



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

**HASTELLOY C276 ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE MİNİMUM  
MİKTARDA YAĞLAMANIN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE TAKIM  
AŞINMASI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**FATİH GÜKAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. TURGAY KIVAK**

**DÜZCE, 2019**

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

**HASTELLOYS C276 ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE**  
**MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMANIN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ**  
**VE TAKIM AŞINMASI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN**  
**ARAŞTIRILMASI**

Fatih GÜNAN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Turgay KIVAK

Düzce Üniversitesi

**Eş Danışman**

Dr. Öğr. Üyesi Çağrı Vakkas YILDIRIM

Erciyes Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Turgay KIVAK

Düzce Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı AKINCIOĞLU

Düzce Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ

Karabük Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Tez Savunma Tarihi: 02/08/2019

## 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.

02 Ağustos 2019

Fatih GÜNAN

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Turgay KIVAK ve Dr. Öğr. Üyesi Çağrı Vakkas YILDIRIM'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen canım eşim Öğr. Gör. Kübra TOPALOĞLU GÜNAN'a, sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2017.07.04.523 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

**02 Ağustos 2019**

**Fatih GÜNAN**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER .....	xii
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	4
2.1. FREZELEME .....	4
2.1.1. Alın Frezeleme .....	5
2.1.2. Simetrik Frezeleme .....	6
2.1.3. Asimetrik Frezeleme .....	6
2.1.4. Çevresel Frezeleme.....	7
2.1.4.1. Aynı Yönlü Frezeleme .....	7
2.1.4.2. Zıt Yönlü Frezeleme .....	8
2.1.4.3. Aynı Yönlü Frezeleme ile Zıt Yönlü Frezelemenin Karşılaştırılması .....	9
2.2. TAKIM AŞINMASI.....	11
2.2.1. Aşınma Mekanizmaları .....	11
2.2.2. Aşınma Tipleri.....	12
2.2.2.1. Yan Yüzey Yanak Aşınması .....	13
2.2.2.2. Krater Aşınması .....	14
2.2.2.3. Plastik Deformasyon .....	15
2.2.2.4. Çentik Aşınması .....	15
2.2.2.5. Termal Çatlaklar.....	16
2.2.2.6. Mekanik Yorulma Çatlakları.....	16
2.2.2.7. Çıtlama (Çentikleme) .....	17
2.2.2.8. Kırılma.....	17
2.2.2.9. Kesici Kenarda Yığılma (BUE).....	18
2.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ.....	19
2.3.1. Yüzeyin Durumu .....	20
2.3.2. Yüzey Kalitesinin Önemi.....	20
2.3.3. Yüzey Kalitesine Etki Eden Faktörler .....	20
2.3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazları .....	21
2.3.5. Yüzey Pürüzlülüğüne ait Parametreler .....	21
2.3.5.1. Örneklem Uzunluğu ve Örneklem Sayısı.....	21
2.3.5.2. Ortalama Çizgisi.....	21
2.3.5.3. Ortalama Aritmetik Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) .....	22
2.3.5.4. Genlik Dağılım Eğrisi (Rsk).....	22

<b>3.</b>	<b>SÜPER ALAŞIMLAR VE HASTELLOY C276.....</b>	<b>23</b>
3.1.	SÜPER ALAŞIM ÇEŞİTLERİ.....	27
3.1.1.	Demir Esaslı Süper Alaşımalar.....	29
3.1.2.	Kobalt Esaslı Süper Alaşımalar.....	30
3.1.3.	Nikel Esaslı Süper Alaşımalar.....	32
3.2.	HASTELLOY C276.....	34
<b>4.</b>	<b>KESME SIVILARI VE MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA. 36</b>	
4.1.	KESME SIVISI ÇEŞİTLERİ .....	36
4.1.1.	İşlevlerine Göre Kesme Sıvıları .....	37
4.1.1.1.	Yağlayıcılar.....	37
4.1.1.2.	Soğutucular.....	38
4.1.2.	Kimyasal Yapılarına Göre Kesme Sıvıları .....	39
4.1.2.1.	Saf Kesme Yağları.....	39
4.1.2.2.	Yağ Katkılı Emülsiyonlar .....	39
4.1.2.3.	Sentetik Yağlar.....	39
4.1.2.4.	Yarı Sentetik Yağlar .....	39
4.2.	KESME SIVILARININ ÇEVRE VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ.....	40
4.3.	MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MMY) SİSTEMİ .....	41
<b>5.</b>	<b>DENEY TASARIMI VE TAGUCHI YÖNTEMİ .....</b>	<b>44</b>
5.1.	TAGUCHI DENEY TASARIMININ AŞAMALARI .....	44
5.1.1.	Analiz Edilecek Faktör ve Etkileşimlerinin Seçilmesi .....	45
5.1.2.	Faktör Düzeylerinin Belirlenmesi.....	45
5.1.3.	Ortogonal Düzenin Belirlenmesi.....	46
5.1.4.	Faktör ve Etkileşimlerinin Sütunlara Atanması .....	47
5.1.5.	Deneylerin Uygulanması.....	47
5.1.6.	Deney Sonuçlarının Analiz Edilmesi .....	48
<b>6.</b>	<b>LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>49</b>
<b>7.</b>	<b>MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>53</b>
7.1.	DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEME VE CİHAZLAR. 53	
7.1.1.	Malzeme .....	53
7.1.2.	Deney Numuneleri.....	53
7.1.3.	Kesici Takım ve Takım Tutucu .....	54
7.1.4.	Takım Tezgâhı.....	55
7.1.5.	Minimum Miktarla Yağlama Sistemi .....	55
7.1.6.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkı nanoakışkanların hazırlanması.....	57
7.2.	DENEYSEL ÖLÇÜMLER .....	58
7.2.1.	Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi .....	58
7.2.2.	Takım Aşınmasının Ölçülmesi.....	59
7.3.	DENEYSEL TASARIM VE KESME PARAMETRELERİ .....	59
7.3.1.	MMY Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Deneysel Tasarımı .....	60
7.3.2.	Ana Deneyler İçin Deneysel Tasarım .....	61
<b>8.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>63</b>
8.1.	MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MMY) PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU .....	63
8.1.1.	Yüzey Pürüzlülüğü.....	64
8.1.1.1.	Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	66

8.1.1.2. ANOVA.....	67
8.1.1.3. Regresyon Analizi .....	68
<b>8.2. TAKIM ÖMRÜ ANALİZİ .....</b>	<b>69</b>
8.2.1. S/N Oranlarının Analizi.....	69
8.2.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	71
8.2.3. ANOVA .....	73
8.2.4. Regresyon Analizi.....	73
8.2.5. Takım Ömrüne Ait Genel Değerlendirme .....	74
<b>8.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ANALİZİ.....</b>	<b>74</b>
8.3.1. S/N Oranlarının Analizi.....	74
8.3.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	76
8.3.3. ANOVA .....	78
8.3.4. Regresyon Analizi.....	78
8.3.5. Yüzey Pürüzlülüğüne Ait Genel Değerlendirme.....	79
<b>9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>81</b>
9.1. SONUÇLAR.....	81
9.2. ÖNERİLER.....	82
<b>10. KAYNAKLAR .....</b>	<b>83</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>90</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 2.1. Sementit karbür uçların takım tutucuya mekanik olarak bağlanması.....	6
Şekil 2.2. Simetrik frezeleme yönteminin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.3. Asimetrik frezeleme yönteminin şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.4. Aynı yönlü frezeleme .....	8
Şekil 2.5. Zıt yönlü frezeleme.....	9
Şekil 2.6. Aynı yönlü frezeleme ile zıt yönlü frezelemenin karşılaştırılması.....	9
Şekil 2.7. Zıt yönlü frezelemede takımın iş parçasından çıkışı .....	10
Şekil 2.8. Zıt yönlü frezelemede takımın iş parçasından farklı şekilde çıkışları .....	10
Şekil 2.9. Yükler sonucu ortaya çıkan aşınma mekanizmaları .....	12
Şekil 2.10. Kesici takımlarda görülen aşınma tipleri.....	13
Şekil 2.11. Yanak aşınması.....	14
Şekil 2.12. Krater aşınması .....	14
Şekil 2.13. Plastik deformasyon .....	15
Şekil 2.14. Çentik aşınması.....	16
Şekil 2.15. Termal çatlaklar .....	16
Şekil 2.16. Mekanik yorulma çatlakları.....	17
Şekil 2.17. Çentikleme.....	17
Şekil 2.18. Kesici takımda meydana gelen kırılma .....	18
Şekil 2.19. Kesici takımda BUE oluşumu .....	19
Şekil 2.20. İşlenmiş bir yüzeyin geometrik yapısı.....	20
Şekil 2.21. Örneklem uzunluğu ve sayısı ile ölçüm uzunluğu.....	21
Şekil 2.22. Ortalama çizgisi.....	22
Şekil 2.23. Profil ve genlik dağılım etkisi .....	22
Şekil 3.1. Nikel esaslı süper alaşımlarda krom içeriğinin mikro yapıya etkileri .....	25
Şekil 3.2. Süper alaşım malzemelerin yıllara göre değişimi.....	26
Şekil 3.3. Süper alaşımların sektörlere göre tercih edilme oranları.....	27
Şekil 3.4. Jet motoru ve tercih edilen süper alaşım türleri.....	27
Şekil 3.5. Süper alaşımların üretilmesinde etkisi olan elementler .....	28
Şekil 3.6. Süper alaşımların çeşitleri .....	29
Şekil 3.7. Nikel esaslı alaşımlar ve gaz türbinli motorlarda kullanım bölgeleri.....	33
Şekil 4.1. Kesme sıvılarının etkileri.....	36
Şekil 4.2. Yağlama rejimleri .....	38
Şekil 4.3. Soğutma-yağlama sistemlerinin sınıflandırılması .....	42
Şekil 5.1. Etkileşimlerin şematik gösterimi .....	46
Şekil 5.2. L27 (3 <sup>3</sup> ) etkileşim tablosu.....	47
Şekil 7.1. Frezeleme deneylerinde kullanılan numune boyutları.....	54
Şekil 7.2. Deneylerde kullanılan kesici takımlara ait geometri ve ölçüler .....	54
Şekil 7.3. Deneylerde kullanılan vidalı takım tutucuya ait ölçüler.....	54
Şekil 7.4. Kesici takımlara uygulanan kaplama yapısı ve teknik özellikleri .....	55
Şekil 7.5. Deney seti kurulumu ve MMY sistemi.....	56
Şekil 7.6. Nanoakışkanların hazırlanması.....	57
Şekil 7.7. Yüzey pürüzlülük ölçümü .....	58

Şekil 7.8. AM 4113ZT polarize dijital mikroskop ile ölçüm.....	59
Şekil 8.1. S/N oranları ana etki grafiği .....	66
Şekil 8.2. Püskürtme açısı ve debiye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim .....	66
Şekil 8.3. Püskürtme basıncı ve debiye bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.....	67
Şekil 8.4. Deney sonuçları ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması .....	69
Şekil 8.5. Takım ömrü için S/N oranları ana etki grafiği .....	71
Şekil 8.6. Kesme hızına ve nanoyağlayıcı karışım oranına göre takım ömrü .....	72
Şekil 8.7. Kesme hızına ve ilerleme hızına göre takım ömrü değişimi .....	72
Şekil 8.12. Ölçülen takım ömrü değerleri ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	74
Şekil 8.13. Yüzey pürüzlülüğü için S/N oranları ana etki grafiği.....	76
Şekil 8.14. Kesme hızına ve ilerleme hızına göre yüzey pürüzlülüğü değişimi .....	77
Şekil 8.15. Kesme hızına ve karışım oranına bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi .....	77
Şekil 8.16. Ölçülen deney sonuçları ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması .....	79



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 7.1. Hastelloy C276 alaşımının kimyasal bileşenleri (Ağırlıkça %) .....	53
Çizelge 7.2. Hastelloy C276 alaşımının mekanik özellikleri.....	53
Çizelge 7.3. CNC dik işleme merkezinin özellikleri .....	55
Çizelge 7.4. SKF marka MMY sisteminin teknik özellikleri .....	56
Çizelge 7.5. Bitkisel esaslı kesme yağının teknik özellikleri .....	57
Çizelge 7.6. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapıldığı cihaza ait teknik özellikler .....	58
Çizelge 7.7. AM 4113ZT polarize dijital mikroskobunun teknik özellikleri .....	59
Çizelge 7.8. Deney girdi parametreleri .....	60
Çizelge 7.9. Taguchi L <sub>9</sub> dikey dizini .....	61
Çizelge 7.10. Deney tasarımında kullanılan etkenler ve düzeyleri.....	61
Çizelge 7.11. Taguchi L <sub>27</sub> dikey dizini .....	62
Çizelge 8.1. Deney sonuçları ve S/N oranları.....	65
Çizelge 8.2. S/N yanıt tablosu .....	65
Çizelge 8.3. ANOVA tablosu .....	68
Çizelge 8.4. Takım ömrü için deney sonuçları ve S/N oranları.....	70
Çizelge 8.5. S/N yanıt tablosu .....	71
Çizelge 8.6. Takım ömrü için ANOVA tablosu .....	73
Çizelge 8.7. Takım ömrü için deney sonuçları ve S/N oranları.....	75
Çizelge 8.8. S/N yanıt tablosu .....	76
Çizelge 8.9. Takım ömrü için ANOVA tablosu .....	78

## KISALTMALAR

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum Oksit
ANOVA	Varyans Analizi / Analysis of Variance
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Birliği)
BUE	Built Up Edge (Talaş Yapışması)
CBN	Cubic Bor Nitride (Kübik Bor Nitrür)
CNC	Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)
CNT	Carbon Nano Tube (Karbon Nano Tüp)
CVD	Chemical vapour deposition (Kimyasal buhar biriktirme)
ÇDKNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
KO	Konsantrasyon Oranı
KNT	Karbon nanotüp
KT	Kesici Takım
MQL / MMY	Minimum Quantity Lubrication (Minimum Miktarda Yağlama)
MWCNT	Multi Walled Carbon Nano Tube (Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp)
MoS <sub>2</sub>	Molibdendisülfür
NC	Numeric Control (Sayısal Denetim)
NT	Nozul Tipi
PVD	Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
RSM	Responce Surface Method (Yüzey Yanıt Metodu)
SEM / TEM	Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
SiC	Silisyum Karbür
S/N	Signal/Noise Rate (Sinyal/Gürültü Oranı)
SYT	Soğutma/Yağlama Yöntemi
TiAlN	Titanyum Alüminyum Nitrür
TiC	Titanyum Karbür
TiN	Titanyum Nitrür
TÖ	Takım Ömrü
YHK	Yüksek Hızda Kesme
WC	Tungsten Karbür

## SİMGELER

a	Kesme derinliği, (mm)
Al	Alüminyum
C	Karbon
Cr	Krom
f	İlerleme hızı, (mm/dev)
F	Kesme kuvveti, (N)
F <sub>a</sub>	Eksenel kuvvet, (N)
F <sub>c</sub> , (F <sub>y</sub> )	Teğetsel kuvvet, (N)
Fe	Demir
F <sub>f</sub> , (F <sub>x</sub> )	İlerleme kuvveti, (N)
F <sub>r</sub> , (F <sub>z</sub> )	Radyal kuvvet, (N)
HV	Vickers Sertliği
Mn	Manganez
Mo	Molibden
n	Devir sayısı, (dev/dak)
Ni	Nikel
P	Basınç, (kg/mm <sup>2</sup> )
Pa	Pascal, (N/m <sup>2</sup> )
Q	Debi, (ml/s)
R <sup>2</sup>	Belirlilik katsayısı
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri, (μm)
Rz	5 en yüksek, 5 en alçak noktanın ortalaması (μm)
Ti	Titanyum
V	Kesme hızı, (m/dak)
V <sub>B</sub>	Yan kenar aşınması, (mm)
Zr	Zirkonyum
μm	Mikron metre
γ	Talaş açısı, (°)

## ÖZET

### HASTELLOY C276 ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMANIN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE TAKIM AŞINMASI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatih GÜNAN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Turgay KIVAK

Ağustos 2019, 89 sayfa

Bu çalışmada, Hastelloy C276 süper alaşımının frezelenmesinde kesme parametreleri, Minimum Miktarla Yağlama (MMY) ve Nano-MMY'nin işleme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler CVD TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN kaplamalı sementit karbür takımlar kullanılarak CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Deneysel çalışmada ilk etapta Taguchi'nin L9 deney tasarımı kullanılarak yüzey pürüzlülüğü için MMY parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Burada kontrol faktörleri olarak debi (20, 60 ve 100 ml/h), püskürtme açısı (30, 45 ve 60°) ve püskürtme basıncı (4, 6 ve 8 bar) ele alınmış olup kesme hızı (75 m/dak), ilerleme hızı (0.15 mm/dev) ve kesme derinliği (0.5 mm) sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre en iyi yüzey pürüzlülük değeri 100 ml/h debi, 45° püskürtme açısı ve 8 bar basınç kombinasyonunda elde edilmiştir. Varyans analizi sonucuna göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktör %74,6 katkı oranı ile debi olmuştur. Bunu %9,1 ve %3,3 katkı oranları ile sırasıyla basınç ve püskürtme açısı takip etmiştir. İlk aşamada elde edilen optimum MMY parametreleri dikkate alınarak ikinci aşamada Nano-MMY'nin ve kesme parametrelerinin işleme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla Taguchi'nin L27 düşey dizini kullanılarak tam faktöriyel deney tasarımı yapılmıştır. Deney tasarımında performans karakteristiği olarak yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü dikkate alınmıştır. Kesme hızı (60, 75 ve 90 m/dak), ilerleme hızı (0,1, 0,15 ve 0,20 mm/dev) ve nanopartikül kakı oranı (0,5, 1 ve 1,5 % hacimce) ise kontrol faktörleri olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre en iyi yüzey pürüzlülük değeri 90 m/dak kesme hızında 0,1 mm/dev ilerleme hızında hacimce %1 katkı oranında elde edilmiştir. En yüksek takım ömrü ise 60 m/dak kesme hızında 0,1 mm/dev ilerleme hızında hacimce %1 katkı oranında elde edilmiştir. Varyans analizi sonucuna göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde %56,2 katkı oranı ile en etkili parametre ilerleme hızı olurken takım ömründe ise %49,1 katkı oranı ile kesme hızı olmuştur.

