. Bonney ve Y. Yamane, "An overview of the machinability of aeroengine alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, c.34, sayı 2, ss. 233–253, 2003.

[50] D. Ulutan ve T. Özel, "Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 51, sayı 3, ss. 250–280, 2011.

[51] R. C. Reed, *The superalloys fundamentals and applications*. New York, İngiltere: Cambridge University Press, 2006, ss. 33–120.

[52] A. Altın, "Inconel 718 süper alaşımlı çeliğin işlenebilirliğinin incelenmesi", Doktora tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2005.

[53] Ş. Karabulut, "Inconel 718 süper alaşımların işlenmesinde talaş kırılma problemleri ve talaş kırıcı tasarımı", Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.

[54] Z. İnanır, "Yüksek çalışma sıcaklıklarının Inconel 718 alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi", Yüksek lisans tezi, İleri Teknolojiler, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.

[55] I. A. Choudhury ve M. A. El-Baradie, "Machining nickel base superalloys: Inconel 718", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, c. 212, sayı 3, ss. 195–206, 1998.

[56] B. Bircan, "Inconel 718 alaşımının katı partikül erozyon davranışının incelenmesi", Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.

[57] A. A. Eker, Süper alaşımlar, *Ders Notları*, İstanbul, 2008.

[58] O. Palavar, "Toz metalürjisi ile üretilen Inconel süper alaşımlarda yaşlanma parametrelerinin aşınma davranışlarına etkisi", Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2014.

[59] E. O. Ezugwu, Z. M. Wang ve A. R. Machado, "The machinability of nickel-based alloys: a review", J*ournal of Materials Processing Technology*, c. 86, sayı 1–3, ss. 1–16, 1999.

[60] V. Kovan, "Oksit dispersiyon sertleştirmesi yapılmış NiCr8020 (2.4869) nikel esaslı süper alaşımın termomekanik yorulma davranışının belirlenmesi", Doktora tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.

[61] I. A. Choudhury, "Machinability studies of high strength materials and the development of a dara base system", Doktora tezi, Makine ve İmalat Mühendisliği, Dublin City Üniversitesi, Dublin, İrlanda, 1995.

[62] G. Brandt, A. Gerendas ve M. Mikus, "Wear mechanisms of ceramic cutting tools when machining ferrous and non-ferrous alloys", *Journal of the European Ceramic Society*, c. 6, sayı 5, ss. 273–290, 1990.

[63] D. Tali, "Nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi", Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2010.

[64] E. F. Bradley, *Superallloys: A Technical Guide*, 2. baskı, Amerika: ASM International, 1988, ss. 235–236.

[65] T. Kıvak, "Inconel 718'in delinebilirliğinin Araştırılması", Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.

[66] M. Sarıkaya, "Kobalt esaslı Haynes 25 süper alaşımının işlenebilirliğinin incelenmesi", Doktora tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi Ankara, Türkiye, 2014.

[67] J. M. Donachie, *Superalloys Source Book*, 2. baskı, Amerika: American Society for Metal, 1984, ss. 110–221.

[68] H. Dinç, “Inconel 718 süper alaşımının termokimyasal borlanması”, Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.

[69] L. M. Maiyar, R. Ramanujam, K. Venkatesan ve J. Jerald, “Optimization of machining parameters for end milling of Inconel 718 super alloy using Taguchi based grey relational analysis”, *Procedia Engineering*, c. 64, ss. 1276–1282, 2013.

[70] E. O. Ezugwu, “Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 45, sayı 12, ss. 1353–1367, 2005.

[71] O. Yazıcıoğlu ve M. B. Yazıcıoğlu, *Makine Elemanları*, 5. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayınevi, 2016, ss. 25–30.

[72] D. Zhang ve S. Zhao, *Aerospace Materials Handbook*, 1. baskı, America: CRC Press, 2012, ss. 1–33.

[73] T. Güner, “Farklı yöntemlerle oluşturulan Hastelloy X ve Inconel 625 kaynak Bağlantılarının araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2019.

