



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜRDÜRÜLEBİLİR İMALAT İÇİN INCONEL X-750 SÜPER
ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE YENİLİKÇİ
SOĞUTMA/YAĞLAMA TEKNİKLERİNİN İŞLEME
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

ŞENOL ŞİRİN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. TURGAY KIVAK**

DÜZCE, 2020

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR İMALAT İÇİN INCONEL X-750 SÜPER
ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE YENİLİKÇİ
SOĞUTMA/YAĞLAMA TEKNİKLERİNİN İŞLEME
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Şenol 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

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Turgay KIVAK

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Karabük Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Nuri ŞEN

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ARSLAN

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 23/01/2020

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.

23 Ocak 2020

Şenol ŞİRİN

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimi başlangıcında, tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden her zaman faydalandığım saygıdeğer danışmanım; Doç. Dr. Turgay KIVAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve deneylerde kullanılan dinamometrenin temini/ölçümü konusunda destek sunan kıymetli Hocalarım, Prof. Dr. Ulvi ŞEKER ve Prof. Dr. İhsan KORKUT'a Őükranlarımı sunarım.

Doktora çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerine başvurduğum yardımlarıyla destek olan; Dr. Öğr. Üyesi Çağrı Vakkas YILDIRIM, Dr. Öğr. Üyesi Harun GÜL, Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı AKINCIOĞLU, Dr. Öğr. Üyesi Ünal UYSAL'a, teze ait deneyleri gerçekleştirdiğim Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ve tüm personeline ayrıca teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde her zaman destekçim ve sığınağım olan çok kıymetli annem Hanife ŞİRİN, babam Mustafa Zihni ŞİRİN'e, hayatımı paylaştığım biricik eşim Öğr. Gör. Emine ŞİRİN'e, oğullarım Mustafa Berk ŞİRİN ve Furkan Mert ŞİRİN'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez çalışmamı, Düzce Üniversitesi BAP-2017.07.04.593 numaralı projeye destekleyen Düzce Üniversitesi Rektörlüğüne ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunuyorum.

23 Ocak 2020

Şenol ŞİRİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR.....	xii
SİMGELER	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
EXTENDED ABSTRACT.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. MMY ve Nano MMY Kesme Koşulları Üzerine Yapılan Çalışmalar	5
2.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşulu Üzerine Yapılan Çalışmalar	12
2.3. Literatür Değerlendirmesi.....	13
3. SÜPER ALAŞIM MALZEMELER.....	16
3.1. Süper Alaşımlar	16
3.2. Süper Alaşım Malzemelerin Sınıflandırılması.....	16
3.2.1. Nikel Esaslı Süper Alaşım Malzeme Çeşitlerine Genel Bakış.....	17
3.2.2. Demir Esaslı Süper Alaşım Malzemeler	19
3.2.3. Kobalt Esaslı Süper Alaşım Malzemeler	20
3.2.4. Döküm ve Dövme Süper Alaşım Malzemeler	21
3.3. Süper Alaşımların Yüksek Sıcaklıklardaki Davranışları	23
3.3.1. Sürünme/Gerilme-Kopma.....	24
3.3.2. Metalürjik Kararsızlık.....	25
3.4. Süper Alaşımların Uygulama Alanları.....	26
3.5. Inconel X-750 Süper Alaşım Malzemesi.....	27
3.6. Süper Alaşım Malzemelerin İşlenebilirlik Özellikleri.....	28
4. FREZELEME	29

4.1. Çevresel Frezeleme ile İşleme	29
4.1.1. Aynı Yönlü Frezeleme	30
4.1.2. Zıt Yönlü Frezeleme.....	31
4.2. Frezelemede Kullanılan Temel Parametreler ve Genel Formüller.....	32
4.2.1. Kesme hızı	32
4.2.2. İlerleme.....	33
4.2.3. Frezelemede Kullanılan Diğer Genel Formüller	34
4.3. Frezelemede Kesme Kuvveti.....	34
4.4. Frezelemede Kesici Takım Aşınması	36
4.5. Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğü.....	38
4.5.1. Yüzey Pürüzlülük Tanımlamaları.....	38
4.5.1.1. Yüzey Pürüzlülük En Büyük Değeri (R_t)	38
4.5.1.2. Yüzey Pürüzlülük Aritmetik Ortalaması (R_a).....	39
4.5.1.3. Karesel Ortalamanın Pürüzlülük Karekök Değeri (R_q).....	40
4.5.1.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülük Yüksekliği (R_z)	40
4.5.2. Yüzey Pürüzlülük Birimi ve Kalite Derecesi.....	40
4.5.3. Yüzey Pürüzlülüğe Etki Eden Faktörler	41
4.5.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Yöntemleri.....	42
4.6. Frezelemede Kesme Sıcaklığı	43
5. METAL İŞLEMEDE SOĞUTMA/YAĞLAMA	45
5.1. Metal İşlemede Kullanılan Soğutma/Yağlama Yöntemleri.....	47
5.2. Sürdürülebilir Soğutma Yağlama Yöntemleri	49
5.2.1. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi.....	49
5.2.1.1. Kesici Takım İçinden Uygulanan MMY Yöntemi.....	50
5.2.1.2. Kesici Takım Dışından Uygulanan MMY Yöntemi.....	52
5.2.2. Nano Partikül Katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Nano MMY) Yöntemi	53
5.2.3. Hibrid Nano Partikül Katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Hibrid Nano MMY) Yöntemi	54
6. MATERYAL VE YÖNTEM	55
6.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar.....	55
6.1.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme.....	55
6.1.2. Kesici Takım ve Tutucular	56
6.1.3. Deneylerde Kullanılan İşleme Tezgâhı.....	56

6.1.4. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi	57
6.1.4.1. <i>Deneylerde Kullanılan Nozul.....</i>	58
6.1.4.2. <i>Deneylerde Kullanılan Bitkisel Esaslı Yağ.....</i>	59
6.1.4.3. <i>Deneylerde Kullanılan Nano Partikül Tozlar.....</i>	59
6.1.5. Nano Akışkan Karıştırma Prosesi	60
6.2. Ölçüm ve Analiz Cihazları.....	62
6.2.1. Nano Akışkan Karışımların Viskozite ve Termal İletkenlik Ölçümleri .	62
6.2.2. Kesme Kuvveti Ölçümü	64
6.2.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	66
6.2.4. Kesme Sıcaklığının Ölçümü	68
6.2.5. Kesici Takım Aşınma Değeri Ölçümü.....	69
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	72
7.1. Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deneyler	72
7.1.1. Nano Akışkan Karışımların Viskozite ve Termal İletkenliğinin Değerlendirilmesi	72
7.1.2. Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi	75
7.1.3. Nano MMY Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi	76
7.1.4. Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Sıcaklığının Değerlendirilmesi	79
7.1.5. Nano MMY Kesme Koşullarında Takım Aşınmasının Değerlendirilmesi	81
7.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deneyler	86
7.2.1. Hibrid Nano Akışkan Karışımların Viskozite ve Termal İletkenliğinin Değerlendirilmesi	86
7.2.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Kuvvetinin Değerlendirilmesi	89
7.2.3. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğün Değerlendirilmesi	91
7.2.4. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Sıcaklığının Değerlendirilmesi	93
7.2.5. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesici Takım Aşınmasının Değerlendirilmesi	95

7.2.6. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deney	
Sonuçlarının ANOVA Analizi.....	100
7.2.6.1. <i>Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Kuvvetinin ANOVA Analizi</i>	100
7.2.6.2. <i>Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğünün ANOVA Analizi</i>	100
7.2.6.3. <i>Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Sıcaklığının ANOVA Analizi</i>	101
7.2.6.4. <i>Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Takım Ömrünün ANOVA Analizi</i>	101
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	103
8.1. Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deney Sonuçları	103
8.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deney Sonuçları	104
8.3. Öneriler	106
9. KAYNAKLAR	108
10. EKLER	119
10.1. EK 1: Deneylerde Kullanılan Inconel X-750 Süper Alaşım Malzeme Sertifikası.....	119
ÖZGEÇMİŞ	122

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. Yüksek sıcaklıkta elementlerin ergime özellikleri	24
Şekil 3.2. Sürünme safhaları	24
Şekil 3.3. Süper alaşım malzemelerin kullanıldığı alanlar	26
Şekil 3.4. Uçak motorlarında kullanılan malzemeler	27
Şekil 4.1. Çevresel frezeleme	30
Şekil 4.2. Aynı yönlü frezelemenin şematik gösterimi.....	31
Şekil 4.3. Zıt yönlü frezelemenin şematik gösterimi	31
Şekil 4.4. Frezelemede talaş kaldırma işlemi	33
Şekil 4.5. Frezeleme işleminde kesme kuvveti yönleri	35
Şekil 4.6. Frezelemede kesici uçtaki kesme kuvveti bileşenleri	35
Şekil 4.7. Yüzey pürüzlülük en büyük değeri R_t	39
Şekil 4.8. Yüzey pürüzlülük ortalama değeri R_a	39
Şekil 4.9. Ortalama yüzey pürüzlülük yüksekliği R_z	40
Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülük derece numaraları.....	41
Şekil 4.11. Kesme bölgesinde ısı oluşumu.	44
Şekil 5.1. Metal işleme sıvılarından arzu edilen fonksiyonlar.....	47
Şekil 5.2. Metal işlemede kullanılan soğutma/yağlama yöntemleri	48
Şekil 5.3. Genel üretim maliyetleri	50
Şekil 5.4. Kesici takım içinden uygulanan MMY yöntemi	51
Şekil 5.5. İçten MMY uygulama kanalları	51
Şekil 5.6. Dıştan MMY uygulaması	52
Şekil 5.7. Dıştan MMY uygulama kanalları	52
Şekil 5.8. Nano akışkan hazırlamada kullanılan Tek-Adım ve İki-Adım Yöntemi	53
Şekil 5.9. Hibrid nano akışkan hazırlama prosesi.....	54
Şekil 6.1. MMY sistemine ait deneysel set.....	57
Şekil 6.2. MMY deneylerinde kullanılan nozul boyutları	58
Şekil 6.3. Nano partikül tozlara ait SEM görüntüleri a) hBN, b) MoS ₂ , c) grafit	60
Şekil 6.4. Karıştırma prosesi a) Nano partikül ekleme, b) Mekanik karıştırıcı	61
Şekil 6.5. Viskozite ölçümünde kullanılan düzenek.....	62
Şekil 6.6. Termal iletkenlik ölçüm deney seti	63
Şekil 6.7. Kesme kuvveti ölçümünde kullanılan dinamometre boyutları.....	64
Şekil 6.8. Kesme kuvveti ölçüm deney seti	65
Şekil 6.9. Yüzey pürüzlülük ölçümü	67
Şekil 6.10. Frezelenen yüzeylerin optik yüzey profilometre ölçümü	68
Şekil 6.11. Kesme sıcaklığı ölçümü deney seti	69
Şekil 6.12. Kesici takım aşınma değerlerinin tespit edilmesi	70
Şekil 6.13. SEM cihazı ile takım aşınmasının ölçümü	71
Şekil 7.1. Nano akışkanlar için nano partikül karışım oranına bağlı viskozite değişimi	73
Şekil 7.2. Hacimce nano partikül konsantrasyon oranlarının termal iletkenlik üzerindeki etkisi	74
Şekil 7.3. Kesme koşulu ve nano partikül konsantrasyon oranlarına bağlı olarak	

kesme kuvvetindeki değişim	75
Şekil 7.4. Kesme koşulu ve nano partikül konsantrasyon oranlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim.	77
Şekil 7.5. Kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında işlenen yüzeylerin 2D fotoğrafları ve 3D topografyaları.	79
Şekil 7.6. Kesme koşulu ve nano partikül konsantrasyon oranlarına bağlı olarak kesme sıcaklığındaki değişim.....	80
Şekil 7.7. Nano partikül konsantrasyon oranlarına bağlı olarak takım yanak aşınma değerlerindeki değişim.	82
Şekil 7.8. Kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında kesici takım SEM aşınma görüntüleri.	83
Şekil 7.9. Kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarına bağlı olarak kesici takım ömürlerindeki değişim.....	85
Şekil 7.10. Hibrid nano akışkan karışımının sıcaklığa bağlı viskozite değişimi.	88
Şekil 7.11. Hibrid nano akışkan karışımının termal iletkenlik değişimi.	89
Şekil 7.12. Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetindeki değişim.	90
Şekil 7.13. Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim.	92
Şekil 7.14. Hibrid Nano MMY kesme koşullarında işlenen yüzeylerin 2D fotoğrafları ve 3D topografyaları.....	93
Şekil 7.15. Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme parametrelerine bağlı olarak kesme sıcaklığındaki değişim.....	94
Şekil 7.16. Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme parametrelerine bağlı olarak takım ömründeki değişim.....	96
Şekil 7.17. Kesme bölgesinde oluşan nano akışkan mekanizmaları.....	96
Şekil 7.18. Hibrid Nano MMY kesme koşullarında kesici takım SEM aşınma görüntüleri	98
Şekil 7.19. Hibrid Nano MMY kesme koşullarında seçilen yüzeylerden alınan EDX haritalandırma sonucu a)HGNF, b)HMNF, c)GMNF.....	99

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 3.1. Süper alaşım malzemelerin sınıflandırılması	17
Çizelge 3.2. Nikel esaslı süper alaşım malzemelerin sınıflandırılması	19
Çizelge 3.3. Alaşım elementlerinin süper alaşım malzeme üzerindeki etkileri.....	23
Çizelge 3.4. Inconel X-750 süper alaşım malzeme kimyasal bileşimi	28
Çizelge 3.5. Inconel X-750 süper alaşım malzeme mekanik özellikleri	28
Çizelge 4.1. Kesici takımında meydana gelen aşınma türleri, nedenleri ve çözüm fikirleri.....	37
Çizelge 5.1. Metal işlemede kullanılan kesme sıvılarının etkileri.....	46
Çizelge 6.1. Tüm deneylerde kullanılan parametreler	55
Çizelge 6.2. Inconel X-750 süper alaşım malzeme kimyasal içeriği (%).....	55
Çizelge 6.3. Inconel X-750 süper alaşım malzeme mekanik özellikleri	56
Çizelge 6.4. Deneylerde kullanılan kesici takım tutucu özellikleri	56
Çizelge 6.5. Deneylerde kullanılan kaplamalı kesici takım özellikleri	56
Çizelge 6.6. Deneylerde kullanılan CNC tezgâhına ait teknik özellikler	57
Çizelge 6.7. MMY cihazına ait teknik özellikler.....	58
Çizelge 6.8. Nano akışkan hazırlamada kullanılan bitkisel esaslı kesme yağına ait özellikleri.....	59
Çizelge 6.9. Nano partiküllere ait genel özellikler	60
Çizelge 6.10. Termal iletkenlik ölçüm cihazına ait teknik özellikler	63
Çizelge 6.11. Kesme kuvveti ölçümünde kullanılan dinamometreye ait teknik özellikler.....	64
Çizelge 6.12. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait teknik özellikler	66
Çizelge 6.13. Optik profilometre cihazına ait teknik özellikler.....	67
Çizelge 6.14. Kızılötesi termal kameraya ait teknik özellikler.....	68
Çizelge 6.15. Takım aşınma değerlerinin ölçümünde kullanılan dijital mikroskopa ait teknik özellikler.....	70
Çizelge 6.16. SEM cihazına ait teknik özellikler.....	71
Çizelge 7.1. Kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında kesici takım EDX analiz sonuçları	84
Çizelge 7.2. Hibrid nano akışkan karışımlarına ait tanımlamalar.....	86
Çizelge 7.3. Hibrid Nano MMY viskozite ve indeks VI ölçüm sonuçları.....	87
Çizelge 7.4. Hibrid Nano MMY kesme koşullarında kesici takım EDX analiz sonuçları	99
Çizelge 7.5. Kesme kuvveti ANOVA analizi sonuçları	100
Çizelge 7.6. Yüzey pürüzlülüğü ANOVA analizi sonuçları.....	101
Çizelge 7.7. Kesme sıcaklığı ANOVA analizi sonuçları.....	101
Çizelge 7.8. Takım ömrü ANOVA analizi sonuçları.....	102

KISALTMALAR

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ANOVA	Varyans Analizi
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Birliği)
BA	Borik Asit
BX	Boraks
BUE	Built-Up-Edge (Talaş Yapışması)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Nümerik Kontrol)
CNT	Carbon Nanotube (Karbon Nano Tüp)
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis
EG	Etilen Glikol
GİA	Gri İlişkisel Analizi
Hibrid Nano MMY	Hibrid Nanopartikül Katkılı Minimum Miktarla Yağlama
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
IR	Infra Red (Kızıl Ötesi)
MMY	Minimum Miktarla Yağlama
MWCNT	Multi Walled Carbon Nanotube (Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp)
NanoMMY	Nanopartikül Katkılı Minimum Miktarla Yağlama
NC	Numerical Control (Sayısal Denetim)
PTFE	Politetrafloroetilen
PVD	Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
SEM / TEM	Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

SİMGELER

ae	Radyal kesme derinliği, (mm)
ap	Eksenel kesme derinliği, (mm)
d	Kesici takım çapı (mm)
ε	Emisivite
f	İlerleme hızı, (mm/dev)
f_z	Diş başına ilerleme
F	Kesme kuvveti, (N)
$F_c, (F_y)$	Teğetsel kesme kuvvet, (N)
$F_f, (F_x)$	İlerleme kuvveti, (N)
$F_r, (F_z)$	Bileşke radyal kesme kuvvet, (N)
hBN	Hegzagonal Bor Nitrür
HRC	Rockwell C sertliği
n	Devir sayısı, (dev/dak)
N	Newton
nm	Nanometre
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, (μm)
Rz	Beş en yüksek, beş en çukur noktanın ortalama pürüzlülüğü, (μm)
Vc	Kesme hızı, (m/dak)
V_B	Kesici takım maksimum yanak aşınma değeri, (mm)

ÖZET

SÜRDÜRÜLEBİLİR İMALAT İÇİN INCONEL X-750 SÜPER ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE YENİLİKÇİ SOĞUTMA/YAĞLAMA TEKNİKLERİNİN İŞLEME PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Şenol ŞİRİN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Turgay KIVAK

Ocak 2020, 121 sayfa

Bu çalışmada, nikel esaslı Inconel X-750 süper alaşımının frezelenmesinde yenilikçi ve sürdürülebilir soğutma/yağlama yöntemlerinin işleme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İşleme deneyleri kaplamalı sementit karbür takımlar kullanılarak CNC dik işleme merkezinde iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hBN, MoS₂ ve grafit nano partiküllerinin farklı oranlarda (hacimce % 0,25, % 0,50, % 0,75 ve % 1) bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle nano akışkan karışımlar hazırlanmıştır. Deneyler sabit kesme hızı (45 m/dak), ilerleme (0,10 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilmiştir. Kuru, Minimum Miktarda Yağlama (MMY) ve 12 farklı nanopartikül katkılı MMY (Nano MMY) kesme koşullarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, kesici takım aşınması ve ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm kesme koşullarında en iyi performansı, hacimce % 0,50 konsantrasyonlu Nano MMY kesme koşulu göstermiştir. Nano akışkanlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde, hacimce % 0,50 hBN katkılı Nano MMY kesme koşulu diğer kesme koşullarına göre üstünlük sağlamıştır. Hacimce % 0,50 konsantrasyonlu hBN nano akışkan kesme koşulu, kuru ve MMY kesme koşuluna göre sırasıyla kesme kuvvetinde % 25,7 - % 18,86, yüzey pürüzlülüğünde % 54,26 - % 45,42, takım ömründe % 222 - % 48,7 oranında iyileşme sağlamıştır. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında eşit oranda (hacimce % 0,25 + % 0,25) yağa eklenen nano partiküller ile üç farklı hibrid nano akışkan (hBN+grafit, hBN+MoS₂ ve grafit+MoS₂) karışımlar hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı hibrid nano akışkan (Hibrid Nano MMY) kesme koşulu, kesme hızı (30, 45 ve 60 m/dak), ilerleme (0,05-0,10 ve 0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; hBN+grafit nano partikül katkılı Hibrid Nano MMY kesme koşulu, kesme kuvvetinde (314 N), yüzey pürüzlülüğünde (0,180 µm), kesme sıcaklığında (115 °C) ve takım ömründe diğer kesme koşullarına göre daha iyi performans göstermiştir. Son olarak ANOVA aracılığıyla işleme parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım ömrü üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. ANOVA analizi sonuçlarına göre; kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım ömrüne etki eden en önemli işleme parametreleri sırasıyla, % 89,03 etki oranıyla ilerleme, % 74,22 etki oranıyla ilerleme, % 67,43 etki oranıyla kesme hızı ve % 85,95 etki oranıyla kesme hızı olmuştur.

Anahtar sözcükler: Minimum Miktarda Yağlama (MMY), Nano Partikül, Frezeleme, Nikel Esaslı Inconel X-750 Süper Alaşımı, Sürdürülebilir İmalat.

ABSTRACT

EFFECTS OF INNOVATIVE COOLING/LUBRICATION TECHNIQUES ON MACHINING PERFORMANCE IN THE MILLING OF INCONEL X-750 SUPER ALLOY FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING

Şenol ŞİRİN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Dr. Turgay KIVAK

January 2020, 121 pages

In this study, the effects of innovative and sustainable cooling/lubrication methods on machining performance in milling of nickel based Inconel X-750 super alloy were investigated. Experiments were carried out in two stages at CNC vertical machining center using coated cemented carbide tools. For this purpose, the nanofluids were prepared by adding four different concentrations hBN, MoS₂ and graphite nanoparticles into vegetable based oil. Experiments were carried out at constant cutting speed (45 m/min), feed rate (0.10 mm/rev) and cutting depth (0.5 mm). Cutting force, surface roughness, cutting temperature, tool wear and life effects were investigated under dry, MQL and 12 different NanoMQL conditions. NanoMQL cutting condition has shown the better performance in all cutting conditions at 0.50 vol% concentration ratio. NanoMQL cutting condition was superior to other cutting conditions at 0.50 vol% concentration ratio. hBN nanofluid cutting condition with 0.50 vol% concentration showed better performance at cutting force 25.7%-18.86%, surface roughness 54.26%-45.42% and tool life 222%-48.7% according to dry and MQL cutting conditions, respectively. In the second stage of the study, nanoparticles were added into oil with equal concentration (0.25%+0.25 vol%) and three different hybrid nanofluid were prepared. Experiments were carried out at three different Hybrid NanoMQL cutting conditions (hBN+graphite, hBN+MoS₂ and graphite+MoS₂), cutting speed (30, 45 and 60 m/min), feed rate (0.05, 0.10 and 0.15 mm/rev) and constant cutting depth (0.5 mm). According to the results; hBN+graphite cutting condition showed better performance at cutting force (314 N), surface roughness (0.180 µm), cutting temperature (115 °C) and tool life compared to other cutting conditions. Finally, the effects of machining parameters on cutting force, surface roughness, cutting temperature and tool life were analyzed through ANOVA. According to the ANOVA analysis; the most important machining parameters affecting the cutting force, surface roughness, cutting temperature and tool life were 89.03% feed rate, 74.22% feed rate, 67.43% cutting speed and 85.95% cutting speed, respectively.

Keywords: Minimum Quantity Lubrication (MQL), Nanoparticles, Milling, Nickel Based Inconel X-750 Super Alloy, Sustainable Manufacturing.

EXTENDED ABSTRACT

EFFECTS OF INNOVATIVE COOLING/LUBRICATION TECHNIQUES ON MACHINING PERFORMANCE IN THE MILLING OF INCONEL X750 SUPER ALLOY FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING

Şenol ŞİRİN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Dr. Turgay KIVAK

January 2020, 121 pages

1. INTRODUCTION

Nickel-based super alloys are extensively used, notably in the construction of critical components of aircraft engines, gas turbines and power plants, nuclear power systems, essential parts in the chemical and petrochemical industry, marine equipment, pollution control apparatus and food processing equipment. Nickel-based super alloys comprise approximately 50% by weight of an aero-motor. Nickel-based super alloys are preferred due to their superior corrosion resistance, mechanical and thermal fatigue strength, high creep resistance and high fracture toughness.

One of the materials of the nickel-based super alloy group increasingly used today is Inconel X-750. Inconel X-750, just like other nickel-based super alloys, is a very difficult-to-machine material. Accurate selection of the machining conditions for such materials is immensely significant in terms of increasing the tool life, improving surface quality and achieving high machining efficiency by reducing production costs. One of the methods which is used to increase the machining efficiency in chip removal operations is the use of cutting fluids.

In this study; the effects of nanofluid cooling/lubrication on milling performance of nickel-based Inconel X-750 super alloy under MQL conditions were investigated. Surface roughness, cutting temperature, cutting force, tool wear and tool life were addressed as performance criteria.

2. MATERIAL AND METHODS

Measurements and parameters applied in milling of Inconel X-750 super alloy are given below step by step.

- Inconel X-750 super alloy material is prepared in dimensions of 17.3x100x150 mm.
- The parameters to be used in the experiments were determined as a result of the preliminary experiments.
- Delta SEIKI vertical CNC machine is used in all milling experiments.
- SKF Vario model device was used in all MQL condition.
- Vegetable based oil was used in the preparation of nanofluid.
- Nanofluid mixtures were prepared and viscosity, thermal conductivity were measured.
- Viscosity measurements were performed by Ubbelohde type viscometer.
- Thermal conductivity measurements were performed by the Hot Disk TPS2500s device.
- Cutting forces were measured by Kistler 9257B dynamometer.
- Surface roughness were realized by Marsurf PS 10 device.
- Cutting tool wear rate were measured by Dino Lite AM 4113ZT digital microscope.
- Cutting temperature were measured by Optris PI 450 infrared thermal camera.
- Cutting tool wear mechanism were realized by FEI Quanta FEG 250 SEM device.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The experiments were carried out in two stages. In the first stage, it was aimed to determine the best nanoparticle concentration ratio. For this purpose, nanofluid mixtures were prepared by adding different concentration (0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 vol%) hBN, MoS₂ and graphite nanoparticles to vegetable based oil.

First stage experiments results;

- The viscosity values of the nanofluids were quite higher than those of the base fluid at all of the concentration ratios.
- The 0.50 vol% hBN, graphite and MoS₂ nanofluids reduced the cutting force by

25.7, 23.29 and 19.88%, respectively, compared to the dry cutting. The hBN nanofluid gave better results than the graphite and MoS₂ nanofluids in terms of the cutting forces.

- The hBN nanofluid at a concentration of 0.50 vol% provided a decrease in surface roughness values at the rates of 54.26% and 45.42%, respectively, compared to dry and base fluid cutting conditions.
- Temperatures under the cutting conditions of MoS₂, graphite and hBN nanofluids at a concentration of 0.25 vol% were measured as 153, 157 and 163 °C, respectively. The lowest cutting temperatures were achieved under the cutting conditions of the nanofluid at 0.25 vol% and MoS₂ showed the best performance among the nanofluids.
- The base fluid, graphite, MoS₂ and hBN nanofluid (0.50 vol%) cutting conditions provided improvements in tool life compared to the dry cutting condition at the rate of 117, 161, 189 and 222%, respectively.

In the second stage, it was aimed to determine the Hybrid NanoMQL cutting conditions in milling performance. For this purpose, nanoparticles were added in oil with equal concentration (0.25+0.25 vol%) and three different hybrid nanofluids (hBN+graphite, hBN+MoS₂ and graphite+MoS₂) were prepared.

Second stage experiments results;

- Prepared hybrid nanofluids viscosity and thermal conductivity were measured and it was observed that viscosity and thermal conductivity increased as the concentration of nanoparticles added to the nanofluid mixture increased.
- According to viscosity measurement HGNF, HMNF and GMNF have 22.97%, 25.15% and 30.10% higher viscosity than pure oil (at 40 ° C), respectively.
- Among the hybrid nanofluids, the highest thermal conductivity ratio was obtained with GMNF (0.2197 W/m-K), followed by HMNF (0.2105 W/m-K) and HGNF (0.2087 W/m-K), respectively.
- The lowest cutting force values among hybrid nanofluids were obtained under the HGNF cutting condition in all cutting speed and feed rate combinations.
- In all Hybrid NanoMQL cooling/lubrication conditions, the lowest surface

roughness values were obtained at 45 m/min cutting speed and 0.05 mm/rev feed rate.

- The lowest cutting temperature values were obtained under HGNF<HMNF<GMNF cutting conditions, respectively.
- HGNF Hybrid NanoMQL cutting condition showed better performance on tool life than HMNF and GMNF Hybrid NanoMQL cutting conditions.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

As a result of the nanofluid experiments, it has been seen that environmental damage can be minimized and cutting conditions can be improved by using environmentally friendly nanofluid. The optimum concentration rate of non-toxic, environmentally friendly nanoparticles was found to be 0.50 vol%. When the nanofluids were evaluated with each other, it was seen that hBN nanofluids showed better machining performance than graphite and MoS₂ nanofluids.

It was observed that milling of Inconel X-750 super alloy under hybrid nanofluid cutting conditions yielded positive results in terms of machining efficiency. Hybrid NanoMQL condition, which is one of the ecological and environmental cooling/lubrication methods, can be used during the milling of Inconel X-750 super alloy materials. The best milling performance is obtained by the experiments carried out under HGNF (hBN+graphite) hybrid cutting condition.

1. GİRİŞ

Nikel esaslı süper alaşımlar, ağır çalışma şartları altında gösterdikleri üstün korozyon direnci, yüksek mekanik ve termal yorulma dayanımları, aşırı sıcaklıklarda aşınmaya karşı gösterdiği yüksek direnç, üstün yorulma mukavemeti gibi özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Hava araçlarının motorları ve gaz türbinlerinin kritik bileşenleri başta olmak üzere enerji santralleri, nükleer santraller, kimyasal-petrokimya endüstrisi, deniz ekipmanları, kirlilik kontrol aparatları ve gıda işleme ekipmanlarında nikel esaslı süper alaşımlar tercih edilmektedirler. Öyle ki, nikel esaslı bu malzemeler havacılık endüstrisinde kullanılan motorların ağırlıkça yaklaşık % 50'sini oluşturmaktadırlar [1], [2]. Ancak ağır çalışma şartları altında verimli bir şekilde çalışan nikel esaslı süper alaşımlar, düşük termal iletkenlik ve difüzyon hızları nedeniyle kesici takım kenarında dik sıcaklık gradyanına neden olmakta ve maksimum sıcaklığı kesici takım ucuna doğru kaydırmaktadır. Dahası, aşırı sıcaklıklarda yüksek sertliğe ulaşması, işleme esnasında sertleşmesi, kesici takıma yapışması, yüksek kimyasal reaktivitesi, mikroyapısında sert aşındırıcı karbürlerin yer alması ve intermetalik fazların olması yüzünden süper alaşımlar işlenebilirliği zor malzemeler olarak kabul edilirler [3]. Nikel esaslı süper alaşım grubunda yer alan ve günümüzde kullanımı gittikçe artan malzemelerden biri de Inconel X-750'dir. Inconel X-750 de tıpkı diğer nikel esaslı süper alaşımlar gibi işlenebilirliği son derece zor olan bir malzeme olarak bilinmektedir [4]. Bu tür malzemelerin işlenmesi esnasında işleme koşullarının doğru seçilmesi, kesici takım ömrünün ve iş parçası yüzey kalitesinin artırılması, üretim maliyetlerinin düşürülerek yüksek işleme verimliliğinin elde edilmesi açısından son derece önem arz etmektedir. Talaş kaldırma operasyonlarında işleme verimliliğini artırmak için kullanılan en bilindik yöntemlerden biri de metal kesme sıvılarının kullanımınıdır.

Frezeleme, tornalama, taşlama, delme vb. talaş kaldırma operasyonlarında kesici takım, iş parçası ve talaş arasındaki temas sonucunda, yüksek oranda sürtünme oluşmaktadır. Sürtünmenin sonucu olarak da kesme bölgesinde yüksek ısılar meydana gelmektedir. Kesme esnasında ortaya çıkan ve kontrol altına alınamayan yüksek ısı, kesici takımın ömrünü kısaltmakla kalmayıp, yüzey kalitesini ve iş parçasının boyutsal doğruluğunu da etkileyebilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için kullanılan yöntemlerin en bilineni

kesme sıvısı kullanımıdır. Kesme sıvılarının temel görevi, kesme bölgesini soğutma, takım-talaş ara yüzeyinde tribo film tabakası oluşturarak yağlamanın sağlanmasıyla sürtünmenin azaltılması, kesici takım ömrünün artırılması ve talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıyla işleme verimliliğinin artırılması şeklinde özetlenebilir [5]. Ancak, dünya genelinde kullanılan yağların yarısından fazlası petrol esaslı olup, işlem sonrası bertaraf maliyetlerinin yüksek olması, toksik olmaları, biyolojik olarak parçalanamamaları gibi dezavantajlarından dolayı çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle kesme sıvılarının kullanımının minimize edilmesi için imalatçılar ve araştırmacılar yoğun bir çaba sarf etmektedirler [6]. Tüm bu sebeplerden dolayı, özellikle işleme verimliliğini artırmak ve sürdürülebilir imalat sürecine katkı sağlamak için yenilikçi ve çevreci soğutma/yağlama sistemlerinin kullanımı bir gereklilik haline gelmiştir.

Metal işleme endüstrilerinin sürdürülebilir imalata geçişi, konvansiyonel soğutmanın sınırlı oranda kullanımıyla mümkün olabilir görüşü, dünya genelinde son yıllarda sıkça bahsedilen konular arasındadır [7]. Kuru işleme, minimum miktarda yağlama (MMY) ve nano partikül katkılı kesme sıvısı kullanımı, konvansiyonel kesme sıvısı kullanımını sınırlandıran, çevreye duyarlı yöntemler olarak bilinmektedirler. Kuru işleme hem üretim maliyetleri hem de çevre duyarlılığı açısından doğru bir yöntemdir. Ancak, özellikle ağır işleme gerektiren koşullarda, işleme verimliliği oldukça düşük bir yöntem olduğu için genellikle pek tercih edilmemektedir [8]. Bir diğer alternatif yöntem ise MMY olarak bilinen, doğrudan kesme bölgesine az miktardaki (20 mL/saat) kesme sıvısının basınçlı hava ile optimal oranda birleşerek sis buharı olarak gönderildiği yöntemdir. Yarı kuru işleme olarak da adlandırılan MMY yönteminin kullanımı, endüstriyel uygulamalarda günden güne artış eğilimi göstermektedir [9]. MMY yöntemi, sıkıştırılmış hava ile karıştırılan az miktarda biyolojik olarak parçalanabilen yağ zerreciklerinin kesme alanına basınçlı bir şekilde püskürtülmesi esasına dayanır. Kesme bölgesinde oluşan etkin yağlayıcı film tabakası, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasının azaltılmasına yardımcı olabilmektedir. MMY, kesme sıvısının çok fazla miktarda kullanıldığı ıslak kesmeye göre, çalışan sağlığı üzerindeki olumsuz etkiyi minimize eden, biyolojik olarak parçalanabilen yağ kullanan, toksik maddeler içermeyen, kuru kesmeye göre kesme kuvvetlerini azaltan, takım ömrünü iyileştiren ve yüzey kalitesini artıran alternatif bir yöntemdir [10]. MMY yöntemi, hem klasik kesme sıvısının hem de kuru işlemenin olumsuz etkilerini ortadan kaldıran çözümlerden biri olmakla beraber frezeleme,

tornalama, delme ve taşlama gibi başlıca talaş kaldırma operasyonların hepsinde de verimli bir şekilde kullanılabilir [11]. Ancak, yeni malzemelerin ortaya çıkması, işleme şartlarının ağırlaşması, aşırı ısı oluşumu gibi olumsuz etmenler nedeniyle, MMY yönteminin verimliliğinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu geliştirme çalışmalarından biri de MMY yönteminde kullanılan kesme sıvısının içerisine nano boyutlarda katı partiküllerin katıldığı nano akışkan yöntemidir.

Kesme sıvısının içerisine katılan nano boyuttaki katı yağlayıcılar sayesinde MMY yönteminin verimliliği iyileştirilebilmektedir. Nano akışkan adı verilen bu karışımlar, farklı konsantrasyon oranlarında (% ağırlıkça veya % hacimce), genelde 100 nm'den daha küçük boyutlarda metalik/metalik olmayan nano parçacıklar veya nano fiberlerin, baz sıvıya (deiyonize su, mineral ester, bitkisel esaslı yağ vb.) eklenmesiyle hazırlanmaktadır [12]. Kesme sıvılarına göre çok daha üstün özelliklere sahip olan bu nano akışkanlar, MMY nozulundan basınçlı havayla karışarak aerosol sis buharı olarak çıkmakta, kesici takım/iş parçası yüzeylerinde film tabakası oluşturmakta ve üstün yağlayıcılık özelliği sayesinde sürtünmeyi minimize etmektedirler. Bu aerosol sis buharını oluşturan nano partiküller etrafında oluşan çok ince film yağ tabakası, kesici takım işleme hızından daha büyük olduğu için kesme bölgesindeki yüzeylere (kesici takım/iş parçası) ve taneler arası boşluklara yerleşebilmektedirler. Böylece, nano akışkanlar iş parçası ve kesici takım yüzeyine yerleşerek sürtünmeyi önemli ölçüde azaltan ve yağlama verimliliğini son derece etkili kılan bir tribo film tabakası oluştururlar [13], [14]. Katı haldeki nano partiküller kesici takım/iş parçası arasında yuvarlanarak (yuvarlanma mekanizması da adı verilen), kesici takımlarda oluşması muhtemel sürtünme kaynaklı aşınmaların hızlı gelişimini engelleyebilmektedirler [15]. Kesme bölgesine yüksek basınç altında ve farklı karışım oranlarında nano akışkanların içerisinde gönderilen nano partiküller, termal iletkenlik özelliğini artırmakta, enerji verimliliğini sağlamakta, kesici takım ve iş parçası yüzeyinde koruyucu ince bir tabaka oluşturmaktadırlar. Bu sayede kesme esnasında oluşan sıcaklığın iş parçasına yayılmasını engellemekle birlikte ortaya çıkan ısıyı hızlı bir şekilde kesme bölgesinden uzaklaştırmaktadırlar [16]. Nano akışkan karışım içerisine hegzagonal Bor Nitrür (hBN), karbon nano tüp (CNT), grafit, Al₂O₃, MoS₂, elmas ve benzeri farklı özelliklere sahip katı nano partiküller eklenebilmektedir. Nano akışkanlar ile yağlama, birbiriyle temas eden yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltan etkili bir yöntemdir. Yağlama etkinliği, katı yağlayıcı maddelerinin morfolojisine, kristal yapısına ve ayrıca parçacıkların kesici

takım/iş parçası ara yüzeyine gönderilme şekline bağlıdır [17]. Nano partiküllerin, ısı taşıma kapasiteleri, şekilleri ve özellikleri birbirinden farklı olabilmektedir. Son zamanlarda araştırmacılar her birinin üstün özelliklerinin bir araya getirildiği hibrid nano akışkanlar üzerine çalışmalara hız vermişlerdir. En az iki farklı nano partikülün aynı anda kesme sıvısına eklenerek hazırlandığı hibrid nano akışkanların, sadece bir nano partikülün eklenerek hazırlandığı nano akışkan kesme koşullarına göre daha üstün özellikleri vardır. Bu özellikler arasında sürtünmeyi azaltıcı etkiye sahip ara tabaka yuvarlanma mekanizması, tamir etkisi, zımpara etkisi bulunmaktadır. Kesici takım/iş parçası ara yüzeyinde sürtünmenin minimize edilmesiyle, kesme sıcaklığında, iş parçası yüzey kalitesinde, kesme kuvvetlerinde ve takım ömründe ciddi iyileşmeler olabilmektedir.

MMY yöntemleri sayesinde, konvansiyonel soğutmada kullanılan toksik ve çevreye zararlı yağların kullanımı azaltılmakta, iş parçası ve kesici takım arasındaki sürtünmeye bağlı sıcaklıklar düşürülmekte, takım aşınması azaltılmakta ve yüzey kalitesi iyileştirilebilmektedir. Böylece, işleme maliyetleri minimize edilerek, yüksek işleme performansı ortaya çıkabilmektedir.

Bu çalışmada; literatürde üzerinde kısıtlı çalışmaların olduğu nikel esaslı Inconel X-750 süper alaşımının frezelenmesinde sürdürülebilir ekolojik soğutma/yağlama yöntemlerinin etkileri incelenmiştir. Kuru, MMY, nano akışkan ve hibrid nano akışkan kesme koşullarının işleme performansı üzerindeki etkileri tüm yönleriyle ele alınmıştır. Performans kriter göstergesi olarak kesme kuvveti, iş parçası yüzey kalitesi, kesme sıcaklığı, kesici takım aşınması ve ömrü seçilmiştir. Nano akışkan karışımları hazırlamada katı haldeki hBN, MoS₂ ve grafit nano partikülleri kullanılmıştır. Hazırlanan nano partikül karışımların viskozite ve termal iletkenlikleri ölçülmüştür. Kaplamalı sementit karbür kesici takımların kullanıldığı deneysel çalışmada, yüzey kalitesinin tespitinde taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı ve yüzey profilometre kullanılmıştır. Kesme bölgesindeki sıcaklıklarının ölçülmesinde kızılötesi termal kamera kullanılmıştır. Takım aşınma ve ömrünün belirlenmesinde dijital mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda süper alaşımlar, ağır çalışma şartlarının olduğu endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Süper alaşımların sahip olduğu eşsiz özelliklerin yanında işlenmesi esnasında karşılaşılan zorluklar, araştırmacıların dikkatini çekmektedir. İşleme verimliliğinin artırılarak, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım ömrünün iyileştirilmesi, soğutma/yağlamanın verimli şekilde uygulanmasıyla mümkün olabilmektedir. En bilindik soğutma/yağlama yöntemi konvansiyonel ıslak kesme olmakla beraber, toksik olması, insan sağlığına, çevreye verdiği zararlar ve süper alaşım malzemelerin işlenmesinde yeterli performans göstermemesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Süper alaşım malzemelerin işlenebilirliği üzerine yapılan son araştırmalar incelendiğinde, işleme verimliliğinin artırılmasında, alternatif ve ekolojik bazı soğutma/yağlama yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Alternatif ve ekolojik olarak adlandırılabilen yöntemler arasında MMY, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşulları ilk olarak göze çarpmaktadır. Bu alternatif yöntemler sürdürülebilir imalat sürecinde güncelliğini korumakla beraber, literatürde yapılan araştırmaların bazılarında aşağıda değinilmiştir.

2.1. MMY ve Nano MMY Kesme Koşulları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Sartori ve arkadaşları Ti-6AL-4V alaşım malzemesini tornalanmasında kuru, ıslak, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tornalama deneyleri, sabit kesme hızı (80 m/dak), ilerleme (0,2 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,25 mm) gerçekleştirilmiştir. Nano akışkan karışımlar kesme yağının içerisine ağırlıkça % 5 politetrafloroetilen (PTFE) ve demineralize suya ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 grafit nano partikülleri eklenerek hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda, takım krater aşınmasında en iyi performansı ıslak kesme koşulu gösterirken bunu, grafit, PTFE katkılı Nano MMY ve kuru kesme koşulunun takip ettiği ifade edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünde en iyi performansı, grafit katkılı Nano MMY kesme koşulu gösterirken kuru, MMY ve ıslak kesme koşullarına göre sırasıyla % 44, % 36 ve % 29 iyileşmeler sağladığı belirtilmiştir [9].

Sarıkaya ve arkadaşları gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, Haynes 25 süper alaşım malzemesinin tornalanmasında kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Tornalama deneyleri, kaplamasız karbür takımlarla, dört farklı kesme hızı (15, 30, 45 ve 60 m/dak), üç farklı ilerleme (0,08-0,12 ve 0,16 mm/dev) ve sabit kesme derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, MMY yönteminin kullanılmasıyla işleme verimliliğinin arttığı ve üretim maliyetlerinin azaldığı ifade edilmiştir [18].

Thamizhmanii ve Hasan, Inconel 718 süper alaşımının frezelenmesinde, kuru ve MMY kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneyler, üç farklı debi (12,5 mL/saat, 25mL/saat ve 37,5 mL/saat) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Frezeleme deneyi sonuçlarına göre, MMY koşulunun kuru işlemeye göre takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünde daha iyi performans gösterdiği, kesme bölgesine gönderilen karışımın basınç değeri arttıkça yüzey pürüzlülükte iyileşmeler görüldüğü bildirilmiştir [19].

Yıldırım ve arkadaşları, Waspaloy süper alaşımının kaplamasız takımlarla frezelenmesinde, MMY kesme koşullarının takım ömrü ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini incelemiştir. Frezeleme deneyleri, dört farklı yağ türü (mineral, sentetik, mineral-sentetik ve bitkisel esaslı), MMY akış hızı (25, 50, 75 ve 100 mL/saat), iki farklı nozul mesafesi (25 ve 50 mm), sabit kesme hızı (45 m/dak), ilerleme (0,1 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, takım ömrü ve kesme kuvveti üzerine en optimum parametreler, bitkisel esaslı kesme yağı, 100 mL/saat MMY akış hızı ve 25 mm nozul mesafesi olarak belirlenmiştir [20].

Ansari ve Kotiveerachary yaptıkları çalışmayla, Incoloy 800 süper alaşımının tornalanmasında, kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarının, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Tornalama deneyleri, üç farklı kesme hızı (40, 50 ve 60 m/dak), ilerleme (0,033-0,066 ve 0,132 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,5-0,75 ve 1 mm) gerçekleştirilmiştir. Kaplamasız karbür takımların kullanıldığı çalışma sonucunda, tüm işleme parametrelerinde MMY koşulunun, diğer kesme koşullarına göre daha iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir [21].

Tosun ve Hüseyinoğlu, 7075-T6 Al alaşımının frezelenmesinde, ıslak ve MMY kesme koşullarının, yüzey pürüzlülük üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kesme sıvısı olarak su ve bor yağının kullanıldığı çalışmada, sonuçları analiz etmede Anova kullanılmıştır.

Çalışma sonunda, ıslak kesme koşulu MMY koşuluna göre düşük kesme hızlarında yüzey pürüzlülükte daha iyi performans göstermiştir. Ancak, kesme hızının artmasıyla birlikte bu kez MMY koşulunun ıslak kesme koşuluna göre yüzey pürüzlülükte daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [22].

Kamata ve Obikawa, Inconel 718 süper alaşımının tornalanmasında kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarının takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tornalama deneyleri, üç farklı kaplamalı karbür takımla (TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD), TiN/AlN (PVD) ve TiAlN (PVD)), iki farklı kesme hızı (60, 90 m/dak), sabit ilerleme (0,1mm/dev) ve kesme derinliğinde (1mm) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre, takım ömründe en iyi performansı TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı takım ve MMY koşulunun gösterdiği bildirilmiştir [23].

Lin ve arkadaşları yaptıkları çalışmayla, Ti-6AL-4V malzemesinin tornalanmasında, kuru, ıslak, MMY, kriyojenik kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tornalama deneyleri, üç farklı kesme hızı (70, 90, 110 m/dak), sabit ilerleme (0,25 mm/dev) ve kesme derinliğinde (1mm) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, MMY koşulunun, kriyojenik, kuru ve ıslak koşullara göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [24].