**Anahtar sözlükler:** Hastelloy C276, Frezeleme, MQL, Nanoakışkan, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül

## ABSTRACT

### INVESTIGATION THE EFFECTS OF MINIMUM QUANTITY LUBRICATION ON SURFACE ROUGHNESS AND TOOL WEAR IN MILLING OF HASTELLOY C276 ALLOY

Fatih GÜNAN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences,

Department of Manufacturing Engineer

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Turgay KIVAK

August 2019, 89 pages

In this study, the effects of cutting parameters, Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Nano-MQL on machining performance in milling of Hastelloy C276 superalloy were investigated. The experiments were carried out in CNC machining center using CVD coated cemented carbide tools. In the first stage of the optimization of MQL parameters for surface roughness was performed by using Taguchi's L9 experimental design. At this stage, flow rate (20, 60 and 100 ml/h), nozzle angle (30, 45 and 60°) and pressure (4, 6 and 8 bar) were considered as control factors and cutting speed (75 m/min), feed rate (0.15 mm/rev) and cutting depth (0.5 mm) were kept constant. According to the test results, the best surface roughness value was obtained in 100 ml/h flow rate, 45° nozzle angle and 8 bar pressure. According to the analysis of variance, the most effective factor on surface roughness was the flow rate with a contribution rate of 74.6%. This was followed by pressure and nozzle angle, with contribution rates of 9.1% and 3.3%, respectively. In the second stage, the effects of Nano-MQL and cutting parameters on machining performance were investigated by considering the optimum MQL parameters obtained in the first stage. For this purpose, full factorial experiment design was performed by using Taguchi's L27 vertical array. Surface roughness and tool life were considered as performance characteristics in the experimental design. Cutting speed (60, 75 and 90 m/min), feed rate (0.1, 0.15 and 0.20 mm/rev) and nanoparticle concentration ratio (0.5, 1 and 1.5% by volume) were determined as control factors. According to the test results, the best surface roughness value was obtained at a cutting speed of 90 m/min at 0.1 mm/rev feed rate with a concentration rate of 1% by volume. The highest tool life was obtained at a cutting speed of 60 m/min at a feed rate of 0.1 mm/rev at a feed rate with a concentration rate of 1% by volume. According to the analysis of variance, the most effective parameter was the feed rate with 56.2% contribution rate on surface roughness and cutting speed with 49.1% contribution rate in tool life.

**Keywords:** Hastelloy C276, Milling, MQL, Nanofluid, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle

# 1. GİRİŞ

Hastelloy C276, zor şartlar altında çalışmak için geliştirilmiş mükemmel korozyon direncine sahip nikel esaslı bir süper alaşımdır. İçeriğinde yüksek oranda nikel ve molibden içeren bu malzeme, korozif ortamlarda özelliklerini uzun süre korumasıyla bilinmektedir. Malzeme bünyesinde bulunan %15 seviyesindeki molibden, Hastelloy C276'nın çukurcuk korozyonuna karşı dayanımını arttırmaktadır. Malzemenin içerisindeki karbon oranı %0.01'den daha azdır ve bu nedenle daha kolay kaynak yapılabilmektedir. İçeriğindeki düşük karbon oranı sayesinde kaynak edilebilirliği yüksek olan bir malzemedir. Dahası, bu sayede, kaynak bölgesinde mekanik veya korozif özellikleri zayıflamaz. Ancak, Hastelloy C-276'nın içeriğindeki yüksek miktarda krom, nikel ve molibden bu malzemenin işlenebilirliğini oldukça zorlaştırmaktadır.

Talaşlı imalat kavramı, istenilen yüzey kalitesi, boyut ve şekli elde etmek adına kesici takım yardımıyla iş parçasından malzeme kopartılması olarak tanımlanmaktadır. Talaş kaldırma işlemi, iş parçası ve kesici ucun birbirine bağlı hareketleri ile iş parçasının belirli bir kısmında gerilim oluşturarak gerçekleştirilen işlemdir [1]. 19. Yüzyılın başlarında yaşanan sanayi devrimi ile birlikte hızla gelişen talaşlı imalat, günümüzde önemi daha da artmış bir şekillendirme yöntemidir. Endüstrinin hemen her alanında yaygın olarak kullanılan bu şekillendirme yöntemi, tormalama, frezeleme, delme, taşlama gibi birçok yöntem aracılığıyla uygulanabilmektedir [2]. Talaş kaldırma işlemi mekanik enerjiyi kullanarak ortaya çıkan bir eylemdir ve bu eylem neticesinde kullanılan mekanik enerjinin neredeyse tamamı ısıya dönüşür. Ortaya çıkan ısı; iş parçası, kesici takım ve talaş olmak üzere üç bölgede toplanmaktadır. Haliyle bu ısı kontrol edilemediği zaman kesici takım ve iş parçasında kalıcı hasarlara yola açabilir ve çeşitli negatif etkilerle talaş kaldırma işlemini olumsuz etkileyebilir [3]. Talaş kaldırma esnasında ortaya çıkan ısıyı kontrol altına almak için uygulanan yöntemlerin başında kesme sıvısı kullanımı gelmektedir [4].

Kesme sıvıları, soğutma işlemini yaparken bir yandan da yağlama özelliği nedeniyle sürtünmeyi azaltmaktadır. Ayrıca, talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması gibi işleme performansını artıran katkılarda bulunarak takım ömrü ve yüzey kalitesinin artmasına

destek olmaktadır [5]. Kesme sıvıları bu faydaları sağlarken temel prensibini sürtünmeyi azaltmak üzerine kurmuştur. Bir başka deyişle, sürtünmenin azaltılmasına yardımcı olan kesme sıvısı sürtünme nedeniyle oluşabilecek zararı en aza indirmekte veya tamamen ortadan kaldırmaktadır [6]. Örneğin; F.W. Taylor 1907 yılında bir deney yapmış ve takım çelikleri kullanılarak yapılan talaş kaldırma işleminde az miktarda su kullanmıştır. Ve bu deney sonucunda kesme hızını %40'ın üzerinde artırmayı başarmıştır [7]. Kesme hızının artması, dolayısıyla işleme süresinin azalmasını sağlayan su kullanımı çok iyi derecede soğutma sağlamasına rağmen suyun korozif etkileri yüzünden paslanma problemini beraberinde getirmiştir. İşleme veriminin çok artması nedeniyle bu yöntemden vazgeçmek istenmediğinden soğutma ile birlikte yağlama işlemini de yapabilecek yeni kesme sıvısı formülleri üzerinde çalışmalar başlamıştır [8]. Kesme sıvılarının faydaları genel olarak incelendiğinde, kesici takım ömrünün iyileştirilmesi, malzemede meydana gelebilecek deformasyonların azaltılması ve talaş kesme bölgesinden uzaklaştırması ilk akla gelenlerindendir [9]. Buna karşın, kesme sıvıları bazı olumsuzlukları da bünyesinde barındırmaktadır. Özellikle iç yapısında kimyasal barındırması ve bu kimyasalların çevreye zarar vermesi, cilde temas ve solunum sonucunda çalışan sağlığına zarar vermesi, üretim maliyetlerini artırması bu olumsuzlukların ilk göze çarpanlarıdır [10]. Bu nedenle kullanılan kesme sıvısı miktarını azaltmak isteyen araştırmacılar alternatif yöntem arayışına başlamıştır.

Alternatif yöntem bulmak için yapılan çalışmalarda ilk akla gelen yöntem kuru işleme olurken kriyojenik soğutma, yüksek hızda kesme ve minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemleri de ilk akla gelenlerdir. Herhangi bir kesme sıvısının kullanılmadığı yöntem olan kuru işlemede çevre ve çalışan sağlığı önemli ölçüde korunmaktadır. Ancak, yüksek yüzey kalitesi ve işleme verimliliği istenen durumlarda kuru işleme beklentileri karşılayamamaktadır. Özellikle, ağır işleme koşulu diye tabir edebileceğimiz süper alaşımların işlenmesinde bu durum daha fazla ön plana çıkmaktadır [4]. Kriyojenik soğutma yöntemi ise yine düşük kesme hızı ve hafif işleme koşullarında verimli olurken kesme hızının yükseldiği veya zor işleme şartlarının olduğu durumlarda verimini kaybetmektedir [11]. Bütün bu nedenlerden dolayı MMY sistemi kendisini daha çok kabul ettirmiştir.

Minimum seviyedeki kesme yağının kullanılması ile uygulanan MMY sistemi, çok az miktarda kesme sıvısının basınçlı hava yardımıyla kesme bölgesine ulaştırılması prensibiyle çalışmaktadır. Çok az miktarda kesme sıvısı kullanılması ve kullanılan kesme

sıvısının yüksek oranda buharlaşması nedeniyle MMY sistemi ile yapılan soğutma işlemine yarı-kuru işleme de denilmektedir. Çok az kesme sıvısından kasıt 10-150 ml/h kesme sıvısının nozul yardımıyla püskürtülmesi olarak literatürde yer almaktadır. Bir başka açıdan bakıldığında ise kullanılan kesme sıvısı miktarı açısından bakıldığında konvansiyonel kesme sıvısına göre 1/10000 oranında bir kesme sıvısı tasarrufu ortaya çıkmaktadır [12].

Bu çalışmada, farklı işleme parametreleri altında nikel esaslı bir süper alaşım olan Hastelloy C276 süper alaşımı frezelenmiştir. Frezeleme deneyleri iki aşamada yapılmış olup birinci aşamada; üç farklı seviyede debi, püskürtme açısı ve püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkinliği araştırılmıştır. Böylece, ana deneylerde kullanılacak MMY parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İkinci aşamada ise kesme hızı, ilerleme ve nanopartikül konsantrasyon oranının yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İkinci aşamadaki deneyler yapılırken MMY parametresi olarak birinci aşamada optimum sonuçları veren parametreler kullanılmıştır. Deneyler sonucunda varyans analizi (ANOVA) yapılarak işleme parametrelerinin sonuç üzerindeki etki oranları elde edilmiştir. Ayrıca, regresyon analizi yardımı ile matematiksel tahmin modelleri oluşturulmuştur. Böylece, Hastelloy C276'nın frezelenmesinde maksimum işleme verimliliğini verecek parametreler ortaya konulmuştur.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. FREZELEME

Frezeleme işlemi, kendi eksenini etrafında dönen bir kesici takım ve buna karşılık olarak iş parçasının doğrusal hareketi sonucu ortaya çıkan bir talaş kaldırma operasyonudur. Daha önceleri sadece üç eksen olarak iş parçasına yaklaşan kesici takım günümüzde hemen hemen her noktadan yaklaşabilmektedir. Freze çakısı olarak da adlandırılan kesici takımlar, birçok kesme kenarına sahiptir ve bu kenarların her biri belli bir seviyede işleme yeteneğine sahiptir. Yüksek işleme verimliliği, yüksek yüzey kalitesi, boyutsal doğruluk ve şeklin oluşturulması esnasındaki üretim esnekliği frezeleme metodunun avantajları arasında sayılabilmektedir. Frezeleme yöntemi, çoğunlukla düz yüzeyler, dik köşeler ve kanal işlemek için kullanılan bir talaş kaldırma operasyonudur [13].

Frezeleme işlemi, kontrol üniteleri ve kesici takım teknolojisindeki gelişmeler nedeniyle günümüzde oldukça evrensel bir talaş kaldırma yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. İşleme merkezi denilen CNC freze tezgâhları günümüzde en yaygın olarak kullanılan tezgâhların başında gelmektedir. Frezeleme işlemi için universal frezeden başlayan ve günümüzde kullanılan CNC frezelere kadar çok geniş bir tezgâh çeşidi yetkilendirilmiş durumdadır [14].

Kaba frezeleme operasyonlarında genellikle manuel olarak kontrol edilen sütunlu ve konsollu freze tezgâhları kullanılır [15], [16]. Kesici takımın bağlandığı iş mili çevresel frezeleme için yatay konuma getirilebilirken; alın, kanal frezeleme, delik delme veya delme operasyonları için de dikey konuma getirilebilmektedir [16]. Yatay konumlu freze tezgâhlarında kesici takım, iş miline bağlı olan ve üst başlığa sabitlenen yataklar içerisinde dönen malafalara takılmaktadır [17]. Üst başlık farklı uzunluktaki malafaların takılabilmesi için ayarlanabilmektedir. Düşey freze tezgâhlarında başlık iş mili ve takım tutucudan oluşur. Başlık sabitlenebilir veya dikey olarak ayarlanabilmektedir. Ayrıca eğik yüzeylerin işlenebilmesi için başlık sütun üzerinde döndürülebilmektedir [16].

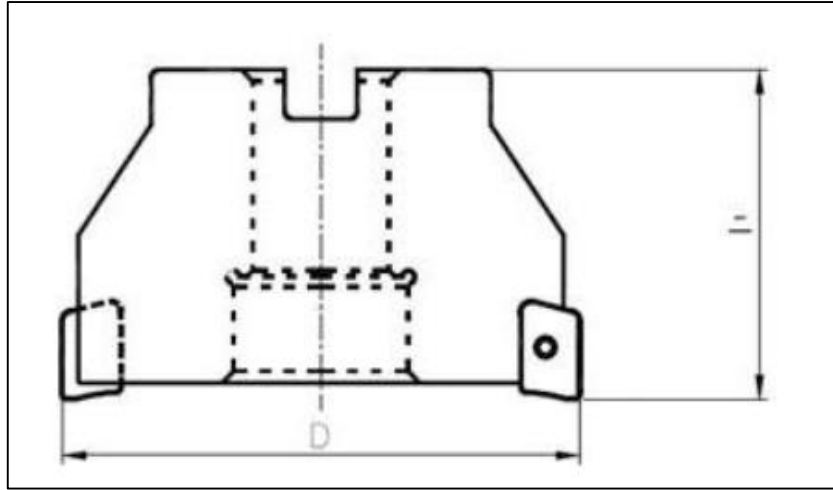
Universal freze tezgâhlarının diğer temel bileşenleri ise konsol, araba ve tabla olarak sayılabilir. Konsol, tezgâh gövdesinde bulunan bir sütun üzerinde yukarı aşağı olarak hareket eder ve z eksenini yönünde kesme derinliğini ayarlamak için kullanılır [16]. Araba,

konsolun üzerine konumlandırılmıştır ve y eksenini doğrudan doğruya hareketleri yapmakla görevlidir. Tabla ise araba üzerinde bulunmaktadır ve x eksenini doğrudan doğruya hareketi yapmakla yükümlüdür. Z eksenini kesme derinliği konusunda ayarlama işlemi yaparken x ve y eksenleri hızlı hareketin yanında ilerleme hareketi ile tahrik edilir. İş mili, sütun içerisinde bulunmaktadır. İlerleme hareketleri konsola monte edilen ayrı bir elektrik motoru tarafından sağlanır ve kinematik olarak x, y, z eksenlerine dağıtılır. Bu yüzden, ilerleme ve iş mili hızları arasında hiçbir kinematik ilişki yoktur [15].