[74] H. K. Tönshoff, W. Spintig, W. König ve A. Neises, “Machining of Holes Developments in Drilling Technology”, *CIRP Annals*, c. 43, sayı 2, 1994.

[75] M. C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2000, ss. 210–270.

[76] Y. Kaynak, “Matkap ile delik delmede kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve sıcaklığa tesirinin deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.

[77] M. Akkurt, *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2000, ss. 147–186.

[78] S. Coromant, *Modern Metal Cutting*, 1. baskı, İsveç: Sandvik Coromant, 1994, sayı 3, ss. 2–61.

[79] Y. Altintas ve A. A. Ber, “Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design”, *Applied Mechanics Reviews*, c. 54, sayı 5, ss. B84–B84, 2001.

[80] S. Yağmur, “Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.

[81] A. Çakır, “Al 7075 ve Al 6013 alüminyum malzemelerin delme operasyonları esnasındaki kesme parametrelerinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.

[82] Ş. Bayraktar, Y. Siyambaş ve Y. Turgut, “Delik delme prosesi: bir araştırma”, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 21, sayı 2, ss. 124–124, 2017.

[83] Ç. V. Yıldırım, “Waspaloy süper alaşımının farklı soğutma teknikleri kullanarak frezeleme yöntemi ile işlenebilirliğinin incelenmesi”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2017.

[84] S. Coromant, *Kesici Takım El Kılavuzu*, 1. baskı, İsveç: Sandvik Coromant, 2008,

sayı 1, ss. 1–100.

[85] A. Akkurt, "Delik yüzeylerine uygulanan yüzey iyileştirme işlemlerinin alüminyum alaşımı malzemeler üzerinde araştırılması", *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 2009, ss. 1–5.

[86] S. A. Basile, "Modeling transverse motions of a drill bit for process understanding", *Precision engineering*, c. 15, sayı 4, ss. 258–265, 1993.

[87] R. M. Sauter ve R. V. Lenth, *Experimental Design for Process Settings in Aircraft Manufacturing*, 3. baskı, Amerika: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1998, böl. 18, ss. 235–269.

[88] M. Kurt, E. Bağcı ve Y. Kaynak, "Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 40, sayı 5–6, ss. 458–469, 2009.

[89] P. G. Benardos ve G. C. Vosniakos, "Predicting surface roughness in machining: a review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 43, ss. 833–844, 2003.

[90] M. Bono ve J. Ni, "The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 41, sayı 15, ss. 2261–2270, 2001.

[91] Anonim, (2020, 30 Kasım). [Online]. Erişim: https://www.mahr.de/en-us/Services/Production-metrology/Know-how/Gaging-Tips/Geometry-Gaging-Tips.

[92] D. Dornfeld ve D. E. Lee, *Machine Design for Precision Manufacturing*, 1. baskı, Boston, Amerika: Springer, 2008, böl. 2, ss. 37–48.

[93] M. T. Hayajneh, "Hole quality in deep hole drilling", *Materials and Manufacturing Processes*, c. 16, sayı 2, ss. 147–164, 2001.

[94] M. Sen ve H. S. Shan, "Analysis of roundness error and surface roughness in the electro jet drilling process", *Materials and Manufacturing Processes*, c. 21, sayı 1, ss. 1–9, 2006.

[95] H. M. Ertunç ve İ. Sevim, "Kesici takımların aşınmasını gözlemleme üzerine yapılan çalışmalar", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 7, sayı 1, ss. 55–62, 2001.

[96] R. L. Vaughn, "Modern Metals Machining Technology", *Journal of Industrial Engineering*, c. 88, sayı 1, ss. 65–71, 1966.

[97] N. Yalçın ve B. Yılmaz, "Ark PVD yüzey kaplama metoduyla titanyum nitrür (TiN) kaplanmış matkap takımlarında takım aşınmasının deneysel olarak incelenmesi", *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Dergisi*, c. 1, ss 1–9, 2004.

[98] G. Avuncan, *Kesici Takımların Bilenmesi*, 1. baskı, Kocaeli, Türkiye: Mavi Tanıtım ve Pazarlama Ltd. Şti. Yayınları, 1998, ss. 62–80.