Uysal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde kuru, MMY (bitkisel esaslı yağ) ve Nano MMY (ağırlıkça %1 MoS₂) kesme koşullarının, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Frezeleme deneyleri, sabit devir (995 dev/dak), ilerleme (180 m/dak), kesme derinliği (0,5 mm), iki farklı MMY akış hızı (20 ve 40 mL/saat) ve 5 bar hava basıncında gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre; 40 mL/saat akış hızında ağırlıkça %1 MoS₂ nano akışkan kesme koşulunun takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünde daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir [25].

Prasad ve Srikat AISI 1040 çeliğinin sementit karbür ve HSS takımlarla tornalanmasında kuru, ıslak, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Nano akışkan karışımlar, 80 nm boyutlarında grafit nano partiküllerinin üç farklı oranda (ağırlıkça % 0,1 % 0,3 ve % 0,5) kesme sıvısının içerisine eklenerek hazırlanmıştır. Deneyler, sabit kesme hızı (105 m/dak), ilerleme (0,14 mm/dev) ve kesme derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, tüm kesici takım türlerinde en iyi performansı ıslak

kesme koşulunun gösterdiği ve bunu sırasıyla ağırlıkça % 0,5 % 0,3, % 0,1 Nano MMY ve kuru kesme koşullarının takip ettiğini iddia etmişlerdir [26].

Chetan ve arkadaşları Nimonic 90 süper alaşımının tornalanmasında, kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının takım aşınması, talaş oluşumu ve yüzey kalitesi üzerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Nano akışkanlar, biyolojik olarak parçalanabilen emülsiyon yağına, 40 nm boyutlarında, Al₂O₃ (hacimce % 0,1, % 0,5 ve % 1) ve 10 nm boyutlarında gümüş (Ag) (hacimce % 5, % 10 ve % 15) eklenerek hazırlanmıştır. Tornalama deneyleri, sabit kesme hızı (60 m/dak), ilerleme (0,12 mm/dev), kesme derinliği (0,5 mm) ve üç farklı MMY debisinde (60, 125 ve 250 mL/saat) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, hacimce % 0,1 Al₂O₃ nano akışkan kesme koşulunun, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti üzerinde, hacimce % 1 Al₂O₃ nano akışkan koşulunun ise takım yan yüzey aşınması üzerinde daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir [27].

Kurşuncu ve Yaraş AISI O2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesinde kuru, MMY (ticari kesme yağı) ve Nano MMY (EG içerisine ağırlıkça % 5 borik asit (BA), ağırlıkça % 5 boraks (BX) eklemiş) kesme koşullarının takım aşınması, iş parçası yüzey kalitesi ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Frezeleme deneyleri, sabit kesme hızı (100 m/dak), ilerleme (0,05 mm/diş), kesme derinliği (0,5 mm), MMY akış hızı (50 mL/saat) ve basınçta (5 bar) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, tüm işleme parametrelerinde EG+BA Nano MMY koşulu, diğer kesme koşullarına göre daha iyi performans gösterdiği iddia edilmiştir [28].

Sahu ve arkadaşları Ti-6AL-4V Ti alaşımının tornalanmasında kuru, konvansiyonel ve Nano MMY kesme koşullarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım aşınması üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Nano akışkan karışımlar, kesme yağı içerisine 10-20 nm çapında, 1-2 µm uzunluğunda ve % 95 saflıkta MWCNT (hacimce % 0,2) nano partikülleri eklenerek hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda, MWCNT katkılı Nano MMY koşulunun, konvansiyonel kesme koşuluna göre takım aşınmasını % 34 azalttığı, kesme kuvvetlerini % 28 düşürdüğü ve yüzey kalitesini % 7 iyileştirdiği belirtilmiştir [29].

Ganesan ve arkadaşları H11 çeliğinin tornalanmasında, kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, EG içerisine 50 nm boyutlarında Cu

nano partikülleri eklenerek hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı kesme hızı (90, 149 ve 209 m/dak), iki farklı ilerleme (0,1 ve 0,2 mm/dev), sabit MMY akış hızı (7 mL/dak) ve basınçta (3 bar) gerçekleştirilmiştir. Genesan ve diğer araştırmacılar, yapmış oldukları optimizasyon işlemi sonucunda Nano MMY koşulunun, kuru ve MMY kesme koşullarına göre sırasıyla yüzey pürüzlülüğünde % 66 ve % 40 daha iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir [30].

Rapeti ve arkadaşları AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nano akışkan karışımlar, hindistancevizi, susam ve kanola yağı içerisine MoS₂ nano partikülleri hacimce % 0,25, % 0,5 ve % 1 eklenerek hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı kesme hızı (40, 60 ve 100 m/dak), ilerleme (0,14-0,17 ve 0,2 mm/dev), sabit kesme derinliği (0,5 mm) ve MMY akış hızında (10 mL/dak) gerçekleştirilmiştir. Taguchi tabanlı Gri İlişkisel Analiz (GIA) yöntemi ile optimum işleme parametreleri; hacimce % 0,5 MoS₂ katkılı Nano MMY kesme koşulu, 40 m/dak kesme hızı ve 0,14 mm/dev ilerleme olarak tespit edilmiştir [31].

Rahmati ve arkadaşları Al6061-T6 alüminyum malzemesinin karbür parmak freze takımlarıyla frezelenmesinde, MMY kesme koşullarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, mineral esaslı yağ içerisine ortalama 40 nm boyutlarında MoS₂ nano partiküllerini ağırlıkça % 0,2, % 0,5 ve % 1 eklenerek hazırlanmıştır. Deneyler, sabit kesme derinliği (133 m/dak), ilerleme (21 mm/dev), kesme derinliği (5 mm), dört farklı hava basıncı (1, 2, 3 ve 4 bar) ve nozul açısında (15°, 30°, 45° ve 60°) gerçekleştirilmiştir. Frezeleme deneyleri sonucunda, kesme sıcaklığı için ideal parametrenin ağırlıkça % 0,5 MoS₂ Nano MMY kesme koşulu, 4 bar basınç ve 30° nozul açısı, yüzey pürüzlülüğü için en ideal parametrenin ağırlıkça % 0,5 MoS₂ Nano MMY kesme koşulu 4 bar basınç ve 60° nozul açısı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca kesme kuvveti için en ideal parametrenin ise ağırlıkça % 1 MoS₂ Nano MMY kesme koşulu, 4 bar basınç ve 30° nozul açısı olduğu belirtilmiştir [32].

Thakur ve arkadaşları, EN-24 Steel tornalanmasında, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nano akışkan karışımlar, kesme yağına SiC nano partiküllerin farklı oranlarda (ağırlıkça % 0,5, % 1 ve % 1,50) eklenmesiyle hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı kesme hızı (40, 80 ve 120 m/dak), ilerleme (0,08-0,16 ve 0,24 mm/dev), kesme

derinliği (0,50-0,75 ve 1 mm) ve MMY akış hızında (60, 120 ve 180 mL/saat) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının optimizasyonunda GİA ve faktörlerin etki seviyelerinin belirlenmesinde Anova kullanılmıştır. Tormalama deneyi sonuçlarına göre, ağırlıkça % 1,5 SiC katkılı Nano MMY koşulu, 40 m/dak kesme hızı, 0,16 mm/dev ilerleme, 0,5 mm kesme derinliği, 180 mL/saat MMY debisi en optimum parametre olmuştur. Anova tabanlı çok amaçlı GİA analizine göre, sonuçlara en fazla katkısı olan parametreler, % 41,14 katkıyla nano partikül oranı, % 40,54 katkıyla MMY debisi, % 4,4 katkıyla kesme derinliği, % 3,9 katkıyla ilerleme ve % 3,4 katkıyla kesme hızı olarak tespit edilmiştir [33].

Sharma ve arkadaşları AISI 1040 eliğinin tormalanmasında kuru, ıslak, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Deneyler, sabit kesme hızı (96,7 m/dak), ilerleme (0,1 mm/dev) ve kesme derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiştir. Nano akışkan karışımlar, kesme yağı içerisine Al₂O₃ nano partiküllerin hacimce % 1 oranında eklenmesiyle hazırlanmıştır. Deneysel alışma sonunda, Nano MMY kesme koşulunun kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarına göre sırasıyla kesme kuvvetini % 59,1, % 29,2, % 28,6, takım aşınmasını % 63,9, % 44,9, % 5,27, yüzey pürüzlülüğünü ise % 47,8, % 29,1, % 25,5 oranında azaltarak iyileşmeler sağlandığı iddia edilmiştir [34].

Talib ve Rahim yaptıkları çalışmada, AISI 1045 eliğinin tormalanmasında, MMY ve hBN nano partikül katkılı Nano MMY kesme koşullarının işleme performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, hintfıştığı yağına hBN nano partiküllerin farklı oranlarda (ağırlıkça % 0,05, % 0,1 ve % 0,5) eklenmesiyle hazırlanmıştır. Hintfıştığı yağına eklenen hBN nano partikül konsantrasyon oranının artmasıyla, tribolojik özelliklerde iyileşmemenin yanı sıra nano akışkan viskozite değerinde de artış gözlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, ağırlıkça % 0,05 hBN nano akışkan koşulunun kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve ömründe diğer kesme koşullarına göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir [35].

Abbas ve arkadaşları AISI 1045 eliğinin tormalanmasında, kuru, ıslak ve Nano MMY kesme koşullarının, yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nano akışkan karışım, kesme yağına 30 nm boyutlarında Al₂O₃ nano partikülleri ağırlıkça % 1 eklenerek hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı kesme hızı (100, 125 ve 150 m/dak), kesme derinliği (0,2-0,50 ve 0,75 mm) ve ilerlemede (0,06-0,12 ve

0,18 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, yüzey pürüzlülüğünün en optimum parametresi, Nano MMY kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı, 0,50 mm kesme derinliği, 0,06 mm/dev ilerleme değeri olurken, enerji tüketiminin en optimum parametresi ise Nano MMY kesme koşulu 100 m/dak kesme hızı, 0,25 mm kesme derinliği olduğu ifade edilmiştir [36].

Singh ve arkadaşları AISI 304 paslanmaz çeliğinin tornalamasında MMY ve Nano MMY kesme koşullarının yüzey pürüzlülük ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Nano akışkan karışımlar, kesme yağı içerisine üç farklı oranda (ağırlıkça % 0,2, % 0,6 ve % 1) grafen nano partikülleri eklenerek hazırlanmıştır. Deneyler üç farklı kesme hızı (40, 90 ve 140 m/dak), ilerleme (0,08-0,12 ve 0,16 mm/dev), ve kesme derinliğinde (0,6-1 ve 1,4 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, kesme sıcaklığının en optimum parametresi ağırlıkça % 1 grafen katkılı Nano MMY kesme koşulu, 40 m/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme ve 0,6 mm kesme derinliği olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün en optimum parametresi ise ağırlıkça % 1 grafen katkılı Nano MMY kesme koşulu, 140 m/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme ve 0,6 mm kesme derinliği olduğu ifade edilmiştir [37].

Yıldırım ve arkadaşları, Inconel 625 süper alaşımının tornalanmasında, kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Nano akışkan karışımlar, bitkisel esaslı yağ içerisine farklı oranlarda (hacimce % 0,5 ve % 1) hBN nano partikülleri eklenmesiyle hazırlanmıştır. Çalışmada, bitkisel esaslı yağ ve nano akışkan karışımların viskozite ve termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. En düşük viskozite ve termal iletkenlik, bitkisel esaslı yağda ölçülürken, hBN nano partikül katkı oranının hacimce % 1 olmasıyla en yüksek değerlere ulaşılmıştır. Deneyler, dört farklı kesme hızında (40, 60, 80 ve 100 m/dak), ilerlemede (0,075-0,100-0,125 ve 0,150 mm/dev), kesme koşulunda (kuru, MMY, hacimce % 0,5 hBN katkılı Nano MMY ve hacimce % 1 hBN katkılı Nano MMY) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, hacimce % 0,5 hBN katkılı Nano MMY kesme koşulu diğer kesme koşullarına göre takım ömründe, takım aşınmasında, yüzey pürüzlülüğünde daha iyi performans gösterirken, kesme sıcaklığında hacimce % 1 hBN katkılı Nano MMY kesme koşulu daha iyi performans göstermiştir [38].

Rahman ve arkadaşları, Ti-6Al-4V ELI alaşımının tornalanmasında, kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve talaş

oluşumu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar kanola ve sızma zeytinyağı içerisine, Al_2O_3 , MoS_2 ve rutil TiO_2 nano partikülleri eklenerek hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, hacimce % 0,5 Al_2O_3 katkılı kanola yağ kesme koşulu, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasında diğer koşullara göre daha iyi performans göstermiştir. Araştırmacılar, kesme sıcaklığı ve talaş oluşumunda en iyi performansı ise hacimce % 0,5 MoS_2 katkılı kanola yağ koşulunda elde ettiklerini belirtmişlerdir [39].

2.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşulu Üzerine Yapılan Çalışmalar

Literatürde yer alan ve hibrid nano akışkan karışımlarının kullanıldığı çalışmalara aşağıda değinilmiştir.

Sharma ve arkadaşları AISI 304 çeliğinin tornalanmasında, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşullarının, kesme sıcaklığı ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano akışkan karışımlar, kesme yağına Al_2O_3 ve Al_2O_3 +grafen nano partikülleri, farklı oranlarda (hacimce % 0,25, % 0,75 ve % 1,25) eklenerek hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı kesme hızı (60, 90 ve 120 m/dak), ilerleme (0,08-0,12 ve 0,16 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,6-0,9 ve 1,2 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonunda, Hibrid Nano MMY koşulunun, Nano MMY koşuluna göre takım aşınmasını % 12,29, kesme sıcaklığını % 5,79 azaltarak daha iyi performans gösterdiği iddia edilmiştir [40].

Sharma ve arkadaşları yaptıkları bir başka çalışmada, AISI 304 çeliğinin tornalanmasında Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşullarının kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nano akışkan karışımlar, kesme yağına Al_2O_3 ve Al_2O_3 + MoS_2 nano partikülleri, farklı oranlarda (hacimce % 0,25, % 0,75 ve % 1,25) eklenmesiyle hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı kesme hızı (60, 90 ve 120 m/dak), ilerleme (0,08-0,12 ve 0,16 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,6-0,9 ve 1,2 mm) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, Hibrid Nano MMY koşulunun, Al_2O_3 Nano MMY koşuluna göre, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini sırasıyla, % 7,35 ve % 2,38 azalttığı ifade edilmiştir [41].

Singh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, AISI 304 çeliğinin sert tornalanmasında, MMY, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşullarının, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti üzerindeki etkilerini incelemiştir. Nano akışkan karışımlar, kesme yağına Al_2O_3 ve Al_2O_3 +grafen nano partiküllerin, farklı oranlarda (hacimce % 0,25, % 0,75 ve % 1,25)

eklenmesiyle hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı kesme hızı (60, 90 ve 120 m/dak), ilerleme (0,08-0,12 ve 0,16 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,6-0,9 ve 1,2 mm) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, Hibrid Nano MMY kesme koşulu diğer koşullara göre yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetinde sırasıyla % 20,28, % 9,94 daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [42].

Zhang ve arkadaşları, Inconel 718 süper alaşımının taşlanması, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşullarının, kesme kuvveti, sürtünme katsayısı ve iş parçası yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nano akışkan karışımlar, kesme yağına MoS₂, CNT ve MoS₂+CNT nano partiküllerinin eklenmesiyle hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, Hibrid Nano MMY koşulunun, Nano MMY koşullarına göre daha iyi performans sergilediği iddia edilmiştir [43].

Yıldırım yaptığı çalışmada, Inconel 625 süper alaşımının tornalanmasında, kuru, MMY, Nano MMY, Hibrid Nano MMY, kriyojenik (LN₂), LN₂+MMY, LN₂+Nano MMY ve LN₂+Hibrid Nano MMY kesme koşullarının, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Nano akışkan karışımlar, bitkisel esaslı kesme yağına Al₂O₃, hBN ve Al₂O₃+hBN nano partiküllerin hacimce % 0,5 ve % 1 eklenmesiyle hazırlanmıştır. Tornalama deneyleri, sabit kesme hızı (70 m/dak), ilerleme (0,1 mm/dev), kesme derinliği (0,8 mm), akış hızı (50 mL/saat) ve basınçta (8 bar) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda araştırmacı, hacimce % 0,5 hBN+LN₂ koşulunun, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasında daha iyi sonuçlar verdiğini iddia etmiştir [44].

2.3. Literatür Değerlendirmesi

Literatürde araştırılan soğutma/yağlama yöntemleri;

- Kuru,
- Islak,
- Minimum Miktarda Yağlama (MMY),
- Nano partikül katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Nano MMY),
- Hibrid Nano partikül katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Hibrid Nano MMY).

Literatürde MMY, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY ile ilgili yapılan çalışmalar

değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- MMY, kesme sıvısı ve basınçlı hava karıştırılarak aerosol sis buharı şeklinde kesme bölgesine gönderildiği bir soğutma/yağlama yöntemidir.
- MMY yönteminde kullanılan kesme sıvıları, işleme performanslarını olumlu yönde etkilemektedir.
- MMY sisteminde kullanılan bitkisel esaslı yağlar, yüzey pürüzlük ve takım aşınmasında sentetik, yarı sentetik ve mineral esaslı yağlara göre daha iyi performans göstermiştir.
- MMY kesme koşulu kuru, ıslak kesme koşullarına göre kesme kuvveti ve kesme sıcaklığında daha iyi performans göstermiştir. Ancak ıslak kesme koşulunun yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasında MMY koşuluna göre nispeten daha iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır.
- İşleme sonrası çıkan talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılmasında, MMY koşulu, ıslak kesme koşuluna göre daha iyi sonuçlar vermiştir.
- MMY yönteminde işleme performanslarının iyileştirilmesi adına, kesme sıvılarının içine nano partiküller eklenmiştir.
- Nano akışkan karışımlar kesme sıvılarına nano boyutlarda (genelde 1-100 nm) termal iletim katsayıları ve yağlayıcılık özellikleri yüksek katı partiküllerin eklenmesiyle hazırlanmıştır. Ancak eklenen nano partikül konsantrasyon oranı, çalışmadan çalışmaya ağırlıkça veya hacimce olmak üzere farklılık göstermiştir.
- Nano akışkan karışıma eklenen nano partikül konsantrasyonlarının artmasıyla viskozite ve termal iletkenlik katsayılarında, artışlar olduğu görülmüştür.
- Nano MMY kesme koşulları, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve ömründe kuru, ıslak ve MMY kesme koşullarına göre daha iyi performans göstermiştir.
- En az iki nano partikül eklenerek hazırlanan hibrid nano akışkan karışımlar, tek nano partikül eklenerek hazırlanan nano akışkan karışımlara göre, tribolojik performansları daha iyi çıkmıştır.
- Farklı üstün nano partikül özelliklerin bir araya getirildiği Hibrid Nano MMY koşulu, MMY ve Nano MMY koşullarına göre, kesme sıcaklığı, kesme kuvveti

ve takım aşınmasında daha iyi sonuçlar vermiştir.

- Kuru, ıslak, MMY, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşulları üzerine yapılan işlenebilirlik çalışmalarının büyük çoğunluğu tormalama operasyonlarında kullanılmıştır.
- Özellikle süper alaşım malzemelerin frezelenmesi üzerine çalışmaların yetersiz kaldığı anlaşılmıştır.

Literatür genel değerlendirmesi sonucunda, MMY işleme verimliliğini iyileştirilmesinde etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle MMY yönteminde kullanılan yağın içerisine nano partiküller eklenmesiyle, işleme performanslarının daha da iyileştirildiği anlaşılmıştır. Metal işlemede Hibrid Nano MMY kesme koşullarının kullanıldığı, çok az sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Inconel X-750 süper alaşım malzemesinin frezelenmesi üzerine henüz kapsamlı bir çalışmanın yapılmadığı anlaşılmıştır.

Yapılan bu çalışmayla, üzerinde henüz kapsamlı bir araştırmanın yapılmadığı Inconel X-750 nikel esaslı süper alaşım malzemesi frezelenmiştir. Literatürde henüz standart bir karşılık bulamamış, nano akışkan konsantrasyon oranlarının optimize edilmesi adına kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarının işleme performansı üzerinde etkileri incelenmiştir. Nano MMY deneyleri sonunda elde edilen optimal nano partikül konsantrasyon oranı (hacimce % 0,50), hibrid nano akışkan karışım hazırlamada kullanılmıştır. Üzerinde yetersiz sayıda çalışma bulunan, Hibrid Nano MMY koşullarının işleme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Performans kriterleri olarak kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve takım ömrü ele alınmıştır.

Yapılan değerlendirme ve gözlemler doğrultusunda, literatürdeki eksiklerin giderilmesi, ağır şartlarda çalışan süper alaşım malzemelerin işleme performanslarının iyileştirilmesi, milli servetimiz olan bor mineralinin kullanımının genişletilmesi ve teknolojik veri sağlanması adına yapılan çalışmanın literatürde önemli bir yer tutacağına inanılmaktadır.

3. SÜPER ALAŞIM MALZEMELER

3.1. Süper Alaşımalar

Süper alaşımalar ilk olarak 1940~1970 yılları arasında, östenitik paslanmaz çelikten faydalanılarak geliştirilmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte farklı malzemeler bir araya getirilmeye ve çeşitli mekanik özellikler kazandırılmaya çalışılmıştır. Süper alaşımalar; uçak, gemi, roket tahrik sistemleri, petrokimya, nükleer reaktörler, denizaltı uygulamaları gibi birçok alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir [45], [46].

Süper alaşımalar, II. Dünya Savaşı'ndan kısa bir süre sonra turbo şarj ve uçak türbin motorları gibi yüksek sıcaklıklarda etkili çalışma performansı gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir [47]. Üretilen ilk nikel esaslı süper alaşım, Nimonic 80 A olarak bilinmektedir. Bu süper alaşıma titanyum takviyesiyle bir derecede ani sertleşme özelliği kazandırılmış ve 80Ni-20Cr alaşımı geliştirilmiştir [48]. Süper alaşımlara ait en karakteristik özellikler; 650 °C'nin üstündeki sıcaklıklara bile uzun süre dayanabilmeleri, sıcaklık değişimlerinde yüksek korozyon ve yüksek erozyon dayanımları olmasıdır. Nikel (Ni) ve kobalt (Co) esaslı süper alaşım malzeme grupları, yüksek sıcaklık değerlerinde (1500~1650 °C) bile özelliklerini koruyacak kadar yüksek dayanıma sahiptirler [49].

Süper alaşımalar östenit fazında, Yüzey Merkezli Kübik (YMK) kristal yapılı olmasından dolayı yüksek dayanım özellikleri sergilemektedirler. Ayrıca süper alaşımalar yapılarında çökeltme sertleşmesi özelliği gösteren fazlar ihtiva etmeleri sebebiyle, yüksek mukavemet özellikleri de sergilerler [50].

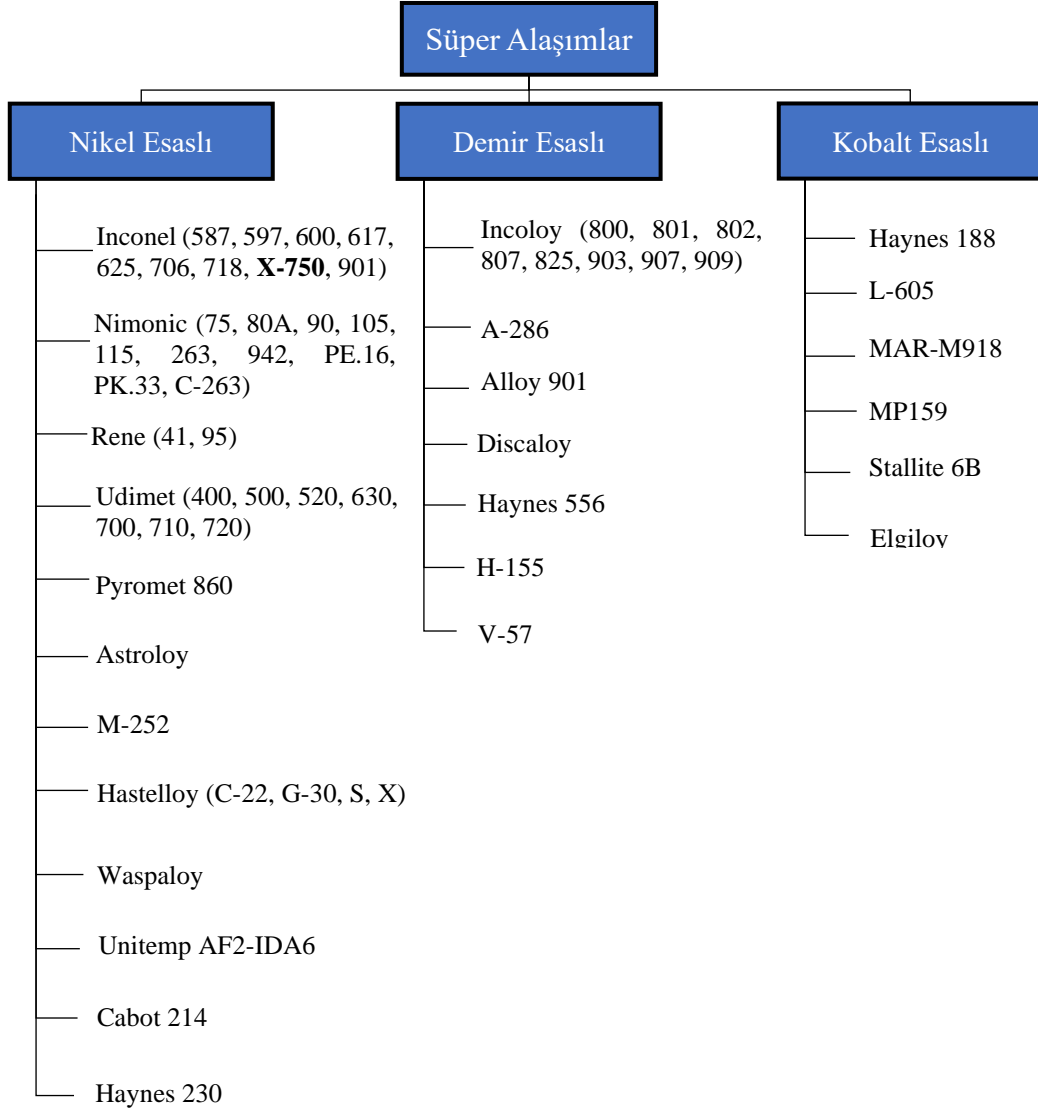
Süper alaşım malzemeler, metal alaşım malzemelere nazaran en önemli avantajları; yüksek özgül mukavemetleri, yüksek özellikli modülleri, aşınma dayanımlarının yüksek olması ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklar altında dahi koruyabilmeleri şeklinde sıralanabilir [51].

3.2. Süper Alaşım Malzemelerin Sınıflandırılması

Süper alaşım malzemeleri, diğer alaşım malzeme gruplarından farklı olarak yüksek sıcaklık değerlerinde ağır mekanik gerilmelere ve yapısal yüzey değişimlerine

dayanabilecek biçimde üretilmiş, ısıl direnç kapasitesi yüksek, demir (Fe)-Ni, Ni ya da Co esaslı alaşım malzemeleri olarak tabir edilirler [52]. Süper alaşım malzemeler sınıflandırılması Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Süper alaşım malzemelerin sınıflandırılması [52].



3.2.1. Nikel Esaslı Süper Alaşım Malzeme Çeşitlerine Genel Bakış

Nikel; 1453 °C ergime sıcaklığı ve 8,9 g/cm³ yoğunluğu olan, periyodik tabloda dördüncü satır ve onuncu sütunda yer alan bir elementtir. Ni esaslı süper alaşımların kimyasal kompozisyonunda, % 50~70 Ni bulunabilmektedir. Ni esaslı süper alaşımlara ayrıca çökelme sertleşme işlemi de uygulanabilmektedir. Ni esaslı süper alaşımlarda bulunan, Ni ve Cr kombinasyonları, bu süper alaşımların oksidasyon direncine pozitif yönde katkı sağlamaktadır. Ni esaslı süper alaşım malzemeler, özellikle 650 °C'nin üzerindeki

sıcaklık değerlerinde mekanik dayanım açısından paslanmaz çeliklerden daha üstün özellikler sergilemektedirler [53]. Yüksek sıcaklıklar altındaki mukavemetleri de oldukça iyi olmakla beraber, korozyon dirençleri de yüksektir. Bu süper alaşım malzemelerin yüksek sıcaklıklarda korozyona, mekanik ve termal yorulmalara, mekanik ve termal şoklara, sürünmeye ve aşınmaya dayanıklı olmaları, ağır çalışma şartlarında kullanabilmelerine imkân sağlamaktadır. Bu özellikler sayesinde alaşımların kullanıldığı alanlarda, verim ve çalışma performansları arzu edildiği üzere etkili olabilmektedir [2]. Ni esaslı süper alaşım malzemelerin yüksek sıcaklık değerlerinde sürünme, yorulma ve çevresel bozunum etkilerine karşı gösterdiği direnç sayesinde, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımını yaygın hale getirmektedir [47]. Esas alaşım olarak Ni elementinin başlıca avantajları, YMK yapıdaki östenit-nikel matrisinin yüksek faz kararlılığı ve doğrudan veya dolaylı olarak farklı biçimlerde alaşımlandırılma yeteneğinin olması şeklinde bahsedilebilir. Buna karşın Ni elementinin yüzey kararlılığı krom (Cr) ve alüminyum (Al) elementlerinin alaşımlandırılma kabiliyeti geliştirilmiştir [50].

Inconel, Nimonic ve Hastelloy gibi alaşımlarda Fe içeriği, küçük miktarlardan yaklaşık % 35'e kadar değişken oranlarda bulunur. Çok sayıda Ni esaslı alaşım malzemesinin, dayanım veya korozyon direncini iyileştirmek adına küçük oranlarda Al, titanyum (Ti), niyobyum (Nb), molibden (Mo) ve tungsten (W) malzeme bileşimine katılabilir. Ni ve Cr elementlerinin kullanıldığı alaşımlar, malzemeye son derecede yüksek oksidasyon direnci kazandırır [54].

Süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda çalışan uçak parçaları, kimyasal fabrika ekipmanları ve korozyon dirençli malzemeler gibi çeşitli yerlerde kullanılmaktadırlar. Süper alaşım malzemelerin genel olarak kullanıldığı yerler;

- Endüstriyel gaz türbin uygulamaları ve uçak üretim sanayii,
- Roket motor bileşenleri,
- Buhar türbinli güç üretim tesisleri,
- Gaz türbin imalatı,
- Tıbbi ve medikal uygulamaları,
- Uzay araçlarının kritik bileşenleri,
- Nükleer reaktörlerin sızdırmazlık ekipmanları,
- Kimya sektörünün çeşitli uygulamaları [46], [54] şeklinde sıralanabilir.

Ni esaslı süper alaşımlar farklı kodlarla sınıflandırılmakla beraber, Çizelge 3.2’de bazı süper alaşım malzemelerin sınıflandırma örnekleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Nikel esaslı süper alaşım malzemelerin sınıflandırılması.

Inconel	587, 597, 600, 617, 625, 706, 718, X-750, 901
Nimonic	75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.16, PK.33, C-263
Rene	41, 95
Udimet	400, 500, 520, 630, 700, 710, 720
Pyromet	860
Astroloy	
M-252	
Unitemp	AF2-IDA6
Cabot	214
Haynes	230

Endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım ağına sahip olan bu alaşım malzemeleri için ortak bazı özellikler, aşağıdaki gibi özetlenebilir [55], [56].

- Yüksek ısı gerilim,
- Yüksek sertlik,
- Yüksek kesme kuvvetine neden olan işleme gerilmesi ve yüksek pekleşme,
- İşleme esnasında yüksek ısıya neden olan düşük termal iletkenlik,
- Yapısında yüksek oranda aşındırıcı karbürlerin bulunması,
- Kesici takım üzerine yüksek oranda yığıntı talaş (BUE) oluşumu ve kaynama eğilimi.

3.2.2. Demir Esaslı Süper Alaşım Malzemeler

Demir (Fe) esaslı süper alaşımlar, ana bileşim elementi olarak Fe, önemli oranda Cr, Ni ve az miktarda da Mo veya W içeren malzemelerdir. Bu malzeme grubu karbür ekleme, intermetalik çökeltme sertleştirilmesi veya katı-eriyik yöntem ile dayanımları artırılabilir. İntermetalik çökelti genellikle $Ni_3(Al, Ti)$ (γ')’dur. Bu grubun Ni-Cr oranları ve mukavemet mekanizmaları, paslanmaz çeliklere göre farklılık göstermektedir. Paslanmaz çelik malzemeler yapılarında % 12~25 Cr ve % 0~20 Ni barındırırken, Fe esaslı süper alaşımlar ise % 20’den daha fazla Ni barındırmaktadırlar (% 25-35). Yüksek oranda Fe içeren birçok süper alaşım olmasına karşın, aslında hepsi Fe esaslı süper alaşım malzeme grubunda değildir. Çünkü bu süper alaşım malzemeler Fe, Ni, Cr, Co, az oranda Mo, W ve Nb gibi elementlerin karmaşık bileşimlerinden oluşmaktadırlar. Bu kombinasyona, katı-eriyik dayanımlı % 16 Fe ve % 49 Ni içeren Hastelloy X ile γ'' kuvvetlendirilen %

18,5 Fe ve % 52,5 Ni içeren Inconel 718 alaşımları örnek olarak verilebilir. Bu tür malzemeler, Fe içeren Ni esaslı süper alaşımlardır. γ' ile kuvvetlendirilen Inconel 901 süper alaşımı, % 42,5 Ni ve % 36 Fe ihtiva eden Ni esaslı veya farklı oranlı Fe-Ni-Cr içeren bir süper alaşımdır. Bu alaşım malzemesi yüksek mukavemete ek olarak termal genleşme katsayısı düşük mertebelindedir. Kompleks içerikli katı-eriyik mukavemetli alaşıma Multimet (N-155) alaşım malzemesi örnek olarak verilebilir. Bu alaşımın içeriğinde % 21 Cr, % 20 Ni, % 20 Co, % 32,5 Fe, % 3 Mo, %2,5 W ve % 1 Nb elementleri bulunmaktadır [53].

YMK kafes yapılı ve alaşım elementlerine bağlı olarak çökelen fazlar, malzemenin mekanik özelliklerinin oluşturulmasında son derece etkin rol oynamaktadırlar. Fe esaslı süper alaşımların mukavemetleri, Ni esaslı alaşımlara göre nispeten daha düşük mertebededir [57]. Fe esaslı süper alaşımlar ve katı solüsyon takviyeli alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri düşük dayanım özelliğinden dolayı verimi en düşük süper alaşım malzeme grubu olarak bilinirler. Ancak bu dezavantajının yanında, Fe esaslı süper alaşımların en büyük avantajı fiyatının diğer süper alaşımlara oranla daha ekonomik olmasıdır [51], [58].

3.2.3. Kobalt Esaslı Süper Alaşım Malzemeler

Kobalt (Co) esaslı süper alaşım malzemelerin içeriğinde ana element olarak Co bulunmaktadır. Ana bileşime ek olarak önemli oranlarda Ni, Cr, W az oranda Mo, Nb, Tantal (Ta), Ti ve bazen Fe gibi elementler de kompozisyona eklenebilmektedirler. Co esaslı süper alaşım malzemeler, katı eriyik ve karbür fazları tarafından mukavemetlendirilir. Co esaslı süper alaşım malzemelerin hiçbiri katı tam eriyik alaşım değildir. Bunun nedeni ise içeriğinde ikincil karbür faz veya intermetalik bileşikler barındırmasıdır. Bu durum oda sıcaklığında süneklik kaybına neden olduğu gibi aynı zamanda doğal yaşlanma sürecinin başlamasına da neden olmaktadır [59].

Co esaslı süper alaşım malzemeler, genellikle yüksek sıcaklıklar altında çalışan gaz türbinlerinin bileşenlerinde, nükleer reaktörlerin kritik bileşenlerinde, medikal implantlarda, tutuşturucularda, buhar türbinlerinde, uçak motoru yakıt türbinleri, statik kanat uygulamaları, geçiş kanallarında ve fırın parçalarında kullanılmaktadır [59].

Co esaslı süper alaşım malzemelerinin farklı uygulamalarda tercih edilme nedenleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Ergime sıcaklık değerlerinin yüksek olması ile yüksek sıcaklık değerlerinde, Fe ve Ni esaslı süper alaşım malzemeleriyle mukayese edildiğinde daha mukavimdirler.
- İçeriklerinde yüksek oranda Cr bulundurmasıyla yüksek sıcaklık değerlerinde korozyon dirençleri son derece yüksektir. Bundan dolayı gaz türbinlerin atmosferde çalışan bileşenlerinde kullanılan bir materyaldir.
- Ni esaslı süper alaşım malzemelere göre termal yorulma direnci daha yüksektir.
- Özellikle yüksek sıcaklıklar altında çalışan ve dönen parçalarda tercih edilirler.
- Kaynaklanma kabiliyetleri bulunmaktadır [51].

Co esaslı süper alaşımların en büyük dezavantajı üretim ve satış maliyetlerinin yüksek olmasıdır [51].

3.2.4. Döküm ve Dövme Süper Alaşım Malzemeler

Süper alaşım malzemeler 1940'lı yıllarda dövme yöntemi kullanılarak üretilirken, 1950'li yılların ortasından sonra bu yöntemler yerini eş eksenli döküm yöntemlerine bırakmıştır. Süper alaşımların tane yapılarından dolayı, yüksek sıcaklıklardaki sürünme dayanımları kısıtlı olmakla beraber, ancak 1000 °C'nin altındaki sıcaklık şartlarında çalışmaktaydılar. Fakat döküm teknolojisinin gelişmesiyle birlikte öncelikli olarak çok yönlü katılaştırma ve tek kristal üretim gibi yöntemler sayesinde süper alaşım malzemelerin kullanım ömrü artmış ve 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalışma imkânı sunmuştur. Süper alaşım malzemelerden mikro yapısal kararlılık, yüksek oksidasyon direnci, sürünme ömrü gibi özellikler beklendiğinden, dövme yöntemi kontrollü atmosferde döküm şartları şeklinde teknolojik olarak geliştirilmiştir [60].

Son ürün elde edilmesinde kullanılan üretim yöntemi, üretilen parçaların mekanik özelliklerine katkısı son derece yüksektir. Şöyle ki bir süper alaşım malzemenin dövme veya döküm yöntemiyle üretilmesi arasında farklılıklar bulunmaktadır.

Dövme alaşım malzemeler, ilk olarak döküm kaba kütük parçalardan oluşan ve sonrasında nihai şeklini alması adına defalarca ısıtılan ve şekil değiştirme adına deformasyona uğratılan alaşım malzemelerdir. Dövme alaşım malzemeler, döküm alaşım malzemelerin katılaştırma esnasında karşılaştığı ayrışma olayı olmadığından, yapıları daha bağdaşık olmaktadır. Döküm yöntemiyle üretilen süper alaşım malzemeler, kaba tane yapılıdır ve sürünme, kopma gibi özellikleri dövme alaşım malzemelere göre nispeten daha iyidir. Dövme süper alaşım malzemeler ise ince tane yapılı olduklarından,

çekme, yorulma gibi özellikleri döküm süper alaşım malzemelere göre nispeten daha iyidir. Dövme süper alaşımlar, döküm süper alaşımlara göre daha sünek yapıda olması nedeniyle en iyi süneklik özellikleri ikincil işlemler ile malzemeye kazandırılırlar [50]. Dövme süper alaşım malzemelerin çoğu, içeriğinde zengin Cr elementi barındırması sayesinde yüksek korozyon direnç özelliği göstermektedir. İlk üretilen dökme süper alaşım malzemeler bileşiminde Cr elementi bakımından zengindi. Ancak ilerleyen yıllarda süper alaşım malzemelerin yüksek sıcaklık dayanımını artıran diğer alaşım elementlerinin bileşime eklenmesiyle, Cr elementi miktarı da azaltılmıştır [61]. Dövme yöntemiyle üretilen bazı Ni esaslı malzemelere, türbin kanatçıkları, jet türbin bileşenleri, egzoz kontrol bileşenleri, zincirler, ısı dönüştürücüler, valf ve pompa gövdeleri örnek olarak verilebilir.

Dövme süper alaşım malzemelerin içerikleri, döküm süper alaşım malzemelerin içerikleriyle mukayese edildiğinde; birtakım farklılıkların olduğu görülebilmektedir. Dövme süper alaşım malzemelerde faz sertleştirme elementleri olarak genellikle düşük oranlarda Al ve Ti eklenmekle beraber Renyum (Re) ile Ta elementleri genellikle bileşimde kullanılmazlar. Bileşime bazen de önemli oranda Fe ve Nb katılabilir ve Cr ilavesi, döküm süper alaşım malzemelerde çoğunlukla % 15'ten daha fazladır [62].

Çizelge 3.3'te süper alaşım malzemelere eklenen alaşımların, malzeme özelliklerine etkileri verilmiştir.

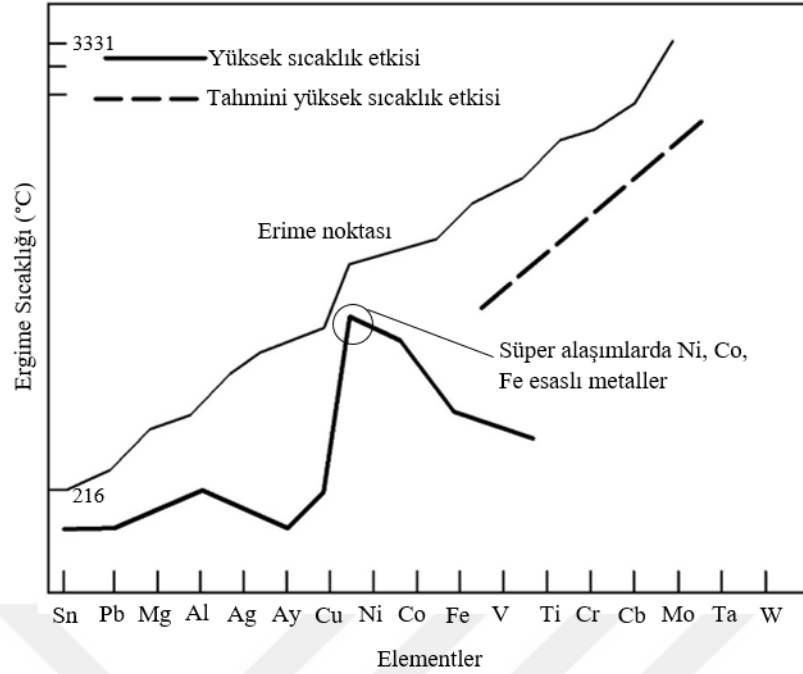
Çizelge 3.3. Alaşım elementlerinin süper alaşım malzeme üzerindeki etkileri [63].

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 oluşturu	Ti	Ti, Ta, Nb	W, Ta, Ti, Mo, Nb
M ₇ C ₃ tipi karbür oluşturu	-	Cr	Cr
M ₂₃ C ₆ tipi karbür oluşturu	Cr	Cr	Cr, Mo, W
M ₆ C tipi karbür oluşturu	Mo	Mo, W	Mo, W
M (CN) tipi karbür oluşturu	C, N	C, N	C, N
γ' -Ni ₃ (Al, T) oluşturu	Al, Ti, Ni	-	Al, T,
Hegzagonal η (Ni ₃ Ti) oluşumu geciktirici	Al, Zr	-	Al, Ti
γ' fazının çözünme sıcaklığı yükseltici	-	-	Co
γ' fazının çözünme sıcaklığını düşürücü	-	-	Cr
γ' irileşmesini geciktirici	-	-	Re
Sertleştirici çökelticiler ve/veya arametaller	Al, Ti, Nb	Al, Mo, W, Ta, Ti	Al, Ti, Nb
γ'' (Ni ₃ Nb) oluşturu	-	-	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	-	Ni ₃ Ti	-
Ara sıcaklık sünekliği geliştirici	-	-	Hf
Karbürlerin genel çökelticileri	P	-	-

* Bahsedilen etkiler bir alaşımda hepsi mutlaka meydana gelemez,
* Ni₃Ti ile sertleşmede yapıda mutlaka Ni bulunmalıdır,
* Yapıda çok fazla miktarda Ni bulunursa borürler meydana gelir.

3.3. Süper Alaşımların Yüksek Sıcaklıklardaki Davranışları

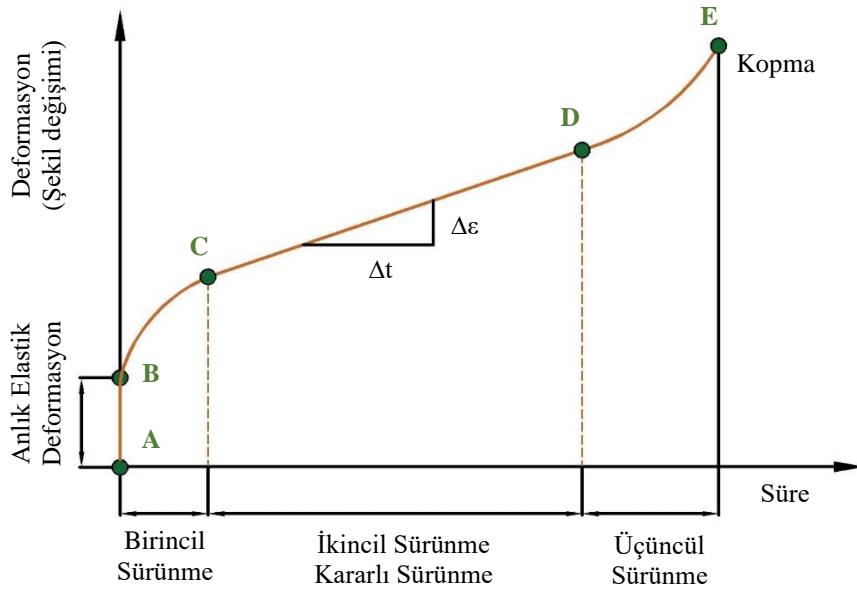
Yüksek sıcaklıklar altında malzeme içeriğindeki elementler, farklı ergime özellikleri sergilemektedirler (Şekil 3.1). Süper alaşımların yüksek sıcaklıklar altında sergilediği davranışları sürünme/gerilme-kopma ve metalürjik kararsızlık olmak üzere iki başlık altında inceleyebiliriz.



Şekil 3.1. Yüksek sıcaklıkta elementlerin ergime özellikleri [64].

3.3.1. Sürünme/Gerilme-Kopma

Sürünme, yüksek sıcaklık değerlerinde ve sabit gerilmelerde malzemenin süreç ilerledikçe plastik deformasyona uğrama eğilimi olarak tanımlanır [64]. Sürünme davranış eğilimi birbirini takip eden üç bölgeden oluşan konvansiyonel sürünme eğrisince şekillendirilir [65]. Şekil 3.2’de sürünme safhaları verilmiştir. Sürünme kırılması, normal şartlarda sürünme eğrisinin üçüncü bölgesiyle alakalıdır ve temel boşluk çekirdeklenmesi, boşlukların artışı ve ilerlemesiyle birlikte ayırt edilmektedir [64].



Şekil 3.2. Sürünme safhaları [64].