Diğer metal kesme operasyonlarından farklı olarak frezeleme işlemi oldukça karmaşık bir yöntemdir. Çünkü birden fazla kesici uç aynı anda talaş kaldırmaktadır. Ayrıca, çok fazla kesici takım çeşidi bulunmaktadır ve bu da karmaşıklığı artırıcı bir etkidir. Frezeleme yöntemi, genellikle, kullanılan kesici takım ve kesme yönü temelinde gruplandırılmaktadır. Bir başka deyişle, frezeleme üç gruba ayrılmaktadır ve bunlar aşağıda verilmiştir [18].

### **2.1.1. Alın Frezeleme**

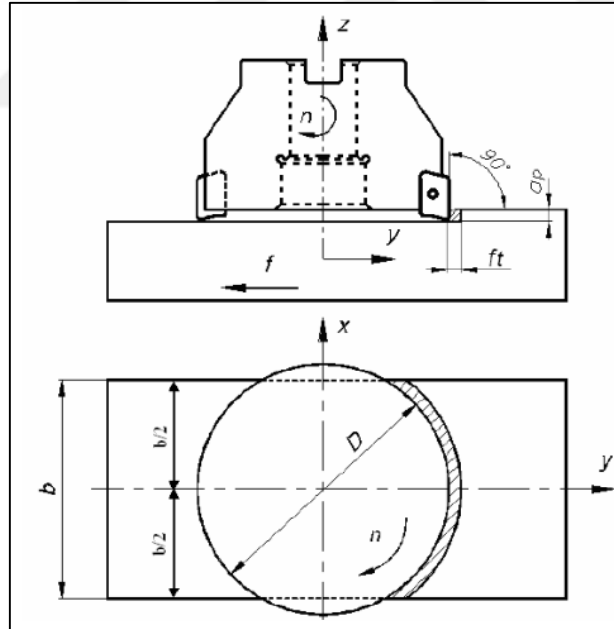
Alın frezeleme ile yapılan talaş kaldırma işlemlerinde, kesici takımın alın kısmında ve çevresinde yer alan kesici ağızlar kullanılarak yapılan eş zamanlı kesme işlemidir. İşlenen yüzeyler kesici takımın dönme eksenine dik olmakla birlikte talaş kaldırma işlemi çoğunlukla takım tutucunun çevresinde yer alan kesici ağızlar vasıtasıyla yapılmaktadır. Takım tutucunun alın kısmında yer alan kesici uç kısmı ise genellikle yüzey kalitesinin belirlendiği son işlem esnasında kullanılmaktadır. Alın frezeleme yönteminde ister silindirik freze isterse takma uçlu freze çakısı kullanılsın düzlem yüzey işlemlerinden önce mutlaka komparatör kullanılmalı ve düz olup olmadığı kontrol edilmelidir. Silindirik freze uçları çoğunlukla yüksek hız çeliğinden tek parça halinde üretilmesine karşın takma uçlu olarak da üretilebilmektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle imal edilen takma uçlu freze çakıları, kaplama işlemiyle birlikte çok daha yüksek kesme hızlarında kullanılabilir. Literatürde çoğunlukla sementit karbür olarak adlandırılan takma uçlar, genellikle mekanik yöntemlerle takım tutuculara bağlanırlar. Alın frezeleme işleminde talaş kaldırma simetrik veya asimetrik olarak yapılabilmektedir [18]. Şekil 2.1'de takma uçlu freze çakılarının mekanik yöntemlerle takım tutucuya bağlanması gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Sementit karbür uçların takım tutucuya mekanik olarak bağlanması.

### 2.1.2. Simetrik Frezeleme

Alın frezeleme yönteminde yapılan bir frezeleme işlemidir (Şekil 2.2). Simetrik frezeleme yöntemi, kesici takım eksenini ve iş parçası ilerleme ekseninin çakışması ile yapılan talaş kaldırma işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Bir başka deyişle, talaş kaldırma esnasında kesici takım iş parçasının ortasında ilerlemektedir [19].

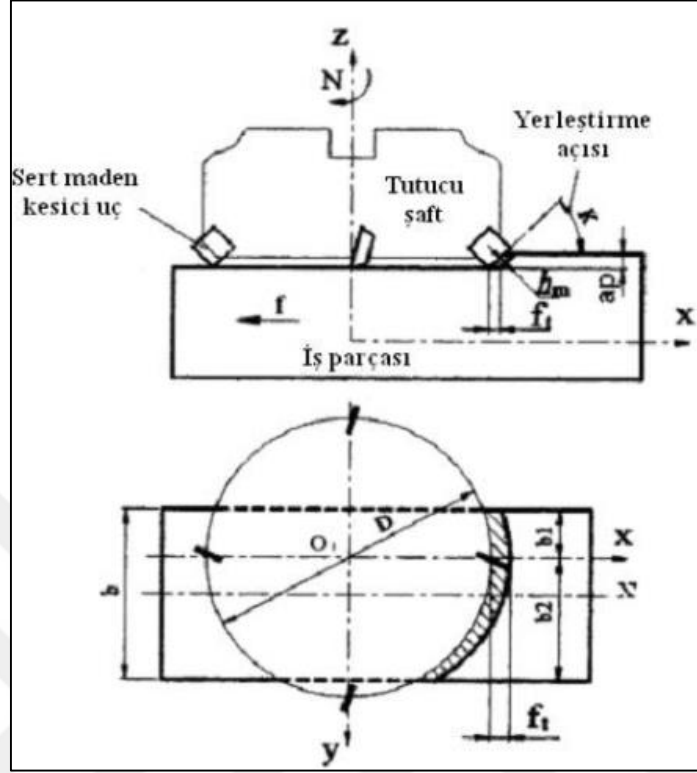


Şekil 2.2. Simetrik frezeleme yönteminin şematik gösterimi [19].

### 2.1.3. Asimetrik Frezeleme

Asimetrik frezeleme yöntemi, iş parçasına ait ilerleme yönündeki ekseninin çakışmadığı durumlarda yapılan frezeleme yöntemidir. Freze çakısı iş parçasından asimetrik olarak talaş kaldırmaktadır (Şekil 2.3).

Bilinmesi gereken bir diğer durum ise ister simetrik isterse asimetrik talaş kaldırabilmek için kesici takımın dönme çapının iş parçası genişliğinden fazla olması [19].



Şekil 2.3. Asimetrik frezeleme yönteminin şematik gösterimi [19].

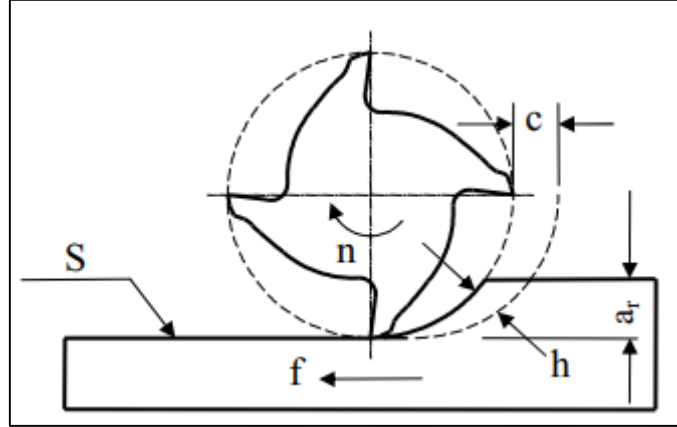
#### 2.1.4. Çevresel Frezeleme

Freze çakıların çevreleyen kesici uçların dönerek talaş kaldırdığı yönetime çevresel frezeleme yöntemi denir. Bu işlemde ortaya çıkan talaş tipleri kıvrık, virgül biçiminde ve sürekli kesite sahip talaşlardır [19]. Bu yöntemde, kesici takım freze miline uzun malafalar yardımıyla bağlanmaktadır. Bu yöntemde, kesici takıma ait dönme eksenini ile iş parçasının kesilen yüzeyi paralel olarak konumlanmaktadır. Kesici takımın kendi eksenini etrafında dönmesi ve iş parçasının üç ekseninde (x, y, z) ilerletilmesi sonucunda talaş kaldırma işlemi gerçekleşmektedir. Çevresel frezeleme yöntemi aynı yönlü frezeleme ve zıt yönlü frezeleme olmak üzere iki bölümde incelenmektedir.

##### 2.1.4.1. Aynı Yönlü Frezeleme

Aynı yönlü frezeleme yönteminde kesici takımın kesme yönü ile iş parçasının ilerleme yönü aynıdır (Şekil 2.4). Freze çakısı iş parçasına batarken talaş kalınlığı maksimumdur. Daha sonra talaş kalınlığı gittikçe azalır ve böylece talaş kalınlığı ile beraber kesme kuvveti de azalır. Bundan dolayı özellikle son şekil verme işlemlerinde kullanılır ve daha iyi bir yüzey ortaya çıkmasını sağlar. Zıt yönlü frezelemeye göre daha ekonomik olan

aynı yönlü frezeleme işlemi daha kullanışlı bir yöntemdir. Ancak, bu yöntemin uygulanabilmesi için kullanılan freze tezgâhının tablasında boşluk olmaması gerekmektedir [19].

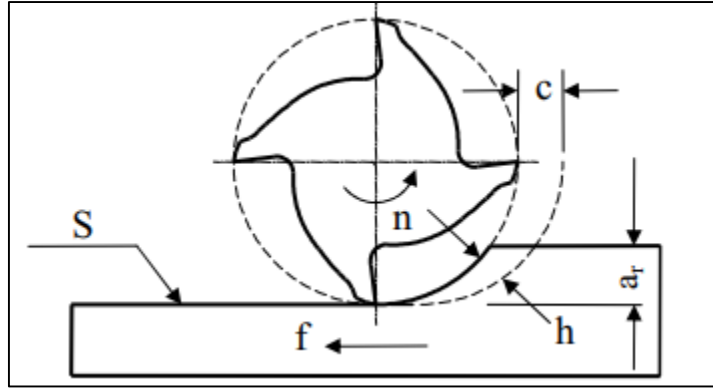


Şekil 2.4. Aynı yönlü frezeleme [20].

#### 2.1.4.2. Zıt Yönlü Frezeleme

Zıt yönlü frezeleme yöntemi adını freze çakısının kesme yönü ile iş parçasının ilerleme yönünün zıt olmasından almaktadır. Kesici takım talaş oluşturabilmek için iş parçasının yüzeyinde kazıma hareketi yapmaktadır (Şekil 2.5). Bu nedenle, kesici takımda görülen dominant aşınma tipi genellikle serbest yüzey aşınması şeklinde olmaktadır. Kesici ağzının iş parçasına batmaya başladığı an oluşan kuvvet kesmenin devamıyla birlikte talaş kesiti arttığı için büyümektedir. Oluşan talaşın şekli virgüle benzemektedir [19].

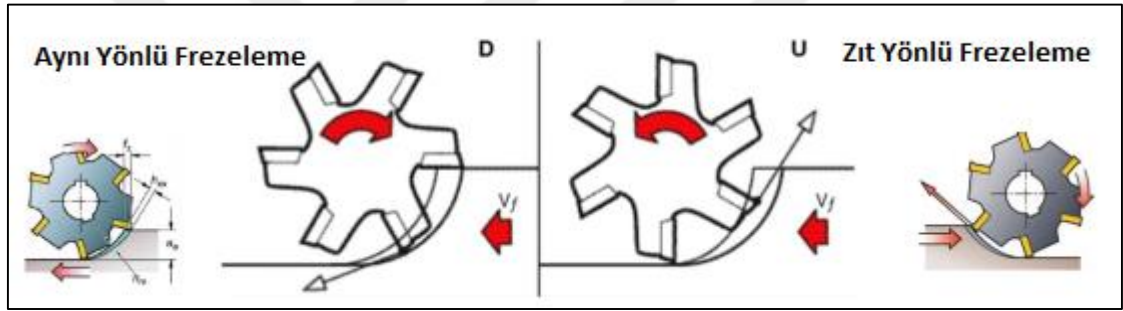
Zıt yönlü frezeleme esnasında kesici takım iş parçasına kazıma hareketi yaparak girdiği için iş parçasını tabladan yukarıya kaldırmaya çalışmaktadır. Oluşan talaş kesiti inceden kalına doğru gittiği için kesici takımda bir zorlanma meydana gelecektir. Kesici takımdaki bu zorlanma malafa milini zorlama veya iş parçasını yukarı kalkmaya zorlama şeklinde işe yansıtacağından iş parçasının yüzeyinde gözle görülmeyecek bir dalgalanma oluşmaktadır [19].



Şekil 2.5. Zıt yönlü frezeleme [20].

#### 2.1.4.3. Aynı Yönlü Frezeleme ile Zıt Yönlü Frezelemenin Karşılaştırılması

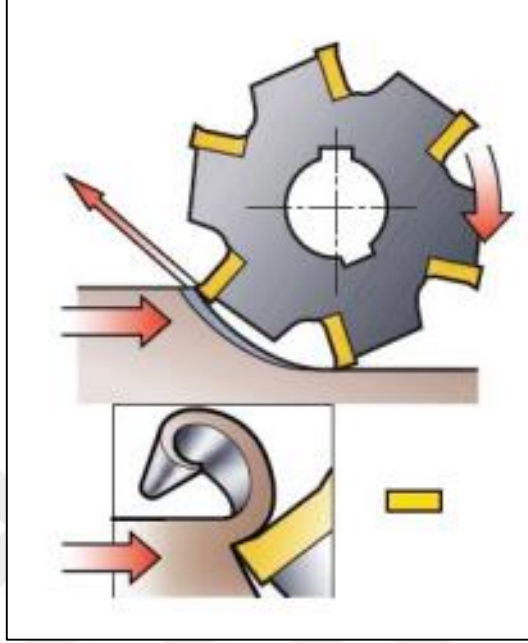
Hem aynı yönlü frezeleme hem de zıt yönlü frezelemede kesme esnasında kaldırılan talaş virgül şeklinde çıkmaktadır ve talaşın kesiti her noktada değişiklik göstermektedir (Şekil 2.6).



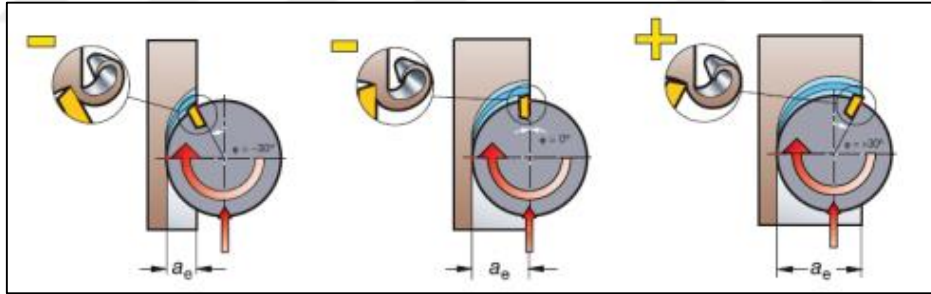
Şekil 2.6. Aynı yönlü frezeleme ile zıt yönlü frezelemenin karşılaştırılması [19].

- Aynı yönlü frezeleme yönteminde kesici takımın iş parçasına ilk daldığı noktada en büyük talaş kesiti oluşurken zıt yönlü frezelemede bu durum tam tersi bir hal almaktadır.
- Aynı yönlü frezelemede ortaya çıkan kesme kuvveti ilk talaş kaldırmanın başladığı noktada en yüksek olup daha sonra azalmakta iken zıt yönlü frezelemede en küçük kesme kuvveti talaşın ilk kaldırılmaya başladığı nokta oluşmaktadır.
- Zıt yönlü frezeleme ile kıyaslandığında aynı yönlü frezelemede kesici takımın iş parçasına sürtünme alanı daha az olmaktadır. Bu da daha az kesme sıcaklığı oluşmasına neden olmaktadır.
- Zıt yönlü frezelemede kesici takımın iş parçasından çıkışı hassas şekilde olmaktadır. Özellikle karbür kesicilerle yapılan talaş kaldırma işlemlerinde büyük talaş kesiti takım ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir. Böyle bir

kesme esnasında oluşan talaş kesme işleminin bitim noktasında destek eksikliği duyar ve bükülmeye çalışır. Bu durum kesici kenar üzerinde kopmaya kadar giden bir aşınma oluşmasına neden olabilmektedir (Şekil 2.7 ve Şekil 2.8).