[99] S. Dolinšek, B. Šuštaršič ve J. Kopač, "Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes", *Wear*, c. 250–251, sayı 1–12, ss. 349–356, 2001.

[100] Anonim, (2020, 10 Kasım). [Online]. Erişim: https://www.sandvik.coramant.com.

[101] M. S. Filho, "Study of burr formation in the drilling process", Yüksek lisans tezi,

Makine Mühendisliği, Santa Catarina Federal Üniversitesi, Florianópolis, Brezilya, 1995.

[102] S. Min, J. Kim ve D. A. Dornfeld, "Development of a drilling burr control chart for low alloy steel AISI 4118", *Journal of Materials Processing Technology*, c. 113, sayı 1–3, ss. 4–9, 2001.

[103] W. F. Sales, A. E. Diniz ve A.R. Machado, "Application of cutting fluids in machining processes", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, c. 23, sayı 2, ss. 227–240, 2001.

[104] N. R. Dhar, M. T. Ahmed ve S. Islam, "An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 47, sayı 5, ss. 748–753, 2007.

[105] M. A. El Baradie, "Cutting fluids: Part I. Characterisation", *Journal of Materials Processing Technology*, c. 56, sayı 1–4, ss. 786–797, 1996.

[106] R. Padmini, P. V. Krishna ve G. K. M. Rao, "Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel", *Tribology International*, c. 94, ss. 490–501, 2016.

[107] K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland ve T. Wakabayashi, "Dry machining and minimum quantity lubrication", *CIRP Annals*, c. 53, sayı 2, ss. 511–537, 2004.

[108] V. S. Sharma, M. Dogra ve N. M. Suri, "Cooling techniques for improved productivity in turning", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 49, sayı 6, ss. 435–453, 2009.

[109] F. S. Chapin III, M. S. Torn ve M. Tateno, "Principles of ecosystem sustainability", *The American Naturalist*, c. 148, sayı 6, ss. 1016–1037, 1996.

[110] A. D. Jayal, F. Badurdeen, O. W. Dillon ve I. S. Jawahir, "Sustainable manufacturing: modeling and optimization challenges at the product, process and system levels", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, c. 2, sayı 3, ss. 144–152, 2010.

[111] G. M. Krolczyk, R. W. Maruda, J. B. Krolczyk, S. Wojciechowski, M. Mia, P. Nieslony ve G. Budzik, "Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production a review", *Journal of Cleaner Production*, c. 218, ss. 601–615, 2019.

[112] F. Pusavec, P. Krajnik ve J. Kopac, "Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies", *Journal of Cleaner Production*, c. 18, sayı 2, ss. 174–184, 2010.

[113] A. Stoll, S. Silverson ve R. Furness, "Environmentally friendly and low cost manufacturing implementation of MQL machining (Minimum Quantity Lubrication)", *SAE*, c. 1, ss. 1–15, 2007.

[114] *Determining carcinogenic potential of virgin base oils in metalworking fluids*, American Society for Testing and Materials ASTM, ASTM Standard E1687-95, 1997.

[115] S. Suda, "Evaluation of machinability with MQL system and effectiveness in production lines", *Proceedings International Tribology Conference*, Nagasaki, Japonya, 2001, ss. 203–208.

[116] R. Padmini, P. V. Krishna ve G. K. M. Rao, "Experimental evaluation of nano-

molybdenum disulphide and nano-boric acid suspensions in vegetable oils as prospective cutting fluids during turning of AISI 1040 steel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*, c. 230, sayı 5, ss. 493–505, 2016.

[117] Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider ve S. Xi, "A review on development of nanofluid preparation and characterization", *Powder Technology*, c. 196, sayı 2, ss. 89–101, 2009.

[118] W. Yu ve H. Xie, "A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications", *Journal of Nanomaterials*, c. 2012, ss. 1–17, 2012.

[119] X. Wang ve A. S. Mujumdar, "A review on nanofluids-part II: experiments and applications", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, c. 25, sayı 4, ss. 631–648, 2008.