Yüksek sıcaklıkta çalışan bir türbin kanatçığının, uzun süreli çalışma koşulların altında, sürünme özelliklerini etkileyen faktörler; kimyasal kompozisyonları, tanelerin ebatları, taneler arası sınırlar ve yüksek sıcaklık değerlerinde göstermiş olduğu faz kararlılığı şeklinde sıralanabilir. Tane boyutlarının özellikle küçük olması, bir başka tanımla tane sınırlarının büyük olması, alaşım malzemesinde tane sınırlarında kaymalara sebep olup sürünme hızında artışa neden olmaktadır. Döküm alaşım malzemelerdeki dendrit yapılar, soğuma hızı ve katılma eğilimine bağlı olarak kolonsal yapılar meydana getirmektedirler [66]. Yüksek sıcaklıklar altında ortaya çıkan gerilme, malzemede sürekli bir gerginlik etkisi oluşturur ve sürünmeye neden olur. Sürünme aslında zamana bağlı gerilme veya yüksek sıcaklık altında meydana gelen deformasyon olarak da tanımlanabilir. Sürecin devamında ise sürünme, “gerilme/kopma” adlandırılan kırılma ile ortadan kalkar [58].

3.3.2. Metalürjik Kararsızlık

Yüksek sıcaklıklar altında çalışmanın diğer bir etkisi metalürjik kararsızlıktır. Gerilme, işlem prosesi, sıcaklık değeri ve çevresel kullanım süresince metalürjik yapıda değişime yol açabilir. Bu yapısal değişimler veya metalürjik kararsızlıklar en iyi gerilme/kopma özelliklerinin etkisiyle olması şeklinde açıklanabilir. γ' alaşımlarda karakteristik kararsızlık sorunlarıyla intermetalik çökeltme safhasını barındırır [67].

Diğer kararsızlık özelliği ise karpit reaksiyonlarını ihtiva eder. Süper alaşımların yapılarında sadece bir çeşit karpit bulunmuştur. Sıcaklık ve gerilmelerdeki değişimler hem tanecikler içindeki karpitleri hem de tanecik sınırlarındaki karpitleri etkiler. Tanecik sınırlarındaki karpitler, sıcaklık etkisiyle sürünme ve kopma davranışının değişim göstermesinde çok daha önemli bir etmendir. Tanecik sınır yapıları gerçekte yüksek sıcaklık özelliklerine bağlı olarak çok önemlidir. Karpitlerin kuvvetlendirici olarak tanecik sınırlarında var olması optimum sürünme ve kopma ömrü için bir gerekliliktir. Ancak şekil ve kırılmada diğer karpit oluşumlarında olan değişiklikler yığılmaya neden olabilir. En iyi mukavemet değeri için tanecik sınırlarındaki en iyi karpit oluşum şekli ayrı blok biçimindeki partiküllerdir. Tane sınır bölgelerindeki karbid tabakalarının devamlılığı, gerilme-kopma ömründe azalmaya yol açar [58].

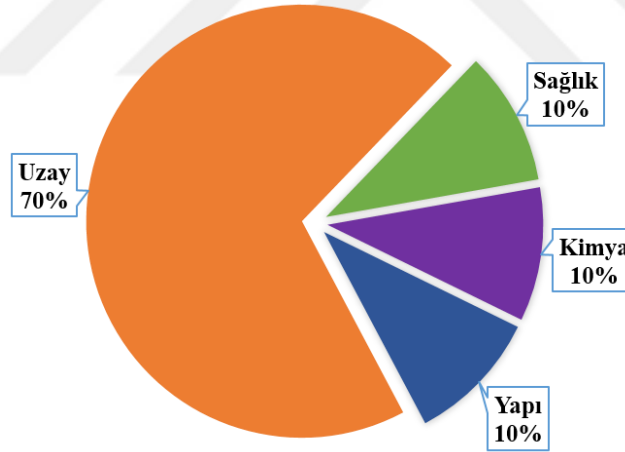
Süper alaşımlardaki karpit oluşumları MC, $M_{23}C_6$, M_6C ve Cr_7C_3 şeklinde kategorize edilebilir. Bu karpit oluşumlarındaki M içeriği sıklıkla titanyumdur. Ancak Mo, Nb, vanadyum (V), zirkonyum (Zr) ve Ta gibi elementler de eklenmiş olabilir. Cr_7C_3 içindeki

Cr bilindiği üzere kromdur. B ve Zr elementlerinin eklenmesiyle, nikel esaslı süper alaşımlarda tane sınırlarını mukavemetlendirerek, sürünme/kopma özelliklerini artırması beklenir. Ni esaslı süper alaşımlarda serbest elementlerin varlığının tespit edilmesi, süper alaşım içeriğinde bulunan özelliklerin tam olarak elde edilmesi için gerekliliktir. Bir kararsızlık durumunda ise bazı elementlerin bileşimde varlığı arzu edilen özelliklerde ciddi derecede düşüslere neden olabilmektedir [58].

3.4. Süper Alaşımların Uygulama Alanları

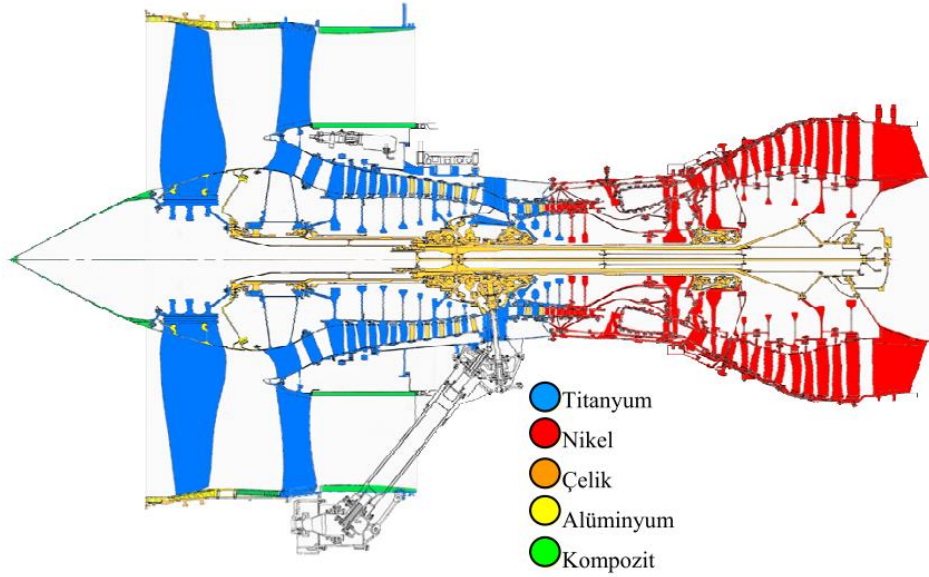
Süper alaşımlar; Ni, Fe-Ni, Cr, Ti ve Co esaslı alaşımlar olup, yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini ve metalürjik kararlılıklarını koruduklarından, son yıllarda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan malzeme grubu olarak bilinmektedirler [68].

Süper alaşım malzemeler, teknolojinin gelişmesiyle birlikte günümüzde 80'den fazla türde üretilmektedirler [26]. Şekil 3.3'te süper alaşım malzemelerin kullanıldığı alanlar yüzdelik dilim şeklinde verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, süper alaşım malzemeler uzay endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır [69].



Şekil 3.3. Süper alaşım malzemelerin kullanıldığı alanlar.

Süper alaşım malzemelerin gösterdiği en önemli özellikler, korozyon ve oksidasyon direncinin son derece yüksek olması, yüksek sıcaklık değerlerinde dahi kırılma ve sürünme direncinin yüksek olması şeklinde özetlemek mümkündür. Bundan dolayı, özellikle uçak motorlarında kullanılan bileşenlerin ağırlıkça % 50'si Ni esaslı süper alaşım malzemelerden üretilmektedir. Şekil 3.4'te Ni esaslı süper alaşım malzemelerin, uçak motorlarında kullanıldığı bölgeler gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Uçak motorlarında kullanılan malzemeler [58].

Süper alaşım malzemeler, göstermiş oldukları yüksek mukavemet ve yapısal kararlılık sayesinde yüksek çalışma sıcaklıklarının olduğu uygulamalarda sorunsuzca kullanılmaktadırlar. Buna ek olarak, yüksek korozyon dirençleri, yüksek sıcaklık dayanımları, düşük ısıl genleşme katsayıları, elektriksel dirençleri ve termal şok dirençleri gibi özellikler sebebiyle havacılık ve uzay endüstrisiyle, nükleer santrallerde ağırlıklı olarak süper alaşım malzemeler kullanılmaktadır.

3.5. Inconel X-750 Süper Alaşım Malzemesi

Inconel X-750, Al ve Ti ilavesiyle çökeltilmeyle sertleşebilen ve içeriğinde kayda değer miktarda Cr ve Fe içeren nikel esaslı bir süper alaşım malzemedir [70]. Ni esaslı süper alaşım malzeme grubunda yer alan Inconel X-750, roket motorları, gaz türbin ve jet motor kanatçıkları gibi değişken sıcaklıklar altında çalışabilmesi, yüksek korozyon ve oksidasyon dayanımı, yüksek kırılma tokluğu, 700 °C'ye kadar iyi mukavemet ve sürünme davranışı gibi özelliklerinden dolayı tercih edilen bir malzemedir. Ayrıca, Inconel X-750 yüksek sıcaklık bölgelerinde gevşemeden ve özelliklerini kaybetmeden çalışması istenen yay veya cıvata gibi makine elamanlarının imalatında uygun bir çözüm olmasını sağlayan üstün özellikler de göstermektedir. Inconel X-750, gaz türbinlerinin kritik bileşenlerinde, yüksek sıcaklık altında çalışan roket motorlarında, uçaklarda, pompa gibi yüksek basınç gerektiren uygulamalarda ve reaktörleri iç bileşenlerinde sıkça kullanılır [71]. Inconel X-750 süper alaşımının diğer malzeme isimleri 2.4669,

NiCr15Fe7TiAl, UNS N07750, Alloy X750 olup, kimyasal bileşimi Çizelge 3.4’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Inconel X-750 süper alaşım malzeme kimyasal bileşimi.

Bileşim Adı	Sembol	Alaşımındaki Miktarı (%)
Nikel	Ni	71,32
Krom	Cr	16,22
Demir	Fe	8,04
Titanyum	Ti	2,47
Niyobyum + Tantal	Nb + Ta	0,90
Alüminyum	Al	0,68
Mangan	Mn	0,21
Silisyum	Si	0,08
Karbon	C	0,04
Bakır	Cu	0,03
Kobalt	Co	0,01

Çizelge 3.5. Inconel X-750 süper alaşım malzeme mekanik özellikleri.

Erime Aralığı	1393-1427 °C
Young Modülü	207 GPa
Sertlik	35 HRC
Çekme Dayanımı	1517 MPa
% Uzama	30
Yoğunluk	8,28 g/cm ³

3.6. Süper Alaşım Malzemelerin İşlenebilirlik Özellikleri

Süper alaşımlar, yapısında Fe, Ni, Co, ilave olarak yüksek miktarlarda Cr ve az miktarda da yüksek sıcaklıkta ergiyen Mo, W, Al ve Ti içeren alaşım elementlerini barındırdığından işlenebilirlik açısından son derece zor malzemeler olarak bilinirler [67]. Burada asıl zorluk, nikel esaslı malzeme grubunun işlenebilirliğinin çok zor olması nedeniyle üretim maliyetlerin ciddi oranda artmasıdır. Ni esaslı malzemeler kullanılarak yapılan işlemlerde 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. Diğer Ni esaslı süper alaşım malzemelerde olduğu gibi, Inconel X-750’nin işlenmesi esnasında da mekanik ve termal yüklerin çok fazla olması nedeniyle, kesici takımlarda çok yüksek oranlarda aşınmalar meydana gelmektedir. Kesici takım aşınmasının hızlı olması nedeniyle de takım değişimi ihtiyacı çok kısa sürelerde yapılmaktadır. Takım değişim süreleri kısa tutulmazsa, takımda oluşan hızlı aşınmalar nihayetinde kırılmalara sebep olabilmekle birlikte, iş parçası ve takım tezgâhına da olası zararlar verebilmektedir [72].

4. FREZELEME

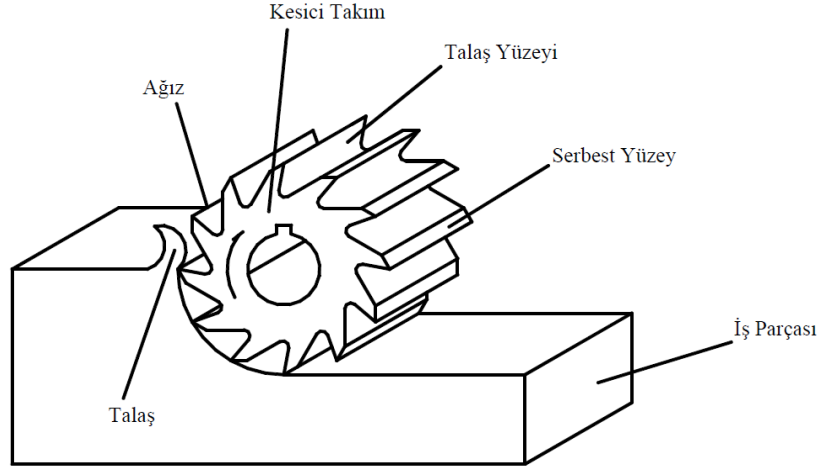
Frezelemede talaş kaldırma, kesici takım türüne ve işleme yönüne göre farklı şekilde adlandırılmaktadır.

Frezelemeyi dört ana başlık altında inceleyebiliriz.

- i. Silindirik vals kesici takım ile çevresel frezeleme
 - Aynı yönlü frezeleme
 - Zıt yönlü frezeleme
- ii. Takma uçlu alın kesici takımıyla düzlem yüzeylerin frezelenmesi
 - Simetrik frezeleme
 - Asimetrik frezeleme
- iii. Form ve biçim kesici takımla ile frezeleme
 - Modül freze çakısı ile frezeleme
 - Değişik geometrilere sahip iç bükey ve dış bükey yüzeylerin frezelenmesi
- iv. Saplı kesici takımla ile frezeleme
 - Parmak freze çakısı ile frezeleme
 - Küresel uçlu freze çakısı ile frezeleme [73].

4.1. Çevresel Frezeleme ile İşleme

Çevresel frezeleme, kesici takım etrafındaki uçların, dönme hareketiyle yaptığı talaş kaldırma işlemine denir. Talaşlar kıvrık, virgül formunda olmakla beraber talaş kesitinde sürekli değişimler gözlemlenebilmektedir [73]. Şekil 4.1'de çevresel frezeleme yöntemine ait şematik resim gösterilmektedir.



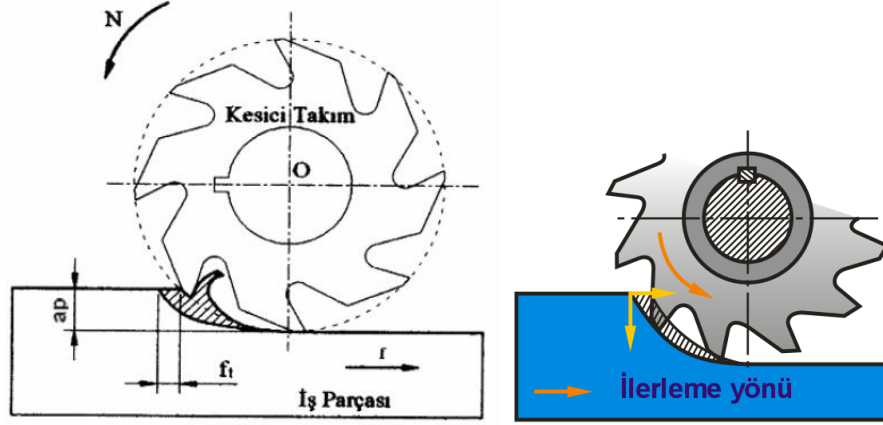
Şekil 4.1. Çevresel frezeleme [74].

Çevresel frezeleme aynı yönlü ve zıt yönlü olmak üzere iki başlık altında incelenebilir.

4.1.1. Aynı Yönlü Frezeleme

Freze tezgâhında, kesici takımın kesme yönüyle, tezgâh tablasının ilerleme yönü aynı yönde olduğu kesme işlemine aynı yönlü frezeleme adı verilir. Bu yöntemde ısı oluşumu ve deformasyon sertleşmesinin düşük mertebelerde kalmasıyla ezme etkisi oluşumu beklenmez. Kesme kuvveti, iş parçasını kesici takıma yaklaştırması neticesinde iş parçası/kesici takım arasında sürekli temas oluşturmaktadır [74].

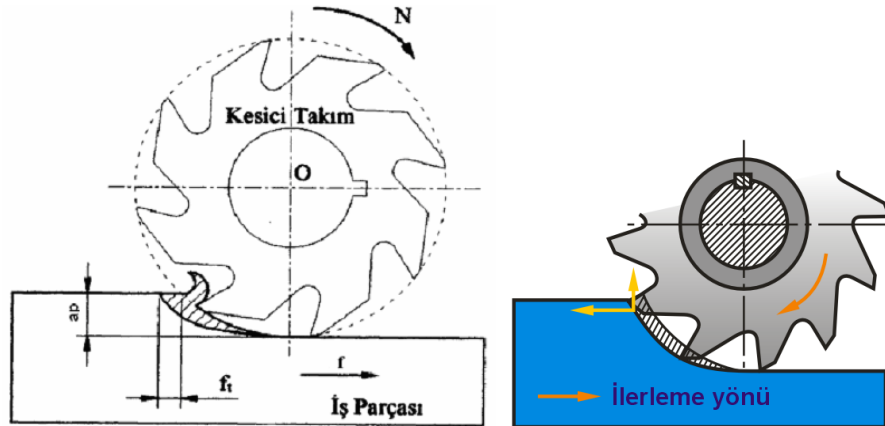
Aynı yönlü frezeleme zıt yönlü frezeleme yöntemine göre işleme maliyeti yönünden daha ekonomiktir [75]. Ancak aynı yönlü frezelemede kesici takım talaşı üstten kavradığından, tezgâh tablasına doğru kuvvet uygulamaya çalışacağından, boşluksuz tabla miline gereksinim duyulmaktadır. Bu yöntemde kesici takım, çok talaştan az talaşa doğru ilerlerken ilk önce bağlı olduğu mili esnetse de talaş azaldığında, dönen kesici takım pürüzsüz bir yüzeyin elde edilmesini sağlar. Şekil 4.2’de aynı yönlü frezelemeye ait şematik resim bulunmaktadır.



Şekil 4.2. Aynı yönlü frezelemenin şematik gösterimi [73].

4.1.2. Zıt Yönlü Frezeleme

Freze tezgâhında, kesici takımın kesme yönüyle, tezgâh tablasının ilerleme yönü zıt yönde olduğu kesme işlemine zıt yönlü frezeleme adı verilir. Kesici takım frezelemeye iş parçası tabanından başladığından, kavrama yolu üzerinde talaş kalınlığı ve kesme kuvvetleri aynı yönlü frezelemeye göre daha büyüktür. Zıt yönlü frezelemede bağlı bulunduğu iş tablası ile iş parçasını birbirinden ayırmaya çalışan kesme kuvvetleri daha büyük olduğundan, kesici takımda daha çok zorlanma meydana gelecektir. Bu yöntemde de oluşan talaş şekli aynı yönlüde olduğu gibi virgül formunda görülmektedir [75]. Şekil 4.3'te zıt yönlü frezelemeye ait şematik resim bulunmaktadır.



Şekil 4.3. Zıt yönlü frezelemenin şematik gösterimi [73].

Kesici takım ömrü, enerji tüketimi, iş parçasının tezgâh tablasına bağlanması gibi durumlar göz önüne alındığında; aynı yönlü ve zıt yönlü frezelemenin birbirine avantaj veya dezavantaj sağladığı bazı durumlar görülmektedir. Görülen bu avantaj ve

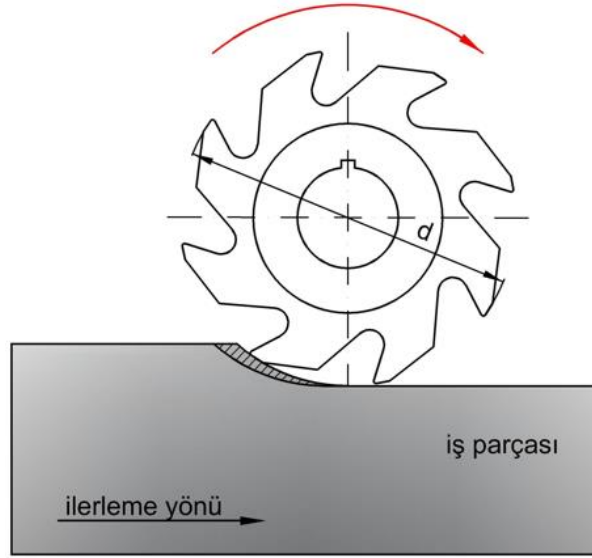
dezavantajları şu şekilde sıralamak mümkündür;

1. Zıt yönlü frezelemede kesme kuvveti bileşkesinin büyümesine neden olan kesme kuvveti ve iş parçası karşı koyma kuvvetinin zıt olma durumu, enerji tüketiminin de artmasına neden olabilmektedir.
2. Aynı yönlü frezelemede, kesici takım iş parçasını bağlı bulunduğu tablaya doğru bastırması, iş emniyeti açısından daha avantajlı olmasının yanında, titreşim seviyelerinin düşük mertebelerde olması, yüzey kalitesini de olumlu yönde etkileyecektir.
3. Özellikle sert kabuk tabakasına sahip malzemelerin frezelenmesi esnasında zıt yönlü frezeleme tercih edildiğinde, kesici takım ezerek kesme işlemi yapacağından, iş parçasındaki sert tabaka kesici takımın daha çabuk aşınmasına neden olabilmektedir.
4. Zıt yönlü frezeleme, kesme mekaniğinde elastik ve plastik deformasyonun da etkisiyle işlem sonrası yüzey pürüzlük değeri, aynı yönlü frezelemeye göre nispeten daha yüksek çıkmaktadır [76].

4.2. Frezelemede Kullanılan Temel Parametreler ve Genel Formüller

4.2.1. Kesme hızı

Kesme hızı (V_c), kesici takımın işleme esnasında metre cinsinden dakikada aldığı yol olarak tanımlanabilir. Kesme hızı değerleri, kesici takım malzeme cinsine, iş parçası malzeme türüne, işleme yöntemine, tezgâhın durumuna ve bağlama rijitliğine göre seçilir. Frezeleme esnasında işleme yönü, kesme kuvveti, talaş kesiti sürekli değişim gösterebilir. Şekil 4.4'te frezelemede talaş kaldırma işlemi gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Frezelemede talaş kaldırma işlemi.

Kesme hızı aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$V_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \quad (4.1)$$

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times d} \quad (4.2)$$

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

4.2.2. İlerleme

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

$$f_z = \frac{V_f}{n \times Z} \quad (4.3)$$

$$V_f = f_z \times n \times Z \quad (4.4)$$

f_z : Diş başına ilerleme (mm/dev)
Z : Kesici takımdaki kesici diş sayısı (adet)
V_f : Tabla ilerlemesi (mm/dak)

4.2.3. Frezelemede Kullanılan Diğer Genel Formüller

Frezelemede kullanılan genel formüller aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

Kesme gücü;

$$N_f = \frac{k_s \times a_p \times b \times V_f}{6120 \times 1000} \quad (4.5)$$

N_f : Kesme gücü (kW)
 k_s : Özgül kesme kuvveti (kg/mm^3)
 a_p : Eksenel kesme derinliği (mm)
 b : Talaş boyu (mm)

Motor gücü;

$$N_m = \frac{N_f}{\eta_G} \quad (4.6)$$

N_m : Motor gücü (kW)
 η_G : Dişli kutusu verimi

Talaş kaldırma oranı;

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{1000} \quad (4.7)$$

Q : Talaş kaldırma oranı (cm^3/dak)
 a_p : Eksenel kesme derinliği (mm)
 a_e : Radyal kesme derinliği (mm)

İşleme zamanı;

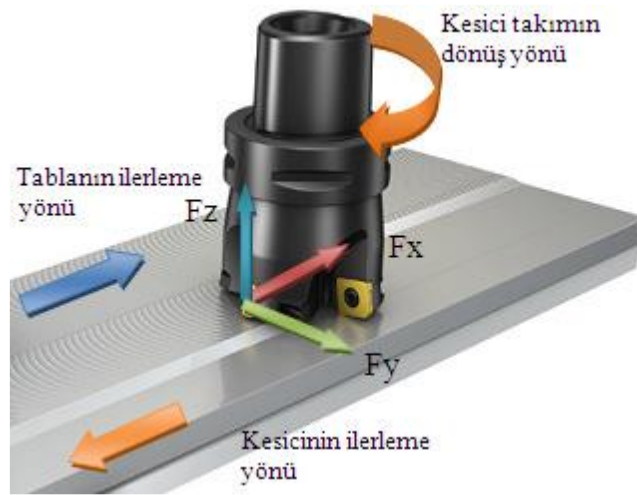
$$T = \frac{l_m}{V_f} \quad (4.8)$$

T : İşleme zamanı (dakika)
 l_m : Frezelenecek yüzey uzunluğu (mm)

4.3. Frezelemede Kesme Kuvveti

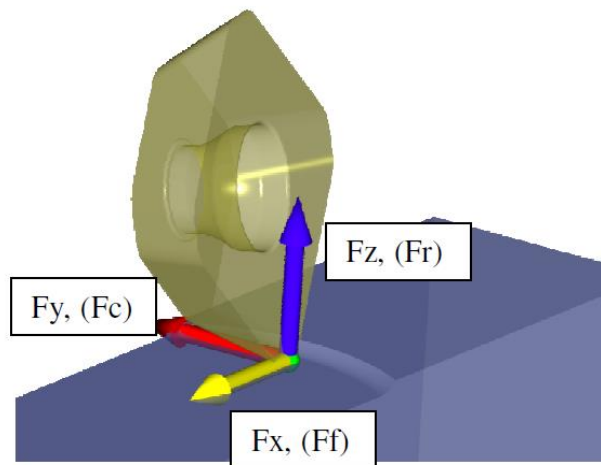
Metal işleme operasyonlarında (frezeleme, tornalama, delme, taşlama vb.) ürün kalitesinin iyileştirilmesi, işleme maliyetlerin azaltılması ve müşteri isteklerinin yerine getirilmesinde kesme kuvvetlerinin tespiti, analiz edilmesi ve kontrol altına alınması büyük bir öneme sahiptir [77], [78]. Frezeleme işleminde talaş kalınlığı ve devir

sayısındaki farklılıkla ortaya çıkan kesme kuvvetlerinde, geometrik olarak hem karışıklık hem de değişkenlik söz konusudur [79]. Kesme kuvvetleri; kesici takım tipi, geometrisi, frezeleme yöntemi, iş parçasının cinsi, talaş kalınlığı, kesme parametreleri vb. değişken faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Frezelemede, kesme bölgesindeki sıcaklık değişimi, talaş oluşum mekaniği ve kesici takımın durumu hakkında bilgi sahibi olmak için kesme kuvvet değişimleri gözlemlenebilir [80]. Kesme kuvvetleri; bileşke kesme kuvveti (F_r), teğetsel kesme kuvveti (F_c) ve ilerleme kesme kuvveti (F_f) olmak üzere üç başlık altında incelenebilir [81]. Frezelemede kesici takım, iş parçasının hareket yönü ve kuvvet yönleri Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5. Frezeleme işleminde kesme kuvveti yönleri [82].

Frezeleme işleminde, kesici uçta oluşan kesme kuvveti bileşenleri Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Frezelemede kesici uçtaki kesme kuvveti bileşenleri [82].

F_x (F_f); X ekseninde ölçülen kuvvet (N), ilerleme doğrultusunda,

F_y (F_c); Y ekseninde ölçülen teğetsel kuvvet (N), takım dönme yönüne zıt doğrultuda,

F_z (F_r); Z ekseninde ölçülen kuvvet (N), kesici takım dönme yönü doğrultusunda.

Frezeleme esnasında kesme kuvvetine etki eden faktörler aşağıdaki biçimde sıralanabilir;

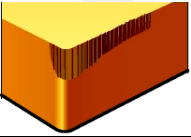
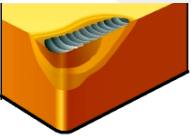
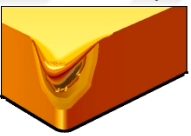
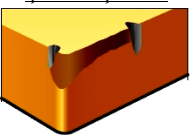
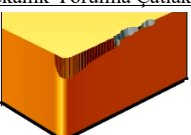

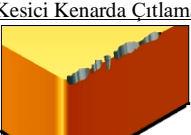
- Kesme parametreleri,
- Kesici takım tipi ve geometrisi,
- Kesici takımın frezeleme işlemine başlama yönü ve yanaşma açısı,
- Talaş kalınlığı,
- Kesici takımdaki aşınma mekanizmaları,
- Frezeleme yöntemi,
- İş parçası malzeme tipi,
- İş parçasının bağlanma şekli ve rijitliği.

4.4. Frezelemede Kesici Takım Aşınması

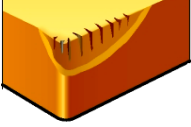
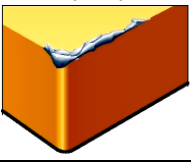
Talaş kaldırma operasyonları esnasında kesici takımlar aşınmakla beraber, bu aşınma kesici takım ömrünü tamamlayıncaya kadar devam eder. Aşınma, mekanik etkenler sonucunda küçük boyuttaki parçaların kesici takım yüzeyinden ayrılmasıyla oluşan istenmeyen yüzeysel deformasyonlar olarak tanımlanabilir. Kesici takımın ömrü belli bir süre sonunda işlevselliğini kaybetmesiyle açıklanabilir. Kesici takımlardaki aşınma süresi 15 dakika gibi kısa olabilmektedir [83]. Kesici takımda meydana gelen aşınmalar, genelde iş parçası ve kesici takımın sürtünmesiyle oluşan yüksek sıcaklık etkisinden kaynaklanmaktadır. Frezeleme esnasında sürtünme sonucu oluşan yüksek sıcaklık, kesici takımın aşınmaya karşı direncini azaltan, aşınma mekanizmalarını hızlandıran en önemli etmendir. Frezelemede diğer talaşlı imalat operasyonlarına göre (torna, delme vb.) iş parçasından dolu/boş şeklinde talaş kaldırdığından değişken mekanik ve termal şoklar takım aşınmasının daha da hızlanmasına yol açabilir. Kesici takım kenarı iş parçasına temas ettiğinde sıcaklık aniden yükselir, iş parçasından ayrıldığındaysa sıcaklık aniden düşer.

Adhesiv aşınma olarak bilinen yapışma aşınması düşük sıcaklıklarda oluşurken, yığıntı talaş oluşumu da gözlemlenebilir. Abrasif aşınmaya ise iş parçası içeriğindeki sert parçacıklar neden olmaktadır. Kesici takımın kimyasal yapısı ve kesici takım malzemesinin iş parçasına olan ilgisi, difüzyon aşınmasını belirler. Tüm bu aşınma mekanizmaları, talaş yüzeylerinde, kesici takım yan ve serbest yüzeyinde veya her üç yüzeyde de gelişebilir [84], [85]. Çizelge 4.1’de kesici takımda meydana gelen aşınma türleri, muhtemel aşınma nedenleri ve çözüm fikirleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kesici takımda meydana gelen aşınma türleri, nedenleri ve çözüm fikirleri [86].

Aşınma Türleri	Muhtemel Aşınma Nedenleri	Çözüm Fikirleri
<p><u>Yan (yanak) Yüzey Aşınması</u></p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Yüksek kesme hızı ➤ Aşınma direncinin yetersizliği ➤ İlerleme çok düşük ➤ Oksidasyon 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kesme hızının azaltılması ➤ Aşınma direnci yüksek kalitede bir kesici uç seçilmesi ➤ İlerlemenin artırılması
<p><u>Krater Aşınması</u></p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kesme sıcaklıklarındaki yükseklik nedeniyle talaş yüzeyindeki difüzyon aşınması 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alüminyum oksit (Al₂O₃) kaplı kesici uç seçilmesi ➤ Pozitif uç geometri kesici uç seçilmesi ➤ Uygun sıcaklık değerleri önce kesme hızının sonra ilerlemenin azaltılması
<p><u>Plastik Deformasyon</u></p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sıcaklık ve basıncın işleme esnasında yüksek olması 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pozitif açılı ve uygun geometri kesici uç seçilmesi ➤ Kesme hızının artırılması ➤ İlerlemenin azaltılması
<p><u>Çentik Aşınması</u></p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kesici ucun gevrek olması ➤ Kesici uç geometrisindeki zayıflık ➤ Yığıntı talaşın oluşması 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kesme hızının azaltılması ➤ Pozitif geometriye sahip bir uç seçilmesi ➤ Kesme hızını artırmak veya pozitif bir geometri seçmek ➤ Aşınma direnci yüksek kesici uç seçilmesi ➤ İlerlemenin azaltılması
<p><u>Mekanik Yorulma Çatlakları</u></p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kesici takımın kenarındaki yükte aşırı değişim ➤ Talaş kaldırma başlangıcında darbe ve titreşimler 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tokluğu yüksek kesici uç seçilmesi ➤ İlerlemenin azaltılması ➤ Kesici takımın giriş yönünün değiştirilmesi ➤ Rijitliğin artırılması
<p><u>Kırılma</u></p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Zayıf geometri kesici uç ➤ Kesici uç üzerinde aşırı yükler ➤ Kırılganlığı yüksek uç seçilmesi ➤ Kesici ucun kırılmalı kaliteli seçilmesi 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tokluğu yüksek kesici uç seçilmesi ➤ İlerlemenin ve kesme derinliğinin azaltılması ➤ Geometrisi güçlü kesici uç seçilmesi ➤ Rijitliğin artırılması
<p><u>Kesici Kenarda Çıtlama</u></p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kırılgan kaliteli kesici uç seçilmesi ➤ Kesici uç geometrisinin zayıf seçilmesi ➤ Yığıntı talaşın oluşması 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tokluğu yüksek kesici uç seçilmesi ➤ Geometrisi güçlü kesici uç seçilmesi ➤ Kesme hızının artırılması ➤ Talaş kaldırma başlangıcında ilerlemenin azaltılması ➤ Rijitliğin artırılması

Çizelge 4.1 (devam). Kesici takımda meydana gelen aşınma türleri, nedenleri ve çözüm fikirleri [86].

<p>Termal Çatlaklar</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ İşleme şartlarının sürekli olmaması ➤ Soğutma sıvılarının değişkenliği 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tokluğu yüksek kesici uç seçilmesi ➤ Sürekli ve bol soğutma uygulaması veya hiç uygulanmaması ➤ Kesme hızının artırılması ➤ İlerlemenin azaltılması
<p>Yığıntı Talaş Oluşumu (BUE)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sünekliği yüksek iş parçası malzemesinin kesici uca yığılarak kaynaklanması ➤ Kesme hızının düşük olması ➤ İlerlemenin düşük olması 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Uygun geometri kesici uç seçilmesi ➤ Pozitif geometriye sahip bir uç seçilmesi ➤ Kesme hızının artırılması ➤ İlerlemenin artırılması

4.5. Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğü

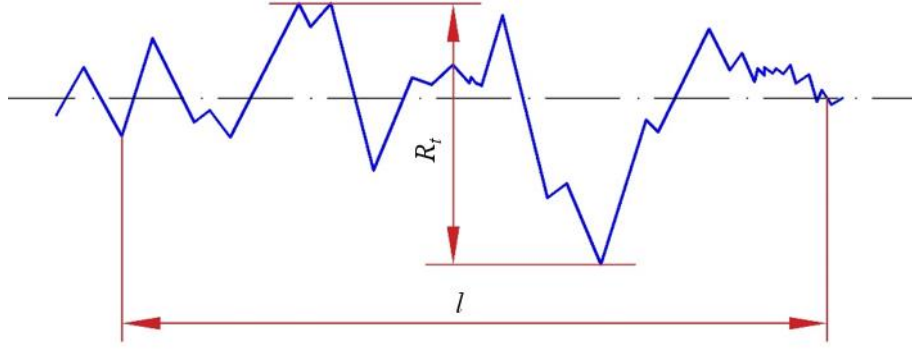
Yüzey kalitesi, ölçülen yüzey pürüzlülük değeriyle doğrudan ilişkilidir. Teknolojik gelişmelerin artışıyla iş parçası yüzey kalitesi de önem kazanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü işlenen yüzeylerin kalite karakteristiği olmakla beraber, imalat yöntemleriyle işlenen yüzeylerin küçük aralıklardaki düzensizlikler olarak da tanımlanmaktadır [79]. Frezelemede özellikle kesikli işleme ile iş parçasından talaş kaldırıldığından, takım geometrisinin, kesme parametrelerinin (kesme derinliği, frezeleme yöntemi, kesme hızı, ilerleme vb.) ve soğutma yöntemlerinin ideal seviyede seçilmesi son derece büyük önem arz etmektedir. Kesici takım BUE oluşumu, tezgâh kaynaklı titreşim, kesici takım ve iş parçasının rijit bağlanması gibi değişkenler kontrol altına alınırsa ideal yüzey pürüzlülüğüne ulaşılması mümkündür. İşlenen yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin tespiti, yüzey kalitesi ve ölçümü uluslararası standartlarda belirlenmiştir [79].

4.5.1. Yüzey Pürüzlülük Tanımlamaları

Yüzey pürüzlülük, genel olarak yüzey pürüzlülüğünün en büyük değeri (R_t), aritmetik ortalaması (R_a), karesel ortalamanın karekökü (R_q veya RMS), beş en yüksek beş en çukur noktanın ortalaması (R_z) olmak üzere dört farklı şekilde değerlendirilebilir.

4.5.1.1. Yüzey Pürüzlülük En Büyük Değeri (R_t)

Yüzey pürüzlülük en büyük değeri, ölçülen yüzey pürüzlülük uzunluğunda (l boyunda) ortalama profil çizgisinin üstünde kalan en büyük tepe noktasıyla, ortalama profil çizgisinin altında kalan en düşük dip nokta arasındaki mesafe olarak tanımlanabilir [87]. Yüzey pürüzlülük en büyük değeri ölçülen uzunluktaki azami pürüzlülük derecesi olarak da adlandırılmakla beraber, R_t sembolü ile de gösterilir (Şekil 4.7).

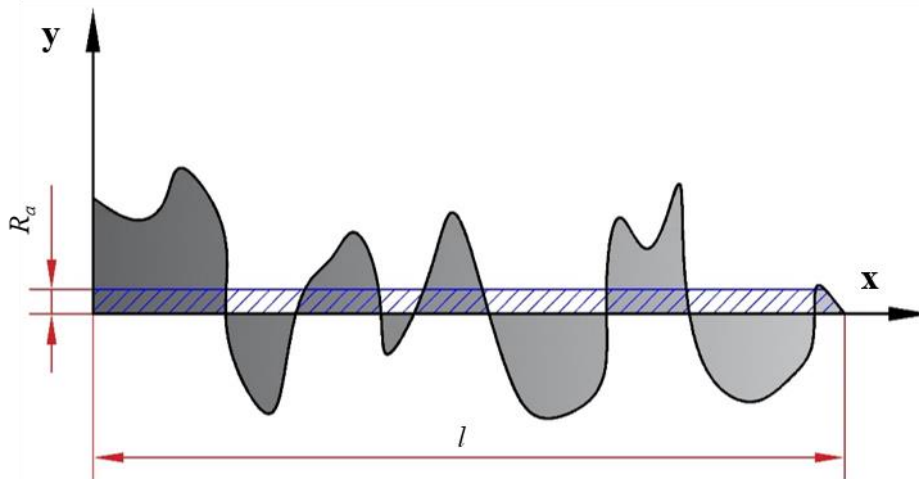


Şekil 4.7. Yüzey pürüzlülük en büyük değeri R_t .

4.5.1.2. Yüzey Pürüzlülük Aritmetik Ortalaması (R_a)

Yüzey pürüzlülük aritmetik ortalaması, pürüzlülük kriteri olarak kabul edilir. Etken profilden ortalama profil çizgisine olan $y_1, y_2 \dots y_n$ değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır (Şekil 4.8). Ortalama profil çizgisinin altında kalan ölçümlerin mutlak değeri alınır. İş parçası imalat resimlerinde yüzey pürüzlülük değeri olarak genelde R_a kullanılmaktadır. Pratikte $R_a = (0,16\sim 0,25) \times R_t$ şeklinde hesaplanabilir. Örnekleme uzunluğu standartlarda verildiği üzere 0,08-2,5-8 ve 25 mm olarak tercih edilebilir. Yüzey pürüzlülük aritmetik ortalama değeri R_a aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade edilebilir.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (4.9)$$



Şekil 4.8. Yüzey pürüzlülük ortalama değeri R_a .

4.5.1.3. Karesel Ortalamanın Pürüzlülük Karekök Değeri (R_q)

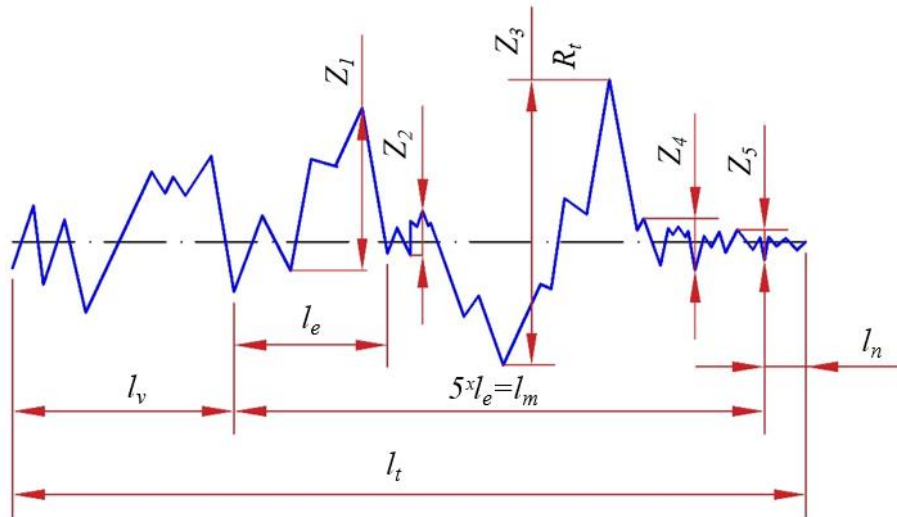
Yüzey pürüzlülük profili “y” koordinatlarının ikinci derece ortalama değerinin karekökü olarak tanımlanır. Yüzey pürüzlülük karesel ortalamasının karekökü ölçülen uzunlukta dağılmış tepe ve çukurlardaki standart sapmayı ifade etmekle beraber R_q sembolü ile de gösterilir. R_q aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade edilebilir.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (4.10)$$

4.5.1.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülük Yüksekliği (R_z)

Ortalama profil çizgisine paralel ve profile kesişmeyen, yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek beş tepe ve en düşük beş çukur noktaları arasındaki ortalama uzaklık olarak ifade edilmekle beraber (Şekil 4.9), R_z sembolü ile de gösterilir. R_z aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade edilebilir.

$$R_z = \frac{1}{5} (z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5) \quad (4.11)$$



Şekil 4.9. Ortalama yüzey pürüzlülük yüksekliği R_z .

4.5.2. Yüzey Pürüzlülük Birimi ve Kalite Derecesi

DIN/ISO 4287 uluslararası standartlarına göre, yüzey pürüzlülük birimi mikron metre (μm) veya mikron inç ($\mu\text{inç}$) olmakla birlikte literatürde en fazla μm şeklinde kullanılmaktadır. İş parçasının işlenmiş yüzeyindeki ortalama yüzey pürüzlülük değeri

- Talaş akışından kaynaklanan bozulmalar,
- Uygun kesme hızı ve ilerleme seçilmemesinden kaynaklanan düzensizlikler,
- Değişken talaş derinliği,
- Kesici takımın ve iş parçasının soğutma/yağlama koşulları,
- İş parçasının kimyasal bileşimi ve metalürjik yapısı,
- Kesici takım geometrisi ve bağlama şekli,
- Takım tezgâhının tipi, rijitliği ve çalışma koşulları,
- Doğru kalıp ve bağlama aparatlarının seçimi [75].

4.5.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Yöntemleri

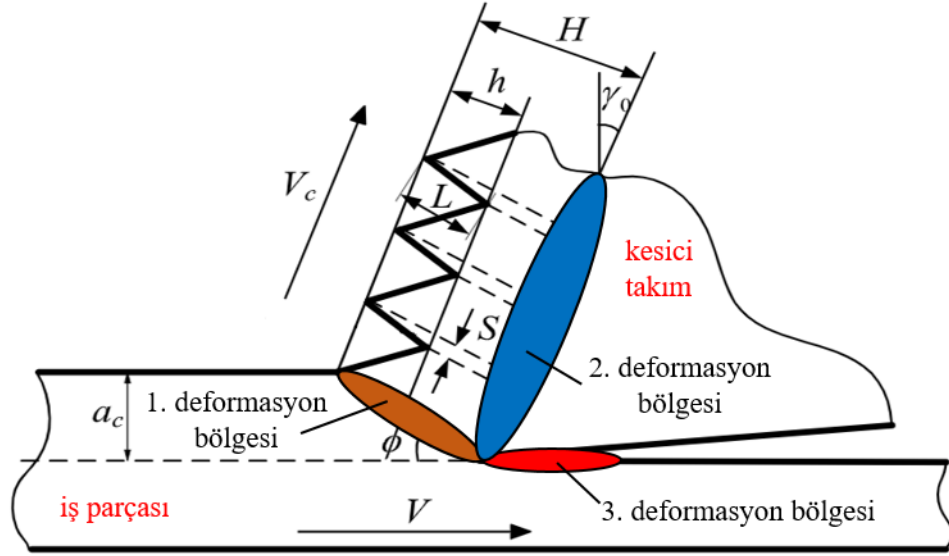
Yüzey pürüzlülüğünün doğru biçimde ölçülmesi hem maliyet hem de işleme zamanından tasarruf sağlanmasında önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey pürüzlülük ölçüm yöntemleri iş parçasının geometrisine, işlenen yüzeyin genel durumuna ve uygulanan işleme yöntemine göre farklılık gösterebilir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde,

- Dokunarak ölçme yöntemi,
- Mekanik çalışmayla ölçme yöntemi,
- Hidrolik yöntem,
- Pnömatik yöntem,
- Yüzey dinamometresi yöntemi,
- Kapasitans yöntemi,
- X ışını (X-Ray) yöntemi,
- Elektron mikroskobu (SEM/TEM) yöntemi,
- Optik mikroskop yöntemi,
- Kesit alma yöntemi,
- Karşılaştırmalı mikroskop yöntemi,
- Optik profilometre yöntemi,
- Optik parazit yöntemi,

- Işık yansımaları yöntemi,
- Replika (maske) yöntemi,
- Standart örnek yüzey yöntemi,
- Işık bant mikroskop yöntemi,
- Elektro fiber optik yöntemi
- İnterferans mikroskop yöntemi,
- Kisilev profilometre yöntemi,
- Yaylı profilometre yöntemi,
- Elektrikli profilometre yöntemi,
- Leving profilografi yöntemi,
- Linnik ikili mikroskop yöntemi,
- Hava master yöntemi,
- Fotoğraflama yöntemi,
- Görsel komparatör yöntemi,
- Çok sayıdaki yükseltinin masterla okunma yöntemi,
- Kaydetme özellikli indikatör yöntemi,
- İzleyici uç yöntemi kullanılabilir.