Şekil 2.7. Zıt yönlü frezelemede takımın iş parçasından çıkışı [19].



Şekil 2.8. Zıt yönlü frezelemede takımın iş parçasından farklı şekilde çıkışları [19].

- Zıt yönlü frezeleme esnasında çıkışta oluşan büyük talaş kesiti daha yüksek sıcaklıklara neden olacaktır ve bu durum da bazen kesme ucu üzerinde kaynaklanmalara neden olabilmektedir. Böylece, her kesme noktasında kesici takım biraz daha aşınacak ve sürecin böyle devam etmesi durumunda kesici takım ömrünü tamamlayacaktır.
- Sementit karbür kesicilerin uç geometrileri minimum bir talaş derinliğine ihtiyaç duymaktadır. Bir başka deyişle, sementit karbür talaşa sıfır yüzeyden batması istendiğinde keskin kenara sahip olmadığından zorlanma yaşanması muhtemel bir durumdur.

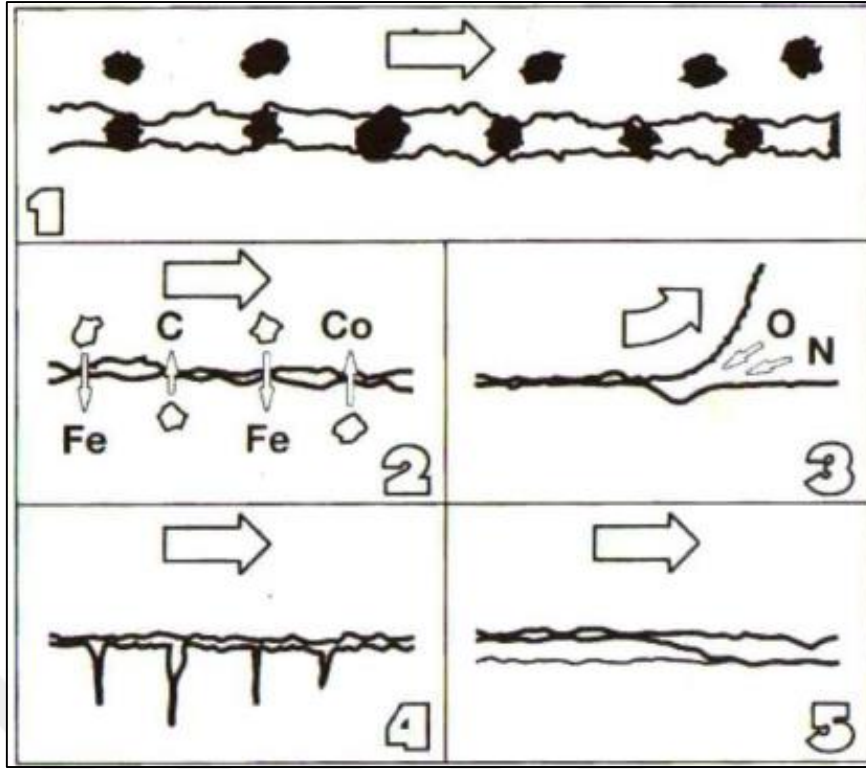
## **2.2. TAKIM AŞINMASI**

Talaş kaldırmak için kullanılan kesici takımlar, talaş kaldırma işlemi sırasında bazı mekanizmaların da etkisiyle aşınırlar ve bu aşınma kesici takım ömrünü tamamlayıncaya kadar devam eder. Kesici takımın çalışma ömrü dakika cinsinden ifade edilmektedir. Önceleri takım ömrü kesici takımın kesmeye devam edememesi şeklinde ifade edilirken günümüzde bu tanım, işlenen yüzeyin yapısı, ölçü tamlığı, takım aşınma biçimi gibi çeşitli parametreleri kapsamaktadır [18], [21].

Kesici takımda meydana gelen aşınmanın en büyük nedeni iş parçası ile kesici takım arasındaki sürtünme nedeniyle ortaya çıkan kesme sıcaklığıdır. Bu sürtünme ve dolayısıyla sıcaklık, kesici ucun aşınmaya karşı mukavemetini azaltarak aşınmayı hızlandırmaktadır. Aşınmanın ana nedenlerini sıralamak gerekirse bunlar; mekanik, termal, kimyasal ve aşındırıcı yüklerdir. Belirli bir periyotta gerçekleşen mekanik yükler sonucunda kesme kenarında bir yorulma meydana gelir. Tornalamaya kıyasla frezelemede bu yükler biraz daha fazla olmaktadır. Bunun başlıca sebebi ise tornalamada sürekli bir kesme meydana gelirken frezelemede darbeli (kesikli) bir talaş kaldırmanın söz konusu olmasıdır. Özellikle frezelemede daha yoğun görülen ve takımın ömrünü önemli ölçüde kısaltan bu yükler sonucunda takım aşınması meydana gelmektedir.

### **2.2.1. Aşınma Mekanizmaları**

Kesme esnasında ortaya çıkan ve kesme kenarı üzerinde önemli etki bırakan yük faktörleri belli bir aşamadan sonra kesici takımda bazı aşınma mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Abrazif, difüzyon, oksidasyon, yorulma ve adhezif aşınma olarak sıralanan bu mekanizmalar Şekil 2.9'da şematize edilmiştir.



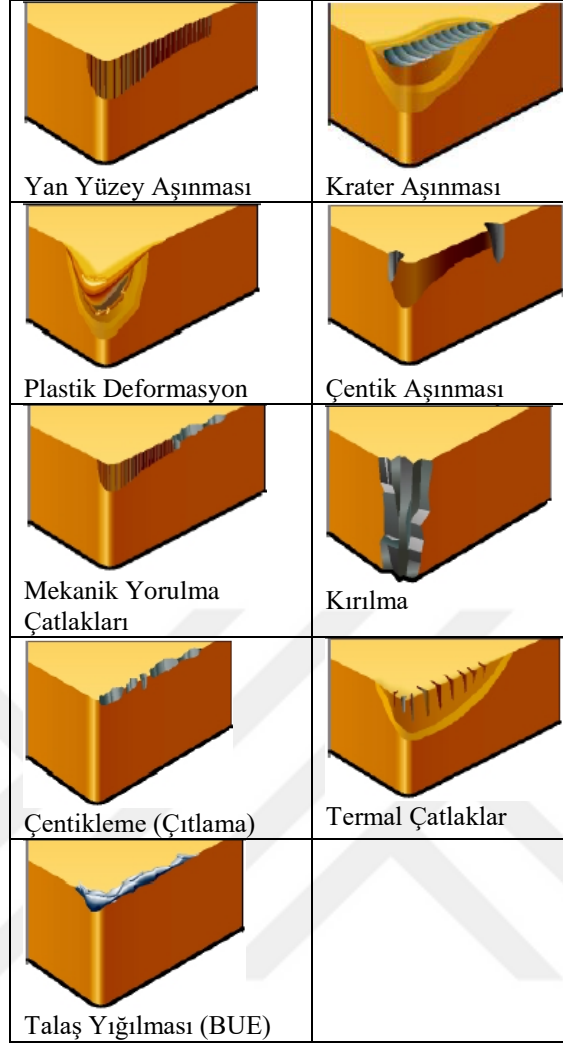
Şekil 2.9. Yükler sonucu ortaya çıkan aşınma mekanizmaları [22].

### 2.2.2. Aşınma Tipleri

Takım aşınması; işleme şekli, doğru kesme koşulları ve kesici takım kalitesinin optimize edilmesi için gerekli verileri sunan en önemli göstergelerden biridir. Takım aşınması genel olarak işleme kriterlerini, ergonomik hassasiyeti, yüzey yapısını, talaşın kontrol edilmesini ve talaş miktarını belirlemektedir. O nedenle işleme verimliliği açısından son derece önemlidir. İdeal takım ömrünü elde etmek için;

- Uygun kesme parametrelerinin bilinmesi,
- Kişisel deneyimin üst seviyede olması,
- İşlenmeye müsait olan iş parçası malzemesi
- İşleme şartlarının bir seviyede optimize edilmesi gereklidir [23].

Daha önce bahsedilen beş aşınma mekanizmasından biri veya birkaçı bir araya gelerek Şekil 2.10'da verilen aşınma tiplerini oluşturmaktadır.



Şekil 2.10. Kesici takımlarda görülen aşınma tipleri [23].

#### 2.2.2.1. Yan Yüzey Yanak Aşınması

Bu aşınma tipi, kesici kenarın yanak kısmında görülen ve genellikle abrasif aşınma mekanizmasının bir sonucu olan aşınma tipidir (Şekil 2.11). Kesici takım serbest kenarı uç yarıçapı ve buna bağlı olarak değişebilen talaş oluşumunda iş parçası ile temas etmektedir. Yan yüzey yanak aşınması genellikle en sık görülen aşınma tipi olmakla birlikte kesici takımın normal bir kesme yaptığına dair işaret olarak algılanır. Yanak aşınmasının çok artması ve normalin dışına çıkması ile birlikte daha kötü yüzey kalitesi ve düşük ölçü tamlığı ortaya çıkar. Genellikle çok yüksek kesme hızı veya düşük kalitede kesici ucun kullanıldığı durumlarda daha çabuk görülür. Kesme hızını azaltmak, aşınmaya karşı daha dirençli bir takım kullanmak, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama tercih etmek, özellikle süper alaşım gibi deformasyon sertleşmesi özelliğine sahip malzemeler işlenirken daha küçük bir giriş açısı ile kesmeye başlamak muhtemel çözüm önerileri arasında yer almaktadır.



Şekil 2.11. Yanak aşınması [23].

#### 2.2.2.2. Krater Aşınması

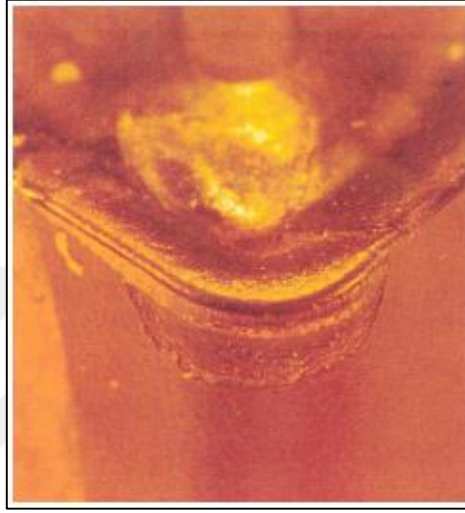
Çukur aşınma olarak da bilinen krater aşınması, abrasif ve difüzyon aşınma mekanizmalarının bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.12). Krater denilen yapı, takım-talaş ara yüzeyine giren sert parçacıkların aşındırma etkisiyle ortaya çıkmakta olup takım malzemesinin talaştan ayrılmasıyla da oluşabilmektedir. İş parçası ve kesici takımın sertliği, iş parçasının yüksek sıcaklıklar altında göstermiş olduğu kızıl sertlik özelliği ve takım iş parçası arasındaki kimyasal etkileşim krater aşınmasının durumunu belirlemektedir. Krater aşınmasının kontrolden çıkması demek kesici kenarın geometrisinin değişmesi ve talaş oluşumunu olumsuz anlamda etkilemesi demektir. Dahası, kesici kenarı önemli ölçüde zayıflatmakta ve bir müddet sonra kesici takımdan parça kopmaları meydana gelmesine sebep olabilmektedir [23].



Şekil 2.12. Krater aşınması [23].

### 2.2.2.3. Plastik Deformasyon

Kesici kenardaki yüksek sıcaklık ve basıncın bir sonucu olarak oluşan plastik deformasyon, yüksek kesme hızı, yüksek ilerleme hızı, sert iş parçası malzemesi, sıcaklık ve basınç demektir (Şekil 2.13). Plastik deformasyonun devreye girmesiyle birlikte kesici kenarda bir şişme meydana gelmektedir. Bu şişme ile birlikte sıcaklık daha yüksek noktalara çıkmaktadır ve bu da talaş akışının değişmesine, kesici geometrisinin bozulmasına sebep olmaktadır. Plastik deformasyonu engellemek için kesici takım geometrisi ve uç yarıçapı doğru seçilmelidir [23].



Şekil 2.13. Plastik deformasyon [23].

### 2.2.2.4. Çentik Aşınması

Genellikle yardımcı kesici kenarda görülen çentik aşınması, klasik bir adhezif aşınma mekanizmasının sonucudur (Şekil 2.14). Çentik aşınması adhezif aşınma mekanizmasıyla ortaya çıkmakla beraber oksidasyon aşınması ile daha büyük bir hal alabilir. Bu aşınma tipinde görülen çentik, kesici kenar ile iş parçası malzemesinin temas ettiği noktada ortaya çıkmaktadır. Aşınma, ortamdaki havanın kesmeye dâhil olduğu noktada ortaya çıkar ve yanak aşınmasının aksine tüm kesme yüzeyinde değil de daha lokal gözükmetedir [23].

Yardımcı kenarı değil de asıl kesme kenarında oluşan çentik aşınması ise mekanik yüklerin bir sonucudur ve genellikle süper alaşım gibi sert malzemelerin işlenmesi esnasında ortaya çıkmaktadır. Çentik aşınmasının kontrol edilebilen alanın dışına çıkması durumunda yüzey kalitesi önemli ölçüde düşer ve kesici kenarın dayanımında ciddi düşüş görülür [23].



Şekil 2.14. Çentik aşınması [23].

#### 2.2.2.5. Termal Çatlaklar

Genellikle ani ısı değişikliklerinden dolayı ortaya çıkan ve yorulma mekanizmasının bir sonucu olan aşınma tipidir (Şekil 2.15). Özellikle frezeleme yöntemiyle yapılan talaş kaldırma işlemlerinde sıkça görülür. Kesici kenara dik bir açıyla oluşan termal çatlaklar, kesici takımdan malzeme kopmasına neden olabilmektedir. Yorulma sonucu kesici takımdan mikro seviyede parça kopması şeklinde görülür ve bu durum kesici takımın kırılma direncini önemli ölçüde düşürür. Termal çatlakların oluşmasını engellemek için soğutma sıvısı kullanımından kaçınmak gerekir. Çünkü soğutma sıvısı talaş kaldırma sırasındaki ve talaş çıktıktan sonraki sıcaklık farklarını daha da artıracaktır [23].

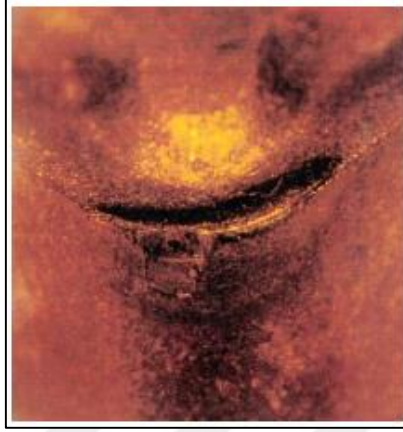


Şekil 2.15. Termal çatlaklar [23].

#### 2.2.2.6. Mekanik Yorulma Çatlakları

Termal çatlaklardan farklı olarak genellikle kesici kenara paralel görülen mekanik yorulma çatlakları aşırı kesme kuvveti darbelerinin görüldüğü durumlarda ortaya

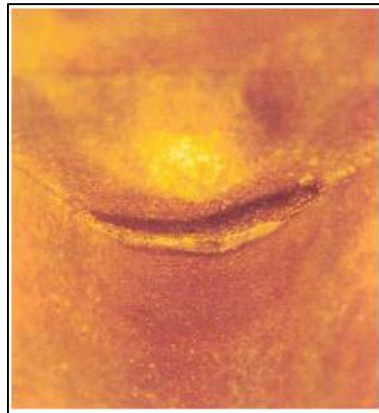
çıkılmaktadır (Şekil 2.16). Bir başka deyişle, kesici takımda görülen mekanik yorulma çatlakları kesme esnasında oluşan kesme kuvvetlerindeki ani değişimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Çatlakların boyutu kuvvet değişim aralığı ile doğrudan bağlantılıdır [23].



Şekil 2.16. Mekanik yorulma çatlakları [23].