[120] V. Singh ve M. Gupta, "Heat transfer augmentation in a tube using nanofluids under constant heat flux boundary condition: a review", *Energy Conversion and Management*, c. 123, ss. 290–307, 2016.

[121] Y. H. Chai, S. Yusup, V. S. Chok, M. T. Arpin ve S. Irawan, "Investigation of thermal conductivity of multi walled carbon nanotube dispersed in hydrogenated oil based drilling fluids", *Applied Thermal Engineering*, c. 107, ss. 1019–1025, 2016.

[122] C. Mao, H. Zou, X. Zhou, Y. Huang, H. Gan ve Z. Zhou, "Analysis of suspension stability for nanofluid applied in minimum quantity lubricant grinding", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 71, sayı 9–12, ss. 2073–2081, 2014.

[123] M. A. Mahboob Ali, A. I. Azmi, A. N. Mohd Khalil ve K. W. Leong, "Experimental study on minimal nanolubrication with surfactant in the turning of titanium alloys", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 92, sayı 1–4, ss. 117–127, 2017.

[124] G. Uzun ve İ. Korkut, "Delme ve frezelemedeki kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için deney seti tasarımı ve imalatı", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Türkiye, 2011, ss. 71–74.

[125] T. K. Nguyen, I. Do ve P. Know, "A tribological study of vegetable oil enhanced by nano-platelets and implication in MQL machining", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, c. 13, sayı 7, ss. 1077–1083, 2012.

[126] M. I. H. C. Abdullah, M. F. B. Abdollah, N. Tamaldin, H. Amiruddin ve N. R. M. Nuri, "Effect of hexagonal boron nitride nanoparticles as an additive on the extreme pressure properties of engine oil", *Industrial Lubrication and Tribology*, c. 68, sayı 4, ss. 441–445, 2016.

[127] Anonim, (2021, 15 Ocak). [Online]. Erişim: https://www.nanografi.com.tr/grafen/.

[128] L. Jiang, L. Gao ve J. Sun, "Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes", *Journal of Colloid and Interface Science*, c. 260, sayı 1, ss. 89–94, 2003.

[129] S. Tanvir ve L. Qiao, "Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials", *Nanoscale Research Letters*, c. 7, sayı 1, ss. 1–10, 2012.

[130] A. Indhuja, K. S. Suganthi, S. Manikandan ve K. S. Rajan, "Viscosity and thermal conductivity of dispersions of gum arabic capped MWCNT in water: Influence of MWCNT concentration and temperature", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, c. 44, sayı 3, ss. 474–479, 2013.

[131] P. G. Kumar, V. Kumaresan ve R. Velraj, "Stability, viscosity, thermal conductivity, and electrical conductivity enhancement of multi-walled carbon nanotube nanofluid using gum arabic", *Fullerenes Nanotube Carbon Nanostructures*, c. 25, sayı 4, ss. 230–240, 2017.

[132] D. K. Devendiran ve V. A. Amirtham, "A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 60, ss. 21–40, 2016.

[133] G. Xia, H. Jiang, R. Liu ve Y. Zhai, "Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al_2O_3/de-ionized water nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, c. 84, ss. 118–124, 2014.

[134] Y. Zhang, C. Li, D. Jia, D. Zhang ve X. Zhang, "Experimental evaluation of MoS_2 nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil", *Journal of Cleaner Production*, c. 87, ss. 930–940, 2015.

[135] Y. Fovet, J. Y. Gal ve F. Toumelin-Chemla, "Influence of pH and fluoride concentration on titanium passivating layer: stability of titanium dioxide", *Talanta*, c. 53, sayı 5, ss. 1053–1063, 2001.

[136] Y. H. Jeong, W. J. Chang ve S. H. Chang, "Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids", *International Journal of Heat Mass Transfer*, c. 51, sayı 11–12, ss. 3025–3031, 2008.

[137] U. Şeker, Kesici takım tasarımı, *Ders Notları*, Ankara, 2008.

[138] T. Kıvak, "Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6Al-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması", Doktora tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.

[139] N. Uçak ve A. Çiçek, "The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills", *Journal of Manufacturing Processes*, c. 31, ss. 662–673, 2018.