4.6. Frezelemede Kesme Sıcaklığı

Talaş kaldırma işlemlerinde, kesici takım/iş parçası ve kesici takım/talaş ara yüzeyinde sürtünme kaynaklı yüksek sıcaklıklar meydana gelmektedir. Oluşan bu sıcaklıklar, iş parçasından talaşın ayrılması için gerekli plastik deformasyona yardımcı olmaktadır. Ancak sıcaklığın daha da artması kesici takım aşınmasını hızlandırabilmektedir. Talaş kaldırma işlemlerinde olduğu gibi frezelemede de harcanan güç, kesici takımın uç bölgesine yakın bir yerde büyük oranda ısıya dönüşür. Oluşan bu ısının bir kısmı talaşla birlikte kesme bölgesinden uzaklaştırılırken, bir kısmı iş parçası çekirdeğine doğru nüfuz etmekte, diğer bir kısmı ise kesici takıma geçmektedir. Isı üretim kapasitesine göre kesme bölgesinde ısı oluşturan üç bölge bulunmaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Kesme bölgesinde ısı oluşumu [89].

Şekil 4.11’de yer alan deformasyon bölgelerine bakılırsa;

1. deformasyon bölgesi/kayma düzlemi; bu bölgede ısı kaynağının önemli kısmı plastik deformasyonla oluşur ve ısının çoğu talaşla uzaklaştırılır.
2. deformasyon bölgesi/kesici takım-talaş ara yüzeyi; bu bölgede ilave plastik deformasyonun oluşmasıyla kayma hareketinden kaynaklı ısı oluşumları etkindir.
3. deformasyon bölgesi/kesici takım yan yüzeyi; bu bölgede iş parçası ve kesici takımın sürtünmesi sonucunda ısı oluşur. Oluşan bu sürtünme özellikle kesici takım yan yüzeyinin aşınmasıyla da artış gösterir [90].

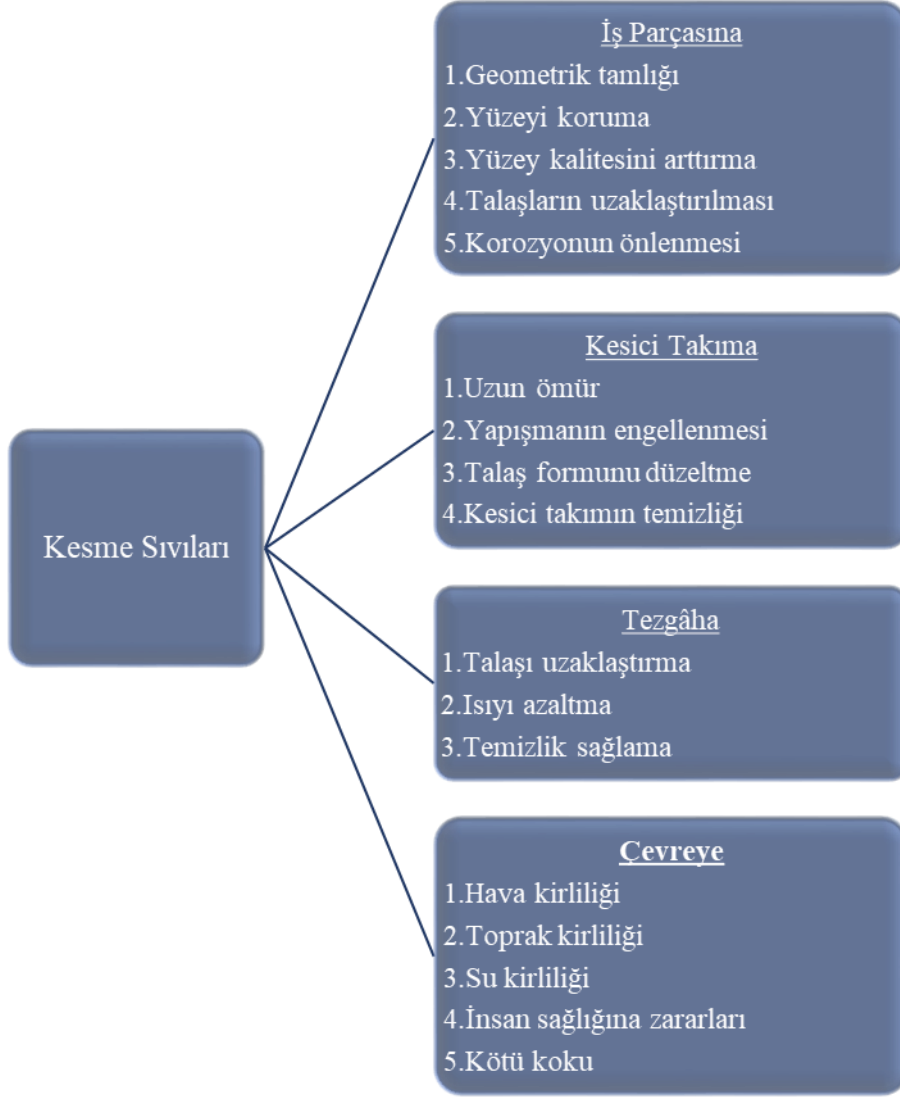
Kesme bölgesinde oluşan ısı, kesici takım aşınmasını ve ömrünü doğrudan etkiler. Kesme hızı, kesme sıcaklığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan, kesme hızı parametresinin artışı talaş kaldırma işlemlerinde sınırlandırılmalıdır. Talaş kaldırma işlemlerinde deformasyon ve sürtünme, kesme hızının artmasıyla artış gösterdiğinden, ısı oluşumunu da artırır. Bir başka tanımla kesme hızındaki artış, kesme bölgesindeki sıcaklığın da artmasına neden olmaktadır, şeklinde ifade edilebilir [91]. Kesme bölgesindeki sıcaklığın aşırı artışı, kesici takım ömrünü de olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Kesme bölgesindeki sıcaklık oluşumu, kesici takım/talaş arasındaki temas, iş parçası/kesici takım arasındaki sürtünmeye ve kesme kuvvetlerinin büyüklüğüne bağlıdır. Düşük kesme hızları iş parçasına aktarılan ısıyı ve dolayısıyla sıcaklığı da artırabilmektedir. Yüksek kesme hızlarıyla işlemede ortaya çıkan enerji, talaşla uzaklaştırıldığından, kesici takım ve iş parçası üzerine ısının az iletilmesi sağlanır.

5. METAL İŞLEMEDE SOĞUTMA/YAĞLAMA

Taylor 1894 yılında, yüksek hız çeliğini (HSS) işlerken kesme bölgesine uyguladığı su sayesinde, takım ömründe herhangi bir azalma olmadan kesme hızını % 33 oranında artırdığını bildirmiş ve literatüre soğutmanın kullanıldığı ilk çalışma olarak geçmiştir [92]. Ancak soğutma için su iyi bir alternatif olsa da iş parçası ve işleme tezgâhında yol açtığı korozyon nedeniyle ciddi sorunlar oluşturabilmektedir. Geliştirilen teknikler ve yeni formüllerle kesme sıvıları iyi bir soğutucu olmasının yanı sıra hem iyi bir yağlama sağlamış, hem kesme kuvvetlerini ciddi azaltmış, hem de yüzey kalitesini iyileştirerek harcanan gücü de minimize etmiştir [93]. Kesme sıvıları, metal işlemede neredeyse 200 yıldır kullanılmaktadır [93]. Günümüzde kesme sıvılarının metal işlemede kullanımı ciddi bir ticari sektör haline gelmiştir. Yapılan işleme türüne göre kesme sıvılarının fonksiyonları soğutma veya yağlama ihtiyacının her ikisini de karşılayabilmektedir. Kesme sıvılarının verimliliği işleme türüne, kesme parametrelerine ve uygulanma şekline göre değişkenlik göstermektedir [94].

Kesme sıvıları işleme esnasında iş parçası ve kesici takım arasında hem soğutma hem de yağlama sağlamaktadır. Hatta kesme sıvıları, yüksek kesme hızlarında ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklar altında bile soğutma ve yağlama etkinliği yüksek olacak şekilde üretilirler. Kesme sıvılarının soğutma ve yağlama dışında kesme bölgesinden talaşların uzaklaştırılması gibi fonksiyonları da bulunmaktadır [95]. Kesme sıvıları genel olarak değerlendirildiğinde, kesici takım ömrünü artırma, takım aşınmalarını minimize etme, işleme verimliliğini artırma, talaşları kesme bölgesinden uzaklaştırma gibi temel fonksiyonları vardır. Kesme sıvılarının, kesici takım, işleme tezgâhı, çevre ve iş parçası üzerine etkileri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Metal işlemede kullanılan kesme sıvılarının etkileri [96].



Kesme sıvılarının uygulanması sonrasında yüzeylerde oluşan film tabakası, yağlayıcılık etkisi sayesinde tezgâh güç tüketimi azaltarak, kesme bölgesinde oluşan gerilimi de düşürmektedir. Kesme sıvılarının yüzeylere tutunarak oluşturduğu tribo film tabakası sayesinde ise sürtünme azaltılmakta ve işleme verimliliğinde artış sağlanmaktadır [97].

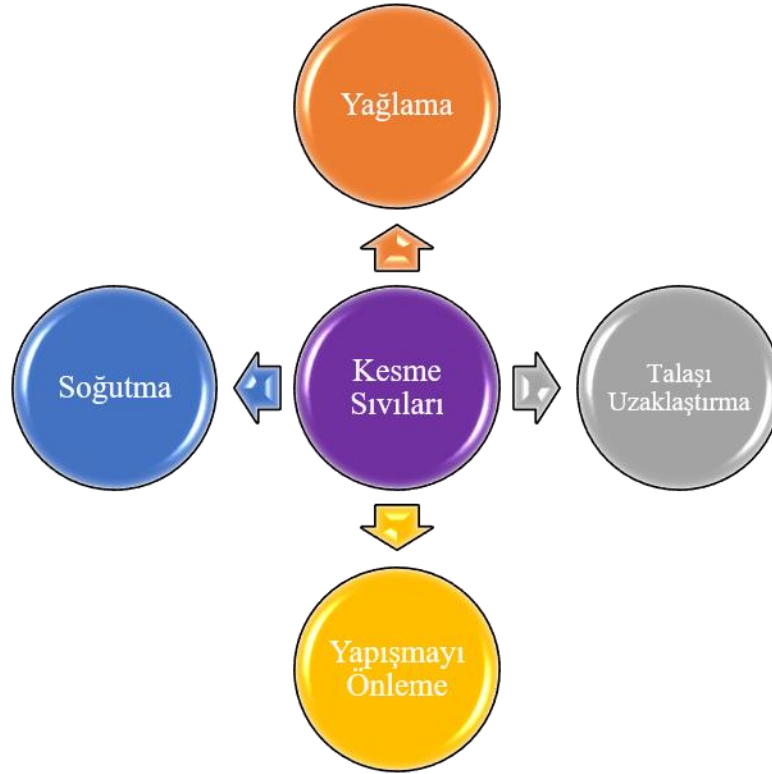
Metal işlemede kullanılan kesme sıvılarından istenen bazı özellikler;

- Kesme bölgesinde etkin soğutma ve yağlama,
- Uzun raf ömrü,
- Korozif olmamaları,
- Çevreci olmaları,

- İşleme tezgâhına zarar vermemeleri,
- Köpürmeye yol açmamaları,
- Parlama noktasının yüksek olması,
- Tribo film tabakasının iyi bir şekilde sağlanması, şeklinde sıralanabilir.

5.1. Metal İşlemede Kullanılan Soğutma/Yağlama Yöntemleri

Dünya genelinde metal işleme endüstrisinde kullanılan kesme sıvılarının tamamına yakını petrol esaslı olmakla beraber, tüm üretim maliyetlerinin ise % 10~17'sini oluşturmaktadırlar. Metal işleme sıvılarından beklenen bazı fonksiyonlar Şekil 5.1'de verilmiştir.

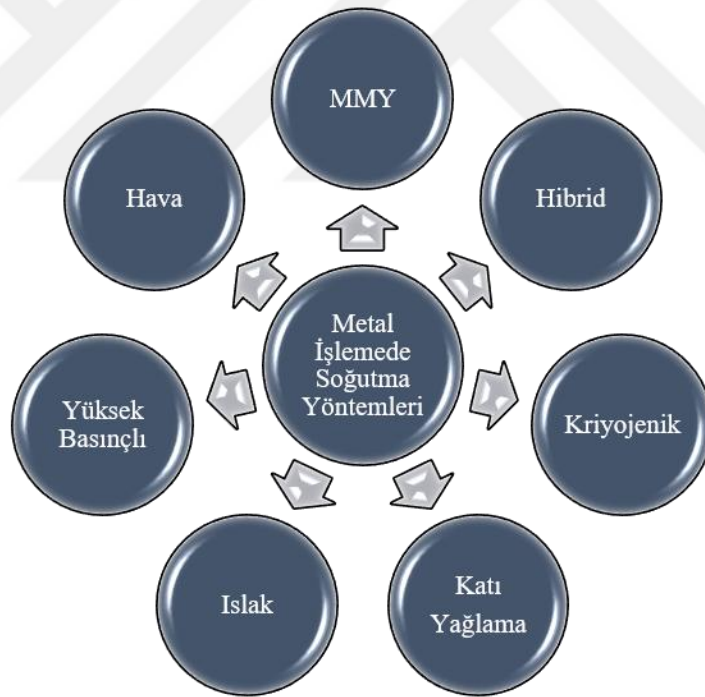


Şekil 5.1. Metal işleme sıvılarından arzu edilen fonksiyonlar.

Kesme bölgesinde, sürtünme kaynaklı yüksek sıcaklıklar oluşmakta ve bu da işleme performansını, kesici takım ömrünü olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Yüksek sıcaklıkların kontrol altına alınmasında kesme sıvılarının soğutma fonksiyonunun iyi olması bir gerekliliktir [79]. Kesme sıvılarının bir diğer fonksiyonu olan yağlayıcılık, kesici takım-iş parçası-talaş ara yüzeylerine nüfuz eden tribo film tabakası oluşmasına,

sürtünmenin azaltılmasına, kesme sıcaklıklarının düşürülmesine yardımcı olur [98]. Kesme bölgesinde biriken talaşlar doğrudan iş parçası yüzey kalitesini etkileyebilmektedir. Kesme sıvılarının talaşları kesme bölgesinden uzaklaştırma fonksiyonu sayesinde oluşabilecek deformatik çizikler nispeten engellenerek yüzeyler korunabilmektedir [99]. Kesme sıvılarının soğutma, yağlama ve talaşın uzaklaştırılması fonksiyonları etkin olsa da kesme bölgesinde kesici takım-iş parçası-talaş teması sonucu sürtünme sonucu ısılar oluşabilmektedir. Kesme bölgesindeki bu temas yüzünden ısının da yardımıyla kesici takım veya iş parçası yüzeylerine talaşlar yapışabilmektedir. Kesme sıvılarının içeriğine katılan sülfür, klorür gibi kimyasal ajanlar sayesinde kesme bölgesi daha da kayganlaşarak, olası yapışma durumları minimize edilmiş olur [100].

Metal işlemede sıklıkla kullanılan soğutma/yağlama yöntemleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Son yıllarda özellikle malzeme teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte süper alaşım gibi işlenebilirliği zor olarak bilinen malzemelerin, endüstriyel uygulamalarda kullanım oranını da artırmıştır.



Şekil 5.2. Metal işlemede kullanılan soğutma/yağlama yöntemleri [101].

Metal işlemede kullanılan konvansiyonel ıslak soğutma/yağlama yönteminin toksik olma, çevreye verdiği zararlar, işleme performansının yetersiz gelmesi gibi dezavantajları yüzünden sürdürülebilir soğutma/yağlama yöntemlerinin geliştirilme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

Sürdürülebilirlik kavramı, esasen ekolojik sistemlerin fonksiyonlarını, süreçlerini ve üretkenliğini gelecekte de devam ettirebilme yetisi olarak tarif edilmektedir [102]. Bu noktadan hareketle sürdürülebilir imalat için soğutma stratejilerinin geliştirilmesi bir gereklilik haline gelmiştir.

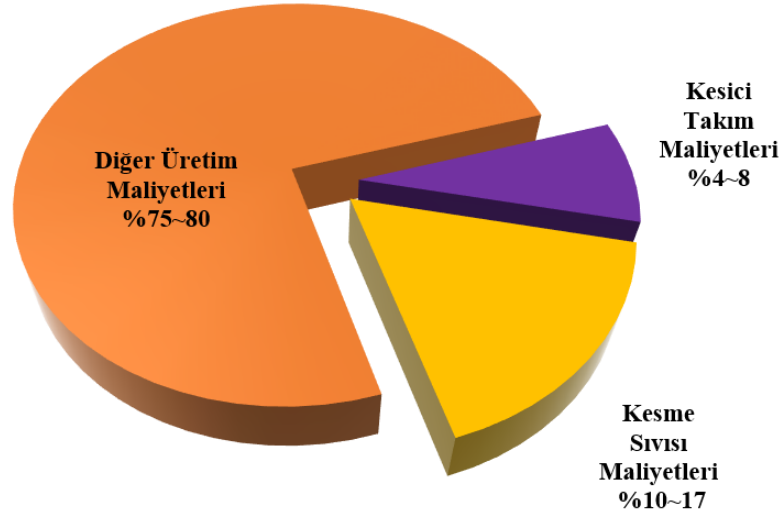
5.2. Sürdürülebilir Soğutma Yağlama Yöntemleri

Son zamanlarda yapılan araştırmalar sonucunda metal işleme sektöründe kesme sıvılarına maruz kalan çalışanların % 80'i enfeksiyon kaptığı bildirilmiştir [103]. Kesme sıvısı karışımlarında kullanılan ham maddeler tek başlarına her ne kadar güvenli olsa da karıştırıldıktan sonra alerjen veya tahriş edici gibi dezavantajlar oluşmaktadır. Dünya genelinde metal işleme sıvılarının tamamına yakını petrol esaslı olmakla beraber, toksik olmaları ve biyolojik olarak parçalanamamaları nedeniyle akciğer kanserine, solunum yolu rahatsızlıklarına, dermatolojik ve genetik rahatsızlıklara neden olabilmektedirler [104]. Kesme sıvısı kullanımını kısıtlayan en bilindik yöntem kuru kesme koşulları olarak karşımıza çıkmaktadır. Kuru kesme işleminde herhangi bir soğutma sıvısı kullanılmamakta olup, çevre kirliliği oluşturmayan, kullanıcı dostu bir yöntemdir. Ancak talaşlı imalatta kesme bölgesinde oluşan ısının ortamdaki uzaklaştırılması, kuru kesme koşullarında yeterli olmadığından, özellikle kesici takımın aşırı ısınmasına yol açmaktadır. Oluşan bu yüksek ısı ise kesici takımda, abrasyon, difüzyon ve oksidasyon aşınma sürecinin hızla gelişimine neden olmaktadır [105]. Kesme sıvısının minimum miktarda kullanıldığı ve yarı kuru işleme olarak adlandırılan yöntem sayesinde soğutma/yağlama kuru işleme koşullarına göre daha verimli olmaktadır.

5.2.1. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi

Kesme sıvıları tribo film tabakası oluşturarak, kesici takım-talaş-ış parçası ara yüzeylerinde yağlama işleminin yanı sıra soğutma işlemi yaparak, termal kaynaklı oluşabilecek aşınmaları ve mekanik arızaları minimize ederken kesici takım ömrünü uzatmada etkin bir rol oynar. İşleme verimliliği açısından değerlendirildiğinde hem kesme kuvvetlerini azaltması hem kesici takım ömrünü uzatması hem de yüzey kalitesini artırması nedeniyle kesme sıvılarının kullanımı tercih edilmektedir. Dünyada kesme sıvılarının ticareti ciddi bir pazar haline gelmiştir. Şekil 5.3'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 5.3. Genel üretim maliyetleri [106].

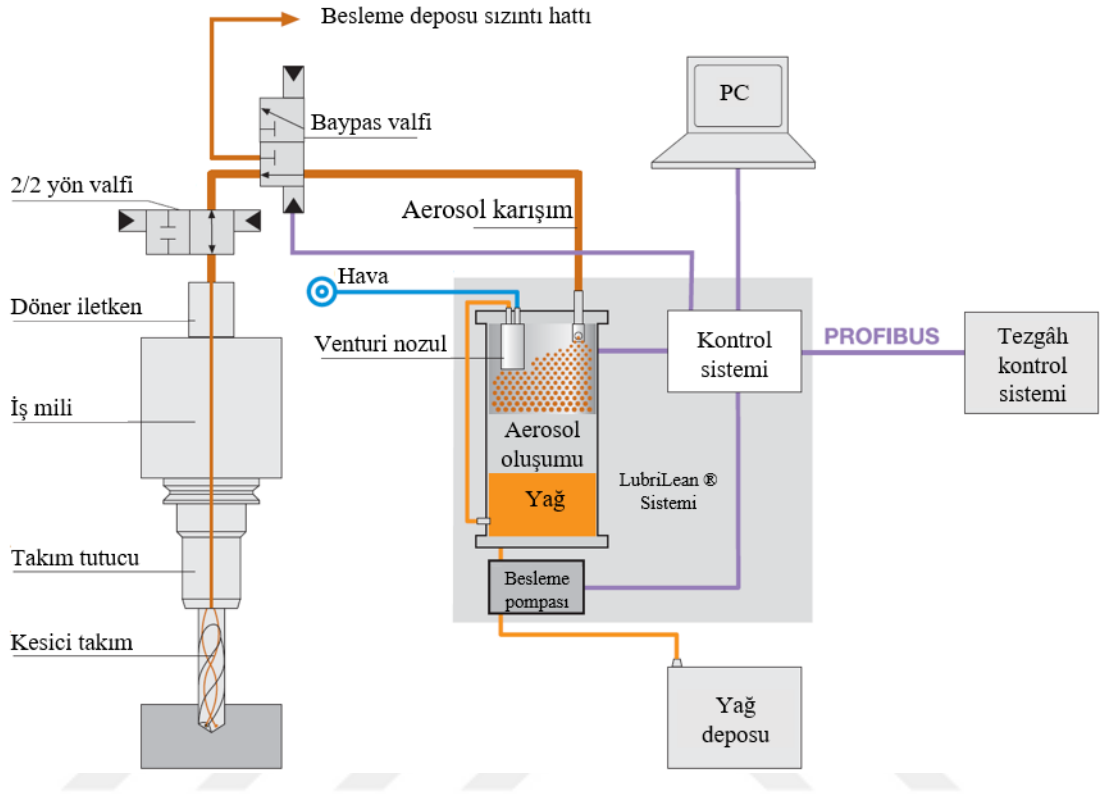
Metal işleme sektöründe toplam üretim maliyetlerinde ciddi paya sahip olan kesme sıvılarının kullanımının azaltılması hem ekolojik hem de çalışan sağlığı kaygıları yüzünden bir gerekliliktir. Minimum miktarda yağlama (MMY), kesme sıvılarının kullanımı azaltan ciddi bir alternatif yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. MMY aynı zamanda yarı kuru işleme olarak adlandırılmakla beraber, çok düşük miktarlarda yağın (20 mL/saat), kesme bölgesinde nozul vasıtasıyla, aerosol sis buharı şeklinde basınçla gönderilmesi esasına dayanır.

MMY, 1996 yılında, Hewson ve Gerow adlı araştırmacılar tarafından literatüre kazandırılmıştır [107]. MMY yöntemi, son yıllarda araştırmacılar ve sanayi kuruluşları tarafından bilinen ve üzerinde araştırmaların yapıldığı bir konu haline gelmiştir [108]. MMY yöntemini kullanan Ford Motor firması, yayınladığı raporda üretim maliyetlerini yaklaşık % 13 oranında azalttığını bildirmiştir [106]. MMY, delme, tormalama ve frezeleme gibi talaş kaldırma işlemlerinde kullanılmakla beraber kuru ve ıslak işleme kesme koşullarını birleştirerek avantajlarını içerisinde bulunduran bir yöntemdir. Bu yöntemle üretim maliyetleri hem minimize edilmekte hem de insan sağlığı için arzu edilen beklentileri karşılamaktadır [109]. MMY yönteminde basınçlı yağ karışımı kesme bölgesine kesici takım içinden veya nozul vasıtasıyla dışından olmak üzere iki farklı şekilde tatbik edilmektedir [79].

5.2.1.1. Kesici Takım İçinden Uygulanan MMY Yöntemi

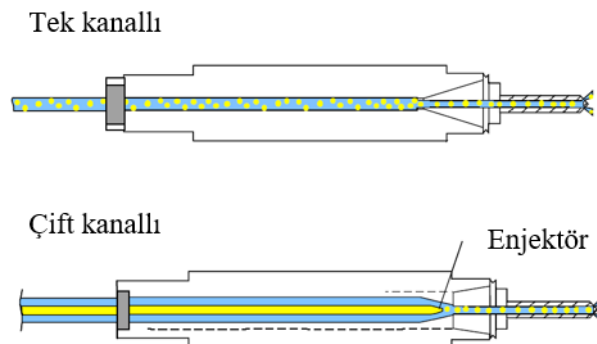
Bu yöntemde soğutmayı kompresörden gelen basınçlı hava, yağlamayı ise MMY sistemi

içerisindeki yağ zerrecikleri sağlamaktadır. Karışan hava-yağ MMY sisteminden uygun kanallar vasıtasıyla, kesici takım içerisinden kesme bölgesine ulaşır [110]. Şekil 5.4'te kesici takım içinden uygulanan MMY yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Kesici takım içinden uygulanan MMY yöntemi.

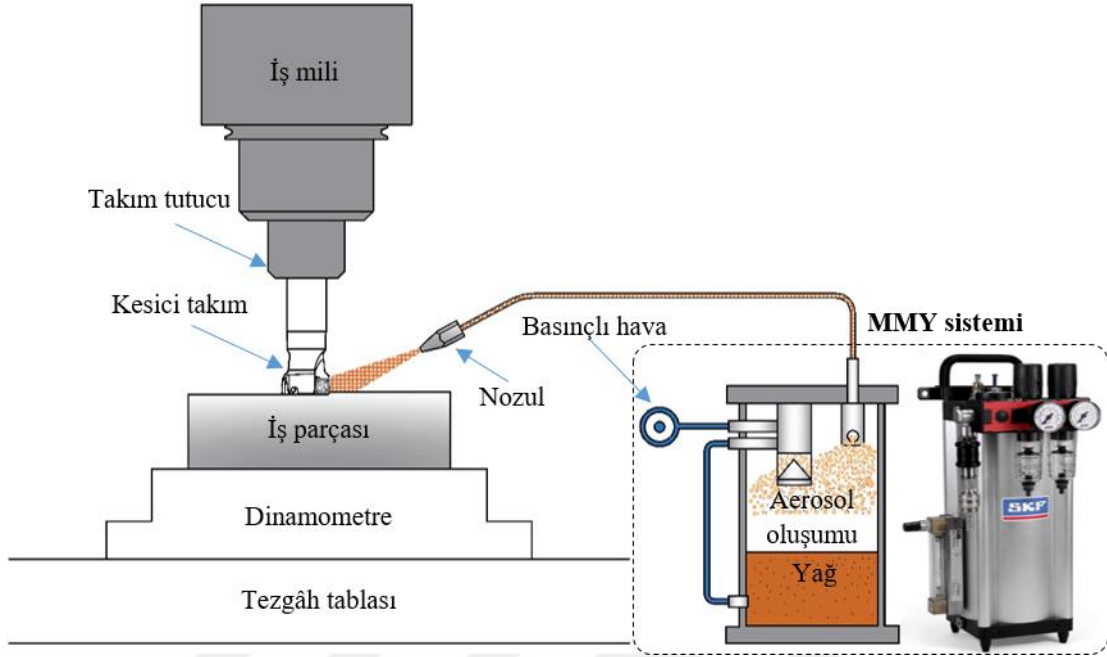
Kesici takım içinden uygulanan MMY, tek ve çift kanallı olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir (Şekil 5.5). Tek kanallı uygulamalarda, yağ ve hava önceden hazırlanıp karışım sağlandıktan sonra kesme bölgesine gönderilir. Çift kanallı uygulamalarda ise yağ ve hava ayrı kanallardan gönderilip kesici takım içinde karışım sağlandıktan sonra kesme bölgesine gönderilir.



Şekil 5.5. İçten MMY uygulama kanalları.

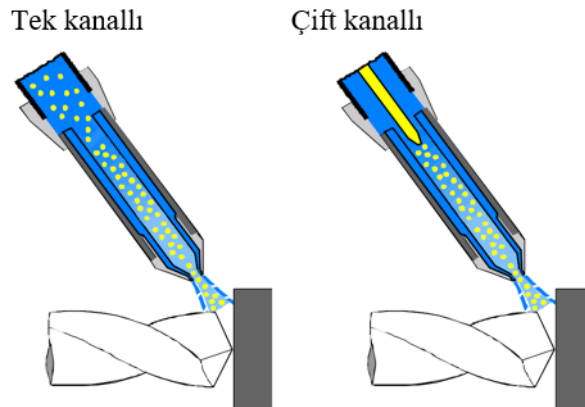
5.2.1.2. Kesici Takım Dışından Uygulanan MMY Yöntemi

Kesici takım dışından uygulanan MMY yönteminde, kesme bölgesine belli açı ve mesafede sabit olan nozullar yardımıyla basınçlı hava-yağ karışımı gönderilir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Dıştan MMY uygulaması.

Bu yöntemde tıpkı içten uygulanan MMY yönteminde olduğu gibi tek ve çift kanallı olmak üzere iki farklı şekilde yağlama sağlanır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Dıştan MMY uygulama kanalları [96].

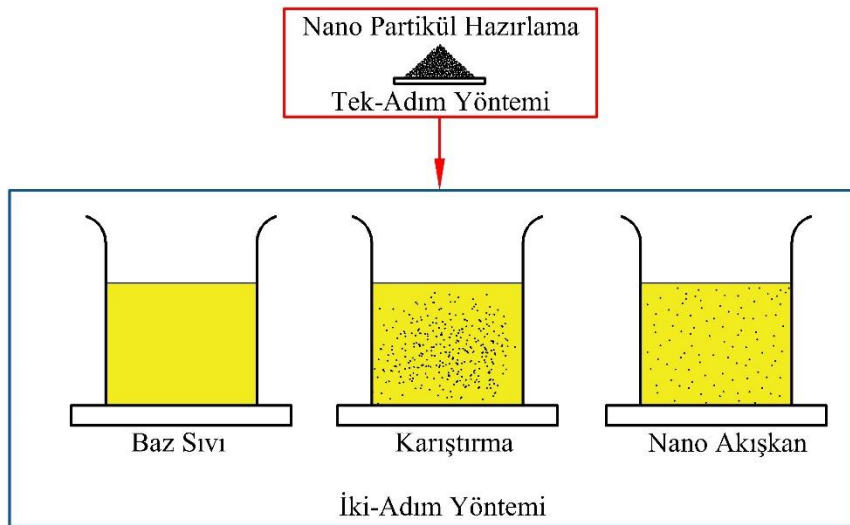
Dıştan tek kanallı MMY uygulamalarında yağ ve hava harici ortamda hazırlanarak, bir veya birden fazla nozul yardımıyla kesme bölgesine gönderilir. Çift kanallı MMY uygulamalarında ise yağ ve hava farklı kanallarla kesme bölgesine sabit açı ve mesafede konumlandırılan nozulun veya nozulların içerisinde karışarak kesme bölgesine gönderilir.

Nozul sayısı, yönü, mesafesi gibi parametreler işlenecek yöntemin kalitesini belirlemede etkilidir. Örneğin, kanal açma, alın frezeleme, tornalama vb. işlemlerin kalitesini belirlemede nozul parametreleri dikkate alınabilir. Delik delme, diş açma gibi işleme yöntemlerinde kesici takım uzunluk/çap oranı 3'ün altında ($l/d < 3$) ise dışarıdan MMY uygulaması faydalıdır [79], [110]. Bu oran derin deliklerde 3'ün çok üzerinde olduğundan, MMY uygulamasının içten olması kaçınılmazdır [111].

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

MMY yöntemi, hem konvansiyonel kesme sıvısının hem de kuru işlemin olumsuz yönlerini ortadan kaldıran çözümlerden biri olmakla beraber torna, freze, delme ve taşlama gibi başlıca talaş kaldırma yöntemlerinin hepsinde de verimli bir şekilde kullanılabilir [11]. Ancak, yeni malzemelerin ortaya çıkması, işleme şartlarının ağırlaşması, aşırı ısı oluşumu gibi sorunlar yüzünden, MMY yönteminin etkinliğinin geliştirilmesi gerektirmektedir. Bu geliştirme çalışmalarından biri de MMY yönteminde kullanılan kesme sıvısının içerisine nano boyutta katı yağlayıcı özellikli partiküllerinin katıldığı nano akışkan yöntemidir.

Nano akışkanlar nanometre (nm) ölçülerinde (genelde <100 nm) katı partiküllerin su, etilen glikol (EG), sentetik yağ, bitkisel esaslı yağ vb. baz sıvıya karıştırılmasıyla elde edilirler. Nano akışkanlar hazırlanmasında iki farklı yöntem tercih edilmekte olup bunlar Tek-Adım ve İki-Adım yöntemleridir (Şekil 5.8).



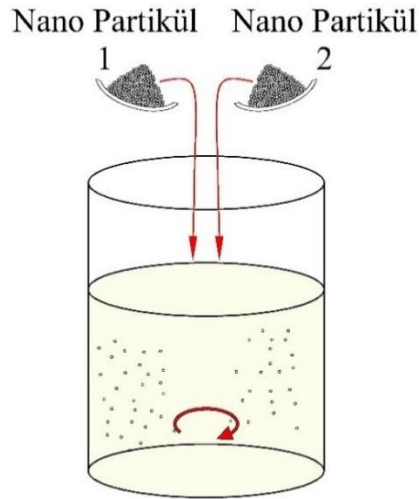
Şekil 5.8. Nano akışkan hazırlamada kullanılan Tek-Adım ve İki-Adım Yöntemi.

Tek-Adım yönteminde nano partiküller genellikle sentezleme yöntemiyle elde

edilmektedirler. Nano akışkan hazırlamada İki-Adım yöntemi, uygulama kolaylığı ve maliyeti yönünden Tek-Adım yöntemine göre daha fazla tercih edilmektedir. Bu metotta, üretilen hazır katı haldeki nano partiküller farklı oranlarda direkt olarak baz sıvıya karıştırılmaktadırlar. İki-Adım yönteminde nano akışkan elde ederken manyetik karıştırıcı, ultrasonik homojenizatör, ultrasonik banyo [112] vb. gibi farklı karıştırma teknikleri kullanılmaktadır.

5.2.3. Hibrid Nano Partikül Katkılı Minimum Miktarda Yağlama (Hibrid Nano MMY) Yöntemi

Nano akışkan hazırlamada; hBN, MoS₂, çok duvarlı karbon nano tüp (MWCNT), grafit, grafen ve alüminyum oksit/alümina (Al₂O₃) gibi farklı özelliklere sahip nano partiküller kullanılabilir. Nano partiküllerin, ısı taşıma kapasiteleri, şekilleri ve özellikleri birbirinden farklı olabilmektedir. Bu yüzden son zamanlarda birbirinin üstün özelliklerinin bir araya getirildiği hibrid nano akışkanlar üzerinde çalışmalar artış eğilimi göstermiştir. Nano akışkanların kullanıldığı endüstriyel uygulamaların artışıyla nano teknolojik işleme kavramı ortaya çıkmaya başlamıştır. Hibrid nano akışkan hazırlarken İki-Adım yöntemi (Şekil 5.8) kullanılmakta olup birbirine göre farklı özelliklere sahip en az iki nano partikül baz sıvıya farklı tekniklerle karıştırılmaktadır. Nano partiküller birbirlerine göre termal iletim, yağlayıcılık, yapışma, korozyon önleme vb. farklı üstün özelliklere sahip olabilmektedirler. Hibrid nano akışkan hazırlamadaki asıl amaç birbirlerine göre farklı üstün özelliklerin bir araya getirilmesidir. Hibrid nano akışkan hazırlama prosesi Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Hibrid nano akışkan hazırlama prosesi.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan bu çalışmayla, Inconel X-750 süper alaşım malzemesinin frezelenmesinde kuru, MMY, Nano MMY, Hibrid Nano MMY işleme koşullarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. hBN, MoS₂ ve grafit nano partiküllerinin bitkisel esaslı yağa eklenmesiyle hazırlanan nano akışkan karışımların, viskozite ve termal iletkenlik katsayıları ölçülmüştür.

Deneysel çalışma iki aşamada yürütülmüştür (Çizelge 6.1). Birinci aşamada nano partikül optimum katkı oranı (hacimce % 0,5) tespit edilmiştir. Deneyler, sabit kesme hızı (45 m/dak), ilerleme (0,10 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, deneyler üç farklı Hibrid Nano MMY kesme koşulu (hacimce %0,5 nano partikül katkılı), kesme hızı (30, 45 ve 60 m/dak), ilerleme (0,05-0,10 ve 0,15 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1. Tüm deneylerde kullanılan parametreler.

Parametreler	Birinci Aşama Deneyleri	İkinci Aşama Deneyleri
Kesme Koşulu	Kuru, MMY ve 12 farklı nano akışkan	HGNF, HMNF ve GMNF hibrid nano akışkan
Kesme Hızı	Sabit 45 m/dak	30, 45 ve 60 m/dak
İlerleme	Sabit 0,1 mm/dev	0,05-0,010 ve 0,15 mm/dev
Kesme Derinliği	Tüm deneylerde kesme derinliği 0,5 mm sabit tutulmuştur.	

6.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar

6.1.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Deneylerde, 150x100x17,3 mm ebatlarında, nikel esaslı Inconel X-750 süper alaşım numuneler kullanılmıştır. Numuneler, kesme işleminde oluşan ısının malzeme kimyasal kararlılığını etkilememesi için 200x1.000 mm ebatlarında plakadan tel erozyon tezgâhında kesilerek hazır hale getirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan numunelerin kimyasal içeriği Çizelge 6.2’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 6.3’te yer almaktadır.

Çizelge 6.2. Inconel X-750 süper alaşım malzeme kimyasal içeriği (%).

C	Ti	Mn	Co	Fe	Si	Cu	Nb+Ta	Ni	Cr	Al
0,04	2,47	0,21	0,01	8,04	0,08	0,03	0,90	71,32	16,22	0,68

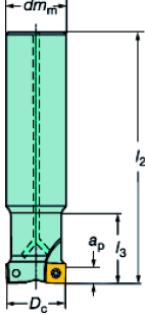
Çizelge 6.3. Inconel X-750 süper alaşım malzeme mekanik özellikleri.

Erime Aralığı (°C)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Sertlik (HRC)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1393-1427	207	35	1517	30


6.1.2. Kesici Takım ve Tutucular

İşleme deneylerinde Sandvik firması tarafından üretilen 90 derece uç açısına ve 0,8 mm köşe radyüsüne sahip S30T kalite PVD TiAlN kaplamalı sementit karbür uçlar (490R-08T308E-ML S30T) kullanılmıştır. Uçlar, Sandvik 490-025A20-08L kodlu takım tutucuya bağlanmıştır. Takım tutucuya ait özellikler Çizelge 6.4'te, kaplamalı kesici takım özellikleri ise Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Deneylerde kullanılan kesici takım tutucu özellikleri.

	dm_m	20 mm
	l₂	110 mm
	l₃	32 mm
	a_p	5.5 mm
	D_c	25 mm
	Takım Tutucu Kodu	490-025A20-08M

Çizelge 6.5. Deneylerde kullanılan kaplamalı kesici takım özellikleri.

Kesici Takım ISO Kodu	Görüntü	Kaplama Tipi	Kaplama Kalınlığı	Kaplama Yöntemi	Sertlik
490R-08T308E-ML S30T		TiAlN	4 µm	PVD	1600 HV

6.1.3. Deneylerde Kullanılan İşleme Tezgâhı

Frezeleme deneyleri, Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan [DELTA SEIKI CNC-1050 A](#) marka CNC dik işleme tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Kesici takım süpürme çapı 25 mm olup, iş parçasından frezelenen genişlik (radyal kesme derinliği) ISO 8688-1 standardı dikkate alınarak kesici takım çapının % 60'ına tekabül eden 15 mm olarak belirlenmiştir. CNC tezgâhına ait teknik özellikler Çizelge 6.6'da verilmiştir.

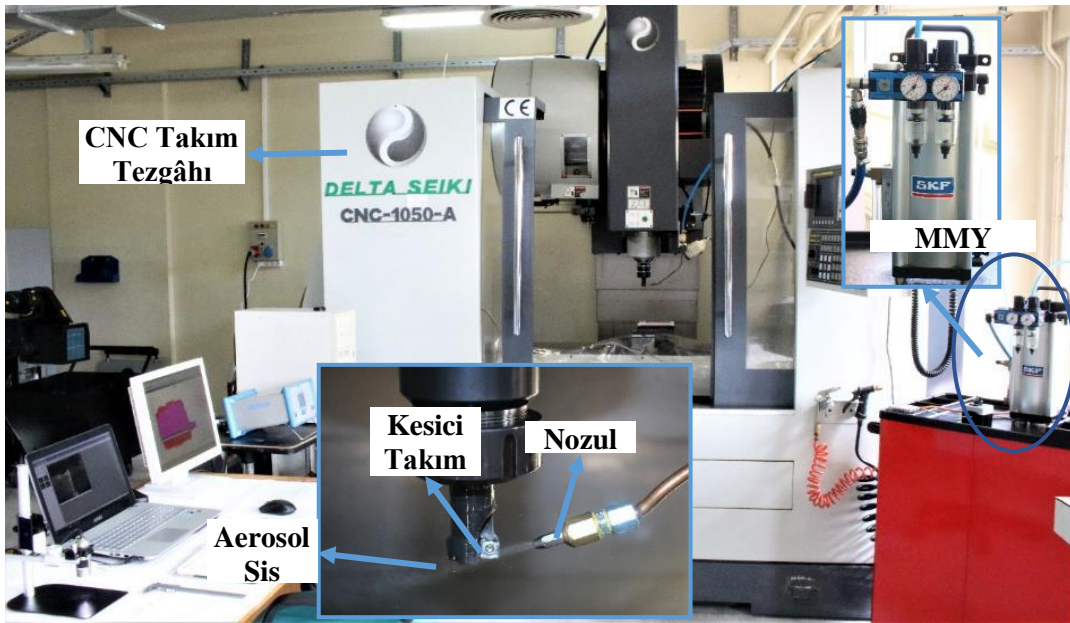
Çizelge 6.6. Deneylerde kullanılan CNC tezgâhına ait teknik özellikler.

Markası	DELTA SEIKI CNC-1050 A
Tabla ölçüleri (mm)	1270 x 400
Azami iş parçası ağırlığı (kg)	500
Azami devri (dev/dak)	10000
Magazin kapasitesi (adet)	24
İş mili motor gücü (kW)	11
İşletim sistemi	Fanuc OT

6.1.4. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

Deneylerde 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 sistem hava basıncı (8 bar) ve akış hızı (50 mL/saat) sabit tutulmuştur.

Tüm deneylerde kullanılan MMY sistemi deney seti Şekil 6.1’de ve cihaz teknik özellikler ise Çizelge 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.1. MMY sistemine ait deneysel set.

Çizelge 6.7. 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, Max. 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 Nozul

Deneylerde kullanılan, SKF marka Vario model cihaz, kesme sıvısını nozul vasıtasıyla, kesme bölgesine dıştan basınçlı havayla gönderen bir sisteme sahiptir. Deneylerde 2 mm çapında tek nozul kullanılmıştır. Nozul tüm deneylerde kesme bölgesinden 20 mm uzaklıkta ve 30° açıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. MMY sisteminde kullanılan nozula ait ölçü ve görüntüler Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. MMY deneylerinde kullanılan nozul boyutları.

6.1.4.2. Deneylerde Kullanılan Bitkisel Esaslı Yağ

MMY sisteminde kesme sıvısı olarak klor, ağır metaller içermeyen ve biyolojik olarak parçalanabilen bitkisel esaslı yağ kullanılmıştır. Bitkisel esaslı yağ, Belgin firmasından temin edilmiş olup, yağa ait özellikler Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Nano akışkan hazırlamada kullanılan bitkisel esaslı kesme yağına ait özellikleri.

Kesme Yağı Kodu	Yoğunluk (20 °C, g/mL)	Viskozite (40°C, mm²/sn)	Parlama Noktası (°C)	Görünüş
Cuttex SYN 5	0,895	5	170	Açık sarı, temiz

6.1.4.3. Deneylerde Kullanılan Nano Partikül Tozlar

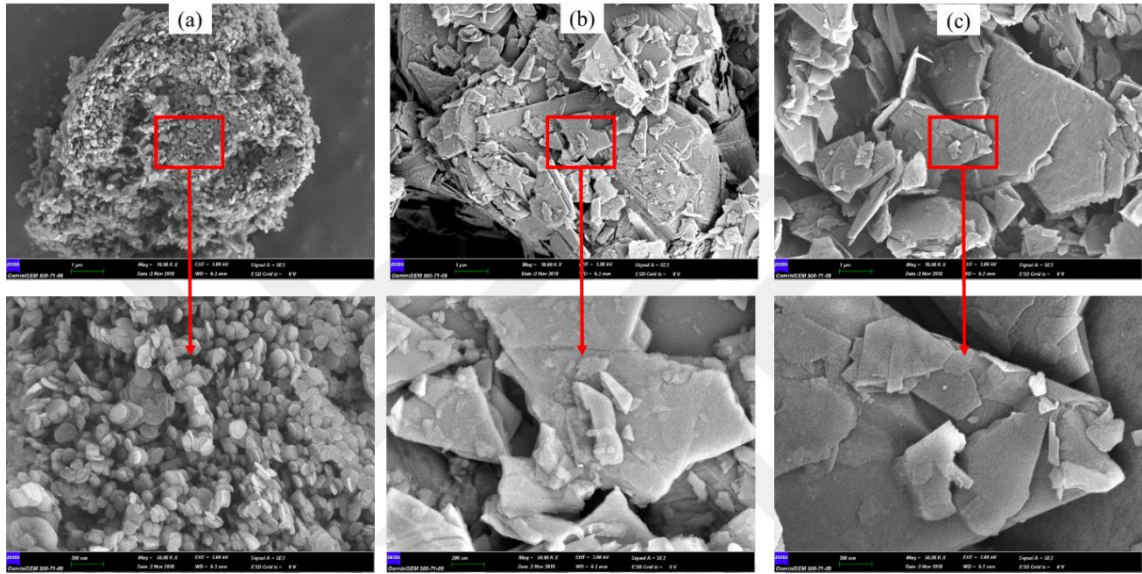
MMY sisteminin performansının artırılması adına kesme yağı içerisine farklı konsantrasyon oranlarında nano partikül tozlar eklenmektedir. Nano akışkan adı verilen bu karışımlar, nanometre ölçülerinde (1-100 nm) katı partiküllerin su, EG, sentetik yağ, bitkisel esaslı yağ vb. baz sıvıya eklenmesiyle elde edilirler [113]. Bu çalışmada nano akışkan karışımların hazırlanmasında hBN, MoS₂ ve grafit nano partikülleri tercih edilmiştir. Nano akışkan hazırlanırken karşılaştırma doğruluğunun sağlanması amacıyla nano partiküller aynı boyutlarda (80 nm) temin edilmiş, bitkisel esaslı kesme yağın içerisine hacimsel olarak eklenmiştir. Bu sayede, kesme bölgesine nozul ile basınçlı aerosol sis buharı olarak tatbik edilen katı nano partiküllerin, birim alana eşit sayıda gönderilmesi amaçlanmıştır.

hBN, 1000 °C’ye kadar stabil kalan, yağlayıcı özelliği yüksek, beyaz renkte ve toksik olmayan katı bir maddedir [114]. hBN göstermiş olduğu, üstün elektrik yalıtkanlık, yağlayıcılık ve UV ışınlarını yansıtma özellikleri sayesinde, metal kalıpların yağlanması, uzay ve hava araçlarda, nano teknolojik soğutmada, otomotiv ve enerji sektöründe kullanılmaktadır. Ayrıca hBN, kimyasal kararlılığı ve erime sıcaklığının yüksek olması nedeniyle kesme esnasında eriyen metalden etkilenmeyen bir yapıya sahiptir. MoS₂, üstün aşınma direnci ve sürtünme önleyici özellik sergilemesiyle, özellikle yüksek basınç ve sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [115]. Grafit, üstün yağlayıcılık özelliği, asit ve ateşe karşı dayanıklılığı, yüksek elektrik iletkenliği sayesinde, ateşe dayanıklı boyalarda, refrakter malzemelerde, enjeksiyon kalıplarda kullanılmaktadır [116]. Tüm bu avantajları yüzünden bu çalışmada hBN, MoS₂ ve grafit nano partikülleri kullanılmıştır.