#### 2.2.2.7. Çıtlama (Çentikleme)

Kesici kenara paralel olarak görülen çentikler, aşınmadan çok kesici kenar boyunca görülen küçük boyutlu kırılmalardır (Şekil 2.17). Mekanik yorulma çatlaklarına benzeyen ancak ondan daha küçük olan bu çentikler, ani yüklemeler ve yükün kaldırılması sonucu ortaya çıkar ve kesici takım bünyesinden küçük parçaların ayrılması şeklinde görülür. Genellikle darbeli çalışma ortamı nedeniyle frezeleme metodunda sıkça görülen bir aşınma tipidir [23].



Şekil 2.17. Çentikleme [23].

#### 2.2.2.8. Kırılma

Kesici kenarın ömrünü tamamladığı anlamına gelen kırılma, en kötü aşınma tipi olup kesinlikle kaçınılması gereken bir durumdur. Genellikle aşınmanın en son hali olarak

görülmektedir. Bir başka deyişle, daha önce görülen aşınma tiplerinin bir sonucudur. Kırılmanın meydana gelmesiyle birlikte kesici takım geometrisi değişmektedir. Daha doğrusu kesici takım kesme kabiliyetini kaybetmektedir [23].



Şekil 2.18. Kesici takımda meydana gelen kırılma [23].

#### 2.2.2.9. Kesici Kenarda Yığılma (BUE)

Kesici kenarda talaş birikmesi veya yığılması olarak da tanımlanan BUE, genellikle yüksek kesme hızlarının bir sonucudur. Dolayısıyla yüksek sıcaklığın bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüksek kesme sıcaklıklarında görülen kesici kenar erimesi ve benzer durumların bir sonucudur. BUE oluşumu esnasında iş parçasından kopan küçük boyutlu parçacıklar yüksek ısı ile birlikte kesme kenarına kaynamaya başlamaktadır. Bu şekilde kesmenin devam etmesi durumunda arkadan gelen iş parçası parçacıkları kaynamaya devam etmekte ve kesici uçta oluşan birikintiyi artırmaktadır. Bu durumun devam etmesi durumunda birikinti bir süre sonra kopmaktadır. Kopma esnasında kesici takımdan da parçalar ayrıştırmaktadır. Ve sonuç olarak kesici takım kesme kabiliyetini kaybetmektedir [23].



Şekil 2.19. Kesici takımında BUE oluşumu [23].

### 2.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

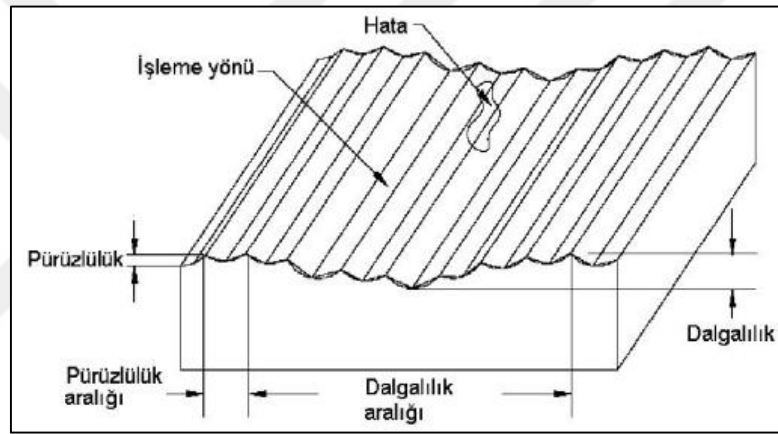
Talaşlı imalatla elde edilen yüzeylerde farklı nedenlerden dolayı bir takım istenmeyen izler oluşmaktadır. İşleme yöntemi, kesici cinsi, işlenen malzeme, işleme parametreleri, bazı fiziksel, kimyasal faktörler ve iş parçası ile kesici takım arasındaki mekanik hareketlere bağlı olarak değişen bu yüzey düzensizliklerine yüzey pürüzlülüğü denir [24].

Talaş kaldırma yöntemlerinin tamamında işlenmiş yüzeylerde belirli bir yüzey düzensizliğinin oluşması kaçınılmaz bir durumdur. Bir malzeme farklı işleme metotları ile işlense bile birbirine yakın yüzey pürüzlülük değerleri ortaya çıkmaktadır. Ancak, bazı durumlarda kesici takımın aşınma miktarı, korozyon, sürtünme ve yorulma dirençleri nedeniyle yüzey pürüzlülük değerlerinde farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Bundan dolayı bir malzemenin yüzey pürüzlülük değeri belirtilirken işleme yöntemi de mutlaka belirtilmelidir [24].

Metal kesme yöntemleriyle elde edilen yüzeyler gözle incelendiğinde her ne kadar pürüzsüzmüş gibi görünse de parça yüzeyindeki gerçek sürtünme alanı parça alanından daha az olmaktadır. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün belli bir sınırı geçtiği durumlardaki bu sınır genellikle  $1.6 \mu\text{m}$  olur ve yüzey pürüzlülüğü artık gözle de görülebilir durumdadır. Bazı durumlarda yüzey pürüzlülük değeri oldukça önemlidir ve böyle anlarda ciddi bir kalite kontrol yapılması gerekmektedir. Bu kalite kontrolün yapılması için uluslararası standartlar yetkilendirilmiştir ve ülkemizde bu durum standart numarası TS 2040 olan standart ile başlamıştır. Daha sonraları TS 2040 standardını TS 2495, TS 971, TS 2587, TS 6956 ve TS 930 standartları takip etmiştir [25].

### 2.3.1. Yüzeyin Durumu

İşlenmiş yüzey yapısına dair fikir vermek için gerekli olan en önemli faktörler aşınmanın durumu, yorulma ömrü ve yataklık etme özelliğidir. İşlenmiş yüzeylerde iki türlü yüzey sapması meydana gelmektedir. Bunlardan birincisi olan dalgalılık, işlenmiş yüzeyin geometrik durumunu temsil eder. Bunlardan ikincisi olan pürüzlülük ise işlenmiş yüzeyin kalitesini göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü, standart olarak, yüzeye dik bir şekilde uzanan kesitteki bir numune uzunluğundan alınan ölçümler, bir referans profili ve ortalama çizgiye göre tayin edilmektedir [26]. Geometrik profil genellikle referans profil olarak kabul edilmektedir. Profil ortalama çizgisinin yeri, referans çizgisinin altında ve üstünde kalan alanların toplamı birbirine eşit olacak şekilde belirlenmektedir [27]. Şekil 2.20’de işlenmiş bir yüzeyin geometrisi ve o yüzeye ait elemanlar verilmiştir.



Şekil 2.20. İşlenmiş bir yüzeyin geometrik yapısı [28].

### 2.3.2. Yüzey Kalitesinin Önemi

Yüzey kalitesi üretim sektörü başta olmak üzere birçok sektörde önemli bir kalite göstergesidir. Özellikle yataklar, korozyon etkisi yüksek ortamda çalışan parçalar, kalıp yüzeyleri, sızdırmazlık istenen yüzeyler, masterlar, boyanmış ve kaplanmış yüzeyler bu sektörlerin ilk akla gelenleridir [29].

### 2.3.3. Yüzey Kalitesine Etki Eden Faktörler

Talaş kaldırma ile elde edilen yüzeylerin pürüzlülük kalitesine etki eden parametrelerden bazıları şunlardır;

- İşleme operasyonunda kullanılan tezgâhın rijitlik durumu,
- Yataklama sisteminin hata durumu,
- Takım tutucuların rijitlik durumu,
- Takım aşınması durumu,

- Kesici takımın geometrik yapısı,
- İşleme parametreleri,
- İş parçası malzemesi,
- Kesme sıvısı kullanımı [29].

#### 2.3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazları

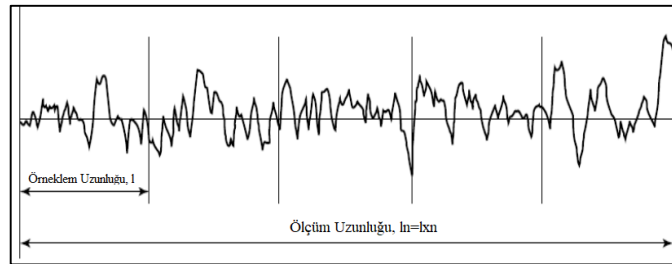
Yüzey pürüzlülük değerini ölçmek için kullanılan cihazlar aşağıda listelenmiştir;

- Elektriksel sivri uçlu cihazlar,
- E göbek tipli cihazlar,
- Bobin tipli cihazlar,
- Piezoelektrik kristalli cihazlar,
- Dokunarak ölçüm yapan cihazlar,
- Mekanik olarak ölçüm yapan cihazlar,
- Kadranlı derinlik cihazları,
- Işık interferans mikroskopları,
- Yüzey kopyalama ile ölçüm yapan cihazlar [30].

#### 2.3.5. Yüzey Pürüzlülüğüne ait Parametreler

##### 2.3.5.1. Örneklem Uzunluğu ve Örneklem Sayısı

Örneklem uzunluğu  $l$  ile ifade edilen uzunluktur ve kesici takımın ilerlemesini temsil edecek büyüklükte olmalıdır. Seçilen alan üzerinde değerlendirilen bütün örneklem bir arada toplanmasıyla " $ln$ " ile gösterilen ölçüm uzunluğu ortaya çıkar.  $n \geq 5$  olmak üzere  $ln$  uzunluğu örneklem uzunluğu ve  $n$ 'in çarpılmasıyla elde edilir. Şekil 2.21'de örneklem uzunluğu ve sayısı ile ölçüm uzunluğu verilmektedir [31].

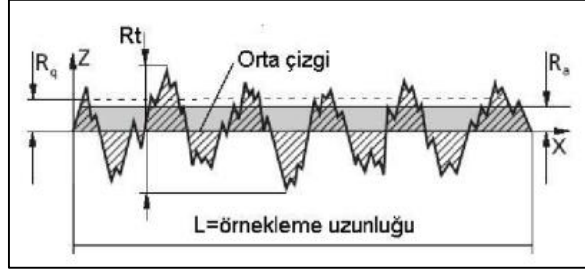


Şekil 2.21. Örneklem uzunluğu ve sayısı ile ölçüm uzunluğu [31].

##### 2.3.5.2. Ortalama Çizgisi

Ölçme işlemi esnasında kullanılan ve yüzey pürüzlülüklerinin alttaki ve üstteki

alanlarının eşit olarak ayrılmasını sağlayan doğruya verilen isimdir [29]. Şekil 2.22’de klasik bir yüzey pürüzlülük ölçümündeki ortalama çizginin şematik görünümü verilmiştir.



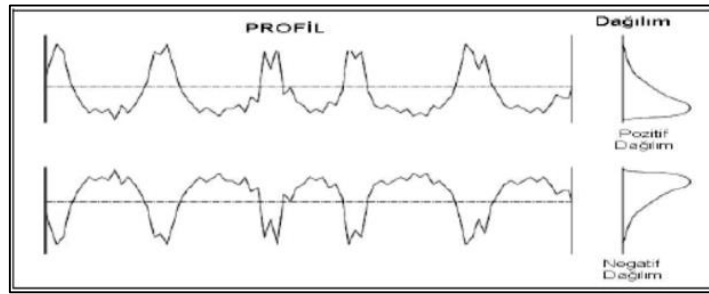
Şekil 2.22. Ortalama çizgisi [29].

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

Ortalama çizgisinin altında ve üstünde kalan mutlak çukurlukların aritmetik ortalama değerlerin gösteren ifade biçimidir. Yüzey pürüzlülük ölçümünde evrenseldir ve dünya genelinde aynı ifadeyi temsil etmektedir. Tanımlanması ve uygulanması kolay bir parametredir [31].

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

Genlik dağılım eğrisi, genlik yoğunluğunun ortalama çizgiye göre simetrisini belirleyen dağılım eğrisine verilen isimdir. Eşit  $R_a$  ve  $R_q$  değerine sahip yüzey profillerini ayırt etmek için kullanılan bir değişkendir. Şekil 2.23’te işlenmiş bir yüzeyin profili ve genlik dağılım eğrisi görülmektedir [31].



Şekil 2.23. Profil ve genlik dağılım etkisi [31].

### 3. SÜPER ALAŞIMLAR VE HASTELLOY C276

Süper alaşımlar, ana yapısını nikel, demir ya da kobaltın oluşturduğu, değişen oranlarda yüksek miktarda krom, düşük oranda da yüksek sıcaklıklarda ergiyen titanyum, volfram, alüminyum ve molibden içeren alaşımlar olarak tanımlanabilmektedir. Süper alaşımlar, çok yüksek sıcaklıklarda bile dayanımlarını muhafaza eden malzemelerdir. Karmaşık bir yapıya sahip olan bu alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyarak mükemmel denilebilecek seviyede oksidasyon ve korozyon direncine ve çekme dayanımına sahiptirler. Katı çözelti matrisi içerisinde homojen dağılmış değişik yapıdaki karbür ve intermetalik fazlar içeren bu malzemeler, 1000-1200°C arasında kullanılabilirdiği gibi 1300°C da kısa süreli olarak kullanılabilir. Alaşımların en iyi kullanım sıcaklığı, ergime sıcaklığının %80'i (0,8 Terg) ve daha aşağı olduğu sıcaklıklardır [32].

Süper alaşımlar, genellikle VIIIA grubu elementlerinden oluşan alaşımlardır ve yüksek çalışma sıcaklıklarında çok iyi mekanik özellikler göstermektedirler. Mekanik mukavemet, sürtünme direnci, mikroyapı stabilizesi, oksidasyon direnci ve korozyon direnci yüksek olan bu malzemeler, yüksek sıcaklıklarda çalışması istenen uçak motorlarında ve turbo şarjlarda kullanım için geliştirilmişlerdir [33]. Günümüzde kullanılan modern süper alaşımların temelini, içeriğinde nikel (%80), krom (%20) barındıran ve elektrik endüstrisinde direnç teli olarak kullanılan malzemeler oluşturmaktadır. Süper alaşım kavramı, ilk olarak 1940'lı yılların başında üretilen ve oksidasyon direnci ile sürünme ve kırılma eğilimi olan malzemelere düşük miktarda titanyum ve alüminyum katılarak üretilen malzemeler için kullanılmaya başlanmıştır [34].

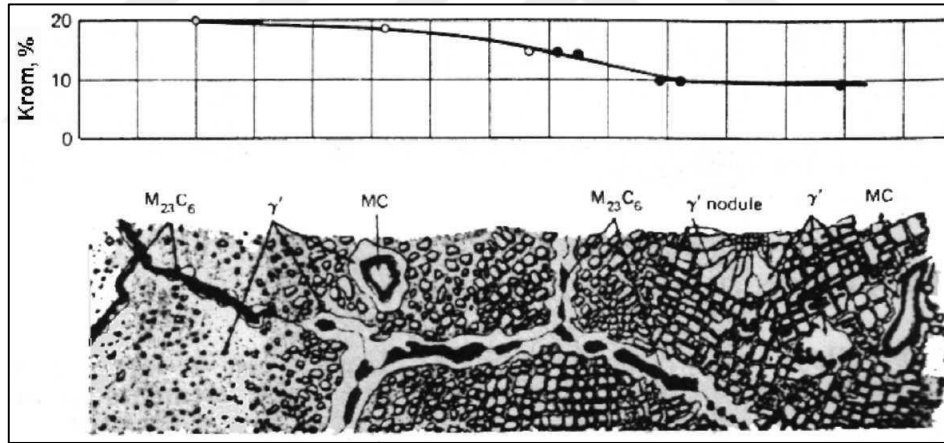
İlk üretilen süper alaşımın Nimonic 80 olduğu bilinmektedir. Daha sonra Nimonic 80 geliştirilerek Nimonic 80 A üretilmiştir. Nimonic 80 A'ya %20 kobalt ilave edilerek Nimonic 90 üretilmiştir. Nimonic 90, türbin motor tasarımcılarının gereksinim duydukları yüksek sıcaklıklarda hizmet verecek şekilde tasarlanmıştır. Taleplerin artmasıyla titanyum ve alüminyuma ilaveten molibden katılarak Nimonic 105 ve 115'in geliştirilmesiyle katı solüsyon gerilimine sahip alaşımlar elde edilmiştir. 1940'ların sonunda Pratt and Whitney Aircraft ve General Electric Company Şirketleri tarafından, Waspalloy ve M 252 adında iki önemli dövme süper alaşım geliştirilmiştir [35].