[140] N. Uçak ve A. Çiçek, "Inconel 718 süperalaşımının delinmesinde kriyojenik soğutmanın delme performansı üzerine etkilerinin araştırılması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 2018, sayı 18–2, ss. 1241–1252, 2018.

[141] R. S. Ruoff, J. Tersoff, D. C. Lorents, S. Subramoney ve B. Chan, "Radial deformation of carbon nanotubes by Van Der Waals forces", *Nature*, c. 364, sayı 6437, ss. 514–516, 1993.

[142] B. Li, C. Zhang, Y. Wang, M. Yang, M. Jia ve Q. Wu, "Effect of the physical properties of different vegetable oil-based nanofluids on MQLC grinding temperature of Ni-based alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 89, sayı 9–12 ss. 3459–3474, 2017.

[143] S. Vafaei, D. Wen ve T. Borca-Tasciuc, "Nanofluid surface wettability through asymptotic contact angle", *Langmuir*, c. 27, sayı 6, ss. 2211–2218, 2011.

[144] Y. Zhang, C. Li, D. Jia, D. Zhang ve X. Zhang, "Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS_2/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication

in Ni-based alloy grinding", *International Journal Machine Tools Manufacture*, c. 99, ss. 19–33, 2015.

[145] R. Sadri, G. Ahmedi, H. Togun, M. Dahari, S. N. Kazi, E. Sadeghinezhad ve N. Zubir, "An experimental study on thermal conductivity and viscosity of nanofluids containing carbon nanotubes", *Nanoscale Research Letters*, c. 9, sayı 1, ss. 1–16, 2014.

[146] S. Yi, G. Li, S. Ding ve J. Mo, "Performance and mechanisms of graphene oxide suspended cutting fluid in the drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V", *Journal of Manufacturing Processes*, c. 29, ss. 182–193, 2017.

[147] X. F. Li, D. S. Zhu, X. J. Wang, N. Wang, J. W. Gao ve H. Li, "Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H_2O nanofluids", *Thermochimica Acta*, c. 469, sayı 1–2, ss. 98–103, 2008.

[148] *Toleranslar-Sınır ölçüleri ve alıştırmalar için ISO sistemi bölüm 2: Delikler ve miller için esas tolerans nitelikleri ve sınır sapmalarına ait çizelgeler*, Türk Standartları Enstitüsü TS 1845-2 EN ISO 20286-2, 1996.

[149] M. M. A. Khan ve N. R. Dhar, "Performance evaluation of minimum quantity lubrication by vegetable oil in terms of cutting force, cutting zone temperature, tool wear, job dimension and surface finish in turning AISI-1060 steel", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE.A*, c. 7, sayı 11, ss. 1790–1799, 2006.

[150] E. Brinksmeier ve R. Janssen, "Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys", *CIRP Annals*, c. 51, sayı 1, ss. 87–90, 2002.

[151] M. Naresh Babu ve N. Muthukrishnan, "Experimental analysis in drilling of AA 5052 using copper nanofluids under minimum quantity lubrication", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, c. 18, sayı 1, ss. 15–24, 2020.

[152] K. H. Park, B. Ewald ve P.Y. Kwon, "Effect of nano-enhanced lubricant in minimum quantity lubrication balling milling", *Journal of Tribology*, c. 133, sayı 3, ss. 1–8, 2011.

[153] T. Kıvak, K. Habalı ve U. Şeker, "The effect of cutting paramaters on the hole quality and tool wear during the drilling of Inconel 718", *Gazi University Journal of Science*, c. 25, sayı 2, ss. 533–540, 2012.

10. EKLER

10.1. EK 1: DENEYLERDE KULLANILAN HASTELLOY X SÜPER ALAŞIMININ SERTİFİKASI

SPECIAL METALS
A PCC Company

HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION
3200 Riverside Drive, Huntington, West Virginia 25705-1771 USA
Tel: +1.304.526.5100 Toll-Free in the USA: 1.800.334.4626
Fax: +1.304.526.5643 info@specialmetals.com

Certificate No. 80257-00
Dated 02-MAR-18
Page No. 1 / 3

CERTIFIED MATERIALS TEST REPORT

Note: The recording of false, fictitious or fraudulent statements on entries on this document may be punishable as a felony under federal statute.