Nano akışkan hazırlamada kullanılan hBN, MoS₂ ve grafit nano partiküllerine ait teknik özellikler Çizelge 6.9’da SEM görüntüleri ise Şekil 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.9. Nano partiküllere ait genel özellikler.

Nano Partikül Tipi	Boyut (nm)	Saflık (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Şekil	Görünüş
hBN	80	99,85	2,29	küresel	beyaz
MoS ₂	80	99,90	4,80	katmanlı	siyah
Grafit	80	99,90	2,26	katmanlı	siyah




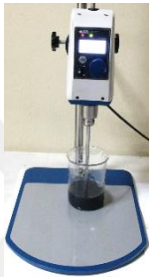

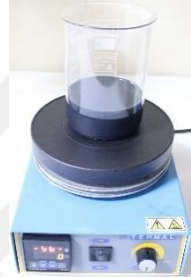

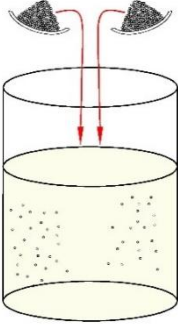
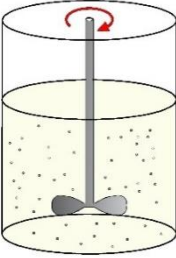
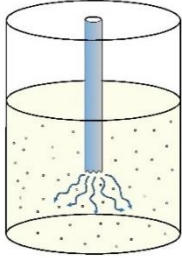
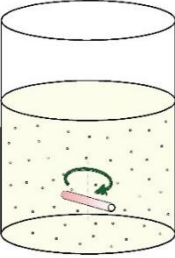
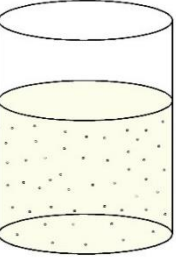
Şekil 6.3. Nano partikül tozlara ait SEM görüntüleri a) hBN, b) MoS₂, c) grafit.

6.1.5. Nano Akışkan Karıştırma Prosesi

Nano akışkanların hazırlanmasında, Tek-Adım ve İki-Adım yöntemleri kullanılabilir (Şekil 5.8). Nano akışkan hazırlamada İki-Adım yöntemi, uygulama kolaylığı ve maliyeti yönünden, Tek-Adım yöntemine göre daha fazla tercih edilir [112]. İki-Adım yönteminde, üretilen hazır haldeki katı nano partiküller farklı oranlarda direkt olarak baz sıvıya karıştırılmaktadır [97]. Uygulama kolaylığı ve avantajları yüzünden, bu çalışmada, İki-Adım yöntemi kullanılmıştır.

İki-Adım yönteminde nano akışkan elde ederken manyetik karıştırıcı, ultrasonik homojenizatör ve ultrasonik banyo [117] gibi farklı cihazlar kullanılmaktadır. Ortalama 80 nm boyutlarında katı halde hBN, MoS₂ ve grafit nano partikülleri temin edilerek bitkisel esaslı yağın içerisine eklenmiştir. Nano akışkan karışımların homojen dağılımlı olması için, karıştırma prosesi beş adımda uygulanmıştır. Karıştırma prosenin ilk

adımında nano partiküller bitkisel esaslı yağ içerisine belirlenen hacim oranlarında eklenmiştir (Şekil 6.4-a). İkinci adımdaysa Daihan marka HS 100D model mekanik karıştırıcı ile 750 dev/dak hızında ve 1 saat süreyle karışıma devam edilmiştir (Şekil 6.4-b). Üçüncü adımda, 20 kHz frekansında 200 W maksimum gücünde Bandelin marka HD 3200 model ultrasonik homojenizatör kullanılarak 30 dakika süreyle karıştırılmıştır (Şekil 6.4-c). Dördüncü adımdaysa Termal marka N11151M model manyetik karıştırıcı ile 1500 dev/dak hızında 2 saat süreyle karıştırma işlemi son bulmuştur (Şekil 6.4-d). Beşinci adım ise homojen nano partikül dağılımlı nano akışkan karışımlar elde edilmiştir (Şekil 6.4-d).

Adım 1	Adım 2	Adım 3	Adım 4	Adım 5
				
				
a	b	c	d	e

Şekil 6.4. Karıştırma prosesi a) Nano partikül ekleme, b) Mekanik karıştırıcı, c) Ultrasonik karıştırıcı, d) Manyetik karıştırıcı, e) Nano akışkan

Nano akışkanlar hazırlanırken karışıma, yüzey gerilimini azaltma ve homojen bir dağılım elde etme adına bazı ek kimyasal ajanlar (sürfaktan vb.) eklenebilmektedir [112]. Ancak eklenen bu ajanlar kesme yağının yüksek sıcaklıklarda özelliklerini değiştirebilmekte, saflığını etkileyebilmekte ve köpük üretebilmektedirler. Ayrıca termal direnç oluşturarak, karışımın termal iletkenliğinde azalmaya neden olabilmektedirler [113], [118]. Soğutma sürecinde nano akışkanları kesme bölgesine gönderen MMY cihazı yapısal dizaynı gereği, basınçlı aerosol sis buhar oluşumunu çok iyi yaptığı ve sürfaktanların olumsuz etkilerinden dolayı, bu çalışmada nano akışkan karışımlara herhangi kimyasal katkı

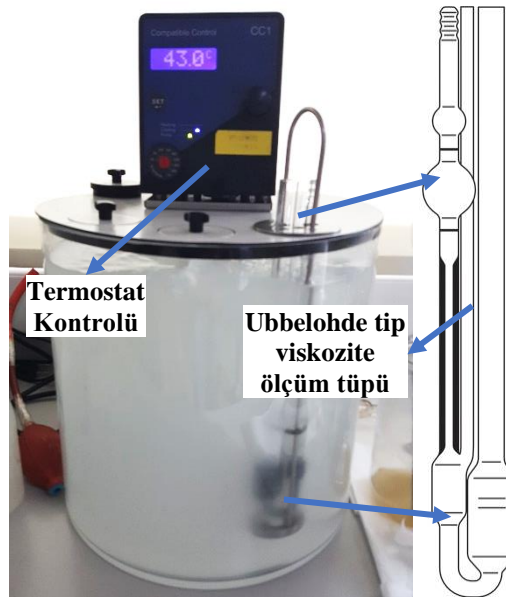
maddesi eklenmemiştir.

6.2. Ölçüm ve Analiz Cihazları

6.2.1. Nano Akışkan Karışımların Viskozite ve Termal İletkenlik Ölçümleri

Nano akışkanlar, baz bir sıvıda asılı nano partiküllerden yapılmış koloitler olarak bilinmektedirler. Nano akışkanların viskozitesi, sıvı akışını ve enerji verimliliğini doğrudan etkilediğinden, termal iletkenlik kadar öneme sahiptir. Temelde nano akışkan karışımlarda viskozite yağlama, termal iletkenlik ise soğutma ile ilişkilidir. Aslında, viskozite, bir sıvının doğrudan pompalama gücü ile ilişkili olan akışın iç direncini ifade eder [119]. Bazı araştırmacılar viskozitenin teorik olarak hesaplanabileceği belirtilerek, farklı denklemler önermişlerdir [120], [121]. Ancak ileri sürülen denklemlerin, akışkan içerisinde farklı boyutlarda nano partiküller eklenerek oluşturduğu karışımın viskozitesinin hesaplanmasında yetersiz kaldığı görülmüştür. Bundan dolayı nano akışkan karışımlarda viskozite tayini deneysel olarak yapılması daha avantajlıdır [122]. Bu sebeple yapılan çalışmada, bitkisel esaslı yağ ve nano akışkan karışımların viskozite ölçümleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Viskozite ölçümlerinde, Schott marka Ubbelohde tip dinamik viskozite ölçüm tüpü kullanılmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Viskozite ölçümünde kullanılan düzenek.

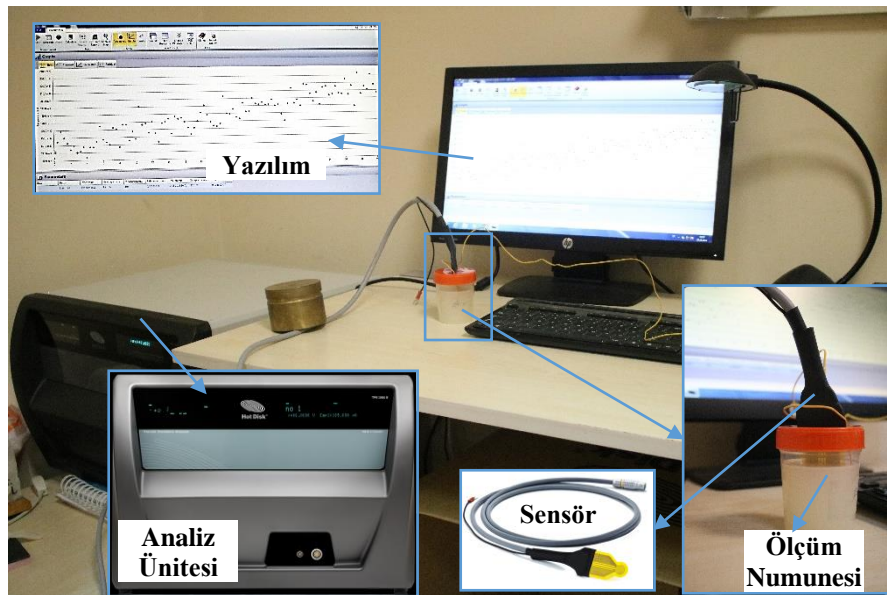
Kullanılan 501 11 tipi viskozite tüpünün, ölüm kapasitesi 0,5 ile 50 mm²/sn arasındadır. Ölüm tüpü DIN 51 562 standardına göre, üretici tarafından dizayn ve kalibre edilmiştir.  l mlerde sabit sıcaklık sağlanması adına, t p Huber-CC1 marka termostat kontrollü banyoya bağlanmıştır. Viskozite  l m tüpü Őeffaf termostat kontrollü banyoda dikey pozisyonda stabil kalması için sabitleyici kısıka lar ile beraber kullanılmıştır. Her  l m öncesi suyun viskozitesi ölümlere kontrol edilmiştir.

Viskozite ve termal iletkenlik ölümlerinde nano partiküllerin olası topaklanma ve  okelmesinden kaçınmak için taze nano akışkan karışımlar kullanılmıştır. Bitkisel esaslı yağ ve farklı konsantrasyonlardaki nano akışkanların termal iletkenlikleri, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Hot Disk TPS 2500s termal analiz cihazı kullanılarak, oda sıcaklığında  l mlm Őtir. Sıcak disk yöntemiyle ölüm yapan analiz cihazına ait teknik özellikler  izelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.10. Termal iletkenlik ölüm cihazına ait teknik  zellikler.

Termal iletkenlik (W/m/K)	0,005~1800
Termal Dif�zite (mm ² /sn)	0,1~1200
Özgül Isı Kapasitesi (MJ/m ³ K)	5'e kadar
Ölüm Zamanı (sn)	1~1280
Tekrarlanabilirlik	Tipik olarak %1'den az
Doğruluk	% 5'ten daha iyi (termal iletkenlik)
Sıcaklık Aralığı (�C)	-23~1000

Termal iletkenlik ölümlerinde, sıvılar için tasarlanan 5465 numaralı 3,2 mm rady sl  sensör kullanılmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Termal iletkenlik ölüm deney seti.

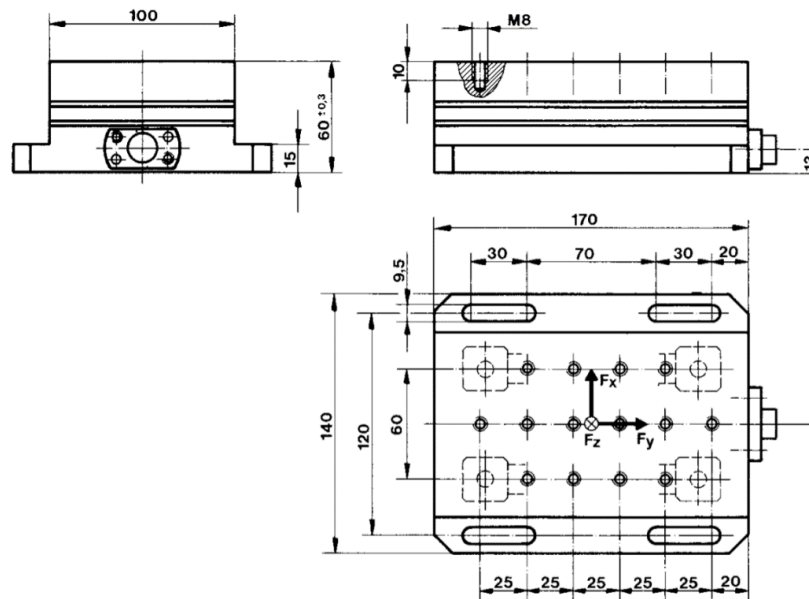
Ortalama 200 noktadan ölçülen değerler, cihaz yazılımı vasıtasıyla ISO 22007:2015 standardına göre termal iletkenlik katsayısına dönüştürülmüştür.

6.2.2. Kesme Kuvveti Ölçümü

Frezeleme deneylerinde kesme kuvveti ölçümleri, işleme merkezinin tablasına bağlanan üç kanallı ölçüm yapabilen (F_x , F_y , F_z) Kistler marka 9257B tipi piezoelektrik dinamometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dinamometreye ait teknik özellikler Çizelge 6.11’de boyutları ise Şekil 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Kesme kuvveti ölçümünde kullanılan dinamometreye ait teknik özellikler.

Kuvvet aralığı (kN) (F_x , F_y , F_z)	-5...10
Tepki verme (N)	<0.01
Hassasiyet (pC/N) F_x , F_y	-7,5
F_z	-3,5
Doğrusallık	% 1 FSO
Histerezis	% 0,5 FSO
Doğal frekans f_0 (x, y, z) (kHz)	3,5
Çalışma sıcaklığı (°C)	0...70
Kapasitans (pF)	220
20 °C’deki yalıtım direnci (Ω)	> 1013
Topraklama sınıfı (Ω)	> 108
Koruma sınıfı	IP 67
Ağırlık (kg)	7,3



Şekil 6.7. Kesme kuvveti ölçümünde kullanılan dinamometre boyutları [79].

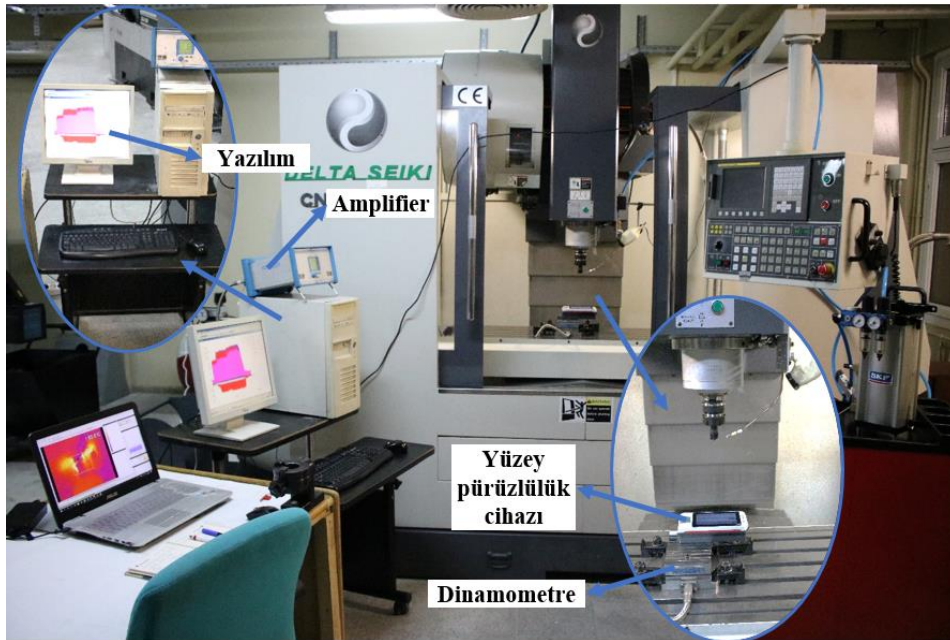
Deney numunesi, dinamometre bağlantı ölçüleri dikkate alınarak, 8 mm çapta boydan boya delinmiştir. Numune dinamometreye, iki noktadan M8 civata yardımıyla rijit bir şekilde bağlanmıştır. Deliklerin olduğu bölgede kesme kuvvetlerinde değişim olacağı göz önüne alınarak, kuvvet ölçüm deneyleri iş parçasının orta bölgesinden zıt yönlü frezeleme ile gerçekleştirilmiştir.

Kesme kuvveti grafiklerinin ve değerlerinin elde edilmesi için Windows işletim sistemi ile uyumlu KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı kullanılmıştır. Dinamometre vasıtasıyla elde edilen kesme kuvveti değerleri kayıt altına alınmış ve bu değerler kullanılarak bileşke kesme kuvveti (F_r) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (6.1)$$

Burada F_x , F_y ve F_z sırasıyla X, Y ve Z eksenlerindeki kuvvetlerdir ve bu kuvvetlerin denklemde yerlerine yazılmasıyla bileşke kesme kuvveti F_r elde edilmektedir.

Bu çalışmada, kesme kuvveti ölçümü tüm kesme koşulları altında gerçekleştirilerek, kesme koşullarının kesme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kesme kuvveti ölçümü deney seti, Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8. Kesme kuvveti ölçüm deney seti.

6.2.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

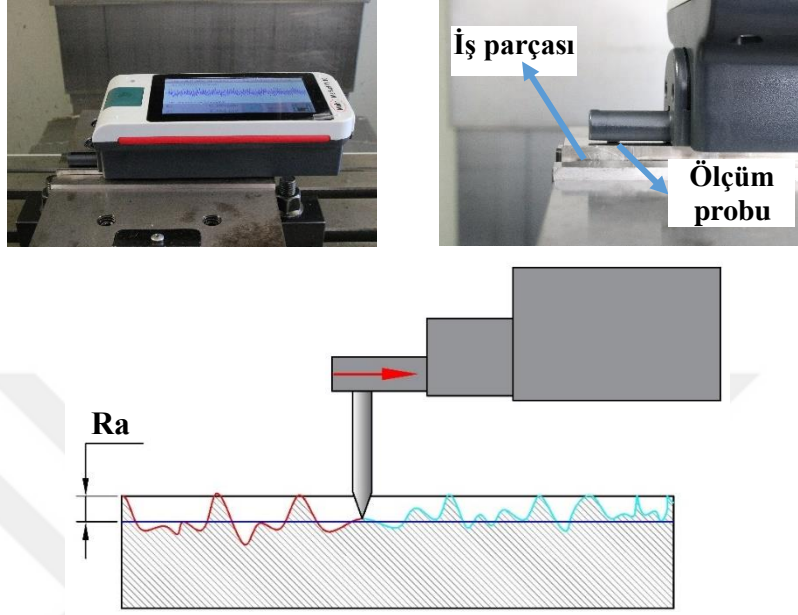
Talaşlı imalat operasyonlarında yüzey pürüzlülüğü, nihai üründe istenen yüzey kalitesinin elde edilmesi adına son derece önem arz etmektedir. Yüzey pürüzlülüğünü, kesme parametreleri, kesici takım, kaplama tipi ve soğutma/yağlama koşulu gibi etkileyen birçok parametre vardır. Tornalama, frezeleme, taşlama, delme vb. talaş kaldırma operasyonlarında elde edilen yüzey kalitesi ve derecesi farklılık göstermektedir. Yüzey pürüzlülük değerinin arzu edilen değerlerde olması, iş parçası malzemesi, enerji sarfiyatı ve üretim maliyetlerini doğrudan etkiler [124]. İstenilen yüzey kalitesine ulaşılmada, kesici takım ve kesme parametrelerinin doğru seçilmesi son derece önemlidir. Bu çalışmanın ana hedeflerinden birisi de MMY, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY kesme koşullarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir. Bu amaçla, yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine İmalat Mühendisliğinde bulunan Mahr Marsurf PS 10 taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait teknik özellikler Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Ölçümler ISO 4287 [125] standardına göre yapılmış olup ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) dikkate alınmıştır. Frezelenen her bir yüzeyin üç farklı noktasından ölçüm alınmış olup değerlendirmede bu ölçümlerin aritmetik ortalaması kullanılmıştır.

Çizelge 6.12. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait teknik özellikler.

Marka Model	Mahr Marsurf PS 10
Ölçme Kuvveti	Yaklaşık 0,7 mN
Ölçme Prensipleri	Tarama Ucu Yöntemi
Girdi	Endüktif Destekli Prob
Ölçüm Aralığı (mm) (Oto. Geçiş)	350 μ m, 180 μ m, 90 μ m
Ölçüm Birimleri	metrik/inç
Profil Çözünürlüğü (mm) (Oto. Anahtarlama)	32 nm, 16 nm, 8 nm
Uç Malzemesi	Elmas
Tarama Ucu	2 μ m
Örnekleme Uzunluğu Sayısı	1-5
Hareket Uzunluğu (mm)	1, 2, 4, 8, 12, 16
Hareket Değerlendirme Uzunluğu (mm)	1,25-4,0-12,5
Ölçülebilen Parametreler	R_a , R_z , R_{max}
Kalibrasyon İşlevi	Dinamik
Ağırlık (gr)	500
Boyutlar (mm)	160 x 77 x 50

Her ölçüm öncesi cihaz, doğrulama blokları ile kalibre edilmiştir. İşlenen yüzeydeki oksitlenmenin önüne geçme adına, pürüzlülük ölçümleri deneyin hemen ardından gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.9’da yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve ölçüm şekli gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Yüzey pürüzlülük ölçümü.

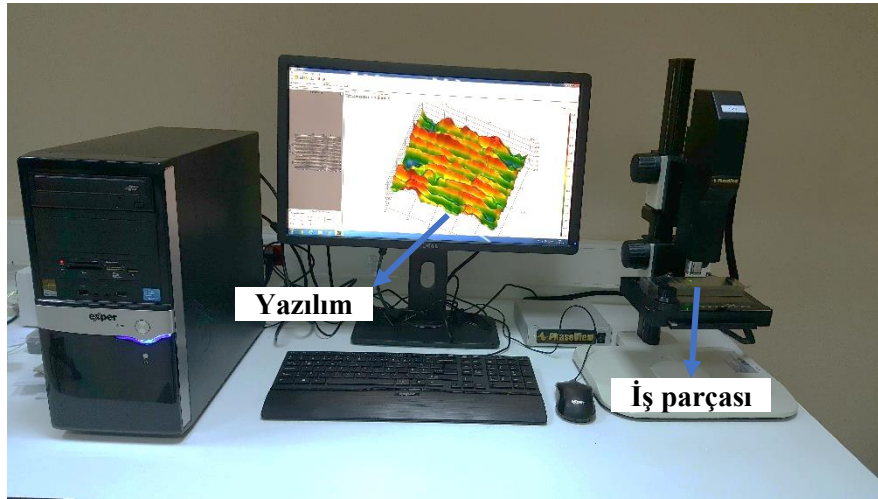
Bu çalışmada işlenen yüzeylerin 3D yüzey topografyası için Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar ve Uygulama Merkezi’nde bulunan Phase View marka optik profilometre cihazı kullanılmıştır. Optik profilometre cihazına ait teknik özellikler Çizelge 6.13’te verilmiştir.

Çizelge 6.13. Optik profilometre cihazına ait teknik özellikler.

Marka/Model	PhaseView/WaveGauge
Objektif Çap Aralığı, mm	0,5-20
Kamera Pikseli, um	6,45 x 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

Yüzey profilometre, kamera ve sensörler yardımıyla yüzeylerin optik fotoğraflarını çekerek üç boyutlu yüzey topografyasına, yazılım vasıtasıyla dönüştüren bir cihazdır. Çalışmanın bu safhasında optik üç boyutlu yüzey topografya ölçümleri, frezelenen yüzeylerden rastgele seçilen $2,5 \times 2,5$ mm boyutlarındaki alanlarda gerçekleştirilmiştir.

Optik üç boyutlu yüzey profilometre cihazına ait görüntü Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10. Frezelenen yüzeylerin optik yüzey profilometre ölçümü.

6.2.4. Kesme Sıcaklığının Ölçümü

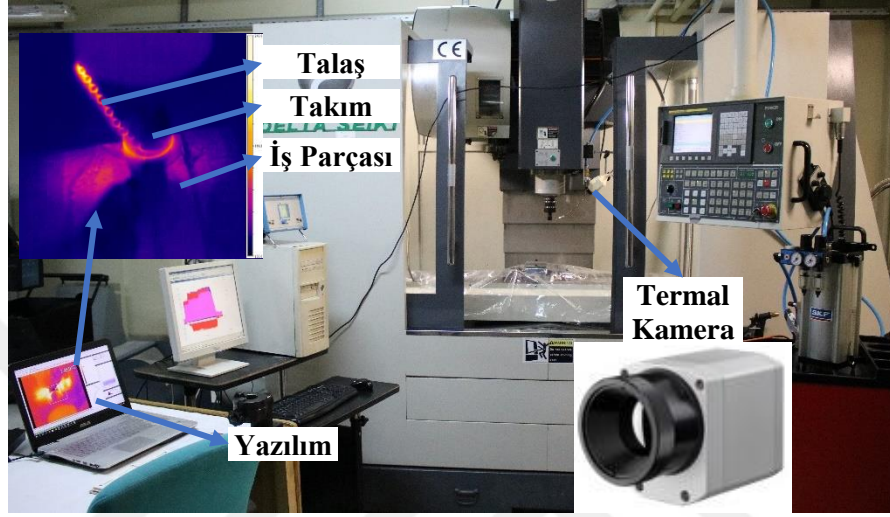
Kesme esnasında, kayma düzlemi boyunca kesici takım ile iş parçasının plastik deformasyon (birincil deformasyon bölgesi), kesici takım-talaş (ikincil deformasyon bölgesi) ve kesici takım-iş parçası (üçüncül deformasyon bölgesi) arasındaki sürtünme etkisiyle sıcaklık oluşumuna neden olmaktadır. Oluşan bu sıcaklıklar büyük boyutlara ulaştığında ise takım ömründe azalmalara ve yüzey kalitesinde bozulmalara neden olurlar [126]. Bu yüzden kesme sıcaklığının kontrol altına alınması son derece önemlidir. Ayrıca kesme bölgesindeki sıcaklığın ölçülmesi, kesme olayı ile ilgili önemli ipuçları vermekte ve işlenebilirliğin değerlendirilmesinde büyük önem arz etmektedir.

Kesme bölgesindeki maksimum sıcaklığın tespit edilmesinde, gerçek zamanlı ölçüm yapan ve termografik görüntüleme sağlayan, Optris marka PI 450 model kızılötesi termal kamera kullanılmıştır. Kızılötesi termal kameraya ait teknik özellikler Çizelge 6.14’de verilmiştir.

Çizelge 6.14. Kızılötesi termal kameraya ait teknik özellikler.

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 x 288
Ağırlık (gr)	320

Kızılötesi termal kameralarla, sıcaklık ölçümünde emisivite (ϵ) değeri büyük bir öneme sahiptir. Emisivite, ölçülen radyasyon değerinin siyah-gövde (black-body) denilen cisimlerle olan ilişkisini tanımlar. Bu çalışmada, Inconel X-750 süper alaşım malzemesi için ϵ değeri 0,42 [97] olarak belirlenmiştir. Kızılötesi termal kamera, tüm kesme koşullarında kesme bölgesine 300 mm mesafede ve 45 derece açıda konumlandırılmıştır. Kızılötesi termal kamera deney seti, Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11. Kesme sıcaklığı ölçümü deney seti.

6.2.5. Kesici Takım Aşınma Değeri Ölçümü

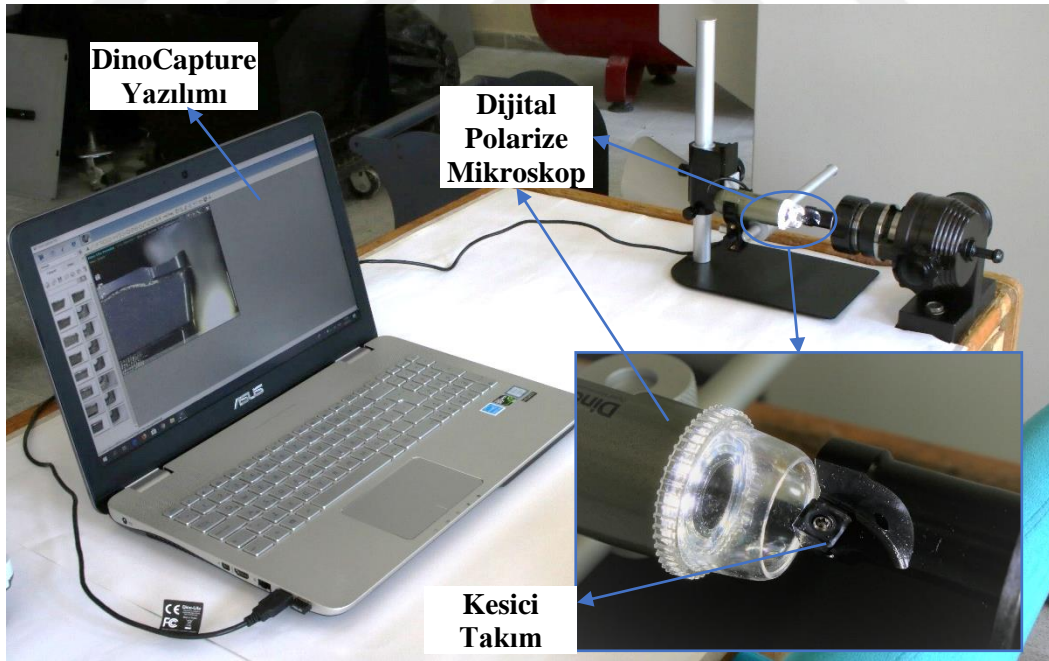
DeneySEL çalışmaya başlamadan önce ilk olarak, bir dizi ön deney gerçekleştirilmiştir. Kesici takım aşınmasını ve ömrünü doğrudan etkileyen kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği gibi parametrelerin tespit edilmesi ve deneylere başlanması hem zaman hem de maliyetten tasarruf sağlamaktadır [123]. Bu doğrultuda hareketle kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametreleri üretici firmanın tavsiye ettiği ve literatürde süper alaşım malzemelerin işlenmesinde kullanılan parametreler dikkate alınarak seçilmiştir.

Bu çalışmada, takım ömrü kriteri olarak maksimum yanak aşınması (V_B) 0,3 mm alınmıştır. Takım aşınma ölçümleri, Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine İmalat Mühendisliğinde bulunan, Dino-Lite marka AM 4113ZT model polarize dijital mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dijital polarize mikroskop teknik özellikleri Çizelge 6.15’te verilmiştir.

Çizelge 6.15. Takım aşınma değerlerinin ölçümünde kullanılan dijital mikroskopa ait teknik özellikler.

Marka / Model	DinoLite / AM413ZT
Çözünürlük	1,3 mega piksel (1280 x 1024 piksel)
Büyütme Özelliği	10~70x 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	Saniyede 30 kare, 1,3M de 15fps
Kalibrasyon Özelliği	Var
Ölçüm	Evet (Çizgi, Yarıçap, Daire, 3 Noktadan daire)
Ağırlık (gr)	105
Ölçü (Uzunluk x Çap cm)	10,5 x 3,2

Takım aşınma oranlarının tespitinde büyütme oranı tüm ölçümlerde (50x) sabit tutulmuştur. Dijital polarize mikroskop ile takım aşınma ölçümü Şekil 6.12’de verilmiştir. Ölçülen aşınma değerleri, kayıt altına alınmış ve her deney sonrası kesici uçlar dikkatlice kodlanarak uygun koşullarda saklanmıştır.



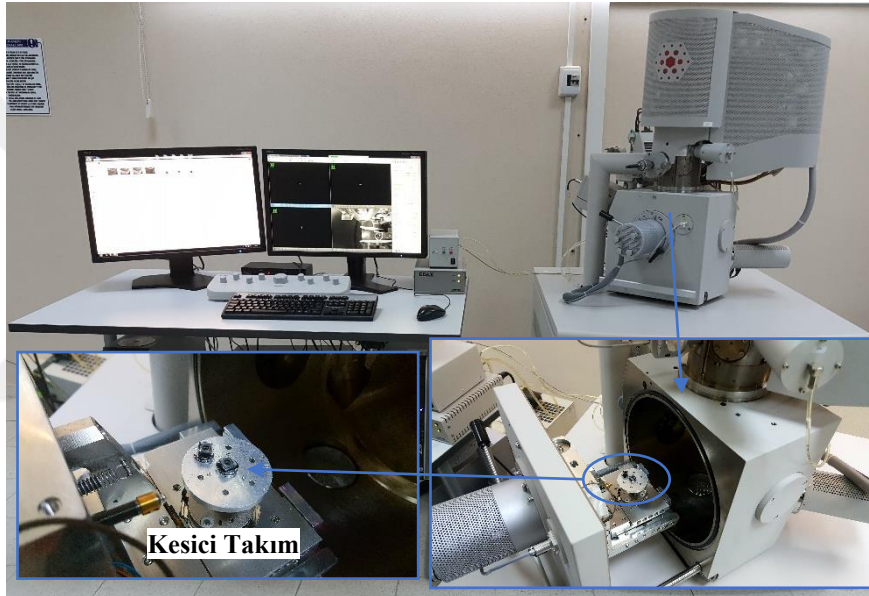
Şekil 6.12. Kesici takım aşınma değerlerinin tespiti.

Kesici takım aşınma karakterizasyonunun analizinde, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar ve Uygulama Merkezi'nde (DÜBİT) bulunan FEI marka Quanta

FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM cihazına ait teknik özellikler Çizelge 6.16’da aşınma ölçümü ise Şekil 6.13’te verilmiştir.

Çizelge 6.16. SEM cihazına ait teknik özellikler.

Güç voltaj (V)	230
Frekans (Hz)	50 veya 60 (+/- % 1)
Maksimum Çalışma Aralığı (°C)	15~25
Kapı 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 x 3536 (yaklaşık 14 MP)
Sistem Kontrolü	Klavye, joystick



Şekil 6.13. SEM cihazı ile takım aşınmasının ölçümü.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir malzemenin işlenebilirliği, işleme esnasında karşılaşılan kolaylık ve zorlukla ifade edilebilir. İşlenebilirliğin ifade edilmesinde kesici takım ömrü, yüzey kalitesi, kesme sıcaklığı, kesme koşulları, kesme kuvvetleri gibi faktörler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip nikel esaslı Inconel X-750 süper alaşım malzemesi frezelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma, Nano MMY ve Hibrid Nano MMY koşullarında olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

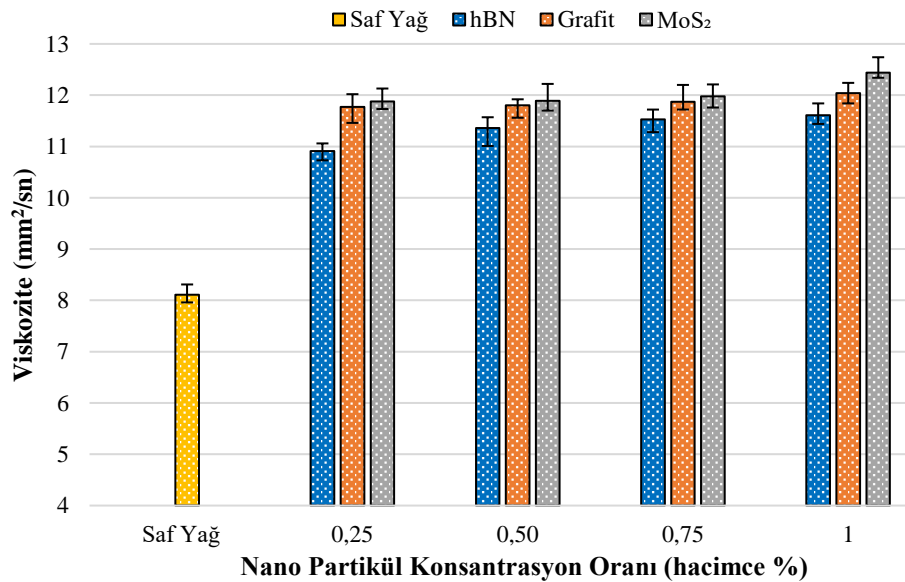
7.1. Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deneyler

Literatür incelemesinde nano akışkanlar üzerine yapılan çalışmaların çok önemli bir kısmında, nano akışkanların kuru, ıslak, MMY ya da benzeri yöntemlerle mukayese edildiği görülmüştür. Ancak, farklı nano partiküllerin birbiri ile mukayesesinin çok az yapıldığı anlaşılmıştır. Ayrıca aynı özellikli nano partiküller için optimal katkı oranlarının çalışmadan çalışmaya farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sebeple farklı nano partiküllerin işleme performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve optimal oranlarının tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Çalışmanın bu aşamasında, Inconel X-750 süper alaşımın frezelenmesinde üç farklı katı yağlayıcı nano partikülün (hBN, MoS₂, grafit) dört farklı hacim oranında (% 0,25, % 0,50, % 0,75 ve % 1) bitkisel esaslı kesme yağına eklenerek hazırlanan nano akışkanların, işleme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Performans kriterleri olarak kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve ömrü ölçülerek, nano akışkan koşulların performans kriterleri üzerindeki etkileri tüm yönleri ile ele alınmaya çalışılmıştır.

7.1.1. Nano Akışkan Karışımların Viskozite ve Termal İletkenliğinin Değerlendirilmesi

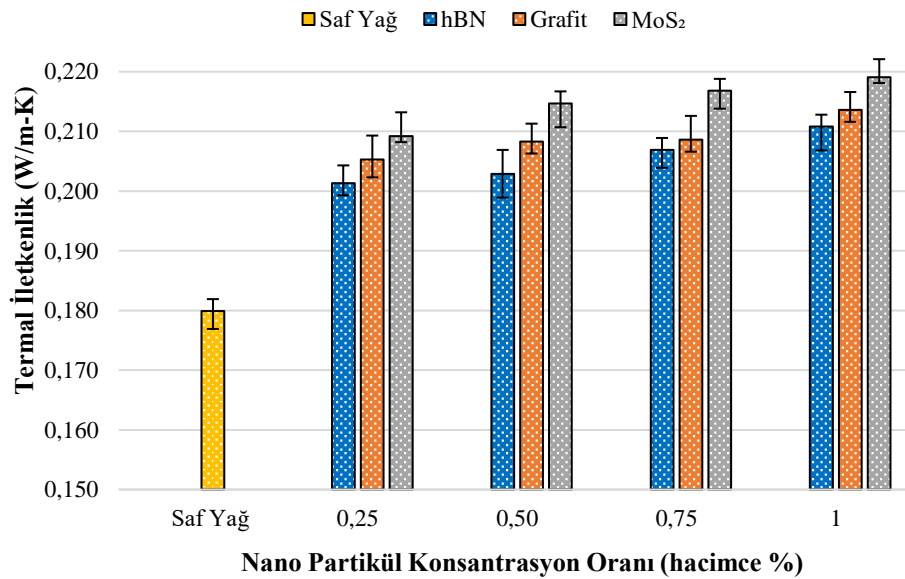
İdeal bir kesme sıvısının hem soğutma hem de yağlama fonksiyonlarını iyi bir şekilde sağlaması beklenir. Kesme sıvılarının yağlama özelliği viskozite, soğutma özelliği ise genellikle termal iletkenlik ile ilişkilendirilir [127]. Bu nedenle nano akışkanların işleme

performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi adına viskozite ve termal iletkenlik ölçümleri büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada hazırlanan nano akışkanların viskozite ve termal iletkenlik ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 7.1’de ve Şekil 7.2’de verilmiştir. Şekil 7.1 incelendiğinde, karışım oranlarının tamamında nano akışkanların viskozite değerlerinin saf yağdan oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Örneğin saf yağa eklenen hacimce % 1 oranında hBN, grafit ve MoS₂ nano partikülleri, viskozitede sırasıyla % 45,13, % 50,5 ve % 55,5 oranında artışa neden olmuştur. Ayrıca hBN, grafit ve MoS₂ nano akışkanlar için konsantrasyon oranı arttıkça viskozite değerleri de artış göstermiştir. Ancak bu artış, saf yağa eklenen en düşük karışım oranındaki (hacimce % 0,25) nano partiküllerin sağladığı artıştan daha düşük olmuştur. Konsantrasyon oranının artması ile viskozitedeki artışın nedeni, kesme yağının film tabaka kalınlığının artması olarak açıklanabilir. Tüm karışım oranları için en düşük viskozite değeri hBN nano akışkanında ölçülürken bunu sırasıyla grafit ve MoS₂ nano akışkanları takip etmiştir. Nano akışkanların viskozitesini, nano partikül tipi, eklendikleri sıvı, partikül şekilleri, karışım oranları ve ortamdaki sıcaklık etkileyebilmektedir [128]. Nano akışkanların viskozite değerlerindeki bu farklılığın sebebi katı haldeki nano katkıların yoğunluk ve partikül şeklinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Nitekim katı haldeki nano partiküllerden MoS₂’nin yoğunluğu hBN ve grafit yoğunluğundan çok daha yüksektir (Çizelge 6.9). Tüm karışım oranlarında hBN nano akışkanların viskozitesinin grafit nano akışkan viskozitesinden daha düşük olması (benzer yoğunluğa sahip olmalarına rağmen) ise partikül şekillerinden kaynaklı olduğu söylenebilir.



Şekil 7.1. Nano akışkanlar için nano partikül karışım oranına bağlı viskozite değişimi.

Metal işleme operasyonlarında kesme bölgesinden oluşan ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması, kullanılan kesme yağlarının termal özelliğiyle doğrudan bağlantılıdır. Termal özelliğin geliştirilmesi adına saf yağ içerisine eklenen çok düşük oranlarda nano partiküller dahi nano akışkanların termal iletkenliklerini önemli oranda artırabilmektedir [129]. Nano akışkanların konsantrasyon oranlarına bağlı olarak termal iletkenliklerindeki değişim Şekil 7.2’de verilmiştir. Saf yağa eklenen nano partiküllerin yağın termal iletkenlik özelliğini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Viskozitede olduğu gibi artan konsantrasyon oranı termal iletkenlikte de artışa neden olmuştur. Termal iletkenlikteki bu artışın viskozite ile bağlantılı olduğu ve genel olarak nano akışkanlarda viskozitenin artmasıyla termal iletkenliğinde artış eğilimi gösterdiği bilinmektedir [130]. Saf yağla karşılaştırıldığında hacimce % 0,25, % 0,50, % 0,75 ve % 1 konsantrasyon oranlarındaki hBN nano akışkanları termal iletkenlikte sırasıyla % 11,90, % 12,78, % 15,01 ve % 17,18 artış sağlamıştır. Bu oranlar grafit için % 14,12, % 15,79, % 15,95, % 18,73 ve MoS₂ için % 16,29, % 19,34, % 20,51, % 21,79 olarak kaydedilmiştir. Dolayısıyla saf yağın termal iletkenliğinde en çok artışı MoS₂ nano partikülleri sağlarken bunu grafit ve hBN nano partikülleri takip etmiştir. Nano akışkanların hem viskozite hem de termal iletkenliği nano partikül konsantrasyonu ve boyutlarına bağlıdır [130]. Ayrıca katı haldeki nano partiküllerin sahip oldukları termal iletkenlik özellikleri de nano akışkanların termal özelliklerinde belirleyici bir role sahiptir [131].

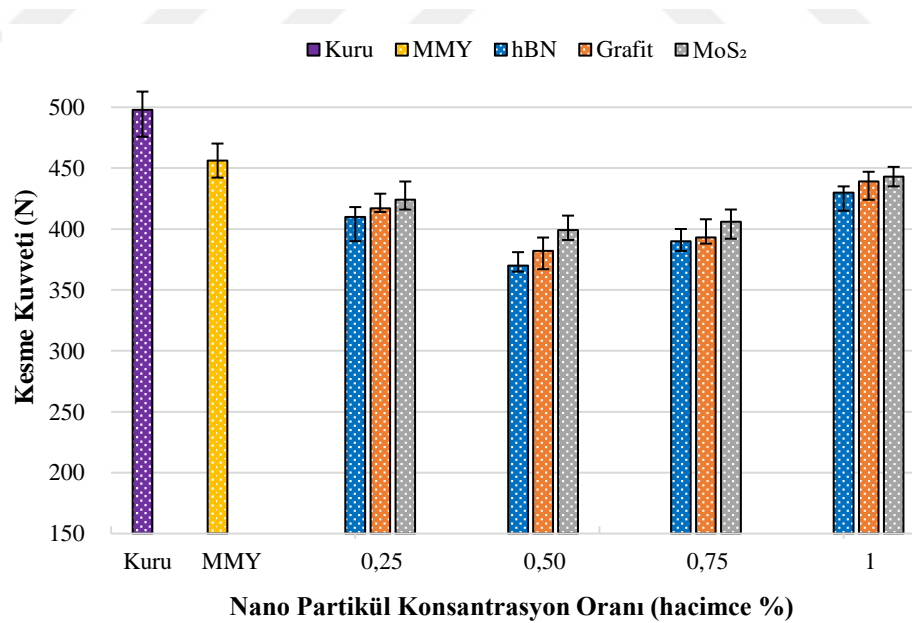


Şekil 7.2. Hacimce nano partikül konsantrasyon oranlarının termal iletkenlik üzerindeki etkisi.

Sonuç olarak nano akışkanlardaki nano partikül konsantrasyonundaki artış hem viskoziteyi hem de termal iletkenliği artırmıştır. Kesme yağının termal iletkenliğinin yüksek olması takım-talaş ara yüzeyindeki ısının uzaklaştırılmasında pozitif bir etkiye sahiptir. Ancak yüksek viskozite, MMY yöntemi ile nano akışkanların kesme bölgesine efektif bir şekilde iletilmesinde problem oluşturabilmektedir. Bu nedenle nano akışkanın optimal viskozite ve termal iletkenlik değeri işleme performansı açısından oldukça yüksek öneme sahiptir.