Günümüz türbin teknolojisinde hedef, yakıtın verimliliğini yükseltmek ve emisyon durumunu azaltmaktır. Bu hedef için süper alaşımlar üzerinde yoğunlaşan çalışmalar, bu malzemelerin hedeflere uygun bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum özellikle yüksek sıcaklık altında yapılan çalışmalarda daha ön plana çıkmaktadır. Süper alaşımlara uygulanan soğuk deformasyon işlemi ile birlikte malzemelerin sertliği nispeten artmaktadır. Ancak, bu sertlik yüksek sıcaklıklar altında bir süre sonra özelliğini kaybetmektedir. Süper alaşımların yüksek dayanıma sahip olmasının sebebi östenitik halde iken yüzey merkezli kübik bir yapı özelliği sergilemesi olarak bilinir ancak çökelti esnasında ortaya çıkan sertleştirici fazların etkisi de oldukça önemlidir. Süper alaşım malzemelerin sınıflandırılmasında kobalt esaslı süper alaşımlar, demir esaslı süper alaşımlar ve nikel esaslı süper alaşımlar seçeneği ön plana çıkan sınıflandırma yöntemidir. Burada dayanım açısından en düşük sınıfın demir esaslı süper alaşımlar olduğunu söylemek mümkündür. Bunun en temel sebebi ise nikel ve kobalt esaslı süper alaşımların demir esaslı süper alaşımlara göre daha yüksek sıcak sertlik özelliği göstermesidir. Bu nedenden ötürü yüksek çalışma sıcaklığı, yüksek çalışma ömrü ve yüksek mekanik zorlanmaların olduğu noktalarda kobalt ve nikel esaslı süper alaşımlar tercih edilmektedir. Daha düşük zorlanma ve sıcaklık şartlarında, maliyetinin düşük olması nedeniyle, demir esaslı süper alaşımlar tercih edilebilir [36].

Süper alaşımlar, çalışma sıcaklığının üst seviye olduğu durumlarda kullanılmak için üretilen ve diğer çalışma ortamlarıyla karşılaştırıldığında daha net ve yüksek kararlılık istenen ortamlarda kullanılan malzeme grubudur [12]. Bu malzemeler, çoğunlukla içerisinde ana alaşım elementi olarak nikel, kobalt ya da demir barındıran ve bunların farklı oranlarda bir araya gelmesiyle elde edilen malzemelerdir. Ayrıca, daha az miktarda tungsten, molibden, tantal, niyobyum, titanyum, hafniyum ve alüminyum da kullanılmaktadır. Demirin aksine kobalt ve nikel esaslı süper alaşımlar, yüksek çalışma sıcaklığında yüksek dayanım gösteren malzemelerdir. Yüksek çalışma sıcaklığı ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle, süper alaşımlar, birçok alaşım çeşidinin yerine geçmiştir. Süper alaşımların şekillendirilmesinde döküm ve talaşlı imalat ön plana çıkmaktadır. Ergime noktası üstünlüğünden ötürü kobalt alaşımlar genellikle 1100 °C'den yüksek sıcaklıklarda nikel esaslı alaşımlardan daha fazla dayanım gösterirler. Karbür bileşikleri içeren ve bir yüzey merkezli kübik katı solüsyon matris ile nitelendirilen döküm kobalt esaslı alaşımlar, gaz türbin motorlarında hava folyoları olarak kullanılmaktadır. Dağılımla kuvvetlendirilmiş nikel esaslı alaşımlar, yüksek

sıcaklıklarda, yüksek dayanıma sahiptirler. Fakat orta sıcaklıklarda orta dayanım gösterirler. İkinci safha, ergime gerçekleşinceye kadar katı bir sertleştirme mekanizması görevinde bu alaşımların yapısında bulunur. Aksine, çökeltme ile kuvvetlendirilmiş alaşımlar, ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda katı solüsyon olarak dayanım kaybederler. Oksitlerin dağılımıyla kuvvetlendirilmiş alaşımlar bazı gaz türbinli motorların yanma uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [37].

Süper alaşımların içerisinde yer alan her alaşım elementi malzemenin genel yapısına farklı bir katkıda bulunmaktadır. Bununla beraber, süper alaşımların bünyesinde yer alan alaşım geliştiriciler her alaşımın mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini hesaplayarak alaşım kimyası üzerine çalışmalar yapmaktadır. Örneğin; alüminyum, sertleştirici fazının hacim içerisinde oranını artırırken Wolfram ve Tantalum, matriks fazı sertleştirmeye yardım eder. Kobalt, Al ve Ti matriks içerisinde çözünürlüğünü düşürerek, bu elementlerin matriks fazı içerisinde çözünmesini maksimuma getirir [38]. Şekil 2.1’de nikel esaslı bir süper alaşımdaki krom içeriğinin mikro yapıya etkilerini gösteren bir görüntü verilmektedir.

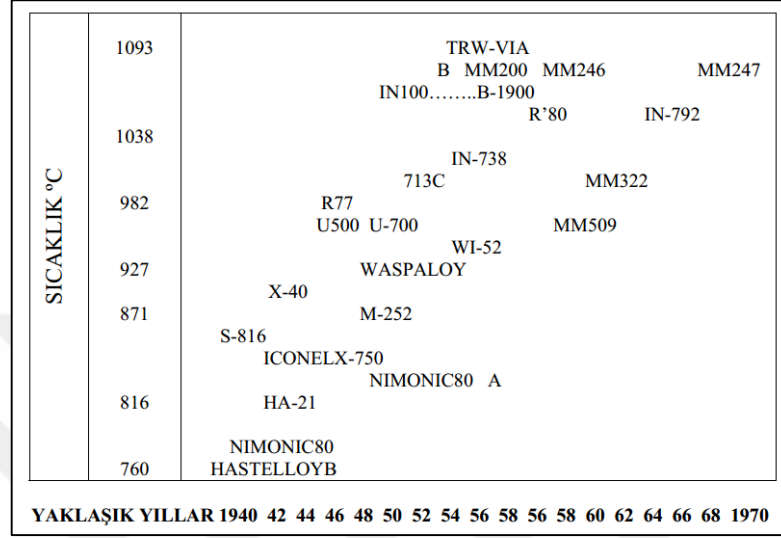


Şekil 3.1. Nikel esaslı süper alaşımlarda krom içeriğinin mikro yapıya etkileri [39].

Krom, oksidasyon dayanımı arttırmak için ilave edilirken, tane sınırında oluşan  $M_{23}C_6$  ve  $M_6C$  karbürleri sayesinde yüksek sıcaklıklarda çatlak yayılımını azaltmaya yardımcı olur. Bor, karbon ve zirkonyum yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirirken, borun ayrıca yorulma performansını iyileştirici etkisi de mevcuttur (Şekil 3.1).

Günümüzde kullanılan süper alaşım malzemelerin çoğu 1950-1970 yılları arasında üretilmiştir. 20. yüzyılın başlarında gaz türbinlerinde kullanmak için üretilen süper alaşım malzemeler günümüzde otomotiv sektörü, gaz türbinleri, gemcilik, hava ve uzay araçlarının motor gibi yüksek sıcaklık üreten bölümlerinde, petro kimya endüstrisi, roket

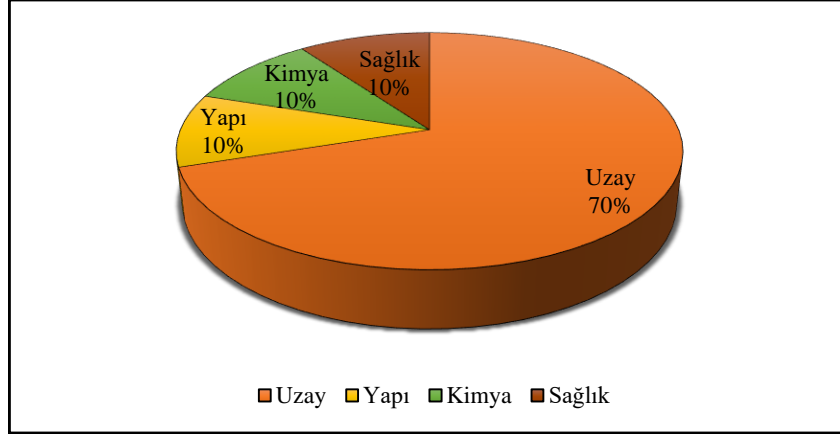
endüstrisi, denizaltı ve reaktör endüstrisi gibi çok kritik sektörlerde yoğun olarak tercih edilmektedir. 1900'lü yılların son çeyreğinden sonra süper alaşım malzemeler bazı katkı maddeleri eklenmiş ve günümüzde kullanılan modern süper alaşımlar son halini almıştır [40]. Süper alaşımların geçmişten bugüne geçirmiş oldukları dönüşüm ve günümüzdeki hali Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Süper alaşım malzemelerin yıllara göre değişimi [40].

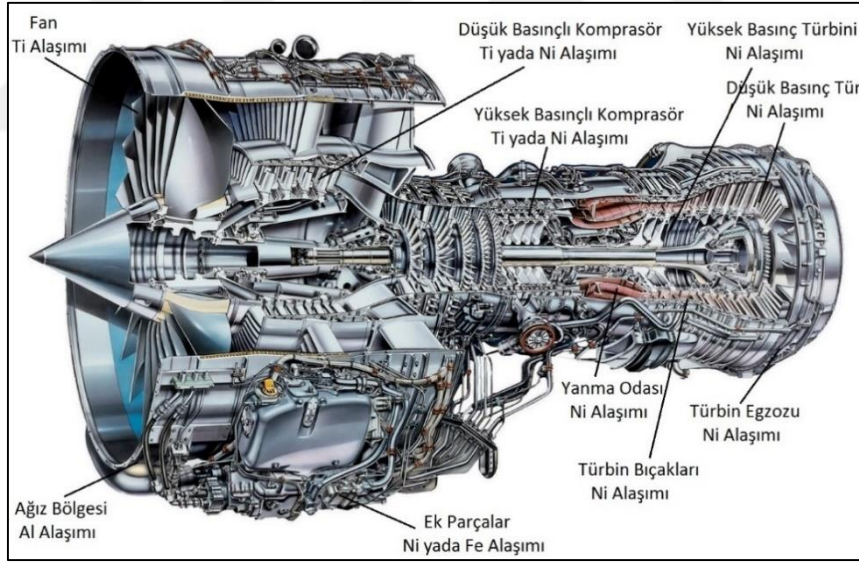
Süper alaşım malzemelerin yukarıda verilen kritik sektörlerde tercih edilme nedenlerinin başında bu işlemlerin farklı ısı ve basınç altında gerçekleşmesi gelmektedir [41].

Süper alaşım malzemeler, yukarıda da değinildiği üzere çok yüksek mekanik ve ısıl özellik göstermelerinin yanı sıra yüksek sıcaklık altında özelliklerini koruyabilmeleri nedeniyle ön plana çıkan malzemelerdir. Böyle bir durumda da bu malzemelerin kritik ve yüksek çalışma sıcaklığı istenen sektörlerde tercih edilmesi kaçınılmazdır. Günümüzde 80'in üzerinde süper alaşım malzemesi bulunmakta olup kritik sektörlerdeki talep oranı gittikçe artmaktadır. Şekil 3.3'te süper alaşım malzemelerin sektörlere göre kullanım yüzdeleri verilmiştir [42].



Şekil 3.3. Süper alaşımların sektörlere göre tercih edilme oranları [42].

Süper alaşım malzemelerin kullanım alanlarını daha da detaylandırmak gerekirse, zincir elemanları, türbin bladeleri diskler, egzoz valfleri, uzay araçlarının motorlarının yapısal parçaları, gaz türbin elemanları, nükleer teknolojisinin yapısal parçaları, kalıp teknolojisi vb. gibi yüksek sıcaklık altında çalışma istenen malzeme grupları sıralanabilir [43]. Şekil 3.4'te bir jet motoru ve tercih edilen süper alaşım çeşitleri verilmiştir.

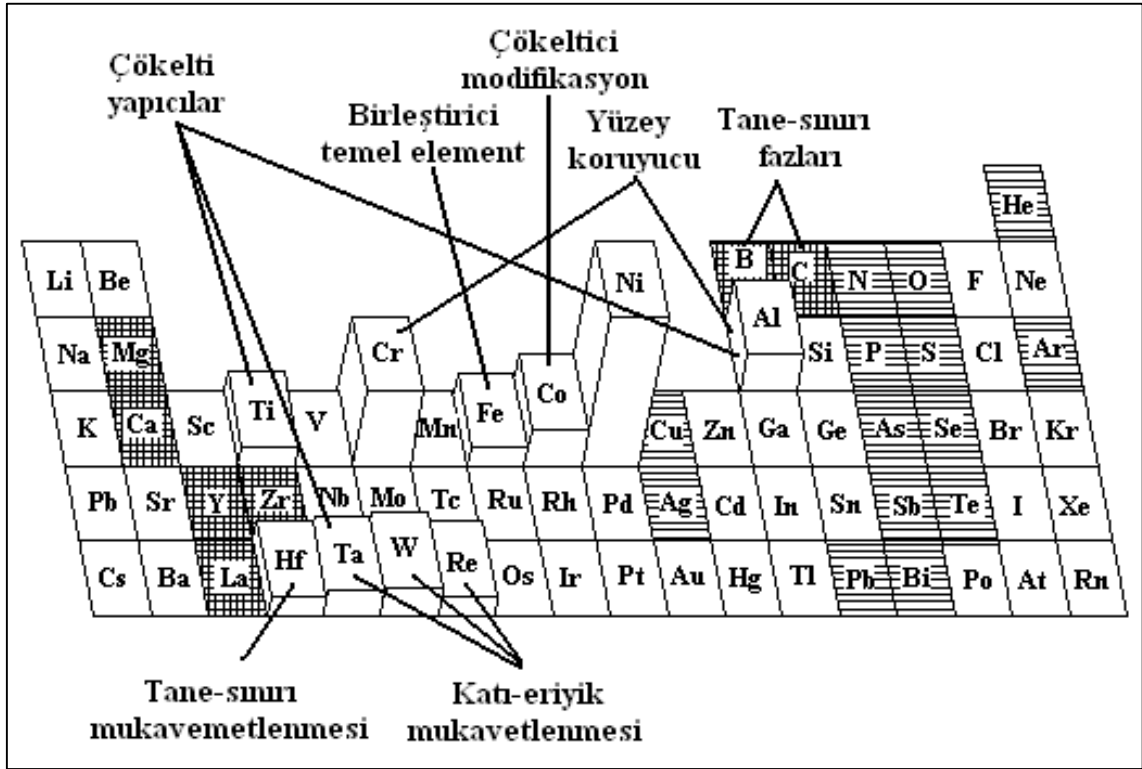


Şekil 3.4. Jet motoru ve tercih edilen süper alaşım türleri [40].