This report relates only to the item(s) tested and may not be reproduced except in full.

Sales Order Number	Purchase Order Number	Mark Order Number	Material Heat / Lot Identity
100069680 / 1.1	HP 6709	HP 6709-1	ZZ9226XG121

UNS Number
N06002

Material Description

INCONEL alloy HX, EAF~AOD-ELECTROSLAG REMELTED, , HOT ROLLED PLATE, DESCALED, SOL ANNEALED, 12.7000(+1.1938/-.2540), 1524.0000(+9.525/-3.175) X 3048.0000(+15.875/-3.175) MM
1 PC PLATE# P77850 525 KG

Specifications

SAE AMS 5536N / ASTM B 435-06 (2016) / ASME SB-435 2017 EDITION/ NACE MR0175-ISO 15156-3 (2015) / SAE AMS 5754M CHEMISTRY & MECHANICAL PROPERTIES ONLY/ GE S-400 (6-03-16)/ GE S-1000 (5-23-17) MARK PER ORDER / WERKSTOFF NR. 2.4665.

ANALYSIS

	C %	MN %	FE %	S %	SI %	CU %	NI %	CR %	AL %
H	.05	.51	18.72	.001	.30	.14	46.7	22.60	.14
Method	C/S	ICP	ICP	C/S	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP

	TI %	CO %	MO %	B %	P %	W %
H	.02	.67	8.98	.002	.015	.53
Method	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP

ANALYSIS METHOD LEGEND

C/S - Carbon/Sulfur
ICP - Inductively Coupled Plasma

TENSILE TEST

ROOM TEMP TENSILE - TRANS|LAB|MECHANICAL

PIECE TEST TEMPER HARDNESS HARD TYPE TENSILE MPA .2% YIELD MPA EFF GA LENGTH MM RED OF AREA%

INCOLOY®, INCONEL®, MONEL®, NILO®, NIMONIC®, Ni-SPAN-C®, UDIMET®, DURANICKEL®, 601GC®, 625LCF®, 718SPF®, 740H®, 800HT®, 945®, and 945X® are trademarks of the Special Metals group of companies EFS95

HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION
3200 Riverside Drive, Huntington, West Virginia 25705-1771 USA
Tel: +1.304.526.5100 Toll-Free in the USA: 1.800.334.4626
Fax: +1.304.526.5643 info@specialmetals.com

Certificate No. 80257-00
Dated 02-MAR-18

CERTIFIED MATERIALS TEST REPORT

P77850	SA	87.1	HRB	732.2	319.2	35.6	56.3

ELONG%	ORIENT
54.4	TRANS

CREEP TEST

STRESS RUPTURE - TRANS|LAB|MECHANICAL

TEST TEMPER	TEMPERATURE C	INITIAL STRESS MPA	TEST ORIENT	RUPTURE LIFE HRS	ELONGATION%	RED OF AREA%
SA	816	110	TRANS	86.8	86.1	61.8

LOCATION LEGEND: B = BACK C = CENTER F = FRONT H = HEAD M = MIDDLE T = TOE

TEST VERDICT LEGEND: P = PASS W = WAIVER
TEST TEMPER LEGEND
SA - Solution anneal
ALL TEST RESULTS ARE REPORTED TO AT LEAST THE REQUIRED PRECISION BY THE ROUNDING METHOD OF ASTM E 29 UNLESS OTHERWISE REQUIRED BY PURCHASE ORDER OR SPECIFICATION.