7.1.2. Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

Kesme kuvveti, önemli bir işleme kalite karakteristiği olup kesme esnasında kesici takım üzerine gelen yükleri ve tezgâh tarafından harcanan gücü belirlemede kullanılmaktadır. Ayrıca kesme kuvveti, kesme bölgesindeki oluşan sürtünme ve kesme sıcaklığı ile de doğrudan bağlantılı olup kesme kuvvetinin yüksek değerleri takım aşınmasını ve yüzey bütünlüğünü olumsuz yönde etkilemektedir. Çalışmanın bu bölümünde, kesme koşullarının kesme kuvveti üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için dinamometre ile kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Kesme koşullarına bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişimler Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3. Kesme koşulu ve nano partikül konsantrasyon oranlarına bağlı olarak kesme kuvvetindeki değişim.

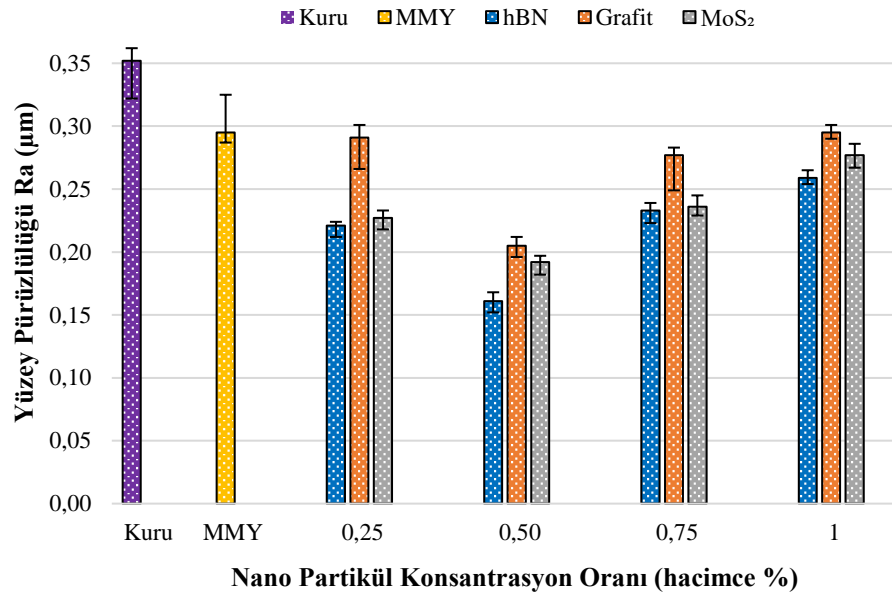
Kuru kesme koşulları altında yapılan frezeleme deneylerinde kesme kuvveti 498 N olarak ölçülmüştür. MMY kesme koşulunda ise kuru kesme koşuluna göre kesme kuvveti %

8,43 azalarak 456 N mertebelerine kadar düşüş sağlanmıştır. MMY yönteminin kullanımı ile takım-talaş ara yüzeyindeki ince yağ filminin sürtünmeyi azaltmasının kesme kuvvetinin düşmesinde önemli bir etkisi olduğu söylenebilir. Nano akışkanlar kesme kuvveti değerlerinin düşmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hacimce % 0,25 konsantrasyon oranlarındaki nano akışkanlar, kuru ve MMY kesme koşullarına göre kesme kuvvetlerinde kayda değer düşüşler sağlamıştır. En düşük kesme kuvveti değerleri ise hacimce % 0,50 konsantrasyon oranındaki nano akışkan kesme koşullarında elde edilmiştir. Hacimce % 0,50 konsantrasyonlu hBN, grafit ve MoS₂ nano akışkanlar kuvvet değerlerinde, kuru kesme koşuluna göre sırasıyla % 25,7, % 23,29 ve % 19,88 ve MMY kesme koşuluna göre ise sırasıyla % 18,86, % 16,23 ve % 12,50 düşüş sağlamıştır. Kesme kuvveti üzerinde hacimce % 0,50 ve hacimce % 0,75 konsantrasyon oranlarındaki nano akışkanların benzer etkilere sahip olduğu görülmüştür. Nano akışkanların konsantrasyon oranının hacimce % 1'e çıkması ise kesme kuvveti değerlerinde bir miktar artışa sebep olmuş ancak kuru ve MMY kesme koşullarından daha düşük değerler kaydedilmiştir. Burada saf yağa eklenen nano partikül yoğunluğunun belli bir değerden sonra olumlu etkisinin azaldığı sonucuna varılabilir. Bu durum ise yağın, viskozitesinde artışa paralel olarak kesme bölgesine nüfuziyetinin azalması ile izah edilebilir. Ayrıca aşırı nano partikül yoğunluğu yağlayıcı film tabaka formunu kötüleştirerek sürtünmeyi artırabilmektedir [126]. Nitekim yüksek konsantrasyon oranlarındaki nano akışkanların düşük konsantrasyon oranlarına göre daha yüksek kesme sıcaklıkları üretmesi de bu durumu doğrular niteliktedir. Nano akışkanlar kendi içlerinde karşılaştırıldığında, hBN nano akışkanların grafit ve MoS₂ nano akışkanlara göre kesme kuvvetlerinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. hBN nano akışkanların viskozite değerleri, diğer nano akışkanlara göre daha düşük çıktığı Şekil 7.1'de görülmektedir. Düşük viskozite değerleri ile kesme bölgesine daha hızlı etki etmesi ve etkin film tabakası oluşturmasıyla temas yüzeyleri arasında oluşan sürtünmeyi azaltmış ve kesme kuvveti değerlerinin düşmesini sağlamıştır. hBN nano partiküllerin takım-talaş temas ara yüzeyinde, sahip olduğu küresel şekli ile yuvarlanması, kayma sürtünmesini yuvarlanma sürtünmesine dönüştürerek sürtünmeyi azaltmasının da daha düşük kuvvet elde edilmesinde etkili olduğu söylenebilir [131].

7.1.3. Nano MMY Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

Yüzey pürüzlülüğü, birbiriyle etkileşim içinde çalışan ekipmanların çalışma performansını, servis ömrünü ve kalitesini etkileyen en önemli işlenebilirlik

kriterlerinden birisidir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğünün olabildiğince düşük olması arzu edilir [132]. Kesme parametreleri, kesici takım, kaplama tipi ve soğutma/yağlama yöntemi gibi yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok parametre vardır. Bu bölümde, diğer değişkenler sabit tutularak soğutma/yağlama yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır. Bu amaçla Inconel X-750 süper alaşım malzemesinin farklı soğutma/yağlama koşulları altında frezelenmesi sonucu ölçülen, ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri Şekil 7.4’de verilmiştir.



Şekil 7.4. Kesme koşulu ve nano partikül konsantrasyon oranlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim.

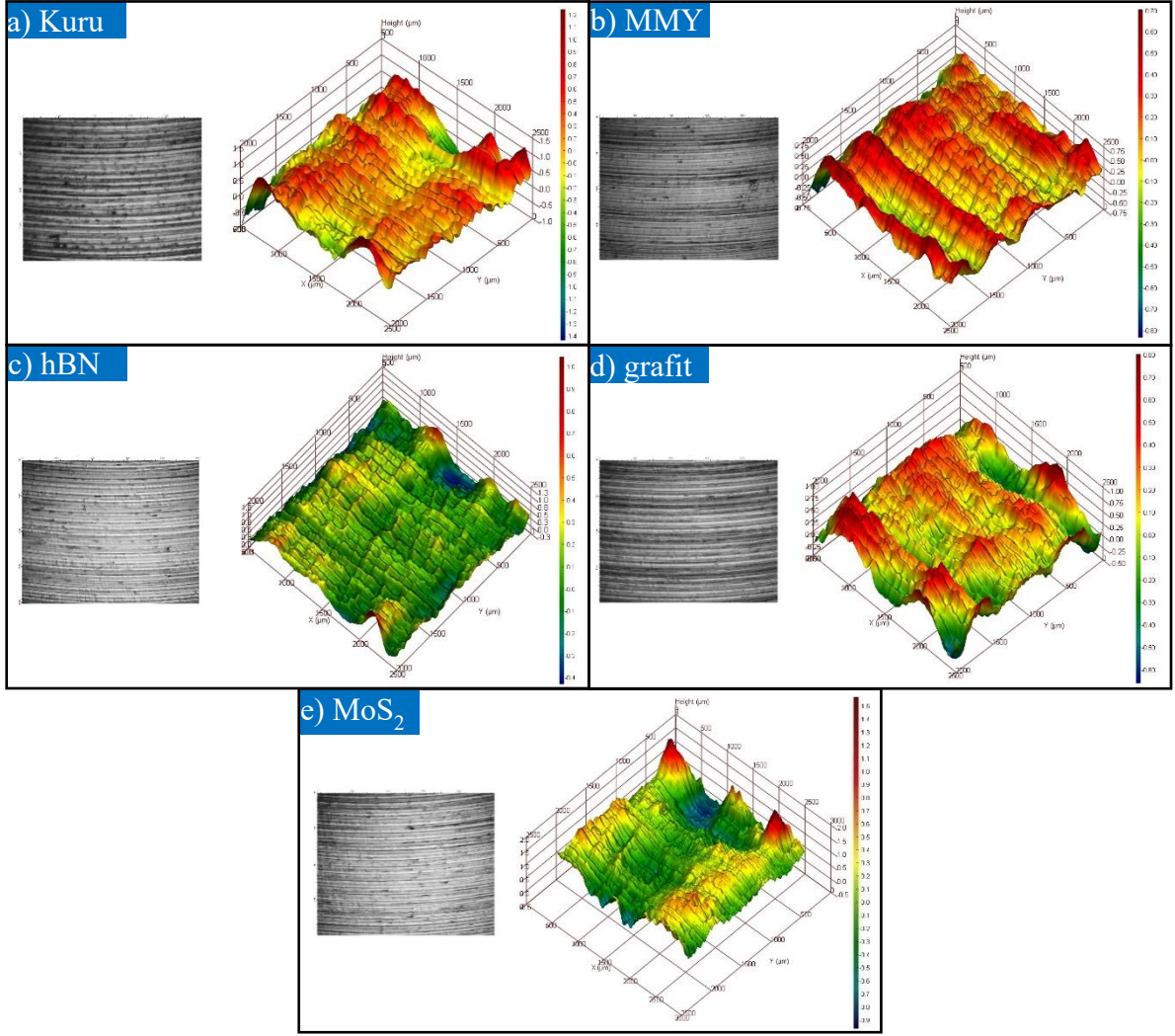
Kuru kesme koşulunda 0,352 μm ölçülen yüzey pürüzlülük değeri MMY kesme koşulunda 0,295 μm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla kuru kesmeye göre MMY yüzey pürüzlülüğünde % 19 iyileşme sağlanmıştır. Bu durum yüksek basınçla takım-talaş ara yüzeyine gönderilen kesme yağı aerosol buharının sürtünmeyi azaltması ile izah edilebilir. Nitekim MMY kesme koşulunda, kuru kesme koşuluna göre daha düşük kesme kuvveti (498 N - 456 N) ve sıcaklığın (350 °C - 203 °C) ölçülmesi de bunu doğrulamaktadır. Nano akışkanlar kuru ve MMY kesme koşullarına göre yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Tüm karışım oranlarında en düşük yüzey pürüzlülük değerleri hBN nano akışkanlarıyla yapılan deneylerden elde edilirken bunu sırasıyla MoS₂ ve grafit nano akışkanları takip etmiştir. Önceki bölümlerde belirtildiği üzere hBN nano akışkanların viskozite değerleri diğer nano akışkanlardan daha düşük ölçülmüştür (Şekil 7.1). Bu da kesme bölgesine MMY

yöntemiyle basınçlı olarak gönderilen nano akışkan buharın takım/talaş ara yüzeyine daha iyi nüfuz etmesini sağlamaktadır. Test edilen nano akışkanlar için en iyi konsantrasyon oranı ise hacimce % 0,50 olduğu görülmüştür. Hacimce % 0,25 konsantrasyon oranında nano partiküllerin kesme bölgesine yeterli oranda gönderilmemesi neticesinde yuvarlanma etkisi ve film oluşumunun yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Hacimce % 0,75 ve % 1 konsantrasyon oranlarında ise birim alana etkiyen katı nano partikül miktarı daha fazla olduğundan kesici takım-iş parçası ara yüzeyinde yığılma oluşturarak tersine bir etki göstermişlerdir. Nitekim daha önce yapılan bazı çalışmalarda nano akışkan konsantrasyon oranındaki artışın benzer etkilere neden olduğu vurgulanmaktadır [131], [133].

En iyi konsantrasyon oranı hacimce % 0,50 olduğundan, bu orana sahip nano akışkanların kuru ve MMY kesme koşullarına göre yüzey karakteristiğini analiz etmek için 3D yüzey topografyaları çekilmiştir (Şekil 7.5).

Yüzey ve yüzey altı karakteristiklerinin önemli ölçüde yüzey topografyasına bağlı olduğu bilinmektedir. İyi bir yüzey topografyası ürünün tribolojik özelliklerini iyileştirerek ömrünü artırmaktadır [35]. Şekil 7.5'teki yüzey fotoğrafları ve topografyalarından hBN nano akışkan ile işlemenin diğer işleme koşulları ile karşılaştırıldığında işleme çizgilerini ve çukur-tepe yüksekliğini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. hBN'nin altıgen kristal yapısından dolayı yüksek termal kararlılık sergilemesinin yanında, aynı tabaka üzerinde bulunan bor ve nitrojen atomlarının birbirine güçlü bağlı olması ve katmanlarındaki Van der Waals kuvvetlerinin zayıf olması nedeniyle nispeten birbirlerinden uzak kalmasını sağlamaktadır [131], [134]. Bunun da temas yüzeylerine yapışan ve birbiri üzerinde kayan bu tabakaların sürtünmeyi azaltmasının [134], daha iyi bir yüzey topografyasının oluşmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

Yüzey topografyası açısından hBN nano akışkanına en yakın performansı MoS₂ ve grafit nano akışkanları göstermiştir. Bu durum, MoS₂'nin yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olması, temas yüzeylerinde düşük kayma direnci oluşturarak sürtünmeyi azaltması [135] grafitin ise yüksek yağlayıcı özelliğiyle kesici takım yüzeyinde etkin bir tabaka oluşturarak kesmeyi kolaylaştırması ve termal iletim katsayısının yüksek olması [20] ile açıklanabilir.



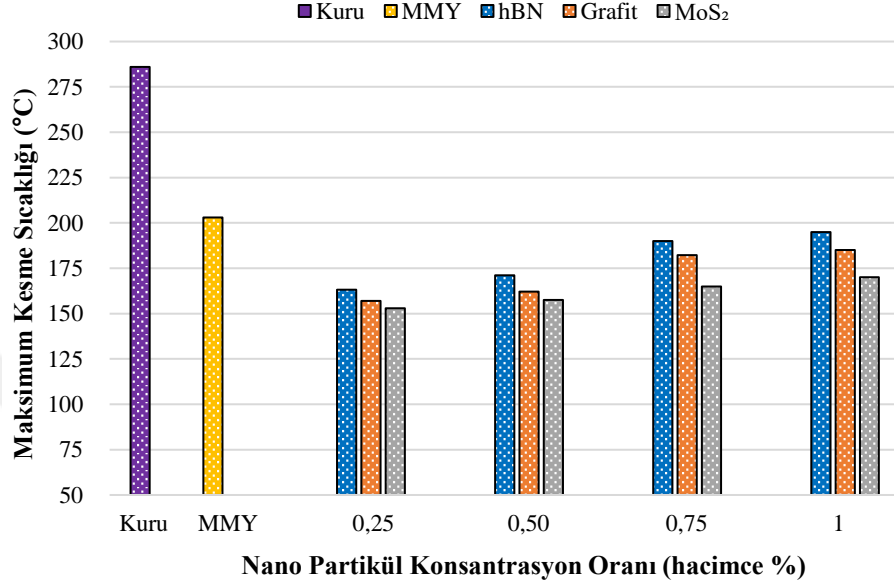
Şekil 7.5. Kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında işlenen yüzeylerin 2D fotoğrafları ve 3D topografyaları.

Ayrıca nano akışkanların yüksek termal iletkenliklerinin kesme bölgesindeki sıcaklıkları azaltarak yüzeydeki termal bozulmaları da azalttığı düşünülmektedir. Hacimce % 0,50 konsantrasyondaki hBN nano akışkanı yüzey pürüzlülük değerlerinde, kuru ve MMY kesme koşullarına göre sırasıyla % 54,26 ve % 45,42 düşüş sağlamıştır. Bu oranlar MoS₂ nano akışkanı için % 45,45 ve % 34,92 iken grafit nano akışkanı için % 41,76 ve % 30,51 olmuştur. Sonuç olarak, en iyi yüzey topografyası hacimce % 0,50 konsantrasyona sahip hBN nano akışkan kesme koşulunda elde edilmiştir.

7.1.4. Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Sıcaklığının Değerlendirilmesi

Şekil 7.6'da farklı kesme koşullarında kızılötesi termal kamera ile ölçülen maksimum sıcaklık değerleri verilmiştir. Tüm deneylerde ölçülen en yüksek kesme sıcaklığı 286 °C olup herhangi bir soğutma ve yağlama olmamasından dolayı kuru kesme koşulunda elde

edilmiştir. MMY kesme koşulunda maksimum sıcaklık 203 °C olarak ölçülmüş olup, kuru kesme koşuluna göre sıcaklığın % 29 azaldığı görülmüştür. MMY kesme koşulunda, nozul ile basınç altında gönderilen aerosol buhar karışımının kesici takım/talaş ara yüzeyine nüfuz ederek ince film oluşturduğu, talaşın hızlı tahliyesiyle de kesme sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğü bilinmektedir [136].



Şekil 7.6. Kesme koşulu ve nano partikül konsantrasyon oranlarına bağlı olarak kesme sıcaklığındaki değişim.

Tüm kesme koşulları içerisinde en düşük kesme sıcaklıkları nano akışkanlarla kesme koşulları altında elde edilmiştir. Nano akışkanların içerisinde yer alan nano partiküllerin termal iletkenlikte sağladığı artışın kesme bölgesindeki sıcaklıkların düşürülmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. En yüksek termal iletkenlik MoS₂ nano akışkanında ölçülürken bunu sırasıyla grafit ve hBN nano akışkanları takip etmiştir (Şekil 7.2). Her bir nano akışkan için artan nano partikül konsantrasyon oranı ile termal iletkenliklerin arttığı gözlemlenmişti (Şekil 7.11). MMY yönteminde kullanılan nano akışkanların termal iletkenliklerinin tek başına kesme sıcaklığının düşürülmesinde etkili değildir. Burada nano akışkanın konsantrasyon oranı, viskozite, nano partikül boyutu ve şekli gibi birçok mekanizmanın etkili olduğundan bahsedilebilir. Bu yüzden nano akışkanlar için optimal konsantrasyon oranının tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Hacimce % 0,25 ve % 0,50 konsantrasyon oranlarında ölçülen sıcaklık değerleri birbirine yakın olmakla birlikte en düşük değerler hacimce % 0,25 konsantrasyon oranındaki nano akışkanlardan elde edilmiştir. Bu oranlardan sonra sıcaklık değerleri bir miktar artış göstermiştir. Hacimce % 0,25 konsantrasyonlu MoS₂,

grafit ve hBN nano akışkan kesme koşullarındaki sıcaklıklar sırasıyla 153 °C, 157 °C ve 163 °C ölçülmüştür. Bu sıcaklık değerleri kuru kesme koşuluna göre sırasıyla % 46,50, % 45,10, % 42,94 daha düşük olurken, MMY kesme koşuluna göre sırasıyla % 24,63, % 22,66 ve % 19,61 daha düşük olmuştur. Düşük konsantrasyonlu nano akışkanların daha düşük viskoziteye sahip olması kesici takım/talaş ara yüzeyinde daha ince bir film tabakası oluşturmaktadır [131]. Konsantrasyon oranının artmasıyla birlikte artan viskozite film tabakasını kalınlaştırarak takım-talaş ara yüzeyindeki yağlamanın zayıflamasına neden olmaktadır [131], [137]. Bu durum sürtünmeyi bir miktar artırmakta bu da kesme sıcaklığının artmasına yol açmaktadır. Özetle en düşük kesme sıcaklıkları hacimce % 0,25 konsantrasyondaki nano akışkan kesme koşullarında elde edilmiş olup nano akışkanlar arasında ise en iyi performansı MoS₂ nano akışkanları göstermiştir.

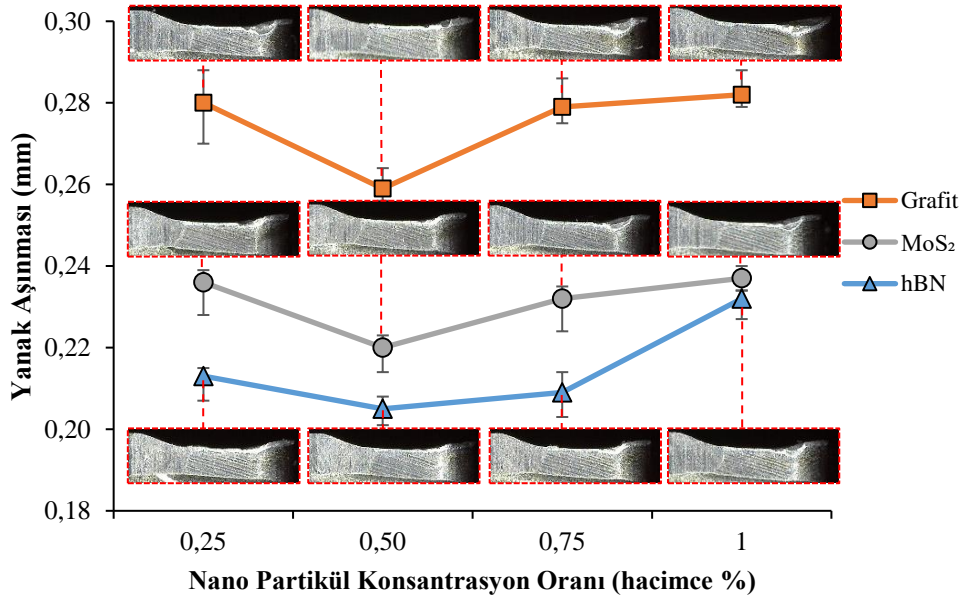
7.1.5. Nano MMY Kesme Koşullarında Takım Aşınmasının Değerlendirilmesi

MMY kesme koşulunda yapılan deneyde yaklaşık 40 dakika kesme zamanı sonunda maksimum yanak aşınma değeri (V_B) 0,32 mm ölçüldüğünden kuru kesme hariç tüm deneylerde bu süre sabit tutulmuştur. Kuru kesme koşulunda ise 18 dakika işleme süresi sonunda kesici takım V_B değeri 0,36 mm olarak ölçüldüğünden test burada sonlandırılmıştır. Dolayısıyla kuru kesme koşuluna göre MMY kesme koşulu takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Şekil 7.7’de nano akışkan kesme koşullarında yaklaşık 40 dakika işleme süresi sonundaki yanak aşınma değerleri ve aşınmış kesici takım fotoğrafları verilmiştir.

Nano akışkanlar tüm konsantrasyon oranlarında takım aşınmasını önemli ölçüde azaltarak kuru ve MMY kesme koşullarına üstünlük sağlamıştır. Saf yağa eklenen nano partiküllerin üstün yağlayıcılık özellikleri ve termal iletkenlikte sağladığı iyileşmeler sayesinde kesme yağının işleme performansını önemli oranda iyileştirdiği düşünülmektedir. Nano akışkanların işleme performansı üzerinde konsantrasyon oranının önemli bir etken olduğu görülmüştür.

Takım aşınması açısından nano partikül konsantrasyon oranındaki artış, belli bir değere kadar pozitif etki gösterirken belli bir orandan sonra negatif etki göstermiştir. Tüm nano akışkanlar için konsantrasyon oranının hacimce % 0,25’ten hacimce % 0,50’ye çıkmasıyla yanak aşınması değerleri azalırken hacimce % 0,50 konsantrasyon oranından sonra takım aşınma değerlerinde artış görülmüştür. Bu durum kesme yağının viskozitesinin artması ve buna bağlı olarak yağlayıcılık etkisinin azalmasından

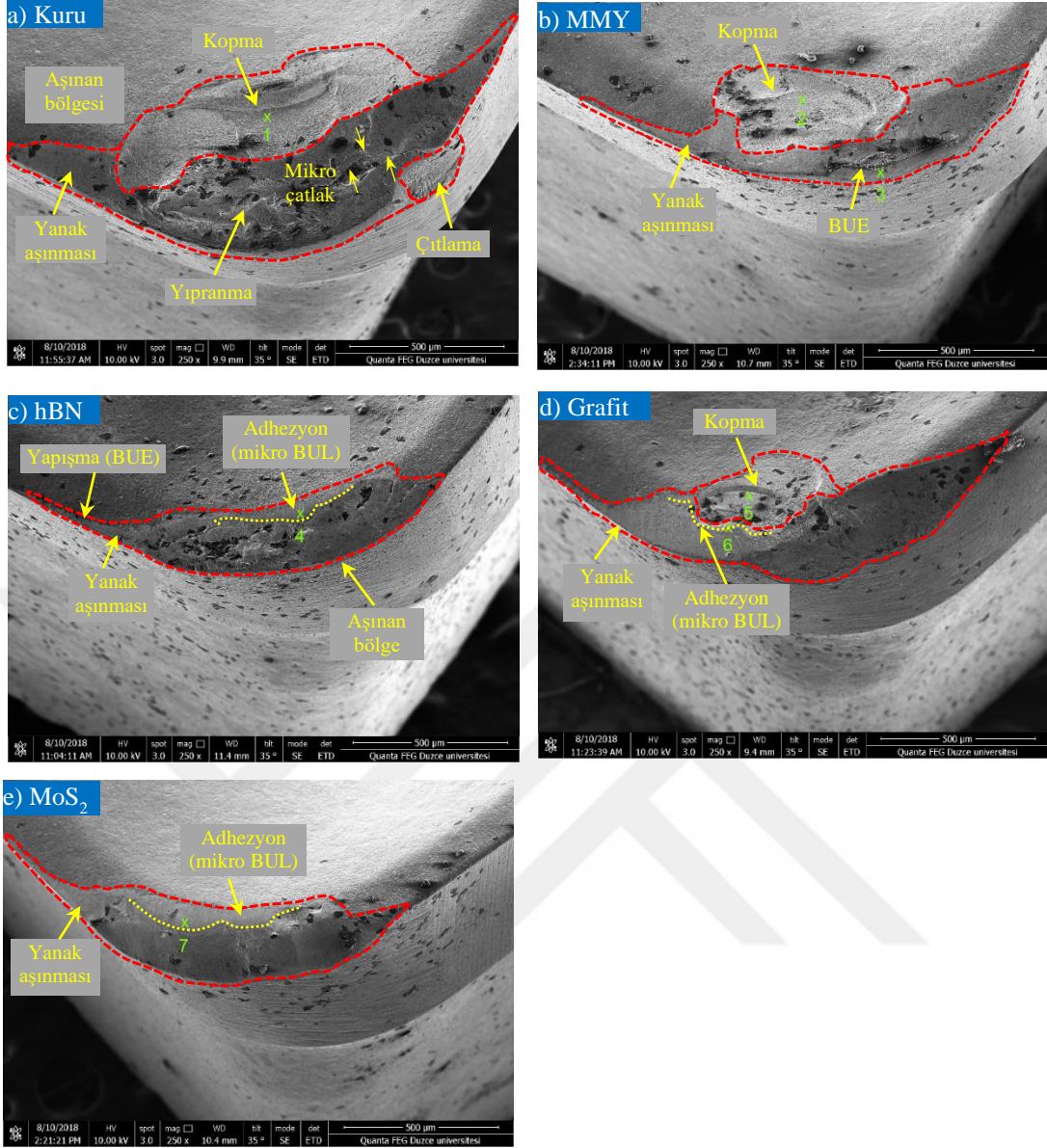
kaynaklandığı düşünülmektedir. Azalan yağlama etkisi sürtünmeyi artırmakta bu da takım aşınmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca nano partikül konsantrasyon oranındaki artış nano partiküllerin toplanmasına sebep olduğu bununda zayıf yağlayıcı stabilite ile sonuçlandığı rapor edilmiştir [137].



Şekil 7.7. Nano partikül konsantrasyon oranlarına bağlı olarak takım yanak aşınma değerlerindeki değişim.

Yüksek konsantrasyona sahip nano akışkanların kesme bölgesinde daha yüksek sıcaklık ve kesme kuvveti değerleri üretmesi de bu durumu doğrular niteliktedir. Dolayısıyla kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi takım aşınmasında da nano akışkanlar için optimal konsantrasyon oranının hacimce % 0,50 olduğu tespit edilmiştir. Tüm konsantrasyon oranlarında en düşük yanak aşınması değerleri hBN nano akışkanı ile elde edilirken bunu sırasıyla MoS₂ ve grafit nano akışkanı takip etmiştir. Daha önce de ifade edildiği gibi hBN nano akışkanın diğer nano akışkanlara göre daha düşük viskoziteye sahip olmasının (Şekil 7.1) takım aşınmasının azaltılmasında da önemli bir etken olduğu düşünülmektedir.

Aşınma tipleri ve aşınma mekanizmaları üzerinde soğutma/yağlama koşullarının etkisini ortaya koymak amacıyla SEM fotoğrafları çekilmiş ve EDX analizleri yapılmıştır. Kuru, MMY ve nano akışkan (hacimce % 0,50) kesme koşullarında kullanılan kesici takımlara ait SEM görüntüleri Şekil 7.8’de verilmiştir.



Şekil 7.8. Kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında kesici takım SEM aşınma görüntüleri.

SEM fotoğrafları incelendiğinde tüm kesme koşulları için baskın takım aşınma tiplerinin yanak aşınması, burun aşınması ve yapışma (built-up edge / BUE veya built-up-layer / BUL) olduğu görülebilir. Bunlardan farklı olarak kuru, MMY ve grafit nano akışkan kesme koşullarında kopma aşınmasının da olduğu görülmüştür. Kuru kesme koşulunda herhangi bir soğutucu/yağlayıcı bir ajanın olmaması nedeniyle takım aşınmasının çok geniş bir alana yayıldığı ancak soğutma/yağlama koşullarının takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. hBN ve MoS₂ nano akışkan kesme koşullarında ise benzer yanak aşınması ve kesici takım burun üst çizgisi bölgesinde lokalize olan BUL oluşumları görülmüştür (Şekil 7.8a-b). BUL oluşumları adhezyon aşınma mekanizmasının

etkinliğini ortaya koymakta olup bu durum Çizelge 7.1’de verilen EDX analizi (Nokta 6 ve Nokta 7) sonuçlarıyla da kanıtlanmıştır.

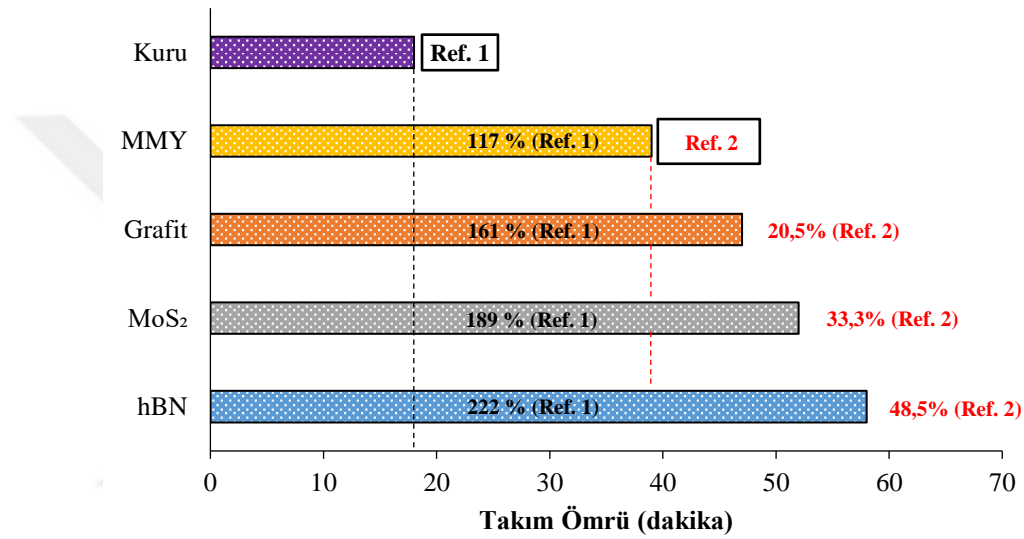
Çizelge 7.1. Kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarında kesici takım EDX analiz sonuçları.

Noktalar	Ti	Cr	Co	Ni	W	C	Al
Nokta 1	-	3,01	9,16	8,32	70,98	8,53	-
Nokta 2	-	-	2,80	-	92,68	4,52	-
Nokta 3	2,18	15,54	-	73,86	-	7,55	0,87
Nokta 4	-	2,01	5,49	3,60	82,31	6,59	-
Nokta 5	2,50	14,24	0,73	72,10	-	9,43	1,00
Nokta 6	2,59	15,13	3,53	75,28	-	2,75	0,72
Nokta 7	3,59	14,87	3,01	71,19	-	6,53	0,81

Kuru kesme koşulunda BUL oluşumunun yerini kopma aşınmasının aldığı görülmektedir. Kesici takımın üst yüzeyinde meydana gelen kopma aşınmasının adhezyon aşınma mekanizmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Süper alaşımların içerisinde yer alan sert abrasif karbür partiküllerin kesme kenarı boyunca akan talaşla birlikte termal ve mekanik yüklerinde etkisiyle ilk etapta abrasif aşınmaya neden olduğu bilinmektedir [138]. Takım aşınması ilerledikçe yüksek ısıl gerilmelerinde etkisiyle, iş parçası malzemesinin takım yüzeyine yapışması kaçınılmazdır. Özellikle süper alaşımların sünek yapıya sahip olmaları ve yüksek kimyasal ilgileri bu durumu tetiklemektedir [139]. Kesme kenarı üzerinde artan BUE veya BUL oluşumu kesme periyodunun devamıyla birlikte belli bir çevrimden sonra kesme kenarından ayrılarak kesici takımda kopma, mikro-çatlak, çatlama ve yıpranma aşınma tiplerini oluşmasına neden olmaktadır [96], [140]. Dolayısıyla kuru kesme koşulunda kesici takımda oluşan kopma, çatlama ve yıpranma aşınmaları BUE veya BUL oluşumunun bir sonraki safhasını resmettiği düşünülmektedir. Ayrıca kuru kesmede çok yüksek kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti oluşması da bunun için gerekli zemini hazırlamaktadır. Benzer şekilde grafit nano akışkan kesme koşulunda kesici takımda meydana gelen yan yüzey aşınmasının BUL oluşumu ile sınır oluşturması da bu durumu doğrulamaktadır (Nokta 5). Ancak hBN ve MoS₂ nano akışkanları kesme bölgesinde oluşturdukları etkin tribo film sayesinde BUL oluşumunu büyük ölçüde geciktirerek yanak aşınmasının oluşumunu engellediği düşünülmektedir. Ayrıca düşük viskozite ve yüksek termal iletkenlikleri sayesinde yanak aşınmasını da önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Nitekim en düşük kesme kuvveti ve kesme sıcaklığının hBN ve MoS₂ nano akışkan kesme koşullarında elde edilmiş olması bu durumu doğrulamaktadır. MMY ve grafit nano akışkan kesme koşullarının takım-talaş

ara yüzeyinde bir yağ filmi oluşturarak yanak aşınması oluşumunu engelleyemese de büyük ölçüde azalttığı görülmüştür. Yanak aşınması bölgelerinden alınan EDX analizleri (Nokta 1, Nokta 2 ve Nokta 4) kaplamanın sıyrıldığını göstermektedir.

Optimal konsantrasyon oranındaki (hacimce % 0,50) nano akışkanların kuru ve MMY kesme koşullarına göre takım ömrü performanslarını belirlemek için takım ömrü deneyleri de yapılmıştır. Yanak aşınma değeri 0,3 mm'ye ulaştığında kesici takımın ömrünü tamamladığı kabul edilmiştir. Şekil 7.9'da kesme koşullarına bağlı olarak takım ömründeki değişimler verilmiştir.



Şekil 7.9. Kuru, MMY ve Nano MMY kesme koşullarına bağlı olarak kesici takım ömürlerindeki değişim.

En düşük takım ömrü değeri 18 dakika olup, kuru kesme koşulunda elde edilmiştir. Soğutma/yağlama koşulları takım ömrünü önemli ölçüde artırmış olup MMY, grafit, MoS₂ ve hBN nano akışkan kesme koşullarında takım ömrü değerleri sırasıyla 39 dakika, 47 dakika, 52 dakika ve 58 dakika olmuştur. Dolayısıyla kuru kesme koşuluna (Ref.1) göre MMY, grafit, MoS₂ ve hBN nano akışkan (hacimce % 0,50) kesme koşulu takım ömründe sırasıyla % 117, % 161, % 189 ve % 222 iyileşme sağlamıştır. Soğutma/yağlama koşulları birbiri ile kıyaslandığında ise MMY (Ref.2) kesme koşuluna göre grafit, MoS₂ ve hBN nano akışkan (hacimce % 0,50) kesme koşulu takım ömründe sırasıyla % 20,5, % 33,3 ve % 48,7 iyileşme sağlamıştır. Bu durum nano akışkanların içerisinde yer alan nano partiküllerin MMY sisteminde aerosol buhar haline getirilen yağ zerreciklerine tutunması neticesinde kesme yağının kesme bölgesinde daha uzun süre kalmasını sağlaması, dolayısıyla daha iyi bir yağlama yapmasına atfedilmiştir. Ayrıca nano

partiküllerin kesme yağının termal iletkenliğini artırması kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürerek takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığı düşünülmektedir. Takım aşınmasının azalması ise kesici takımın daha uzun süre kesmesine imkân tanıyarak takım ömründe önemli iyileşmeler sağladığı düşünülmektedir.

7.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deneyler

Çalışmanın bu bölümünde, Inconel X-750 nikel esaslı süper alaşımının frezelenmesinde hibrid nano akışkan soğutma/yağlama koşullarının işleme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Performans kriteri olarak, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, kesici takım aşınması ve ömrü seçilmiştir. İlk aşamada gerçekleştirilen deneylerde en optimum nano partikül konsantrasyon oranı hacimce % 0,50 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bu aşamasında hibrid nano akışkan karışımlar, kesme yağına hacimce % 0,50 hBN+grafit, hBN+MoS₂ ve grafit+MoS₂ nano partikülleri eklenerek hazırlanmıştır. Nano partiküller karışıma eklenirken hacimce % 0,25 + % 0,25 olmak üzere eşit oranda (% 50 + % 50) karıştırılmıştır. Bu çalışmayla, tek başına üstün özellikler sergileyen farklı şekillere sahip iki nano partikülün, eşit konsantrasyonda kesme yağına eklenmesiyle daha verimli bir nano akışkan elde edilmesi amaçlanmıştır. Farklı konsantrasyon oranlarında hazırlanan hibrid nano akışkanlara ait tanımlamalar Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Hibrid nano akışkan karışımlarına ait tanımlamalar.

Nano Partikül Tipi	Konsantrasyon (hacimce %)	Tanımlama
hBN + grafit	0,25 + 0,25	HGNF
hBN + MoS ₂	0,25 + 0,25	HMNF
grafit + MoS ₂	0,25 + 0,25	GMNF

Frezeleme deneyleri üç farklı Hibrid Nano MMY kesme koşulu (HGNF, HMNF ve GMNF), kesme hızı (30, 45 ve 60 m/dak), ilerlemede (0,05-0,10 ve 0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilmiştir.

7.2.1. Hibrid Nano Akışkan Karışımların Viskozite ve Termal İletkenliğinin Değerlendirilmesi

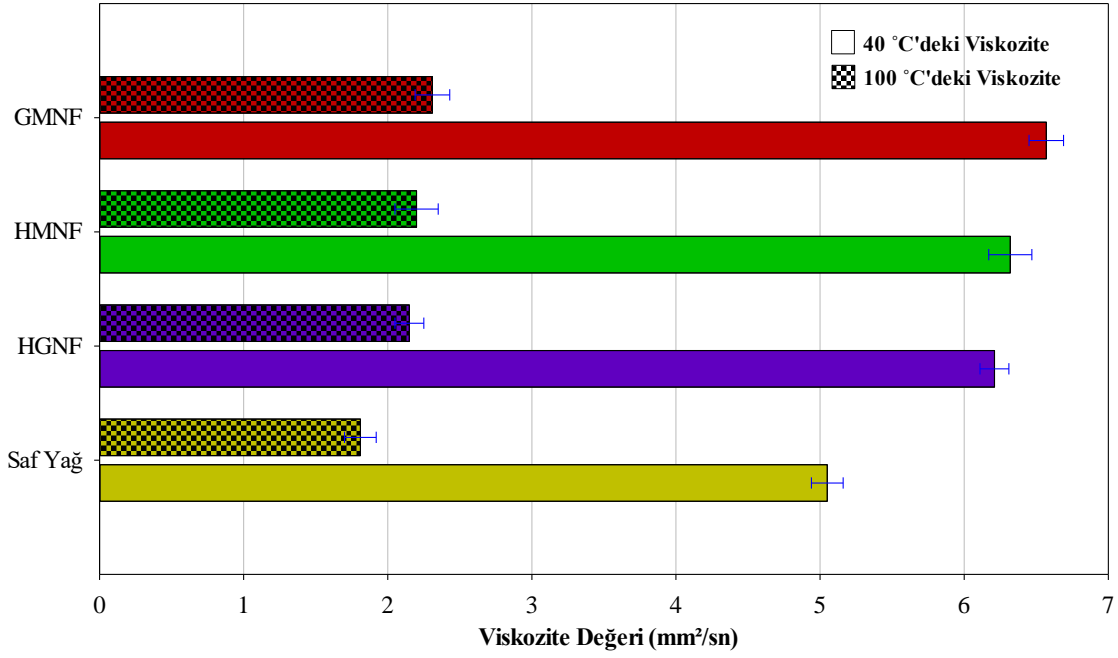
Saf yağ ve nano akışkanlara ait viskozite ve viskozite indeks VI değerleri Çizelge 7.3’te verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan saf yağ ve hibrid nano akışkanların viskozite

ölçümleri 40 °C ve 100 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta yapılmış olup indeks değerlerinin belirlenmesinde ASTM D2270 metodu kullanılmıştır. 40 °C'deki viskozite değerlerine bakıldığında, saf yağ beklendiği gibi 5,05 mm²/sn değeriyle en düşük viskoziteye sahip olduğu, saf yağa nano partikül eklenmesiyle viskozite değerlerinde önemli artışların olduğu görülmektedir. Öyle ki saf yağa göre HGNF, HMNF ve GMNF sırasıyla % 22,97, % 25,15 ve % 30,10 daha yüksek viskoziteye sahip olmuştur (40 °C'de). MoS₂ nano partikül ihtiva eden hibrid nano akışkanların (HMNF ve GMNF) viskozitelerinin yüksek olması dikkat çekicidir. MoS₂ nano partikül yoğunluk değerinin, hBN ve grafitte göre daha yüksek olması (Çizelge 6.9) saf yağa eklendiği karışımların viskozite değerlerini artırmada etkili olduğu düşünülmektedir. Hibrid nano akışkanların viskozite değerinin düşük olması istenen bir durumdur. Düşük viskozite ile yağ içerisinde nano partiküllerin daha hareketli olması ve hibrid nano akışkan yağlama performansının daha etkili olması sağlanabilir. Viskozitenin yüksek olması ise yağlayıcı film kalınlığını artırarak yağlayıcılık performansında azalmaya yol açabilmektedir [97]. Yağların viskozite indeks VI değeri yüksek sıcaklıklar altında özellikle yağlayıcılık özelliğinin bir göstergesi olmakla beraber genelde 100 değerinin üstünde olması arzu edilir [141].

Çizelge 7.3. Hibrid Nano MMY viskozite ve indeks VI ölçüm sonuçları.

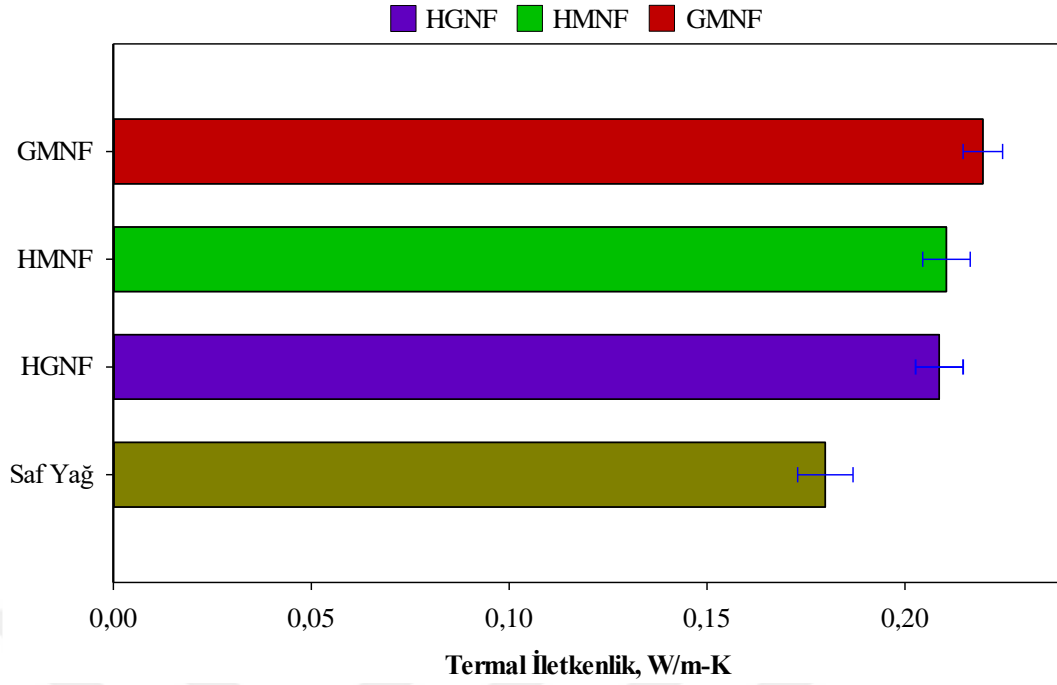
Yağlayıcı Türü	40 °C'deki Viskozite (mm ² /sn)	100 °C'deki Viskozite (mm ² /sn)	Viskozite indeks VI
Saf Yağ	5,05	1,81	153
HGNF	6,21	2,15	174
HMNF	6,32	2,20	183
GMNF	6,57	2,31	200

Özellikle MMY sisteminde kullanılan nano akışkanların viskozite değerleri yağın pülverize olması ve takım-talaş ara yüzeyine nüfuziyeti açısından kritik öneme sahiptir. 100 °C'deki viskozite değerlerine bakıldığında 40 °C'deki artışa benzer bir trend görülmektedir (Şekil 7.10). Ancak 100 °C'de ölçülen viskozite değerleri tüm akışkanlar için 40 °C'den çok daha düşük olmuştur. Sıcaklığın artması yağlayıcı film kalınlığında azalmaya ve buna bağlı olarak ta viskozite değerlerinde düşüşe neden olmaktadır. Her iki sıcaklık değeri için nano akışkanlar arasında en düşük viskozite değeri HGNF'den elde edilmiştir.