### 3.1. SÜPER ALAŞIM ÇEŞİTLERİ

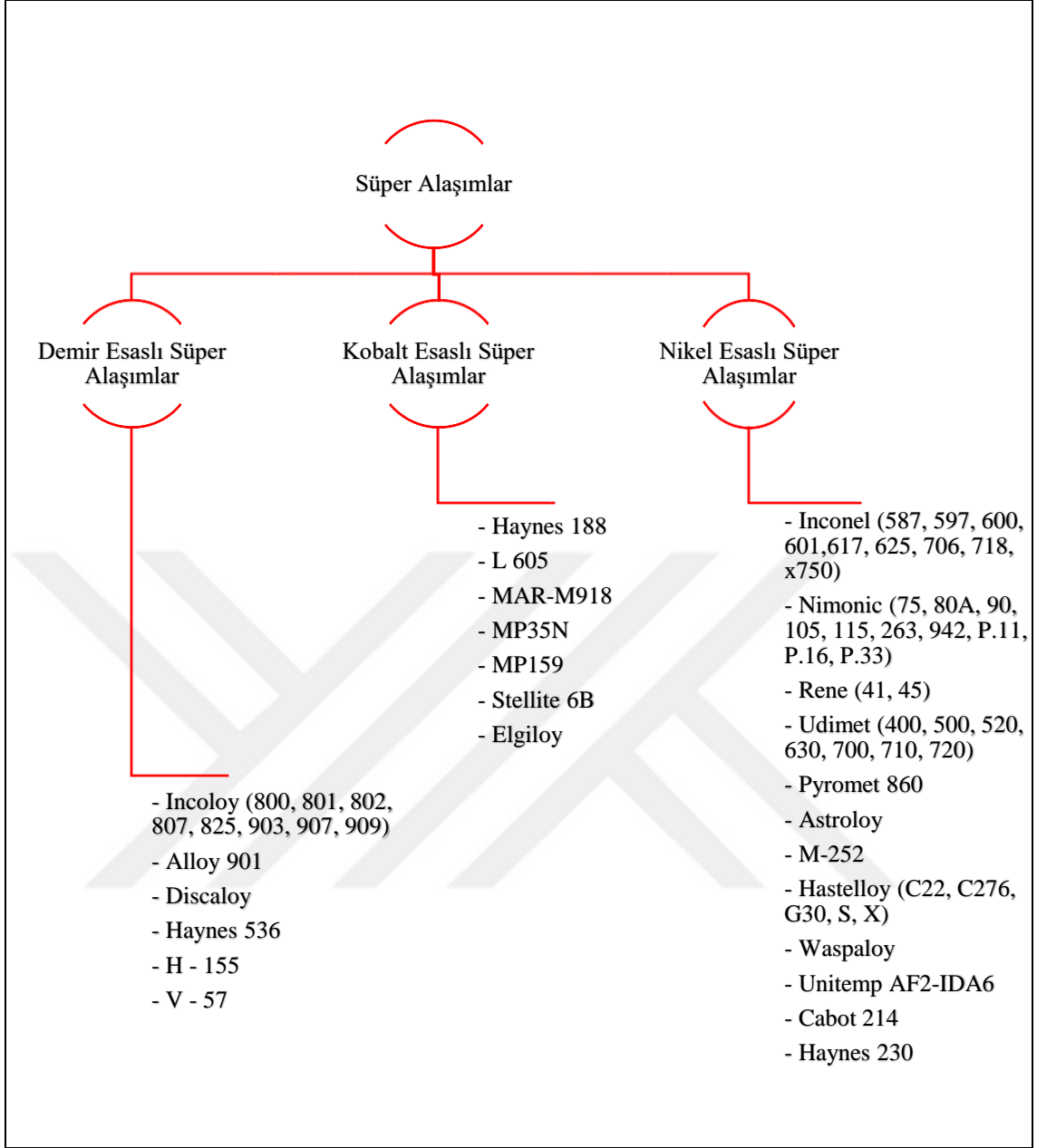
Süper alaşım malzemeler, yapısal özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklıklarda çalışabildiği için tercih edilen ve genellikle 8A grubu elementler kullanılarak geliştirilen dayanımı yüksek malzemelerdir. Bu malzemelerden istenen en önemli özellikler yüzey kararlılığı, yüksek sıcaklık altında özelliklerini koruyabilme ve korozyon dayanımıdır [25], [45].

Süper alaşım malzemeler genel olarak demir, nikel, kobalt ve kromun farklı elementler ile farklı oranlarda kombine edilmesiyle üretilmektedir. Bu malzemeleri elde etmek için demir, nikel, kobalt ve kromun yanında daha düşük oranlarda molibden, tungsten, niyobyum, tantalum, alüminyum ve titanyum da kullanılmaktadır. 650°C ve üzeri sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilmeleri ve erozyon dayanımlarının yüksek olması bu malzemelerin en temel özellikleri arasında sayılmaktadır. Bazı elementlerin süper alaşımların üretilmesindeki etki durumları periyodik tablo üzerinden Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Süper alaşımların üretilmesinde etkisi olan elementler [45].

Süper alaşım malzemeler, alaşımın ana bileşeni olan elementin durumuna göre üç ana başlık altında incelenmektedir. Süper alaşımların sınıflandırılması ve çeşitleri Şekil 3.6'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Süper alaşımların çeşitleri [45].

### 3.1.1. Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Ana bileşeni demir olan demir esaslı süper alaşımlar, “karbür ve intermetalik bileşiklerin çökmesi sonucunda sertleşen alaşımlar” şeklinde ifade edilebilir. Demir esaslı süper alaşımlar, yüksek miktardaki demire daha düşük miktarlarda krom, nikel, tungsten, karbon, mangan, molibden, titanyum gibi çeşitli elementlerin eklenmesiyle elde edilmektedir [45].

Demir esaslı süper alaşımların içeriğinde %25-45 oranında Ni, %15-60 oranında Fe elementlerinin yanında oksidasyon direncini artırmak için %15-28 oranında Cr, katı

çözelti mukavemeti oluşturmak için %1-6 oranında Mo elementleri bulunmaktadır. Nikelle birlikte alüminyum, niyobyum ve titanyum sayesinde mukavemeti arttırıcı çökelti elde edilir. Ayrıca, titanyum ve alüminyum elementleri aracılığıyla da çökeltme sertleşmesi uygulanarak sertleştirilebilirler.

Birçok süper alaşım içerisinde yüksek miktarda demir elementi barındırmasına rağmen bunların hepsine demir esaslı süper alaşım demek mümkün değildir. Buna örnek olarak, katı-eriyik dayanımlı, yaklaşık olarak %10-16 Fe ve %49 Ni içeren Hastelloy X ile %18,5 oranında Fe ve %52,5 oranında Ni içeren Inconel 718 alaşımları verilebilir. Bu malzemelere demir içerikli nikel esaslı süper alaşım denilmektedir. Bir başka örnek malzeme olan Inconel 901 süper alaşımı, %42,5 oranında Ni ve %36 oranında Fe bulundurmaktadır ve bu malzemeye nikel bazlı veya karmaşık demir-nikel-krom bazlı süper alaşım denir. Bu alaşımlarda, yüksek mukavemetle birlikte, sürekli düşük termal genleşme katsayısı gözlenmektedir. Multimet (N-155) alaşımı karmaşık bileşiklere örnek olarak verilebilir. Bu alaşımda, %21 oranında Cr, %20 oranında Ni, %20 oranında Co, %32,5 oranında Fe, %3 oranında Mo, %2,5 oranında W ve %1 oranında Nb bulunmaktadır [45].

Demir esaslı süper alaşımlar yaklaşık olarak 650°C civarındaki sıcaklıklarda yoğun olarak tercih edilmektedir. Bu malzemelerin mukavemeti, nikel esaslı süper alaşımlara kıyasla daha düşüktür. Bu özelliklerinden dolayı, nikel ve kobalt alaşımları demir esaslı süper alaşımlara nazaran daha çok tercih edilirler.

Bu alaşımlar, gaz türbinlerine ait motorlarda, disklerde, şaftlarda ve buhar türbinlerindeki bazı parçaların üretimde kullanılmaktadır. Nikel ve kobalt alaşımlı malzemelere göre daha az tercih edilse de maliyetleri daha düşüktür.

### **3.1.2. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar**

Bu malzemeler, ilk defa ikinci dünya savaşı esnasında kullanılmıştır. En önemli kullanım sebepleri arasında yüksek gerilmeler altında çalışan gaz türbin bıçakları bulunmaktadır. İlk defa kullanılmaya başlanan kobalt esaslı süper alaşımlar, çok yüksek sıcaklıklara çıkamasa da gerilmenin yüksek olduğu ve kırılma dayanımının yüksek olmasının istendiği durumlarda diğer alaşımlara oranla daha iyi sonuçlar vermiştir [46].

Birçok kobalt esaslı süper alaşım, genellikle, karbon içeriği yüksek olan malzemelerdir ve dayanımlarını karbür çökeltmesi sayesinde kazanmaktadır. Kobalt esaslı süper alaşımlar 980°C üzerindeki sıcaklıklar haricinde dayanım açısından nikel esaslı süper

alaşımlara nazaran daha kötü sonuçlar vermektedir. Ancak, tamir edilmesinin kolay olması, bir başka deyişle, kaynak edilebilirliğinin yüksek olması, korozyon direncinin yüksek olması nedeniyle türbin kanatçıklarının yapımı gibi geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bunun en temel nedeni ise içeriğindeki yüksek krom oranıdır [47].

Ana bileşik olarak kobalt içeren kobalt esaslı süper alaşımlar, buna ek olarak yüksek oranda nikel, yüksek oranda krom, yüksek oranda tungstenin yanı sıra daha düşük oranda tantal, titanyum, niyobyum, molibden ve bazı alaşımlarında demir gibi elementleri barındırmaktadır. Ayrıca, dayanımı artırmak için karbür fazları ve katı-eriyik yapılar da etkilidir.

Kobalt katı-eriyik alaşımları üç grupta incelenmektedir [37].

- 1- 650°C'den 1150°C'ye kadar sıcaklıklar için tercih edilen S-816, UMC0-50 ve Haynes 188.
- 2- 650°C civarında tercih edilen fastener alaşımlar (MP-159 ve MP-35N).
- 3- Aşınmaya karşı oldukça dirençli olan Stellite 6B.

Kobalt temelli süper alaşımlar tam olarak katı-eriyik bir alaşım sayılmazlar. Bunun sebebi, hepsinin intermetalik bileşikler ya da ikincil karbür fazları içermesidir. Böyle bir durumda süneklik kaybı ve yaşlanma ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, kobalt esaslı alaşımların tamamı yumuşatma işlemi ve ısıl işlem esnasında kristal yapı göstermektedirler. Buna karşın, MO-159 ve MP-35N alaşımları kullanılmadan önce termo mekanik işleme tabi tutulur ve bu esnada Hegzagonal yapı oranı kontrollü bir şekilde artırılmaktadır. Isıl işlem için 650 ile 1050°C sıcaklık aralığı tercih edilen Stellite 6B ve 650°C seviyesinde ısıl işlem gören Haynes 25 süper alaşımları kısmen de olsa hegzagonal yapıyı göstermektedirler. En çok tercih edilen kobalt esaslı süper alaşımlardan biri de bunlardan biri olan Haynes 25'dir. Haynes 25 süper alaşımı, çoğunlukla, yüksek sıcaklığın önemli bir zorlayıcı olduğu, gar türbinleri, nükleer reaktörlerin yapısal parçalarının yapımında kullanılmaktadır. Yine çok tercih edilen kobalt esaslı süper alaşımlardan biri de Haynes 188'dir [37]. Bunların haricinde Haynes 25 ve 188 kadar sert olmasa da UMC0-50, MP-159, MP35N, Stellite 6B, WI-52, MAR-M302, MAR-M509 ve X-40'da tercih edilen kobalt esaslı süper alaşımlardan bazılarıdır [39].

### 3.1.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

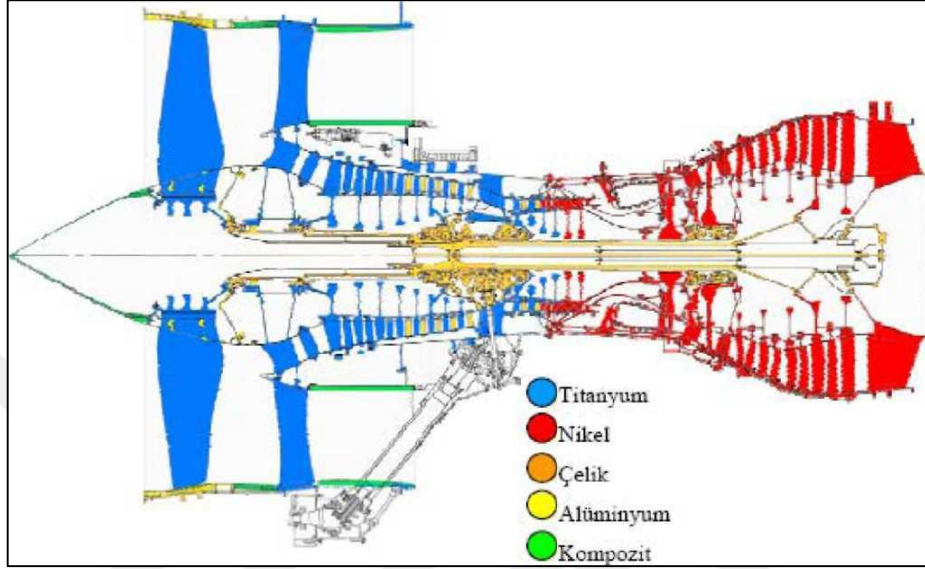
Yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım gösterebilen ısıl dirençli alaşımlar olarak tanımlanan nikel esaslı süper alaşımlar, gösterdikleri mükemmel korozyon direnci, oksidasyon direnci, yüksek sıcaklık altında sürünme ve kırılma direnci nedeniyle yoğun olarak tercih edilmektedir. Bu malzemelerin oksidasyon direncinin temelinde içeriğindeki yüksek oranda nikel ve krom yatmaktadır. Ana alaşım elementi olarak nikel içeren bu süper alaşımlar, içerisinde yüksek oranda tungsten, molibden, tantal, kobalt ve demir içerebilirler. Bu malzemeler, intermalik çökelme ve katı solüsyon aracılığıyla kuvvetlendirilme işlemine tabi tutulmuşlardır. İntermalik oluşum elemanları arasında niyobyum, titanyum ve titanyum yer almaktadır [42].

Nikel esaslı süper alaşımlar paslanmaz çeliklerle kıyaslandıklarında özellikle 650°C üstündeki sıcaklıklarda dayanım olarak daha karardır. Ayrıca, mukavemet/ağırlık oranı açısından da paslanmaz çeliklere göre daha iyi sonuç vermektedirler. Oksidasyon ve korozyona karşı yüksek direnç istenen çalışma alanlarının çokluğu nikel esaslı süper alaşımların aranan bir malzeme türü olmasına neden olmaktadır. Bu malzemeler özellikle uçak motorlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Öyle ki modern bir gaz türbinli uçak motorunun ağırlıkça %50'si nikel esaslı süper alaşımlardan oluşmaktadır [42].

Çok yüksek mekanik özelliklere sahip olan bu malzemeler, yüksek korozyon mukavemeti sergilemelerinin yanında ergime sıcaklıklarının %80 ile %90 sıcaklıklarında sürünme ve yorulma dayanımı devam ettirmek gibi eşsiz özelliğe sahiptirler. Nikel esaslı alaşımların zor çalışma şartlarında kullanılmasının ana sebebi göstermiş oldukları mükemmel korozyon direnci, termal ve mekanik yorulmalara karşı dirençli olmalarıdır. Özellikle bu dayanımların zaruri olduğu çalışma alanlarında nikel esaslı süper alaşımların tercih edilmesi kaçınılmazdır. Bu çalışma ortamının en çok olduğu yerlerden biri olan uçak motorları nikel esaslı süper alaşımların kullanımı için oldukça uygundur. Bu malzemelerin özellikle tercih edilme sebeplerinden biridir [42].

Nikel esaslı süper alaşım malzemeler, oluşum açısından, nikel ile tungsten, krom ve renium gibi katı çözeltileri sertleştirme özelliği barındıran elementlerle birleşerek katı çözeltilerin intermalik bileşimini içermektedir. Bu intermalik bileşimin içerisinde yer alan bir başka element ise tantalyumdur. Tantalyum, içinde bulunduğu bileşimin yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direncini üst seviyeye çıkarmaktadır. Bu özellikleri düşürmek istendiğinde ise tantalyum ve titanyum yer değiştirmektedir [42].

Nikel esaslı süper alaşımlar arasında yer alan Inconel, Nimonic ve Hastelloy gibi malzemeler içerisinde az miktarda demir elementi barındırırken bu oran Incoloy 901 ve Inconel 706 gibi malzemelerde yaklaşık %35 oranına kadar çıkabilmektedir. Nikel esaslı süper alaşımlardan bazıları dayanım ve korozyon direnci artırmak için az miktarda alüminyum, titanyum, niyobyum, molibden ve tungsten de içermektedir.



Şekil 3.7. Nikel esaslı alaşımlar ve gaz türbinli motorlarda kullanım bölgeleri [42].

Nikel esaslı süper alaşımların mukavemet değerlerini artırmak için çökelti sertleşmesi veya eriyik sertleşmesi kullanılır. Ancak, eriyik sertleşmesi en çok tercih edilen yöntemdir.

Katı çökelti sertleştirilmesi ile sertleştirilen ilk nikel esaslı süper alaşım Nimonic 80'dir ve 1940'lı yılların başında İngiltere'de üretilmiştir. Nimonic 80A, Al,Ti çökeltilerinin oluşması için içerisinde %2,25 titanyum ve alüminyum içeren bir Ni-%20 Cr katı eriyik malzemedir. Bu alaşımların performanslarını artırmak için uzun süre molibdeni niyobyum, zirkonyum, bor, kobalt, demir ve diğer bazı elementler kullanılmıştır. Günümüzde yaklaşık olarak 100 civarında döküm ve dövme yöntemiyle imal edilmiş nikel esaslı süper alaşım bulunmaktadır.