COUNTRY OF ORIGIN: MELTED AND MANUFACTURED IN THE USA. DFARS PART 252.225.7014 AND 252.225.7008 COMPLIANT.
THIS CERTIFICATION AFFIRMS THAT THE CONTENTS OF THIS REPORT ARE CORRECT AND ACCURATE AND THAT ALL TEST RESULTS AND OPERATIONS PERFORMED BY SPECIAL METALS CORPORATION, INC. OR ITS SUBCONTRACTORS ARE IN COMPLIANCE WITH THE MATERIAL SPECIFICATIONS.
QUALITY SYSTEM MEETS REQUIREMENTS OF DIRECTIVE 2014/68/EU (PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE), ANNEX 1, CHAPTER 4.3 PER ABS GROUP LTD CERTIFICATE 41734 (EXPIRES SEPTEMBER 14, 2018)

HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION IS AN ACCREDITED INDEPENDENT NADCAP MATERIALS TESTING LABORATORY VIA CERTIFICATE NUMBER 3200165734 (EXPIRES APRIL 30, 2018) FOR ALL TESTING SPECIFIED IN THE SCOPE OF ACCREDITATION.
MATERIAL PRODUCED UNDER QA SYSTEM DOCUMENTED IN HUNTINGTON ALLOYS CORP QA MANUAL REV. 53, DATED 01/13/2017
QA MANUAL NOT TO IMPLY COMPLIANCE TO ASME SECTION III. COMPLIANCE MUST BE OTHERWISE STATED ON CMTR.
QUALITY SYSTEM CERTIFICATION: ISO 9001:2008 (ABS-QE CERT. 30125, EXPIRES 7/31/2019); EN 10 204/DIN 50049 (TYPE 3.1)

INCOLOY®, INCONEL®, MONEL®, NILO®, NIMONIC®, Ni-SPAN-C®, UDIMET®, DURANICKEL®, 601GC®, 625LCF®, 718SPF®, 740H®, 800HT®, 945®, and 945X® are trademarks of the Special Metals group of companies EF595

HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION
3200 Riverside Drive, Huntington, West Virginia 25705-1771 USA
Tel: +1.304.526.5100 Toll-Free in the USA: 1.800.334.4626
Fax: +1.304.526.5643 info@specialmetals.com

Certificate No. 80257-00
Dated 02-MAR-18

CERTIFIED MATERIALS TEST REPORT

QUALITY SYSTEM CERTIFICATION: AS9100D (ABS-QE CERT 56476 EXPIRES 1/28/2021)
LABORATORY IS ACCREDITED TO ISO/IEC 17025:2005 FOR MECHANICAL TESTING AND CHEMICAL ANALYSIS.

VISUAL AND DIMENSIONAL EXAMINATION SATISFACTORY.
MATERIAL, WHEN SHIPPED, IS FREE FROM CONTAMINATION BY MERCURY, RADIUM, ALPHA SOURCE, AND LOW MELTING ELEMENTS.

CHEMICAL ANALYSIS AS REQUIRED FOR CARBON, SULFUR, NITROGEN, OR OXYGEN IS PERFORMED BY COMBUSTION TECHNIQUES.
ALL OTHER REPORTED ELEMENTS ARE ANALYZED BY X-RAY AND/OR EMISSION SPECTROSCOPY.""

AUTHORIZED QUALITY CERTIFICATION REPRESENTATIVES:
W.E. BOLEN, K.R. SMITH, V.A. POWELL, B.K. VASS, ROBERT D. DILLE, G.J. BURKHEAD

End Of Certificate

This is to certify that all required samplings inspections and tests have been performed in accordance with the order and specification requirements. The test report represents the actual attributes of the material furnished and the values shown are correct and true. The material described by this certificate is in full compliance with all order and inspection requirements. We hereby certify that the figures given are in accordance with the specified contract requirements.

REV. 6/08

Signed

For and on behalf of HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION
Authorized Signature

INCOLOY®, INCONEL®, MONEL®, NILO®, NIMONIC®, Ni-SPAN-C®, UDIMET®, DURANICKEL®, 601GC®, 625LCF®, 718SPF®, 740H®, 800HT®, 945®, and 945X® are trademarks of the Special Metals group of companies

EF595

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emine ŞİRİN

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2021
Y. Lisans	Makine Eğitim	Gazi Üniversitesi	2010
Lisans	Talaşlı Üretim Öğretmenliği	Gazi Üniversitesi	2007
Lise	CNC	OF H. M. B. Ulusoy Anadolu Meslek Lisesi	2002

YAYINLARI

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

A.1. E. Şirin, T. Kıvak ve Ç. V. Yıldırım, "Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X", *Tribology International*, c. 157, ss. 106894, 2021.

B. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

B.1. E. Şirin, Ş. Şirin, Y. Turgut ve İ. Korkut, "AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin farklı geometriye sahip kesici takımlarla frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisinin araştırılması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, sayı 3, ss. 660–668, 2018.

B.2. S. Akıncıoğlu, Ş. Şirin, G. Akıncıoğlu ve E. Şirin, "100Cr6 rulman çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 5, sayı 1, ss. 46–52, 2016.

B.3. E. Şirin, Ş. Şirin, Y. Turgut ve İ. Korkut, "AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi metodu ile optimizasyonu", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 3, sayı 1, ss. 132–144, 2015.

B.4. Ş. Şirin ve E. Şirin, "Merkezi soğutma sisteminde kullanılan metal işleme

sıvılarının insan sağlığına olumsuz etkileri-derleme", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 2, sayı 2, ss. 444–457, 2014.

B.5. E. Şirin, Y. Turgut ve İ. Korkut, "Farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisi", *Politeknik Dergisi,* c.15, sayı 1, ss. 9–14, 2012.

C. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

C.1. Ş. Şirin, E. Şirin ve T. Kıvak, "Metal işlemede sürdürülebilir soğutma/yağlama stratejilerinin araştırılması: derleme", *VII. Uluslararası Fen, Mühendislik ve Mimarlık Bilimlerinde Akademik Çalışmalar Sempozyumu ISMS*, Ankara, Türkiye, 2019, ss. 491–504.

C.2. Ş. Şirin, T. Kıvak, Ç. V. Yıldırım, E. Şirin ve İ. Uygur, "Bitkisel esaslı kesme yağına nano grafit ilavesinin viskozite ve termal iletkenlik üzerindeki etkileri", *6th International Symposium on Innovative Technologies (ISITES 2018),* Antalya, Türkiye, 2018, ss. 488–497.

C.3. E. Şirin, Y. Turgut, İ. Korkut ve Ş. Şirin, "AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin farklı geometriye sahip kesici takımlarla frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisinin araştırılması", *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS)*, Düzce, Türkiye, 2017, ss. 226–226.

C.4. Ş. Şirin ve E. Şirin, "Kaynak teknolojisi programlarında okutulan bilgisayar destekli çizim dersinin Bologna sürecinde değerlendirilmesi", *Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu (UMYOS),* Yalova, Türkiye, 2015, ss. 1297–1303.

C.5. E. Şirin, G. Akıncıoğlu ve S. Akıncıoğlu, "Torna Tezgahında meydana gelen iş kazaları ve güvenlik önlemleri", *7. Uluslararası İş Sağlığı Güvenliği ve Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 2014, ss. 300–309.

C.6. Ş. Şirin ve E. Şirin, "Forklift ile meydana gelen iş kazaları ve güvenlik önlemleri", *7. Uluslararası İş Sağlığı Güvenliği ve Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 2014, ss. 401–409.

D. Projelerde Yaptığı Görevler:

D.1. "Sürdürülebilir imalat için Inconel X-750 süper alaşımının frezelenmesinde yenilikçi soğutma/yağlama tekniklerinin işleme performansı üzerindeki etkileri", *Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (DÜBAP),* **Araştırmacı**, 14/08/2017–14/02/2019.

D.2. "Gümüşova MYO makine ve metal teknolojileri laboratuvar imkanlarının geliştirilmesi ve akreditasyon işlemlerinin başlatılması", *Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Doğu Marmara Kalkınma Ajans (MARKA) Projesi*, **Araştırmacı**, 06/09/2018–06.03.2020.

D.3."Hastelloy X süper alaşımının delinmesinde nanopartikül katkılı kesme yağlarının ve kriyojenik soğutmanın işleme performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi", *Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (ERÜBAP),* **Araştırmacı**, 22/04/2019–22/11/2020.