Şekil 7.10. Hibrid nano akışkan karışımların sıcaklığa bağlı viskozite değişimi.

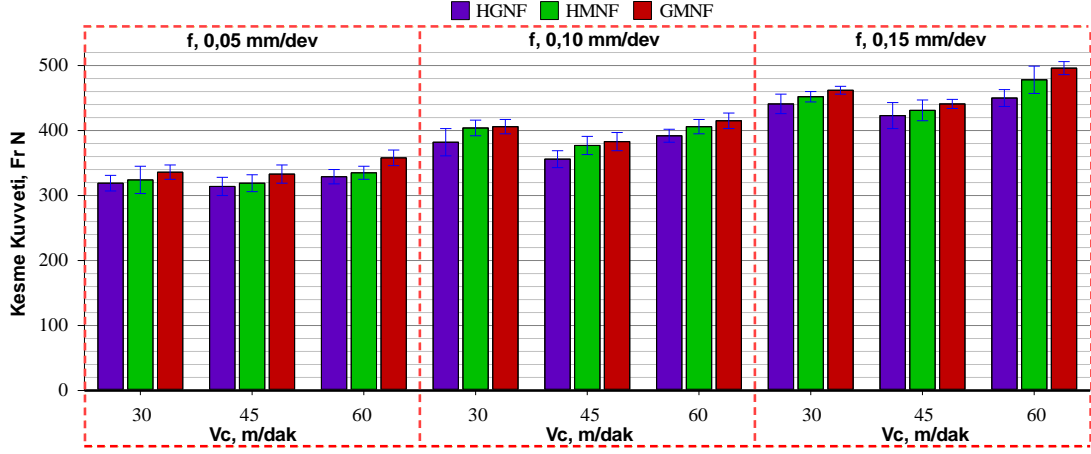
MMY yönteminde metal kesme sıvısı olarak kullanılan nano akışkanların viskoziteleri kadar termal özellikleri de büyük öneme sahiptir. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkların tahliyesi için kesme sıvısının yüksek termal iletkenliğe sahip olması arzu edilir. Saf yağ ve hibrid nano akışkanların termal iletkenlik ölçüm sonuçları Şekil 7.11’de verilmiştir. Saf yağa nano partiküllerin eklenmesi termal iletkenliği önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Hibrid nano akışkanlar arasında en yüksek termal iletkenlik değeri GMNF (0,2197 W/m-K) ile elde edilirken bunu sırasıyla HMNF (0,2105 W/m-K) ve HGNF (0,2087 W/m-K) takip etmiştir. Dolayısıyla saf yağa göre HGNF, HMNF ve GMNF termal iletkenlikte sırasıyla % 16,01, % 17,01 ve % 22,12 artış sağlamıştır. Hibrid nano akışkanlar arasındaki bu farkların katı haldeki nano partiküllerin termal iletkenlik özellikleri, partikül şekilleri ve boyutlarına bağlı olduğu düşünülmektedir. Termal iletkenlik ölçüm sonuçları viskozite ölçüm sonuçlarıyla paralellik gösterip, yüksek viskoziteye sahip hibrid nano akışkanların aynı zamanda yüksek termal iletkenliğe de sahip olduğu görülmüştür. Yüksek termal iletkenlik, ısı tahliyesi için önemli iken yüksek viskozite yağın takım-talaş ara yüzeyine ulaşması noktasında dezavantaj oluşturabilmektedir. Bu nedenle nano akışkanların işleme performansı açısından viskozite ve termal iletkenlikleri arasında hassas bir denge olduğu söylenebilir.



Şekil 7.11. Hibrid nano akışkan karışımların termal iletkenlik değişimi.

7.2.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Kuvvetinin Değerlendirilmesi

Kesme parametreleri ve hibrid nano akışkan türüne bağlı olarak kesme kuvvetindeki değişimler Şekil 7.12’de verilmiştir. Tüm kesme hızı ve ilerleme kombinasyonlarında hibrid nano akışkanlar arasında en düşük kesme kuvveti değerleri HGNF kesme koşulunda elde edilmiştir. Bunu sırasıyla HMNF ve GMNF kesme koşulları takip etmiştir. hBN nano partiküllerinin kullanıldığı HGNF (hBN+grafit) ve HMNF (hBN+MoS₂) hibrid nano akışkanları ile GMNF (grafit +MoS₂) hibrid nano akışkanından daha düşük kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Özellikle ağır işleme koşulları olan 60 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerlemede bu fark daha belirgin olmuştur. Bu parametrelerde GMNF kesme koşuluna göre HGNF ve HMNF kesme koşulları kesme kuvvetinde sırasıyla % 10,22 ve % 3,77 oranında düşüş sağlamıştır. Burada en büyük etkinin katı nano partikül şekillerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.12. Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetindeki değişim.

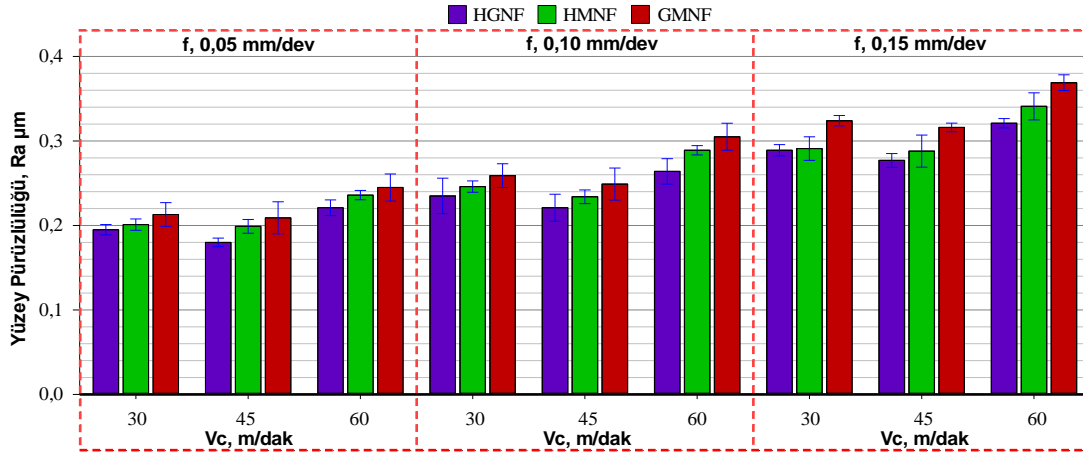
Küresel yapıda olan hBN nano partikülleriyle hazırlanan hibrid nano akışkanların viskoziteleri daha düşük olmuştur (Şekil 7.10). Düşük viskoziteli hibrid nano akışkanlar kesici takım-iş parçası ara yüzeyine daha iyi yerleşerek etkin bir yağlama film tabakası oluşturmaktadırlar [35]. Viskozite değerinin artmasıyla yağlayıcı film tabakası kalınlaşmakta ve kesme yağının kesici takım-iş parçası ara yüzeyine nüfuziyeti azalmakla beraber kesme bölgesinde oluşan sürtünme artmaktadır. Kesici takım-iş parçası ara yüzeyinde artan sürtünmeye bağlı olarak da kesme kuvveti değerlerinde de artışlar meydana gelmektedir. En yüksek kesme sıcaklığı değerlerinin (183,9 °C ve 172 °C) yüksek viskoziteli nano akışkanlar (HMNF-GMNF) ile elde edilmesi de bu durumu doğrular niteliktedir (Şekil 7.15). Kesme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvveti değişimlerine bakıldığında ise kesme kuvveti üzerinde en etkili parametrenin ilerleme olduğu söylenebilir. Tüm Hibrid Nano MMY kesme koşullarında, artan ilerleme, kesme kuvvetlerini belirgin bir şekilde artırmıştır. En yüksek kesme kuvveti (496 N), 60 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme ve GMNF kesme koşulunda elde edilirken, en düşük kesme kuvveti (319 N) ise, 45 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/dev ilerleme ve HGNF kesme koşulunda elde edilmiştir. Kesme hızının ise kesme kuvvetinin değişimi üzerinde çok fazla etkisi olmadığı görülmüştür. Kesme hızı arttığında kesme kuvveti değerleri önce bir miktar düşmüş ardından kesme hızındaki artışla birlikte kuvvet değerlerinin bir miktar arttığı görülmüştür. Bu trend, tüm Hibrid Nano MMY koşullarında benzer eğilim göstermiştir. Kesme hızındaki artış kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasını da sağlamıştır (Şekil 7.15). Artan sıcaklığın ise iş parçasının plastik deformasyonu kolaylaştırmasının kuvvet değerlerinde düşüşe sebep olduğu düşünülmektedir. Kesme

hızının artmaya devam etmesiyle kesme kuvvetindeki artışlar ise kesici takım deformasyonundaki artışa atfedilmiştir. Nitekim 60 m/dak kesme hızında takım ömürlerinin çok düşük olması bu durumu doğrulamaktadır (Şekil 7.18). Sonuç olarak kesme kuvveti açısından en iyi performansı hBN+grafit (HGNF) Hibrid Nano MMY koşulu göstermiştir.

7.2.3. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğün Değerlendirilmesi

Şekil 7.13'te Hibrid Nano MMY kesme koşulları altında, kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişimler verilmiştir. Şekil 7.13 incelendiğinde, kesme hızı ve ilerlemenin artışına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin önce azalış sonra artış eğiliminde olduğu görülmektedir. En düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri (0,180 μm) HGNF kesme koşulunda, 45 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerlemede elde edilirken, en yüksek yüzey pürüzlülük değeri (0,369 μm) ise GMNF kesme koşulunda, 60 m/dak kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerlemede elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki bu eğilimin kesme kuvveti sonuçlarına benzer eğilimde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni düşük kesme hızlarında, iş parçası malzemesinin plastik deformasyonuna yardımcı kesme sıcaklığının düşük olması neticesinde, kesici takımın iş parçasından talaş ayırmada zorlanması ve yüzey bütünlüğünün zarar görmesi olarak bahsedilebilir. Tüm Hibrid Nano MMY kesme koşullarında, 45 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme değerlerinde en düşük R_a değerleri elde edilmiştir (HGNF: 0,180 μm , HMNF: 0,199 μm ve GMNF: 0,209 μm). Kesme parametrelerinin artmaya devam etmesiyle bu sefer R_a değerlerinde artış eğiliminin devam ettiği ve 60 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme değerlerinde en yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştür (HGNF: 0,321 μm , HMNF: 0,341 μm ve GMNF: 0,369 μm). Şekil 7.13 incelendiğinden, en düşük R_a değeri HGNF kesme koşulunda elde edilirken bunu sırasıyla HMNF ve GMNF kesme koşulu takip etmiştir. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere HGNF hibrid nano akışkanın diğer nano akışkanlara göre viskozite ve viskozite indeks VI değerleri daha düşük ölçülmüştür (Şekil 7.10). Viskozite değerinin düşük olması MMY yöntemiyle kesme bölgesine yüksek basınç altında gönderilen aerosol hibrid nano akışkan buharı, kesici takım/talaş ara yüzeyine iyi nüfuz etmesini sağlayabilmektedir. Katı haldeki katı nano partiküllerin termal iletkenlik özellikleri ve kesici takım/iş parçası ara yüzeyinde yuvarlanma etkisi oluşturmasıyla kesici takım üzerinde oluşacak sıcaklık ve sürtünme

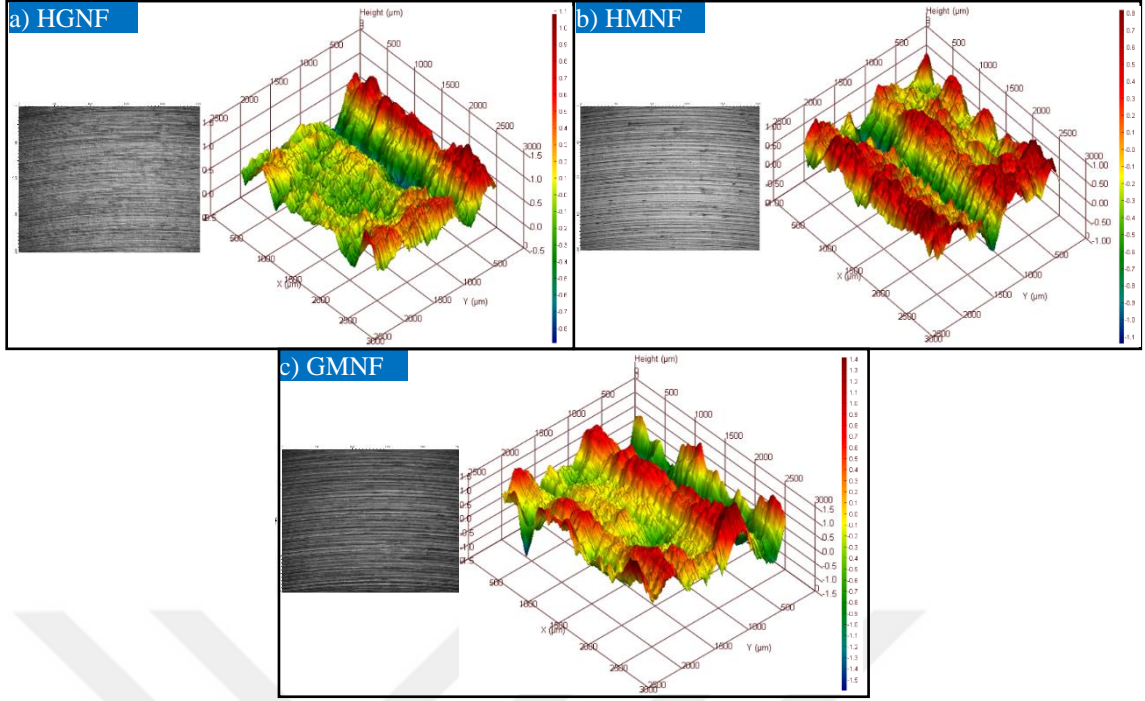
minimize edilebilmektedir. Fakat viskozitenin artmasıyla yağlayıcı film tabakası artmakta, yuvarlanma etkisi kesme bölgesinde tersinir bir durum göstererek sürtünmeyi artırmaktadır. Sürtünmenin artmasıyla birlikte yüzey bütünlüğünde ve kalitesinde de bozulmalar görülebilmektedir. Literatürde yer alan bazı araştırmalar bu iddiayı doğrular niteliktedir [142], [143].



Şekil 7.13. Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim.

Tüm Hibrid Nano MMY kesme koşulları altında, en düşük R_a değerlerine 45 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev kesme parametrelerinde ulaşıldığından, bu parametreler için yüzey karakteristiğini analiz etmede 3D yüzey topografyaları Şekil 7.14'te verilmiştir.

Şekil 7.14 incelendiğinde HGNF kesme koşulunun HMNF ve GMNF kesme koşullarına göre işleme izlerini ve tepe yüksekliklerini azalttığı görülmektedir. Bunun nedeni hBN altıgen kristal yapısındaki bor ve nitrojen atomlarının birbirine sıkı bağlı olması ve grafitin üstün yağlayıcı özelliği sayesinde sürtünmenin azalarak daha iyi bir yüzey topografyası oluşturduğu şeklinde açıklanabilir. Ayrıca lamel yapıda bulunan grafit nano partiküllerinin ara yüzeylerine küresel yapıdaki hBN nano partiküllerin yuvarlanmasıyla daha etken bir yuvarlanma mekanizması olduğu söylenebilir. HGNF hibrid nano akışkan içerisindeki lamel yapı arasında yuvarlanan nano partiküllerin HMNF ve GMNF hibrid nano akışkanına göre yüzeyde daha etken bir tribo film tabakası oluşturduğu düşünülmektedir. Bunun nedeni olarak, MoS_2 nano partikül yoğunluk özelliğinin fazla olması (Çizelge 6.9) neticesinde bu mekanizmanın nispeten daha az verimli olduğu şeklinde ifade edilebilir.

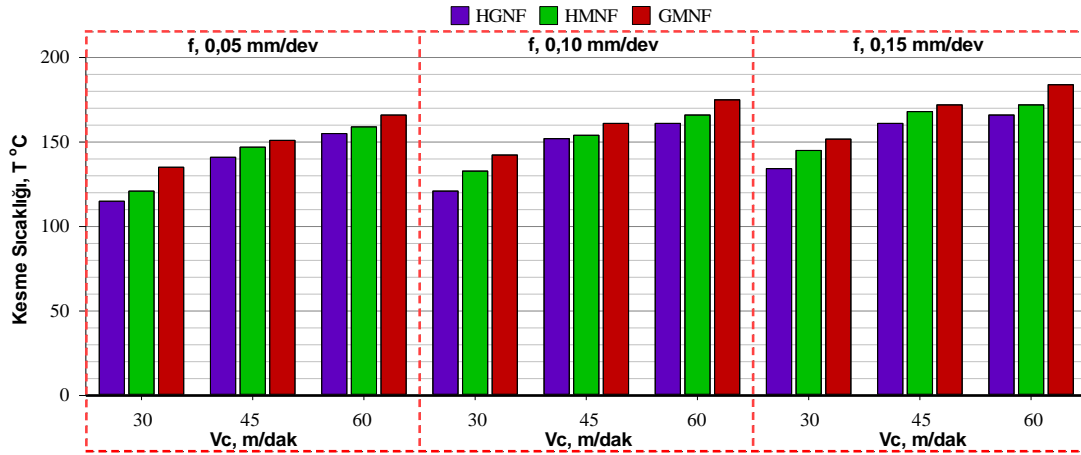


Şekil 7.14. Hibrid Nano MMF kesme koşullarında işlenen yüzeylerin 2D fotoğrafları ve 3D topografyaları.

7.2.4. Hibrid Nano MMF Kesme Koşullarında Kesme Sıcaklığının Değerlendirilmesi

Metal işleme esnasında farklı kesme bölgelerindeki plastik deformasyon, kesici takım-iş parçası ve kesici takım-talaş arasında sürtünme kaynaklı enerji oluşumu gibi etmenlerden dolayı çeşitli sıcaklık kaynakları ortaya çıkabilmektedir. Ortaya çıkan bu sıcaklıklar kesme parametreleri, kesici takım malzemesi ve geometrisi, soğutma/yağlama yöntemlerinin kullanılması gibi etmenlerle değişiklik gösterebilmektedir. Çalışmanın bu safhasında Hibrid Nano MMF koşullarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kesme sıcaklığı ölçüm sonuçları Şekil 7.15'te verilmiştir.

Şekil 7.15 incelendiğinde tüm kesme parametrelerinde en düşük kesme sıcaklığı değerleri sırasıyla HGNF<HMNF<GMNF kesme koşullarında elde edildiği görülmektedir. En yüksek sıcaklık değerlerinin elde edildiği 60 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme GMNF kesme koşulunda kaydedilen sıcaklık değeri 183,9 °C'dir. Aynı kesme parametrelerinde HMNF ve HGNF kesme koşullarındaki sıcaklık değerleri ise sırasıyla 172 °C ve 166 °C olmuştur. Dolayısıyla HMNF ve GMNF ile kıyaslandığında HGNF kesme sıcaklığında sırasıyla % 6,92 ve % 10,78 düşüş sağlamıştır.



Şekil 7.15. Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme parametrelerine bağlı olarak kesme sıcaklığındaki değişim.

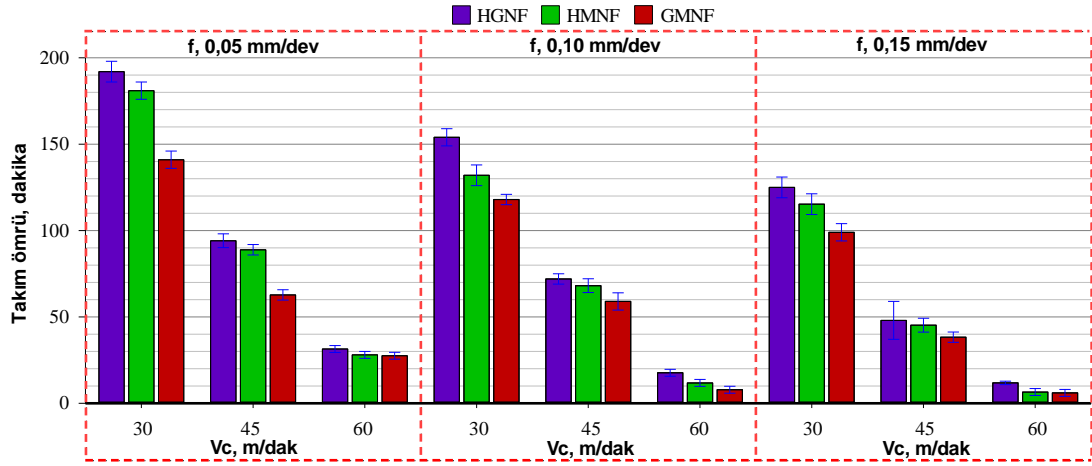
Yüksek termal iletkenlik katsayısına sahip olan hibrid nano akışkanın (Şekil 7.11) daha düşük kesme sıcaklığı üretmesi beklenirken burada durumun tam tersi olduğu görülmüştür. Dolayısıyla termal iletkenliğin kesme sıcaklığı üzerinde tek başına belirleyici faktör olmadığı söylenebilir. MMY sisteminde kullanılan nano akışkanın düşük viskoziteye sahip olması yağın daha iyi pülverize olmasını sağlamanın yanında takım-talaş ara yüzeyine nüfuzetini de artırmada kritik bir role sahiptir [38]. Nitekim en düşük kesme sıcaklığı değerlerinin düşük viskoziteli hibrid nano akışkanlar ile elde edilmiş olması da bu durumu doğrular niteliktedir. Ancak termal iletkenlik ve viskozitenin yanı sıra nano akışkana eklenen nano partiküllerin şeklinin, hibrid karışımlarda ise nano partiküllerin birbiri ile etkileşimlerinin göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Örneğin karışımlarda kullanılan hBN, altıgen kristal yapıya sahip olup iki tabaka arasında bor ve nitrojen atomlarına kovalent bağlı zayıf Van der Waals kuvvetleri oluşturmaktadır [144]. hBN sahip olduğu bu eşsiz özellikleri sayesinde eklendiği karışımlarda nispeten homojen bir dağılım oluşturabilmektedir. Ayrıca hBN, kesici takım iş parçası temas yüzeylerine kuvvetli bir şekilde yapışarak ince yağlayıcı film tabakası oluşturması sayesinde sürtünmeyi azaltmakta ve kesme sıcaklığının düşmesini sağlamaktadır. Ayrıca küresel formda olan hBN katı nano partiküllerin yuvarlanma etkisi özelliği sergilemesiyle, kesici takım iş parçası ara yüzeyinde oluşan temas minimize edilebilmektedir. Bu sayede kesici takım-iş parçası ara yüzeyindeki temas yoluyla oluşan sürtünme azalmakta ve kesme bölgesinde oluşan sıcaklıklarda da önemli düşüşler gözlenebilmektedir. Katı haldeki MoS₂ yoğunluk değerinin hBN ve grafitte göre çok daha yüksek olması (Çizelge 6.9) kesme bölgesine aerosol buhar olarak gönderilmesini

nispeten zorlaştırmakta ve kesici takım-talaş ara yüzeyinde yağlayıcı film kalınlığının artmasıyla yağlayıcılık performansında azalmaya yol açabilmektedir. Kesme parametrelerinin, kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri incelendiğinde kesme hızı ve ilerleme değerlerinin artmasıyla kesme sıcaklığını artırdığı görülmüştür. Ancak kesme sıcaklığı üzerinde en etkili parametrenin, kesme hızı olduğu söylenebilir. Öyle ki HGNF kesme koşulunda 0,05 mm/dev ilerlemede, 30 m/dak kesme hızında 115 °C olan kesme sıcaklığı, kesme hızının 60 m/dak olması ile % 34,78 artışla 155 °C'ye ulaşmıştır. Bu durum yüksek kesme hızlarında takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünmenin artması ile izah edilebilir. Nitekim en yüksek kesme kuvveti değerlerinin (Şekil 7.12) en yüksek kesme hızında elde edilmiş olması da bunu doğrulamaktadır. İlerleme değerindeki artışın kesme sıcaklığını artırma üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu görülmüştür. Öyle ki HGNF kesme koşulunda 30 m/dak kesme hızında 0,05 mm/dev ilerlemede 115 °C olan kesme sıcaklığı 0,1 mm/dev ilerlemede % 5,22 artışla 121 °C ve 0,15 mm/dev ilerlemede % 16,78 artışla 134,3 °C olarak ölçülmüştür.

7.2.5. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesici Takım Aşınmasının Değerlendirilmesi

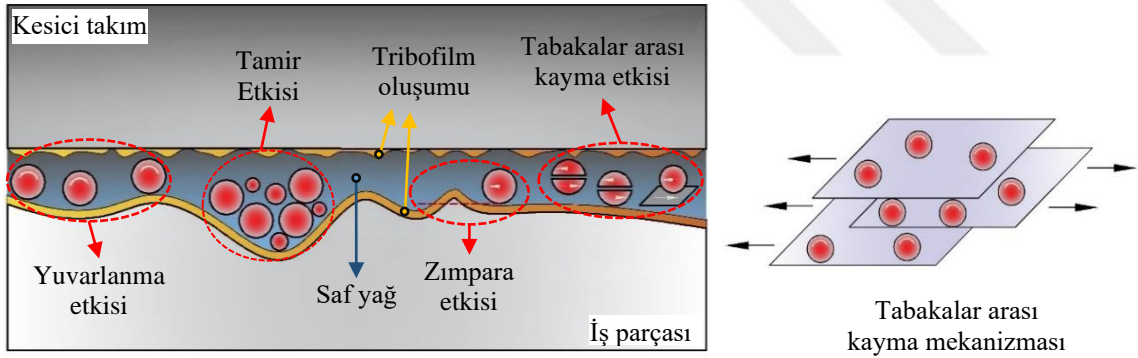
Bu bölümde, sabit kesme derinliğinde (0,5 mm) üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve üç farklı Hibrid Nano MMY soğutma/yağlama koşulu altında, kesici takım yanak aşınma değeri (V_B) 0,3 mm sabit tutularak, kesici takım aşınma süreleri ele alınmıştır. Şekil 7.16'da kesme koşullarına göre kesici takım aşınma süreleri verilmiştir. Şekil 7.16 incelendiğinde ilerleme ve kesme hızının artmasıyla birlikte kesici takımın daha hızlı aşındığı görülmektedir. En düşük ilerleme ve kesme hızının olduğu parametrelerde en uzun kesici takım ömrünün olduğu görülmektedir. Kesme parametrelerinin düşük değerlerde olması kesici takım iş parçası arasında temas süresinin fazla olmasına neden olmaktadır. Ayrıca iş parçasından talaşın ayrılmasını sağlayan plastik deformasyona yardımcı kesme bölgesinde oluşan ısının istenmeyen değerlere ulaşmaması bunun neticesinde de kesici takım aşınma süresinin daha uzun olmasına neden olmaktadır. Kesme parametrelerinin artışıyla kesici takıma etkileyen kesme kuvvet değerlerinde ve kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkta artışa neden olmakta bu da kesici takımın daha çabuk ömrünü tamamlamasına yol açtığı düşünülmektedir. Çalışmanın önceki bölümlerinde de bahsedildiği gibi HGNF Hibrid Nano MMY kesme koşulu altında gerçekleştirilen kesici ömür deneyleri HMNF ve GMNF Hibrid Nano MMY kesme koşullarına göre daha iyi

sonuçlar göstermektedir.



Şekil 7.16. Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme parametrelerine bağlı olarak takım ömründeki değişim.

HGNF hibrid nano akışkanın içeriğinde bulunan hBN yapısının küresel, grafit yapısının ise tabaka formunda olması, nano akışkanların, tamir, parlatma, yuvarlanma ve tabakalar arası kayarak yuvarlanma mekanizmalarının daha etkin oluşmasını sağladığı düşünülmektedir (Şekil 7.17).



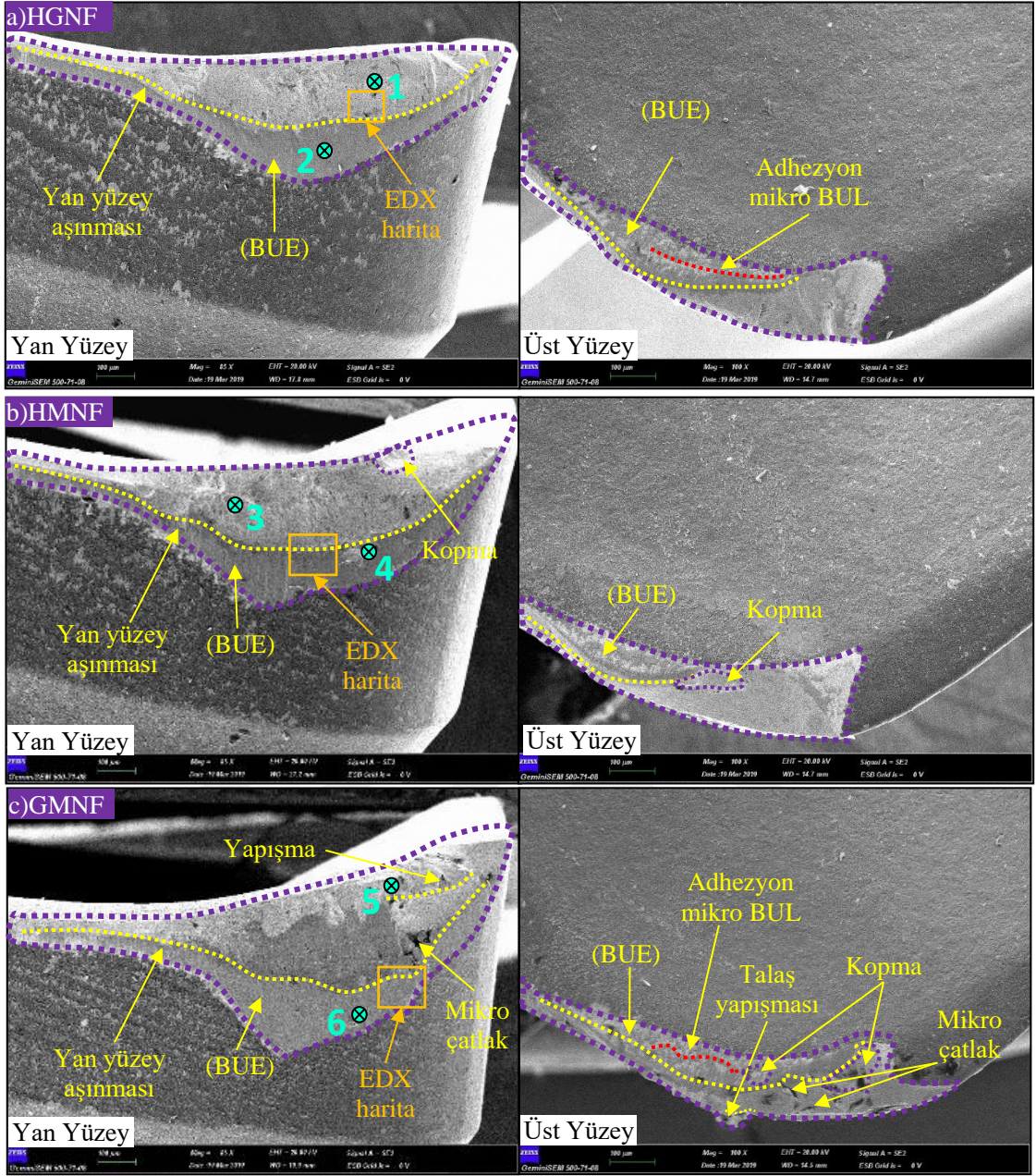
Şekil 7.17. Kesme bölgesinde oluşan nano akışkan mekanizmaları [145].

HMNF hibrid nano akışkanı, HGNF hibrid nano akışkanın sergilediği mekanizma etkisinin nispeten gerisinde kaldığı görülmektedir. Bunun asıl nedeni özellik MoS₂ nano partikülün tabaka formunda olmasına rağmen özgül yoğunluk özelliğinin yüksek olması (Çizelge 6.9) ve bundan dolayı da tabakalar arasına küresel yapıdaki hBN nano partiküllerinin nüfuz edememesi şeklinde açıklanabilir. GMNF hibrid nano akışkanın ise iki tabaka yapıdaki grafit ve MoS₂ nano partikülün özellikle aşınma mekanizmalarının önlenmesinde önemli bir etkisi olduğu düşünülen yuvarlanma etki mekanizmasını oluşturamadığından kesici takım ömründe düşüşe neden olmuştur şeklinde ifade

edilebilir.

Hibrid Nano MMY kesme koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, kesici takımlardaki aşınma mekanizmalarını belirleme amacıyla, SEM fotoğrafları çekilerek EDX analizleri yapılmıştır. 30 dakika işleme süresi sonunda kesici takımlara ait SEM aşınma görüntüleri Şekil 7.18’de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde aşınan kesici takımlarda baskın olarak, yanak aşınması, burun aşınması olduğu ayrıca kesici takıma iş parçasından BUE veya BUL aşınma mekanizmasını hızlandıran mekanizmaların geliştiği görülmüştür. HGNF, HMNF ve GMNF Hibrid Nano MMY kesme koşullarındaki yan yüzey SEM fotoğrafları incelendiğinde (Şekil 7.18 a-b-c) kesici takım yan yüzey aşınmasının baskın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Hibrid Nano MMY kesme koşullarındaki yanak aşınma alanları büyükten küçüğe doğru GMNF>HMNF>HGNF şeklinde sıralandığı görülmektedir. HMNF ve GMNF Hibrid Nano MMY kesme koşullarında kesici takım üst yüzeyinde, adhezyon aşınmasından kaynaklanan kopma aşınmasının olduğu görülmektedir. Özellikle süper alaşımların kimyasal yapısındaki abrasif karbür partiküller kesici takım kenarından akan talaşın da etkisiyle birlikte abrasif aşınma oluşumuna neden olmaktadır. Nikel esaslı süper alaşım malzemelerin sünek yapıda olması, düşük termal iletkenlik ve difüzyon hızları sebebiyle kesici takım kenarında dik sıcaklık gradyanına neden olmakla birlikte sürtünme kaynaklı oluşan sıcaklığın kesici takım kenarına doğru kaymasına neden olabilmektedir [97].

Artan sıcaklık ve kesici takım kenarında kayan talaşlar, kesici takım kenarına BUE veya BUL formunda yapışmaktadırlar. Kesme işleminin devamıyla birlikte kesici takımın bir parçası gibi davranan BUE ve BUL oluşumları, sonrasında ayrılarak kesici takımda kopma, talaş yapışması, mikro yapışma ve yıpranma aşınma mekanizmalarını gelişmesini hızlandırıcı etki göstermektedirler. GMNF Hibrid Nano MMY kesme koşulunda kesici takım uç kısmına yapışan talaş bu mekanizmayı açıklar niteliktedir.



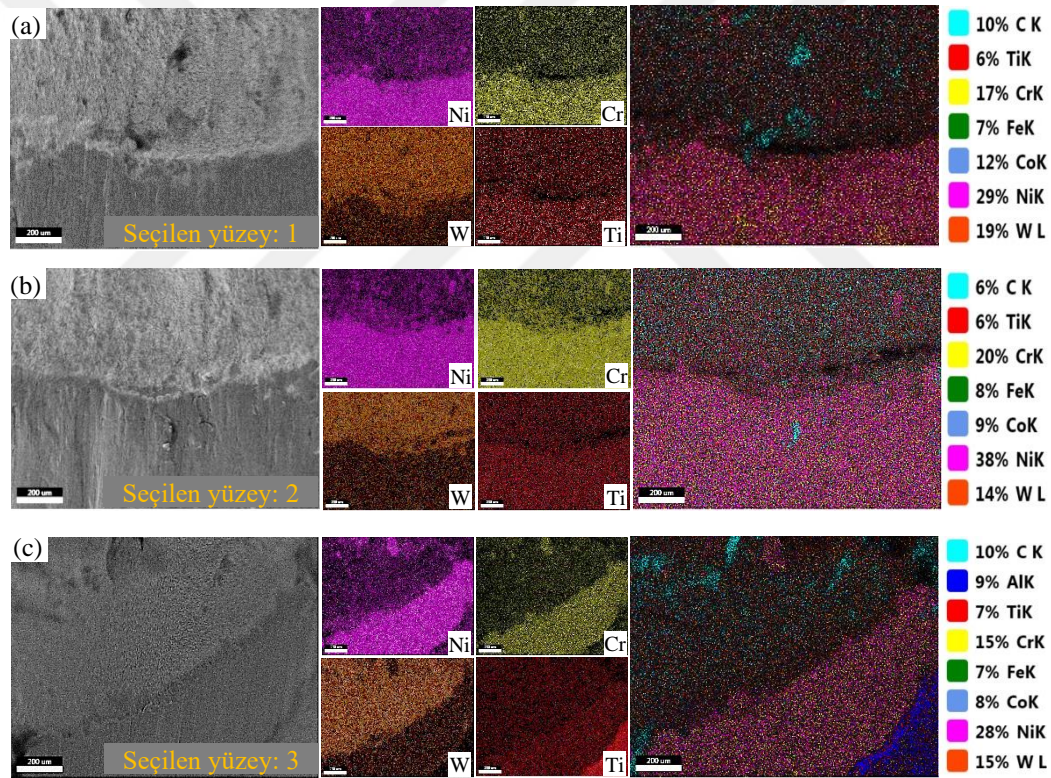
Şekil 7.18. Hibrid Nano MMY kesme koşullarında kesici takım SEM aşınma görüntüleri.

hBN ve grafit nano partikülleriyle hazırlanan HGNF Hibrid Nano MMY kesme koşulunda tribo film tabakasının etkin bir şekilde oluşması, grafit lamel yapıları nano partiküllerin katmanları arasında küresel yapıları hBN nano partiküllerin tabakalar arası yuvarlanma mekanizması sayesinde BUL veya BUE oluşumunu geciktirdiği ve kopma aşınma oluşumunu bu sayede engellediği düşünülmektedir. Kesici takım yan yüzeylerinden alınan EDX analizleri Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Hibrid Nano MMY kesme koşullarında kesici takım EDX analiz sonuçları.

Noktalar	Ti	Cr	Co	Ni	W	C	Al
Nokta 1	-	4,51	9,96	7,02	57,02	21,49	-
Nokta 2	4,39	19,13	-	62,69	-	12,83	0,96
Nokta 3	-	3,9	9,2	7,44	60,46	19	-
Nokta 4	1,47	13,75	4,15	32,64	25,81	21,61	0,57
Nokta 5	-	2,14	3,68	7,15	66,29	18,94	1,80
Nokta 6	4,38	23,67	-	71,95	-	-	-

Kesici takım kaplamasının sıyrılarak iş parçası malzemesinin kesici takıma yapıştığı EDX haritalandırma analizleri ile de görülmektedir (Şekil 7.19). SEM görüntülerinin yer aldığı Şekil 7.18 SEM fotoğrafları üzerinde seçme bölgelerinin gösterildiği, Şekil 7.19 incelendiğinde kesici takım kaplamasının sıyrıldığı ve iş parçası malzemesinin takıma yapıştığı görülmektedir.



Şekil 7.19. Hibrid Nano MMY kesme koşullarında seçilen yüzeylerden alınan EDX haritalandırma sonucu a)HGNF, b)HMNF, c)GMNF.

Şekil 7.19-a HGNF kesme koşulundaki EDX haritalandırma analizinde seçilen bölgedeki element oranlarına bakıldığında Ni % 29 ve Cr % 17 oranda olduğu görülmektedir. Ayrıca Çizelge 7.4'te yer alan EDX analizleri de bu durumu doğrular niteliktedir. Şekil 7.19-b ve Şekil 7.19-c incelendiğinde, benzer durum buradaki sonuçlarda da görülmektedir. Adhezyon aşınmasının görüldüğü kesici takım yan yüzeylerinde Inconel X-750 süper

alaşımı kimyasal içeriğinde baskın Ni ve Cr elementleri görülmektedir. Ayrıca adhezyon aşınma çizgisinin dışında kalan yüzeylerde ise kesici takım kaplaması Ti ve içeriğindeki W elementleri de Şekil 7.19’da görülmektedir.

7.2.6. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deney Sonuçlarının ANOVA Analizi

Çalışmanın bu aşamasında kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım ömrü üzerinde, Hibrid Nano MMY kesme koşulu, kesme hızı ve ilerlemenin etki seviyeleri belirlenmiştir. Etki seviyelerinin belirlenmesi amacıyla ANOVA analiz yöntemi kullanılmıştır [146]. ANOVA analizi % 5 önem seviyesinde ve % 95 güvenirlikle gerçekleştirilmiştir.

7.2.6.1. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Kuvvetinin ANOVA Analizi

İşleme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkilerini gösteren ANOVA sonuçları Çizelge 7.5’te verilmiştir.

Çizelge 7.5. Kesme kuvveti ANOVA analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri	Etki Oranı (%)
Kesme Koşulu	2	2792	1396,1	23,86	0,000	3,65
Kesme Hızı	2	4423	2211,4	37,78	0,000	5,78
İlerleme	2	68081	34040,3	581,63	0,000	89,03
Hata	20	1171	58,5	-	-	1,53
Toplam	26	76466	-	-	-	100

ANOVA sonuçlarına göre kesme kuvvetine etki eden en önemli parametre beklendiği gibi % 89,03 oranla ilerleme olmuştur. Bunu % 5,78 oranla kesme hızı ve % 3,65 oranla ise kesme koşulu takip etmiştir. İlerleme değerinin artması, kesici takım üzerine daha fazla yüklerin etki etmesine ve birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasına neden olduğundan, kesme kuvveti değerleri de artış göstermiştir [74], [83].

7.2.6.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğünün ANOVA Analizi

İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini gösteren ANOVA sonuçları Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Yüzey pürüzlülüğü ANOVA analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri	Etki Oranı (%)
Kesme Koşulu	2	0,004577	0,002288	57,94	0,000	7,24
Kesme Hızı	2	0,010940	0,005470	138,48	0,000	17,30
İlerleme	2	0,046944	0,023472	594,23	0,000	74,22
Hata	20	0,000790	0,000040	-	-	1,25
Toplam	26	0,063251	-	-	-	100

ANOVA analiz sonuçları incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrenin % 74,22 etki oranıyla ilerleme olduğu görülmektedir. Bunu % 17,30 etki oranıyla kesme hızı ve % 3,65 etki oranıyla ise kesme koşulu takip etmiştir. İlerleme değerinin artması takıma etki eden kesme kuvveti değerlerinin artmasına neden olmaktadır. İlerlemedeki artış, kesici takımın iş parçasından birim zamanda daha fazla ilerlemesine ve işleme izlerinin artması neticesinde yüzey pürüzlülük değerlerinin de artmasına neden olmuştur [147].

7.2.6.3. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Kesme Sıcaklığının ANOVA Analizi

İşleme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerini gösteren ANOVA sonuçları Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Kesme sıcaklığı ANOVA analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri	Etki Oranı (%)
Kesme Koşulu	2	967,6	483,80	61,25	0,000	12,03
Kesme Hızı	2	5423,7	2711,84	343,34	0,000	67,43
İlerleme	2	1494,1	747,05	94,58	0,000	18,58
Hata	20	158,0	7,90	-	-	1,96
Toplam	26	8043,4	-	-	-	100

ANOVA analiz sonuçları incelendiğinde, kesme sıcaklığına etki eden en önemli parametrenin % 67,43 etki oranıyla kesme hızı olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla % 18,58 etki oranıyla ilerleme, % 12,03 etki oranıyla ise kesme koşulu takip etmiştir. Kesme hızının artması, kayma düzleminde şekil değiştirme hızını da artırdığından, kesme sıcaklığı değerleri de artış göstermiştir [83].

7.2.6.4. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Takım Ömrünün ANOVA Analizi

İşleme parametrelerinin takım ömrü üzerindeki etkilerini gösteren ANOVA sonuçları ’de

verilmiştir.

Çizelge 7.8. Takım ömrü ANOVA analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri	Etki Oranı (%)
Kesme Koşulu	2	1977	988,5	8,09	0,003	2,45
Kesme Hızı	2	69490	34745	284,41	0,000	85,95
İlerleme	2	6937	3468,7	28,39	0,000	8,58
Hata	20	2443	122,2	-	-	3,02
Toplam	26	80848	-	-	-	100

ANOVA analiz sonuçlarına göre, takım ömrüne etki eden en önemli parametrenin % 85,95 etki oranıyla kesme hızı olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla % 8,58 etki oranıyla ilerleme, % 2,45 etki oranıyla ise kesme koşulu takip etmiştir. Kesme bölgesindeki ısı oluşumu ile takım aşınması arasında doğrudan tipik bir ilişki vardır [83]. Kesme hızının artması, kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasına yol açtığından, kesici takım aşınmasını hızlandırmakta ve takım ömründe düşümlere sebebiyet vermektedir.



8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deney Sonuçları

Inconel X-750 süper alaşımın frezelenmesinde ekolojik kesme koşullarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk aşamada yapılan frezeleme deneyleri kuru, MMY, dört farklı konsantrasyon oranına sahip (hacimce % 0,25, % 0,50, % 0,75 ve % 1) üç farklı nano partikül (hBN, MoS₂, grafit) katkılı nano akışkan olmak üzere toplamda 14 farklı kesme koşulunda gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Tüm nano akışkanlar (hBN, grafit ve MoS₂) için nano partikül konsantrasyon oranı arttıkça viskozite değerleri de artış göstermiştir. Tüm konsantrasyon oranlarında (hacimce % 0,25, % 0,50, % 0,75 ve % 1) en düşük viskozite değerleri hBN nano akışkanlarda elde edilirken bunu sırasıyla MoS₂ ve grafit nano akışkanları takip etmiştir.
- Saf bitkisel esaslı yağa nano partiküllerin eklenmesiyle hazırlanan nano akışkan karışımın termal iletkenlik özelliğinde önemli ölçüde iyileşme görülmüştür. Bu iyileşme tüm nano akışkanlar için artan konsantrasyon oranıyla birlikte daha da artmış olup en yüksek termal iletkenlik değerleri hacimce % 1 konsantrasyonlu MoS₂ nano akışkanında elde edilmiştir. Bitkisel esaslı yağ ile karşılaştırıldığında hacimce % 1 karışım oranlarındaki hBN, grafit ve MoS₂ nano akışkanları termal iletkenlikte sırasıyla % 17,18, % 18,73 ve % 21,79 artış sağlamıştır.
- Soğutma ve yağlama ajanının olmaması sebebiyle en yüksek yüzey pürüzlülüğü (0,352 µm), kesme kuvveti (498 N), kesme sıcaklığı (286 °C) ve en düşük takım ömrü (18,32 dakika) değerleri beklendiği üzere kuru kesme koşulunda elde edilmiştir. MMY kesme koşulunun kullanımı ile yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, takım ömründe kuru kesme koşullarına göre sırasıyla % 16,19, % 8,43, % 29,02 ve % 117 iyileşme sağlanmıştır.
- Hacimce % 0,50 konsantrasyonlu Nano MMY koşulları, yüzey pürüzlülüğü,

kesme kuvveti, takım aşınması ve ömründe en iyi performansı gösterirken, kesme sıcaklığında ise en iyi performansı hacimce % 0,25 konsantrasyonlu Nano MMY kesme koşulları göstermiştir.

- Termal iletkenlik katsayısı yüksek olan nano partiküllerle hazırlanan nano akışkanların kullanıldığı kesme koşullarında kesme sıcaklık değerleri daha düşük çıkmıştır. Dolayısıyla en düşük kesme sıcaklığı MoS₂ nano akışkan (153 °C) kesme koşulunda elde edilirken, bunu sırasıyla grafit (157 °C) ve hBN (163,2 °C) nano akışkan kesme koşulu takip etmiştir.
- hBN nano akışkan kesme koşulu, MoS₂ ve grafit nano akışkan kesme koşulları ile karşılaştırıldığında, yüzey pürüzlülüğü (% 16,15 - % 21,46), kesme kuvveti (% 7,27 - % 3,14) ve daha takım aşınmasında (% 6,82 - % 20,85) daha iyi performans göstermiştir.
- SEM ve EDX analizleri sonucunda, hBN ve MoS₂ nano akışkan kesme koşullarında kesici takım baskın aşınma tipinin düzensiz yan yüzey aşınması olduğu gözlenmiştir. Kuru, saf yağ ve grafit kesme koşullarında ise BUL oluşumunun yerini kopma aşınması aldığı tespit edilmiştir. Nano akışkan kesme koşulları, kuru ve MMY kesme koşullarına göre takım aşınmasını azaltarak takım ömründe önemli iyileşmeler sağlamıştır. Kuru ve MMY kesme koşullarına göre hBN, MoS₂ ve grafit nano akışkan kesme koşulları takım ömründe sırasıyla % 222 - % 48,7, % 189 - % 33,3 ve % 161 - % 20,5 iyileşmeler sağlamıştır.

Genel değerlendirme sonucunda Inconel X-750 süper alaşımının frezelenmesinde ekolojik olarak adlandırılan nano akışkan kesme koşullarının işleme performansını iyileştirdiği görülmüştür. Toksik özelliği olmayan, çevreyle dost nano partiküllerin optimum konsantrasyon oranı hacimce % 0,50 olarak tespit edilmiştir. Nano akışkanlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde işleme performansı açısından hBN nano akışkan koşulu diğer nano akışkan koşullarına üstünlük sağladığı görülmüştür.

8.2. Hibrid Nano MMY Kesme Koşullarında Gerçekleştirilen Deney Sonuçları

Çalışmanın ikinci aşamasında, Inconel X-750 süper alaşım malzemesinin frezelenmesinde Hibrid Nano MMY kesme koşullarının işleme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk aşamada gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre elde edilen en iyi nano partikül konsantrasyon oranı (hacimce % 0,50) bu çalışmada girdi parametresi

olarak kullanılmıştır. Hibrid nano akışkanlar, hacimce % 0,50 konsantrasyonda hBN, grafit ve MoS₂ nano partiküllerinin bitkisel esaslı kesme yağına eşit oranda (% 50 + % 50) ve eklenmesiyle hazırlanmıştır. Frezeleme deneyleri üç farklı kesme koşulu (HGNF, HMNF ve GMNF), kesme hızı (30, 45 ve 60 m/dak), ilerlemede (0,05-0,10 ve 0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen verilerle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Bitkisel esaslı yağa hBN, grafit ve MoS₂ nano partiküllerinin eşit oranda eklenmesiyle viskozite değerlerinde artışlar görülmüştür. HGNF, HMNF ve GMNF hibrid nano akışkanların 40 °C de viskozite değerleri, saf yağa göre sırasıyla % 22,97, % 25,15 ve % 30,10 artış gösterirken, 100 °C de ölçülen viskozite değerleri % 19, % 22 ve % 28 artış göstermiştir. Viskozite indeks VI değerlerinde ise artış % 13,73, % 19,61 ve % 30,10 mertebelerinde olmuştur.
- Hibrid nano akışkan karışımların, saf yağa göre termal iletkenlikleri daha yüksek ölçülmüştür. HGNF ve GMNF hibrid nano akışkanlar karışımlar termal iletkenlikte saf yağa göre, % 16,01, % 21,05 ve % 22,12 oranında artış göstermiştir.
- Kesme kuvvetinin en düşük değeri HGNF kesme koşulunda görülürken, bunu sırasıyla HMNF ve GMNF kesme koşulları takip etmiştir. Ayrıca tüm Hibrid Nano MMY kesme koşullarında, 45 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerlemede en düşük kesme kuvveti değerleri ölçülmüştür.
- Frezeleme esnasında kesme bölgesinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri incelendiğinde, en düşük kesme sıcaklık değerleri sırasıyla HGNF<HMNF<GMNF hibrid nano akışkan kesme koşullarında olduğu görülmüştür.
- Yüzey pürüzlülüğün en düşük değerine (0,180 µm) HGNF kesme koşulunda, 45 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/dev ilerleme parametrelerinde elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri (0,369 µm) ise GMNF kesme koşulunda, 60 m/dak kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerleme parametrelerinde elde edilmiştir.
- Hibrid Nano MMY kesme koşulları altında gerçekleştirilen kesici takım aşınma karakterizasyonunun belirlenmesinde SEM görüntüleri ve EDX analizleri kullanılmış ve baskın aşınma tipinin tüm koşullar için yan yüzey aşınması olduğu görülmüştür. En düşük takım aşınması HGNF kesme koşulunda olurken bunu

sırasıyla HMNF ve GMNF kesme koşulu takip etmiştir.

- ANOVA analizi sonuçlarına göre; kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım ömrüne etki eden en önemli işleme parametresi sırasıyla, % 89,03 etki oranıyla ilerleme, % 74,22 etki oranıyla ilerleme, % 67,43 etki oranıyla kesme hızı ve % 85,95 etki oranıyla kesme hızı olmuştur.

Tüm sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; Inconel X-750 süper alaşımın Hibrid Nano MMY kesme koşulları altında frezelenmesinde, işleme verimliliği açısından olumlu sonuçların elde edildiği görülmüştür. En iyi işleme performansı HGNF (hBN+grafit) Hibrid Nano MMY kesme koşulu altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilmiştir.

8.3. Öneriler

- Inconel X-750 süper alaşım malzemesi kesme sıvısı kullanılarak frezelenmesi tavsiye edilmektedir.
- Kesme sıvısı kullanımında MMY sisteminde biyolojik olarak parçalanabilen bitkisel esaslı yağ tercih edilmelidir.
- MMY sisteminde kullanılan bitkisel esaslı yağın içerisine hBN, MoS₂ ve grafit nano partiküllerinin hacimce % 0,50 konsantrasyon oranında eklenmesi tavsiye edilmektedir.
- Inconel X-750 süper alaşımının frezelenmesinde Hibrid Nano MMY kesme koşulunun kullanımı tavsiye edilmektedir.
- Hibrid nano akışkan hazırlamada nano partikül olarak, hBN, MoS₂ ve grafitin birlikte kombin edilmesi tavsiye edilmektedir.
- Hibrid Nano MMY, Nano MMY koşulları işleme performansı ve çevreci olmalarından ötürü işlenebilirlik çalışmalarında, kuru ve konvansiyonel soğutma yerine kullanımı tercih edilmelidir.

Bu çalışmada ele alınamayan fakat üzerinde daha kapsamlı çalışılabilir konular;

- Inconel X-750 üzerine literatürde yapılan çalışmalar yetersiz olduğundan işlenebilirlik çalışmalarına devam edilebilir.
- Kesici takım olarak farklı geometri ve kaplamaya sahip takımlarla frezeleme

deneyleri gerçekleştirilebilir.

- Nano akışkan hazırlamada kullanılan hBN, MoS₂ ve grafit nano partikülleri yerine farklı özellikli nano partiküller tercih edilebilir.
- MMY nozul açısı ve mesafesi optimize edilerek çalışma derinleştirilebilir.
- MMY sisteminde kesme sıvısı olarak kullanılan bitkisel esaslı yağın farklı türlerinin işleme performansları test edilebilir.
- Hibrid nano akışkan hazırlamada iki yerine daha fazla nano partikül karışıma eklenebilir.
- Frezeleme işleminde kesme sıcaklığının ölçümünde temaslı termokupl yöntemleriyle, kızılötesi termal kamera yöntemi karşılaştırılabilir.

9. KAYNAKLAR

- [1] A. Thakur, ve S. Gangopadhyay, “State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c.100, ss. 25–54, 2016.
- [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] H. Attia, S. Tavakoli, R. Vargas, ve V. Thomson, “Laser-assisted high-speed finish turning of superalloy Inconel 718 under dry conditions”, *CIRP Annals*, c. 59, sayı 1, ss. 83–88, 2010.
- [4] N. Tazehkandi, A. H. Shabgard, M. Pilehvarian, ve F. Farshfroush, “Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in turning of Inconel alloy X-750 with biodegradable vegetable oil”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, c. 231, sayı 9, ss. 1516–1527, 2017.
- [5] M. Soković, ve K. Mijanović, “Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 109, sayı 1–2, ss. 181–189, 2001.
- [6] L. N. López De Lacalle, C. Angulo, A. Lamikiz, ve J. A. Sánchez, “Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 172, sayı 1, ss. 11–15, 2006.
- [7] 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.
- [8] F. Klocke, ve G. Eisenblaetter, “Dry cutting”, *CIRP annals*, c. 46, ss. 519–526, 1997.
- [9] S. Sartori, A. Ghiotti, ve S. Bruschi, “Solid lubricant-assisted minimum quantity lubrication and cooling strategies to improve Ti6Al4V machinability in finishing turning”, *Tribology International*, c. 118, ss. 287–294, 2018.
- [10] N. Mia, M. Khan, ve M. A. Dhar, “Study of surface roughness and cutting forces using ANN, RSM, and ANOVA in turning of Ti-6Al-4V under cryogenic jets applied at flank and rake faces of coated WC tool”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 93, sayı 1–4, ss. 975–991, 2019.
- [11] D. Fratila, ve C. Caizar, “Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3”, *Journal of Cleaner Production*, c. 19, sayı 6–7, ss. 640–645, 2011.
- [12] A. Ghadimi, R. Saidur, ve H. S. C. Metselaar, “A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, c. 54, sayı 17–18, ss. 4051–4068, 2011.
- [13] H. Hegab, H. Umer, U. Deiab, ve I. Kishawy, “Performance evaluation of Ti-6Al-4V machining using nano-cutting fluids under minimum quantity lubrication”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 95, sayı 9–12, ss. 4229–4241, 2018.

- [14] J. S. Nam, P. H. Lee, ve S. W. Lee, “Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 51, sayı 7–8, ss. 649–652, 2011.
- [15] S. H. Lee, K. Hwang, Y. Cheong, S. Choi, Y. Kwon, L. Lee, ve J. Kim, “Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication”, *Tribology Letters*, c. 35, sayı 2, ss. 127–131, 2009.
- [16] 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.
- [17] M. Sayuti, O. M. Erh, A. A. D. Sarhan, ve M. Hamdi, “Investigation on the morphology of the machined surface in end milling of aerospace AL6061-T6 for novel uses of SiO₂ nanolubrication system”, *Journal of Cleaner Production*, c. 66, ss. 655–663, 2014.
- [18] M. Sarıkaya, V. Yılmaz, ve A. Güllü, “Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy”, *Journal of Cleaner Production*, c. 133, ss. 172–181, 2016.
- [19] S. Thamizhmanii, “A study of minimum quantity lubrication on Inconel 718 steel”, *Archives of Materials Science and Engineering*, c. 39, sayı 1, ss. 38–44, 2009.
- [20] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya, ve F. Erzincanlı, “Determination of mql parameters contributing to sustainable machining in the milling of nickel-base superalloy Waspaloy”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, c. 42, sayı 11, ss. 4667–4681, 2017.
- [21] I. Ansari, ve B. Kotiveerachary, “Study of the effect of minimum quantity lubrication on the surface roughness of Incoloy 800 during turning operation”, *International Journal of Mechanical Engineering and Research*, c. 3, sayı 5, ss. 439–448, 2013.
- [22] N. Tosun, ve M. Hüseyinoğlu, “Effect of mql on surface roughness in milling of AA7075-T6”, *Materials and Manufacturing Processes*, c. 25, sayı 8, ss. 793–798, 2010.
- [23] Y. Kamata, ve T. Obikawa, “High speed mql finish-turning of Inconel 718 with different coated tools”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 192, ss. 281–286, 2007.
- [24] H. Lin, C. Wang, Y. Yuan, Z. Chen, Q. Wang, ve W. Xiong, “Tool wear in Ti-6Al-4V alloy turning under oils on water cooling comparing with cryogenic air mixed with minimal quantity lubrication”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 81, sayı 1–4, ss. 87–101, 2015.
- [25] A. Uysal, F. Demiren, ve E. Altan, “Applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano MoS₂ reinforced vegetable cutting fluid”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, c. 195, ss. 2742–2747, 2015.
- [26] S. Prasad, ve R. R. Srikant, “Performance evaluation of nano graphite inclusions in cutting fluids with mql technique in turning of AISI 1040 steel”, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, c. 2, sayı 11, ss. 381–393, 2013.
- [27] Chetan, B. C. Behera, S. Ghosh, ve P. V. Rao, “Application of nanofluids during

- minimum quantity lubrication: a case study in turning process”, *Tribology International*, c. 101, ss. 234–246, 2016.
- [28] B. Kurşuncu, ve A. Yaraş, “Assessment of the effect of borax and boric acid additives in cutting fluids on milling of AISI O2 using MQL system”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 95, sayı 5–8, ss. 2005–2013, 2018.
- [29] N. K. Sahu, A. B. Andhare, ve R. A. Raju, “Evaluation of performance of nanofluid using multiwalled carbon nanotubes for machining of Ti-6AL-4V”, *Machining Science and Technology*, c. 22, sayı 3, ss. 476–492, 2018.
- [30] K. Ganesan, M. Naresh Babu, M. Santhanakumar, ve N. Muthukrishnan, “Experimental investigation of copper nanofluid based minimum quantity lubrication in turning of H 11 steel”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 40, sayı 3, ss.160–177, 2018.
- [31] P. Rapeti, V. K. Pasam, K. M. Rao Gurram, ve R. S. Revuru, “Performance evaluation of vegetable oil based nano cutting fluids in machining using grey relational analysis-A step towards sustainable manufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, c. 172, ss. 2862–2875, 2018.
- [32] B. Rahmati, A. A. D. Sarhan, ve M. Sayuti, “Investigating the optimum molybdenum disulfide (MoS₂) nanolubrication parameters in CNC milling of AL6061-T6 alloy”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 70, sayı 5–8, ss. 1143–1155, 2014.
- [33] A. Thakur, A. Manna, ve S. Samir, “Multi-response optimization of turning parameters during machining of EN-24 steel with SiC nanofluids based minimum quantity lubrication”, *Silicon*, c. 12, sayı 1, ss. 71–85, 2020.
- [34] A. K. Sharma, R. K. Singh, A. R. Dixit, ve A. K. Tiwari, “Characterization and experimental investigation of Al₂O₃ nanoparticle based cutting fluid in turning of AISI 1040 steel under minimum quantity lubrication (MQL)”, *Materials Today: Proceedings*, c. 3, sayı 6, ss. 1899–1906, 2016.
- [35] N. Talib, ve E. A. Rahim, “Performance of modified jatropa oil in combination with hexagonal boron nitride particles as a bio-based lubricant for green machining”, *Tribology International*, c. 118, ss. 89–104, 2018.
- [36] A. T. Abbas, M. K. Gupta, M. S. Soliman, M. Mia, H. Hegab, M. Luqman, ve D. Y. Pimenov, “Sustainability assessment associated with surface roughness and power consumption characteristics in nanofluid MQL-assisted turning of AISI 1045 steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 105, sayı 1–4, ss. 1311–1327, 2019.
- [37] R. K. Singh, A. K. Sharma , B. V. Mandal, K. Gaurav, A. Nag, A. Kumar, A. R. Dixit, A. Mandal, ve A. K. Dasa, “Influence of graphene-based nanofluid with minimum quantity lubrication on surface roughness and cutting temperature in turning operation”, *Materials Today: Proceedings*, c. 5, sayı 11, ss. 24578–24586, 2018.
- [38] 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.

- [39] S. S. Rahman, M. Z. I. Ashraf, A. N. Amin, M. S. Bashar, M. F. K. Ashik, ve M. Kamruzzaman, “Tuning nanofluids for improved lubrication performance in turning biomedical grade titanium alloy”, *Journal of Cleaner Production*, c. 206, ss. 180–196, 2019.
- [40] A. K. Sharma, J. K. Katiyar, S. Bhaumik, ve S. Roy, “Influence of alumina/MWCNT hybrid nanoparticle additives on tribological properties of lubricants in turning operations”, *Friction*, c. 7, sayı 2, ss. 153–168, 2019.
- [41] A. K. Sharma, R. K. Singh, A. R. Dixit, ve A. K. Tiwari, “Novel uses of alumina-MoS₂ hybrid nanoparticle enriched cutting fluid in hard turning of AISI 304 steel”, *Journal of Manufacturing Processes*, c. 30, ss. 467–482, 2017.
- [42] 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.
- [43] Y. Zhang, C. Li, D. Jia, D. Zhang, ve X. Zhang, “Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 99, ss. 19–33, 2015.
- [44] Ç. V. Yıldırım, “Experimental comparison of the performance of nanofluids, cryogenic and hybrid cooling in turning of Inconel 625”, *Tribology International*, c. 137, ss. 366–378, 2019.
- [45] E. O. Ezugwu, J. Bonney, ve Y. Yamane, “An overview of the machinability of aeroengine alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 134, sayı 2, ss. 233–253, 2003.
- [46] 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.
- [47] R. C. Reed. *The Physical Metallurgy of Nickel and its Alloys*, Cambridge UK: Cambridge University Press, 2006, ss. 33–120.
- [48] J. M. Donachie, *Superalloys Source Book*. 2. baskı, Amerika: American Society for Metal, 1984, ss. 110–221.
- [49] A. Altın, “Inconel 718 süper alaşımlı çeliğin işlenebilirliğinin incelenmesi,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2005.
- [50] Z. İnanır, “Yüksek çalışma sıcaklıklarının Inconel 718 alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [51] Ş. Karabulut, “Inconel 718 süper alaşımların işlenmesinde talaş kırılma problemleri ve talaş kırıcı tasarımı,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [52] M. A. Choudhury, ve I. 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.
- [53] O. Palavar, “Toz metalürjisi ile üretilen Inconel süper alaşımlarda yaşlanma parametrelerinin aşınma davranışlarına etkisi”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2014.

- [54] E. O. Ezugwu, Z. M. Wang, ve A. R. Machado, “The machinability of nickel-based alloys: a review”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 86, sayı 1–3, ss. 1–16, 1999.
- [55] I. A. Choudhury, “Machinability studies of high strength materials and the development of a data base system”, Doktora tezi, Dublin City Üniversitesi, Dublin, İrlanda, 1995.
- [56] M. Brandt, G. Gerendas, ve A. 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.
- [57] D. Tali, “Nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2010.
- [58] E. F. Bradley, *Superalloys: a technical guide*, 2. baskı, Amerika: ASM International, 1988, ss. 235–236.
- [59] V. V. Çay, ve S. Ozan, “Süperalaşımlar ve uygulama alanları”, *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, c. 3, sayı 2, ss. 178–188, 2005.
- [60] R. Kocaman, E. Altuncu, ve E. Kayıkçı, “Nikel esaslı tek kristal türbin kanadı süper alaşımları ve teknolojik beklentiler”, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Dergisi*, ss. 30–39, 2014.
- [61] M. J. Donachie, *Titanium: a technical guide*, 2. baskı, Amerika: ASM International, 2000.
- [62] R. C. Reed, *The superalloys fundamentals and applications*, New York: Cambridge University Press, 2006, ss. 33–120.
- [63] M. J. Donachie, *Superalloys a technical guide*, 2. baskı, Amerika: ASM International, 2002.
- [64] D. H. Kim, J. H. Kim, J. W. Sa, Y. S. Lee, C. K. Park, ve S. I. Moon, “Stress rupture characteristics of Inconel 718 alloy for ramjet combustor”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 483, ss. 262–265, 2008.
- [65] M. Fındık, F. Okumuş, ve S. C. Çolak, *Malzeme seçimi ve uygulamaları*, 2. baskı. Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2016, ss. 210–320.
- [66] R. William, D. Callister, ve G. David, *Materials Science and Engineering*, 7. baskı. USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [67] G. Basmacı, “Nikel esaslı süper alaşım malzemelerinin freze tezgahlarında işlenmesinde kesme parametrelerinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [68] H. Dinç, “Inconel 718 süper alaşımının termokimyasal borlanması”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [69] E. O. Ezugwu, “Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 45, sayı 12–13, ss. 1353–1367, 2005.
- [70] D. Ferreno, I. Gorrochategui, L. Sánchez, ve F. Gutiérrez-Solana, “Optimisation of heat treatment for improvement of IGSCC properties of an X-750 alloy”, *Engineering Failure Analysis*, c. 11, sayı 5, ss. 799–810, 2004.

- [71] V. V Kannan, ve V. Kannan, “A comparative study on machinability characteristics in dry machining of Inconel X-750 alloy using coated carbide inserts”, *SAE Technical Paper*, no. 2018-28-0031, ss. 1–13, 2018.
- [72] D. Zhang, ve S. Zhao, *Aerospace Materials Handbook*, 1. baskı, Amerika: CRC Press, 2012, ss. 1–33.
- [73] K. Çiftçi, “Mikroalaşımli çeliklerin frezelenmesinde kesme parametrelerinin talaşlı işlenebilirliğe etkisinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [74] M. C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*, 1. baskı. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2000, ss. 210–270.
- [75] E. Şirin, “AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezede işlenebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [76] H. Oktay, “Eğik yüzeylerin frezelenmesinde farklı işleme yönlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2011.
- [77] U. Şeker, A. Kurt, ve İ. Çiftçi, “Design and construction of dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion”, *International Journal of Materials in Engineering Applications*, c. 23, sayı 4, ss. 355–360, 2002.
- [78] M. Günay, “Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2003.
- [79] Ç. V. Yıldırım, “Waspaloy süper alaşımının farklı soğutma teknikleri kullanarak frezeleme yöntemi ile işlenebilirliğinin incelenmesi”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2017.
- [80] M. Akkurt, *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2000, ss. 147–186.
- [81] M. Akkurt, *Talaş Kaldırma Bilimi ve Teknolojisi, CNC Takım Tezgâhları ve Üretim Otomasyonu*, 2. baskı. İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2012, ss. 80–138.
- [82] E. Ekici, “Alüminyum matrisli B₄C takviyeli ve grafit katkılı kompozitlerin üretilmesi, mekanik özellikleri ve frezede işlenebilirliğinin incelenmesi”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [83] U. Şeker, ve M. Günay, İM 322-Kesici takım tasarımı, *Ders Notları*, Ankara, 2008.
- [84] G. Boothroyd, *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, 2. baskı, New York: Crc Press, 1988, c. 28.
- [85] J. Gu, S. C. Tung, ve G. C. Barber, “Wear mechanisms of milling inserts: dry and wet cutting”, *In Wear Processes in Manufacturing. ASTM International*, ss. 31–47, 1998.
- [86] Sandvik Coromant (firm), “*Modern metal cutting—A practical handbook*”, 1. baskı, İsveç: Sandvik Coromant, 1996, c. 3, ss. 218–256.
- [87] T. Şekercioğlu, *Ölçme Tekniği*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2016, ss. 50–90.
- [88] H. Öktem, “Kalıp parçalarının frezelenmesi sonucunda oluşan yüzey

- pürüzlülüğünün optimizasyonu”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2009.
- [89] B. Wang, Z. Liu, Q. Song, Y. Wan, ve Z. Shi, “Proper selection of cutting parameters and cutting tool angle to lower the specific cutting energy during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy”, *Journal of Cleaner Production*, c. 129, ss. 292–304, 2016.
- [90] E. P. DeGarmo, J. T. Black, ve R. A. Kohser, *Materials and processes in manufacturing*. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1997.
- [91] J. H. Zhang, *Theory and technique of precision cutting*. Oxford: Pergamon Press, 1991.
- [92] R. F. Ávila, ve A. M. Abrão, “The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 119, sayı 1–3, ss. 21–26, 2001.
- [93] S. A. Lawal, I. A. Choudhury, ve Y. Nukman, “Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals - a review”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 52, sayı 1, ss. 1–12, 2012.
- [94] S. Debnath, M. M. Reddy, ve Q. S. Yi, “Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”, *Journal of Cleaner Production*, c. 83, ss. 33–47, 2014.
- [95] Y. Yang, C. Zhang, Y. Wang, Y. Dai, ve J. Luo, “Friction and wear performance of titanium alloy against tungsten carbide lubricated with phosphate ester”, *Tribology International*, c. 95, ss. 27–34, 2016.
- [96] R. Padmini, P. Vamsi Krishna, ve G. Krishna Mohana Rao, “Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel”, *Tribology International*, c. 94, ss. 490–501, 2016.
- [97] Ş. Şirin, ve T. Kivak, “Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy”, *Tribology International*, c. 137, ss. 180–192, 2019.
- [98] J. D. Silliman, *Cutting and grinding fluids: selection and application*, 3. baskı, Amerika: University of Northern Iowa Press, 1992, ss. 35–46.
- [99] R. B. Aronson, “Machine tool 101: Part 6, machine servers”, *Manufacturing Engineering*, c. 6, sayı 1, ss. 47–52, 1994.
- [100] M. Dal, “Bitkisel esash kesme sıvılarının frezelemedeki performanslarının araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2009.
- [101] 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.
- [102] F. S. Chapin III, M. S. Torn, ve M. Tateno, “Principles of ecosystem sustainability”, *American Naturalist*, ss. 1016–1037, 1996.
- [103] Y. M. Shashidhara, ve S. R. Jayaram, “Vegetable oils as a potential cutting fluid-an evolution”, *Tribology International*, c. 43, sayı 5–6, ss. 1073–1081, 2010.
- [104] B. Özçelik, E. Kuram, M. H. Çetin, ve E. Demirbaş, “Experimental investigations

- of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L”, *Tribology International*, c. 44, sayı 12, ss. 1864–1871, 2011.
- [105] W. Y. Lee, K. W. Kim, ve H. C. Sin, “Cutting conditions for finish turning process aiming: The use of dry cutting”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 42, sayı 8, ss. 899–904, 2002.
- [106] A. Stoll, S. Silverson, ve R. Furness, “Environmentally friendly and low cost manufacturing-implementation of mql machining (minimum quantity lubrication)”, *SAE Technical Paper*, no. 2007-01-1338, USA, 2007.
- [107] W. D. Hewson and G. K. Gerow, “High performance metal working oil”, USA, Patent 5958849, 1999.
- [108] P. Bollig, C. Faltin, R. Schießl, J. Schneider, U. Maas, ve V. Schulze, “Considering the influence of minimum quantity lubrication for modelling changes in temperature, forces and phase transformations during machining”, *Procedia CIRP*, c. 31, ss. 142–147, 2015.
- [109] D. U. Braga, A. E. Diniz, G. W. A. Miranda, ve N. L. Coppini, “Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 122, sayı 1, ss. 127–138, 2002.
- [110] A. Çakır, “AA 7075 Ve AA 2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.
- [111] ASTM, “ASTM Standart E1687-95: determining carcinogenic potential of virgin base oils in metalworking fluids”, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1997.
- [112] D. Kumar, 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.
- [113] 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.
- [114] Ç. V. Yıldırım, “Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL”, *Tribology International*, c. 144, ss. 106–127, 2020.
- [115] B. Shen, P. Kalita, A. P. Malshe, ve A. J. Shih, “Performance of novel MoS₂ nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding”, *Transactions of Namri/SME*, c. 36, sayı 1, ss. 357–364, 2008.
- [116] A. D. Çuhadaroğlu, ve E. Kara, “Grafit: bir genel değerlendirme”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, c. 8, sayı 1, ss. 15–33, 2018.
- [117] R. Manimaran, K. Palaniradja, N. Alagumurthi, S. Sendhilkathan, ve J. Hussain, “Preparation and characterization of copper oxide nanofluid for heat transfer applications”, *Applied Nanoscience*, c. 4, sayı 2, ss. 163–167, 2014.
- [118] E. P. B. Filho, O. S. H. Mendoza, C. L. L. Beicker, A. Menezes, ve D. Wen, “Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system”, *Energy conversion and Management*, c. 84, ss. 261–267, 2014.

- [119] A. D. Zadeh, ve D. Toghraie, “Experimental investigation for developing a new model for the dynamic viscosity of silver/ethylene glycol nanofluid at different temperatures and solid volume fractions”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, c. 131, sayı 2, ss. 1449–1461, 2018.
- [120] N. A. Frankel, ve A. Acrivos, “On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres”, *Chemical Engineering Science*, c. 22, sayı 6, ss. 847–853, 1967.
- [121] L. E. Nielsen, “Generalized equation for the elastic moduli of composite materials”, *Journal of Applied Physics*, c. 41, sayı 11, ss. 4626–4627, 1970.
- [122] W. H. Azmi, K. V. Sharma, R. Mamat, G. Najafi, ve M. S. Mohamad, “The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids - a review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 53, ss. 1046–1058, 2016.
- [123] K. Özdemir, ve M. C. Çakır, “Kesme parametrelerinin başlangıç aşınmasına etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 13, sayı 2, ss. 99–109 2008.
- [124] T. Kıvak, “Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6Al-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [125] ISO 4287:1997, “Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters”, *International Organization Standarts*, 1997.
- [126] J. Zhao, Z. Liu, B. Wang, Y. Hua, ve Q. Wang, “Cutting temperature measurement using an improved two-color infrared thermometer in turning Inconel 718 with whisker-reinforced ceramic tools”, *Ceramics International*, c. 44, sayı 15, ss. 19002–19007, 2018.
- [127] B. P. Keller, S. E. Nelson, K. L. Walton, T. K. Ghosh, R. V. Tompson, ve S. K. Loyalka, “Total hemispherical emissivity of Inconel 718”, *Nuclear Engineering and Design*, c. 287, ss. 11–18, 2015.
- [128] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, ve F. Erzincanlı, “Tool wear and surface roughness analysis in milling with ceramic tools of Waspaloy: a comparison of machining performance with different cooling methods”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 41, sayı 2, ss. 83–98, 2019.
- [129] A. N. Omrani, E. Esmailzadeh, M. Jafari, ve A. Behzadmehr, “Effects of multi walled carbon nanotubes shape and size on thermal conductivity and viscosity of nanofluids”, *Diamond and Related Materials*, c. 93, ss. 96–104, 2019.
- [130] 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.
- [131] H. Pourpasha, S. Zeinali Heris, ve A. Asadi, “Experimental investigation of nano-TiO₂/turbine meter oil nanofluid”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, c. 138, sayı 1, ss. 57–67, 2019.
- [132] M. I. Pryazhnikov, A. V. Minakov, V. Y. Rudyak, ve D. V. Guzei, “Thermal conductivity measurements of nanofluids”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, c. 104, ss. 1275–1282, 2017.

- [133] A. Naddaf, ve S. Zeinali Heris, “Density and rheological properties of different nanofluids based on diesel oil at different mass concentrations”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, c. 135, sayı 2, ss. 1229–1242, 2019.
- [134] M. Li, T. Yu, L. Yang, H. Li, R. Zhang, ve W. Wang, “Parameter optimization during minimum quantity lubrication milling of TC4 alloy with graphene-dispersed vegetable-oil-based cutting fluid”, *Journal of Cleaner Production*, c. 209, ss. 1508–1522, 2019.
- [135] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, ve A. R. Dixit, “Progress of nanofluid application in machining: a review”, *Materials and Manufacturing Processes*, c. 30, sayı 7, ss. 813–828, 2015.
- [136] H. Xie, B. Jiang, J. He, X. Xia, ve F. Pan, “Lubrication performance of MoS₂ and SiO₂ nanoparticles as lubricant additives in magnesium alloy-steel contacts”, *Tribology International*, c. 93, ss. 63–70, 2016.
- [137] B. Wang, X. Wang, W. Lou, ve J. Hao, “Thermal conductivity and rheological properties of graphite/oil nanofluids”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, c. 414, ss. 125–131, 2012.
- [138] H. Salimi-Yasar, S. Z. Heris, M. Shanbedi, A. Amiri, ve A. Kameli, “Experimental investigation of thermal properties of cutting fluid using soluble oil-based TiO₂ nanofluid”, *Powder Technology*, c. 310, ss. 213–220, 2017.
- [139] Y. Kaynak, A. Gharibi, ve M. Özkütük, “Experimental and numerical study of chip formation in orthogonal cutting of Ti-5553 alloy: the influence of cryogenic, MQL, and high pressure coolant supply”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 94, sayı 1–4, ss. 1411–1428, 2018.
- [140] A. S. Abdul Sani, E. A. Rahim, S. Sharif, ve H. Sasahara, “The influence of modified vegetable oils on tool failure mode and wear mechanisms when turning AISI 1045”, *Tribology International*, c. 129, ss. 347–362, 2019.
- [141] P. Ghosh, T. Das, G. Karmakar, ve M. Das, “Evaluation of acrylate-sunflower oil copolymer as viscosity index improvers for lube oils”, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, c. 3, sayı 3, ss. 547–556, 2011.
- [142] R. K. Singh, A. R. Dixit, A. Mandal, ve A. K. Sharma, “Emerging application of nanoparticle-enriched cutting fluid in metal removal processes: a review”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 39, sayı 11, ss. 4677–4717, 2017.
- [143] M. Hemmat Esfe, M. R. Sarmasti Emami, ve M. Kiannejad Amiri, “Experimental investigation of effective parameters on MWCNT–TiO₂/SAE50 hybrid nanofluid viscosity”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, c. 137, sayı 3, ss. 743–757, 2019.
- [144] G. Argentero, A. Mittelberger, M. R. A. Monazam, Y. Cao, T. J. Pennycook, C. Mangler, C. Kramberger, J. Kotakoski, A. K. Geim, ve J. C. Meyer, “Unraveling the 3D atomic structure of a suspended Graphene/hBN van der waals heterostructure”, *Nano Letters*, c. 17, sayı 3, ss. 1409–1416, 2017.
- [145] J. He, J. Sun, Y. Meng, ve X. Yan, “Preliminary investigations on the tribological performance of hexagonal boron nitride nanofluids as lubricant for steel/steel friction pairs”, *Surface Topography: Metrology and Properties*, c. 7, sayı 1, ss. 15–22, 2019.

- [146] T. Kıvak, “Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts”, *Measurement*, c. 50, sayı 1, ss. 19–28, 2014.
- [147] K. Habalı, H. Gökaya, ve H. Sert, “Kesici takım kaplama malzemesi ve kesme parametrelerinin AISI 1040 çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, c. 9, sayı 1, ss. 35–38, 2006.



10.EKLER

10.1. EK 1: Deneyleerde Kullanılan Inconel X-750 Süper Alaşım Malzeme Sertifikası

HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION
A Special Metals Company
HUNTINGTON, WEST VIRGINIA 25705-1771

CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT No. 31309

HA ORDER NO./ITEM	DATE	PAGE	OF
100051085 1	04/19/12	1	3
QUANTITY	INSPECTED BY		
3717 LBS	HA/S/MC		
CHARGE ORDER NO.	MARK ORDER NO.		
6072	11421		
DESCRIPTION OF MATERIAL SHIPPED			
✓ INCONEL ALLOY X750 HR PLATE DESCALED ANN .6450 IN 48.0000 IN 192.000 IN SHR			

NOTE: THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THIS DOCUMENT MAY BE PUNISHABLE AS A FELONY UNDER FEDERAL STATUTE.

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 DOES NOT GUARANTEE THE COMPLIANCE OF THE SAME WITH THE REQUIREMENTS DESCRIBED BY THIS CERTIFICATE IS IN FULL COMPLIANCE WITH ALL ORDER AND INSPECTION REQUIREMENTS. WE HEREBY CERTIFY THAT THE BELOW FIGURES ARE IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFIED CONTRACT REQUIREMENTS. REV. 808

*****THIS REPORT RELATES ONLY TO THE ITEM(S) TESTED AND MAY NOT BE REPRODUCED EXCEPT IN FULL.*****

UNSN: N07750

SPECIFICATIONS: SAE AMS 5542N MARKING WAIVED\SAE AMS 5598E MARKING WAIVED\
US MIL-N-7786C AMEND 2 CHEM & CAPABILITY AGED MECHANICAL PROPER
TIES ONLY\
GE B50A151A S11 CHEM & CAPABILITY AGED MECHANICAL PROPERTIES OML
Y\GE B50A714A S1 CHEM ONLY\GE S-400 (10-10-2011)\
GE S-1000 (8-1-2011)\
NACE MRO175-ISO 15156-3 (2009) AS-SHIPPED (ANNEALED) CONDITION O
NLY\NACE MRO103-2007 AS-SHIPPED (ANNEALED) CONDITION ONLY\
SAE AMS 5667H CHEMISTRY ONLY\ASTM B 637-06 CHEMISTRY ONLY\
QUALITY SYSTEM CERTIFICATION: ISO 9001:2008 (ABS-QE CERT. 30125);
EN 10 204/DIN 50049 (TYPE 3.1)

HEAT#	CHEMICAL ANALYSIS (WT. %)										
	C	MN	FE	S	SI	CU	NI	CR	AL	TI	CO
HT2771XK	0.04	0.21	8.04	0.001	0.08	0.03	71.32	16.22	0.68	2.47	0.01

COUNTRY OF ORIGIN: MELTED AND MANUFACTURED IN THE USA
MELT METHOD: VIM + ELECTROSLAG REMELTED

HEAT/LOT	QUANTITY	HARDNESS	MECHANICAL PROPERTIES			
			YIELD TENSILE	TENSILE	ELONGATION	REDUCTIVE AREA
HT2771XK	2 PCS	96.3	1363	1819	24.0	37.1
	PLATE# P1150.P11140		1441	1898	23.0	33.0
	-CAPABILITY					
	-CAPABILITY					
	-AS SHIPPED					

HEAT TREAT #1
HEAT TREAT #2

HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION
A Special Metals Company

HUNTINGTON, WEST VIRGINIA 25705-1771

NOTE: THE RECORDING OF FALSE, DECEITFUL OR FRAUDULENT STATEMENTS ON THIS DOCUMENT MAY BE PUNISHABLE AS A FELONY UNDER FEDERAL STATUTE.

WESTERN U. S.		J		31309	
CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT		No.		31309	
HA ORDER NO./ITEM	DATE	PAGE	OF		
100051085 1	04/19/12	2	3		
QUANTITY	INSPECTED BY				
3717 LBS	HA/SWC				
CHARGE ORDER NO.	MARK ORDER NO.				
6072	11421				
DESCRIPTION OF MATERIAL SHIPPED		INCONEAL ALLOY X750 HR PLATE DESCALED ANN			
		.6450 IN 48.0000 IN 192.000 IN SHR			
		REV. 09/08			

THIS IS TO CERTIFY THAT ALL REQUIRED SAMPLINGS INSPECTIONS AND TESTS HAVE BEEN PERFORMED IN ACCORDANCE WITH THE ORDER AND SPECIFICATION REQUIREMENTS. THE NUMBER OF SAMPLES TAKEN 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 ABOVE REQUIREMENTS ACCORDANCE WITH THE SPECIFIED CONTRACT REQUIREMENTS.

HARDNESS -HRC 32.5
HARDNESS -HRC -CAPABILITY 34.7

HEAT TREAT #1
HEAT TREAT #2

YIELD STRENGTH WAS DETERMINED USING A STRESS STRAIN CURVE

NO WELDING OR WELD REPAIR WAS PERFORMED.

MATERIAL HEAT TREAT: ANNEAL AT 1800 DEG. F. FOR 30 MINUTES THEN WATER QUENCHED.

CAPABILITY HEAT TREAT #1: AGED AT 1300 DEG. F. FOR 20 HOURS THEN AIR COOLED.

CAPABILITY HEAT TREAT #2: AGED AT 1350 DEG. F. FOR 8 HOURS THEN FURNACE COOLED AT 100 DEG. F/HR TO 1150 DEG. F. FOR 8 HOURS THEN AIR COOLED.

METRIC DIMENSIONS: 16.30MM X 1219MM X 4876MM

VISUAL AND DIMENSIONAL EXAMINATION SATISFACTORY. MATERIAL, WHEN SHIPPED, IS FREE FROM CONTAMINATION BY MERCURY, RADIUM, ALPHA SOURCE, & 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."

"QUALITY SYSTEM MEETS REQUIREMENTS OF DIRECTIVE 97/23/EC (PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE), ANNEX 1, CHAPTER 4.3 PER ABS GROUP LTD CERTIFICATE 41734 (EXPIRES JULY 30, 2014)."

HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION IS AN ACCREDITED INDEPENDENT NADCAP MATERIALS TESTING LABORATORY VIA CERTIFICATE NUMBER 127805 (EXPIRES APRIL 30, 2013) FOR ALL TESTING SPECIFIED IN THE SCOPE OF ACCREDITATION.

MATERIAL PRODUCED UNDER QA SYSTEM DOCUMENTED IN HUNTINGTON ALLOYS CORP QA MANUAL REV. 49, DATED 2/17/2011

AUTHORIZED QUALITY CERTIFICATION REPRESENTATIVES :

HUNTINGTON ALLOYS CORPORATION
A Special Metals Company

HUNTINGTON, WEST VIRGINIA 25705-1771

NOTE: THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THIS DOCUMENT MAY BE PUNISHABLE AS A FELONY UNDER FEDERAL STATUTE.

WESTERN U.S.

CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT		No. 31309
HA ORDER NO/ITEM 100051085 1	DATE 04/19/12	PAGE OF 3 3
QUANTITY 3717 LBS	INSPECTED BY HA/SMC	
CHARGE ORDER NO. 6072	MARK ORDER NO. 11421	
DESCRIPTION OF MATERIAL SHIPPED INCONEL ALLOY X750 HR PLATE DESCALED ANH .6450 IN 48.0000 IN 192.000 IN SHR		

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. THE TESTS WERE CONDUCTED CORRECTLY AND THE MATERIAL DESCRIBED BY THIS CERTIFICATE IS IN FULL COMPLIANCE WITH ALL ORDER AND INSPECTION REQUIREMENTS. WE HEREBY CERTIFY THAT THE BELOW FIGURES ARE IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFIED CONTRACT REQUIREMENTS.

REV. 8/08

W. E. BOLEN, M. A. MORRISON, D. K. MILLER, J. J. JEFFREY

D.K. Miller

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şenol ŞİRİN
Doğum Tarihi ve Yeri : 25/11/1984
Yabancı Dili : İngilizce
Medeni Hali : Evli
Telefon : 0 505 703 66 61
E-posta : senolsirin@duzce.edu.tr / senol.sirin61@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2020
Y. Lisans	Makine Eğitim	Karabük Üniversitesi	2012
Lisans	Talaşlı Üretim Öğretmenliği	Gazi Üniversitesi	2008
Lise	CNC	OF H. M. B. Ulusoy Anadolu Meslek Lisesi	2002

DENEYİMLERİ

Yıl	Yer	Görev
2013-...	Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu	Öğretim Görevlisi
2011-2013	Anadolu Rulman İmalat San. Tic. A. Ş.	Takım ve Proses Mühendisi
2008-2010	PARS Makina Ltd. Şti.	Tasarım ve Üretim Uzmanı

YAYINLARI

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- A.1.** Ç. V. Yıldırım, M. Sarıkaya, T. Kıvak, ve Ş. Şirin, “Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and cryomql”, *Journal of Materials Research and Technology*, DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.12.069.
- A.2.** Ş. Şirin, ve T. Kıvak (2019). “Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy”, *Tribology International*, c. 137, ss. 180–192, 2019.
- A.3.** 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.

B. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- B.1.** Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, ve Ş. Şirin, “Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde nanopartikül katkılı yağlamanın takım aşınması üzerindeki etkisinin araştırılması”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, sayı 1, ss. 466–476, 2019.
- B.2.** Ş. Şirin, S. Akıncıoğlu, ve H. Gül, “Kriyojenik işlem zamanının AISI 430 çeliğinin mekanik özelliklerine etkisi”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 7, sayı 3, ss. 66–71, 2018.
- B.3.** 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.4.** 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.5.** 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.6.** 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.

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

- C.1.** E. Çelik, T. Kıvak, ve Ş. Şirin, “Dubleks paslanmaz çeliğinin farklı soğutma/yağlama yöntemleri altında tornalanmasında kesme sıcaklığının optimizasyonu”, *VII. Uluslararası Fen, Mühendislik ve Mimarlık Bilimlerinde Akademik Çalışmalar Sempozyumu ISMS*, c. 1, sayı 1, ss. 512–524, 2019.
- C.2.** 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*, c. 1, sayı 1, ss. 491–504, 2019.

- C.3. Ş. Şirin**, T. Kıvak, E. Özyazgan, ve Ş. Üzmez, “Transmisyon çeliğinin farklı ester katkılı kesme sıvıları kullanılarak tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün taguchi yöntemi ile optimizasyonu”, *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (INERS 19)*, c. 1, sayı 1, ss. 583–590, 2019.
- C.4. H. Yalılı**, T. Kıvak, ve **Ş. Şirin**, “AISI 904L paslanmaz çeliğinin mmy yöntemi ile nanografen katkılı nanoakışkan kullanılarak tornalanmasında kesme sıcaklığının optimizasyonu”, *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (INERS 19)*, c. 1, sayı 1, ss. 591–596, 2019.
- C.5. 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)*, ss. 488–497, 2018.
- C.6. Ç. V. Yıldırım**, T. Kıvak, ve **Ş. Şirin**, “İşlenmesi zor malzemelerin frezelenmesinde nano yağlamanın yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi”, *II. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Kongresi (Multicongress ADANA)*, ss. 308–315, 2018.
- C.7. Ş. Şirin**, Ç. V. Yıldırım, ve T. Kıvak, “100Cr6 rulman çeliğinin tornalanmasında mineral esaslı minimum yağlama miktarı ile yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu”, *II. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Kongresi (Multicongress ADANA)*, ss. 300–307, 2018.
- C.8. E. Şirin**, Y. Turgut ve 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)*, ss. 226–226, 2017.
- C.9. Ş. Şirin**, ve E. Şirin, “Kaynak teknolojisi programlarında okutulan bilgisayar destekli çizim dersinin Bologna sürecinde değerlendirilmesi”, *Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu (UMYOS)*, c.1, ss. 1297–1303, 2015.
- C.10. Ş. Şirin**, ve E. Şirin, “Forklift ile meydana gelen iş kazaları ve güvenlik önlemleri”, *7. Uluslararası İş Sağlığı Güvenliği ve Konferansı*, ss. 401–409, 2014.

D. Projelerde Yaptığı Görevler:

- D.1.** “Yuvarlanma yoluna özel geometri uygulayarak konik rulman yorulma ömrünün ve titreşim seviyesinin iyileştirilmesi”, *Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Projesi*, **Uzman**, 01/06/2012–01/08/2013.
- D.2.** “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.3.** “Gümüşova MYO makine ve metal teknolojileri laboratuvar imkanlarının geliştirilmesi ve akreditasyon işlemlerinin başlatılması”, *Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Doğu Marmara Kalkınma Ajansı (MARKA) Projesi*, **Yürütücü**, 06/09/2018–(devam ediyor).

Hobileri

Doğa fotoğrafçılığı, Ahşap oyma, Kemeçe çalma, Amatör balıkçılık.