İçeriğindeki nikel sayesinde kararlı bir mikroyapı oluşturan nikel esaslı süper alaşımlar yine nikel sayesinde asidik ortamlarda yüksek korozyon direnci gösterirler. Bu malzemelere ilave edilen krom aracılığıyla da korozyon ve oksidasyon direnci artmaktadır. Böylece, bu malzemeler, yüksek sıcaklık mukavemeti, işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesi, oksidasyon ve korozyona karşı yüksek direnç gibi üstün

özellikleri kazanırlar. Bu malzemelerin kullanım alanlarının geniş olmasının en temel nedeni de bu özellikleridir [42].

İçeriğinde çok sayıda alaşım elementi barındıran nikel esaslı süper alaşımlar, bu elementler nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptirler. Nikel esaslı süper alaşımların ana fazları, kübik yüzey merkezli  $\gamma$ (Ni) matris ve sıralı kübik yüzey merkezli koheren  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{X}$ ,  $\text{X}=\text{Al}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Ta}$  veya  $\text{Nb}$ ) çökelmiş fazıdır.  $\gamma'$  çökelmiş fazın hacimce oranını arttırarak nikel esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklık dayanımları arttırılabilir fakat bu uzun dönem mikro yapısal kararlılıkta sorunlara yol açar.  $\gamma$  ve  $\gamma'$  fazlarının oluşturduğu katı çökeltisi toplam dayanıma katkı sağlar. Diğer yararlı fazlar ise genellikle tane sınırlarında oluşan karbürler ve borürlerdir. Bu fazlar genellikle zararlı elementleri bir araya getirerek tane sınırı kaymasını azaltırlar. Alaşım bileşimi kontrol edilemezse veya yüksek sıcaklıklara çıkılırsa bazı istenmeyen yüzeysel sıkı paket fazlar, kübik yüzey merkezli  $\gamma$  matris oktahedral yüzeylerle aynı yönde tabaka veya iğne şekilli yapılar oluşturur. Bu fazların varlığı mekanik özellikler açısından fazlaca zararlıdır [45].

Dezavantaj olarak ise nikel esaslı süper alaşımların kesici takım üzerine kaynama eğiliminin yüksek olması ve BUE oluşumuna elverişli olmalarıdır. Bu nedenle de nikel esaslı süper alaşımların işlenebilirliği oldukça zordur. Nikel esaslı süper alaşımlar, tungsten-karbür-kobalt sınıfı kesici takım kaliteleri ile 50 m/dak kesme hızının üzerindeki bir hızda işlenebilmektedir [48]. Bu hızda talaş kontrolü zayıftır. Talaş tipi süreklidir ve aşındırıcı testere dişi kenarlara sahiptir. Yüksek ısıların kombinasyonu yüksek iş parçası gerilimi ve aşındırıcı talaşlar kesme derinliğinde çentik oluşmasına neden olan ana problemdir [49].

### **3.2. HASTELLOY C276**

Nikel esaslı bir süper alaşım olan Hastelloy C-276, Haynes International firmasının bir ürünüdür ve Alloy C276 olarak da bilinmektedir. Ortalama elli yıl kadar önce geliştirilen bu malzeme temel amaç olarak zorlayıcı çalışma ortamları için üretilmiştir. Bu nedenle de kullanımı oldukça yaygın olan bir malzemedir. UNS standardına göre UNS N10276 şeklinde bir gösterimi olan Alloy 276'nın malzeme numarası ise literatürde 2.4819 olarak geçmektedir.

Hastelloy C-276, yüksek sıcaklık altında çalışmak için tasarlanmış, zor ve sıcak koşullar altında çok yüksek korozyon ve oksidasyon direnci gösteren bir malzemedir. İçeriğinde

yüksek oranda nikel ve molibden barındıran Hastelloy C-276, çok farklı korozif şartlar altında özelliğini koruyabilmekle ünlüdür. Bu malzemenin içerisinde %15 civarında molibden bulunur ki bu sayede çukurcuk korozyonuna karşı dayanımı yüksektir. Ayrıca, bu malzeme içerisinde çok düşük oranda ( $<0,01$ ) karbon içerir. Böylece kaynak edilebilirliği önemli ölçüde artmaktadır. Düşük karbon oranı demek kaynak sırasındaki karbürleme seviyesinin oldukça makul bir orana çekilmesi demektir ve böylece kaynaklı bölgenin korozyon direnci ve mekanik özellikleri değişikliğe uğramamaktadır.

Hastelloy C276'nın üstün özelliklerini saymak gerekirse, aşındırıcı ortam altında göstermiş olduğu yüksek korozyon direnci, korozif etki gösteren çözeltiler karşısında göstermiş olduğu yüksek direnç, karıncalama ve gerilim korozyonu çatlaması gibi hatalara karşı dirençli olması söylenebilir. Ayrıca ıslak klorin gazı, hipoklorid ve klorin dioksit dayanabilen nadir alaşımlardan biri olması akla ilk gelen özellikleridir.

## 4. KESME SIVILARI VE MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA

Talaş kaldırarak şekil vermenin en önemli amacı iş parçası malzemesini istenilen şekle sokmaktır. Bu süreç genellikle kesici takımın iş parçasına sürtünerek ondan parça koparması yani talaş kaldırma işlemi aracılığıyla olmaktadır. Sürtünme kavramı yüzey alanına bağlı olmayıp uygulanan yüklerle alakalıdır. Sürtünmenin getirdiği zararları en aza indirmek için uygulanan yöntemlerin başında kesme sıvısı kullanımı gelmektedir [50]. Kesme sıvılarının kullanılmasının en temel nedeni sürtünme ile oluşan ısının azaltılması ve talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması olarak görülebilir. Şekil 4.1’de kesme sıvılarının iş parçası, kesici takım, tezgâh, çevre ve sağlığa etkileri görülmektedir.



Şekil 4.1. Kesme sıvılarının etkileri [50].

Şekil 4.1 incelendiğinde, kesme sıvılarının iş parçası, kesici takım ve tezgâha faydalı olduğu ancak çevre konusunda aynı faydalardan bahsedilemeyeceği görülmektedir.

### 4.1. KESME SIVISI ÇEŞİTLERİ

Metal kesme operasyonlarında yüksek işleme verimliliği elde etmek için kullanılan kesme sıvıları, uygulama alanlarına göre değişmektedir. Kesme sıvılarını sınıflandırmadaki en genel yapı, işlevlerine ve kimyasal kompozisyonlarına göre yapılan

sınıflandırmadır.

#### 4.1.1. İşlevlerine Göre Kesme Sıvıları

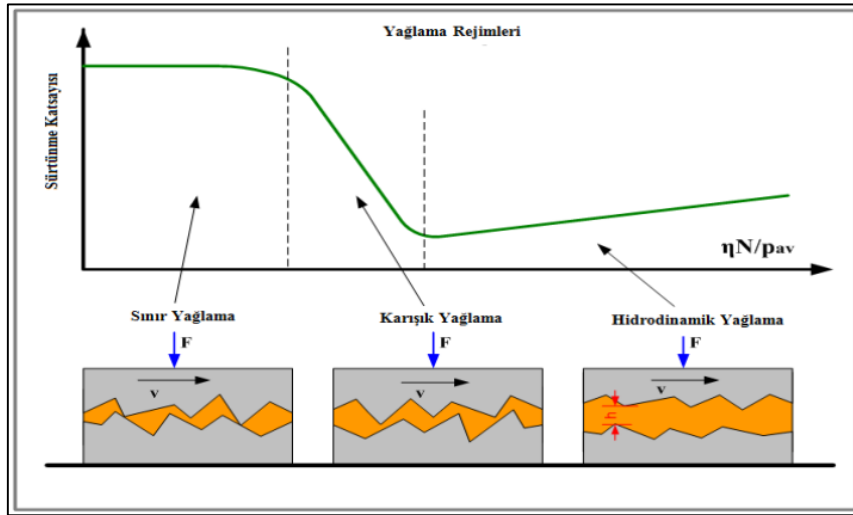
İşlevlerine göre tanımlanan kesme sıvıları yağlayıcılar ve soğutucular olmak üzere iki grupta incelenebilir.

##### 4.1.1.1. Yağlayıcılar

Yağlayıcı özelliği ile ön plana çıkan kesme sıvıları, kesici takım ile iş parçasının birbirine sürtüdüğü bölgede ince bir film tabakası oluşturarak sürtünmeyi tamamen ortadan kaldırmak veya en aza indirmekle yükümlüdürler [50]. Talaş kaldırma yönteminin durumuna göre aşağıdaki yağlama farklılıklarından bir yâda birkaçı aynı anda kullanılarak yağlama fonksiyonu yerine getirilebilir;

- **Polar (Sınır) Yağlama:** Genel tanımı polar katkı moleküllerinin kesme yağı ile birleştirilmesi sonrasında kesme operasyonuna dâhil edilmesi şeklindedir. Bu yöntem, yağlama tabakasının iş parçasının yüzeyinde ortaya çıkan pürüzlülük mesafesinin en yüksek noktalara teması ile oluşan yağlama şeklidir [51]. Şekil 4.2’de yağlama rejimleri gösterilmiştir. Grafiğin ilk bölümünde gösterilen sınır yağlamada “ $h < R_a$ ” olacak bir yöntem vardır. Bu yöntem, kesici takım ile iş parçası arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Burada yüzey pürüzlülüğünün en yüksek noktası ve kesicinin kesme yaptığı bölge ile aralarında temas bulunmaktadır. Bu yağlama türü hidrostatik ve hidrodinamik yağlama yöntemleriyle karşılaştırıldığında sürtünme artışı, enerji kaybı ve maddi hasarlara yol açtığı için pek tercih edilmemektedir. Bu yöntemdeki yağlama özelliği hidrodinamik yağlayıcılığa göre daha yüksektir [52]. Bu yöntemin tek olumsuz yanı yüksek basınç altında veriminin düşük olmasıdır.
- **Karışık Yağlama:** Karışık yağlama yönteminde kesici ve iş parçasının yüksek yüzeylerinin temas ettiği bölgeler yağlanmaktadır (Şekil 4.2) [52].
- **Hidrodinamik Yağlama:** Bu yöntemde birbiri ile temas halinde olan iki yüzey, sürekli bir yağlayıcı film tabakası aracılığıyla birbirinden ayrılmaktadır. Oluşan sürekli film tabakası her iki yüzeyle de temas halindedir ve yüzeylerin hareketiyle aynı yön ve aynı hızda hareket etmektedir [50]. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi “ $h > R_a$ ” olmak üzere bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemden yola çıkarak, yağlama çeşidinin çalışma prensibi, sürtünen yüzeyler arasına ince bir film

tabakası oluşturması ve sürtünmeyi en aza indirmesidir.



Şekil 4.2. Yağlama rejimleri [50].

- **Yüksek Basınçlı Yağlama:** Bu yöntemde birçok kimyasal bileşenden birinin veya birkaçının yağ bünyesine dâhil edilmesi ile yapılan bir yağlamadan bahsetmek mümkündür. Bu kimyasallardan bazıları, bor, fosfor, sülfür ve klordur. Bu elementlerin katkılarıyla elde edilen bu yağlar iş parçası yüzeyinde yüksek yük ve sıcaklık değerlerine rağmen oldukça kuvvetli bir yağ filmi oluşturmaktadır [53].
- **Hidrostatik Yağlama:** Bu yöntemde yağlama işlemi, iş parçası ile kesici takımın arasına dışarıdan püskürtme ile uygulanmaktadır. Uygulanabilirliği ve uygulama maliyeti nedeniyle en çok kullanılan yağlama yöntemidir. Ancak, hidrodinamik yağlamayla kıyaslandığında verimi daha düşüktür. Bu yöntemin en önemli özelliği ise yavaş işleyen makinelerden başlayarak her hızdaki makinelere kadar verimli bir şekilde çalışmasıdır. Bunun en büyük sebebi ise kinematik parçaların sağladığı geniş uygulama ve hareket alanıdır [53].

#### 4.1.1.2. Soğutucular

Bir diğer adı soğutma sıvısı olan soğutucular, suya yağ bileşenlerinin belirli bir oran dâhilinde katılmasıyla elde edilirler. Bu kesme sıvılarının yapısındaki su oranı genellikle %80 ile %99 arasında değişmektedir. Soğutucu görevi ile ön plana çıkan kesme sıvıları daha çok kesme bölgesinde oluşan ısıyı düşürmekle görevlidirler. Ancak, su gibi yağlayıcı özelliği eksik olan soğutma sıvılarının verimliliği son derece düşüktür. Bu nedenden dolayı, kesme sıvısı seçiminde hem yağlayıcı hem de soğutucu özelliği olan kesme sıvılarının seçilmesi son derece önemlidir [54].

#### **4.1.2. Kimyasal Yapılarına Göre Kesme Sıvıları**

Kesme sıvıları, kimyasal yapılarına göre sınıflandırıldıklarında dört ana grupta incelenmektedir;

##### *4.1.2.1. Saf Kesme Yağları*

Saf kesme yağları, içerisinde yağ minerallerini barındıran ve su ilave etmeden kullanılan kesme yağlarına verilen genel bir isimdir [55]. Karışımdaki yağ oranı genellikle %70 ile %85 arasındadır ve emülsiyon karışımı olarak kullanılmaktadır. Bu kesme yağları, petrol, deniz ve hayvan yağlarının bir veya daha fazlasının karışımından oluşmaktadır [56]. Saf kesme yağları, diğer karışım yağlarıyla karşılaştırıldıklarında yağlayıcı özellikleri daha düşük olsa da maliyet açısından daha uygundur. Genellikle alüminyum, magnezyum ve düşük karbonlu çelik gibi daha yumuşak malzemelerin işlenmesinde kullanılırlar [55].

##### *4.1.2.2. Yağ Katkılı Emülsiyonlar*

Emülsiyon sıvı diye bilinen karışımlar, yağların yağlayıcı özelliği ile soğutucuların soğutma özelliklerinin tek bir kesme yağında toplanmış halidir. Bu karışımlardaki su miktarı %60 ile %85 arasındadır ve geri kalan kısmında yağ bulunmaktadır. Emülsiyon sıvılar genellikle mineral yağ, emülgatör, korozyon inhibitörü ve koruyucu katkı maddelerinin suya karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Emülsiyon katkı kesme yağlarının kullanım sürelerinin uzatılması ve kesme operasyonlarında doğru verimi alabilmek için mutlaka karışımın homojen kalmasına ve pH dengesinin uygun şartlar sağlayacak şekilde saklanması gerekmektedir [55], [57].

##### *4.1.2.3. Sentetik Yağlar*

20. yüzyılın başlarında sentetik hidrokarbon ve ester teknolojilerinin geliştirilerek günümüz yağlarına zemin hazırlamıştır. İmalat endüstrisinde kullanılan en eski yağlardır. Sentetik yağlar, içeriğinde hiçbir madensel yağ katkısı bulundurmamaktadır. Sentetik yağlar yapay olarak üretildikleri ve normal yağ, su karışımı ile karşılaştırma yapıldığında düşük ile yüksek sıcaklıklara ve yüksek basınca karşı dirençlidir. Sentetik yağlar 25'den fazla türü bulunmaktadır [50].

##### *4.1.2.4. Yarı Sentetik Yağlar*

İçerisinde %5 ile %50 arasında mineral yağ içeren ve geri kalanı sudan oluşan kesme sıvılarıdır. Yarı sentetik yağlar temelde kimyasal, aktif yüzey akışkan ve emülsiyondan oluşur, bu nedenle her farklı sıvının karakteristiğini taşırlar. Yarı sentetik kesme

sıvılarının en önemli özellikleri soğutma ve korozyonu önlemeyken en olumsuz yönleri yağlayıcılık özelliklerinin oldukça düşük olmasıdır. Kullanım esnasında köpüklenme ve buharlaşma gibi problemleri olsa da yağ esaslı kesme sıvılarıyla karşılaştırıldıklarında daha iyi sonuçlar vermektedirler [50].

#### 4.2. KESME SIVILARININ ÇEVRE VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Talaş kaldırma işlemlerinde kullanılan kesme sıvılarının raf ömrünü uzatabilmek için bakımları zamanında ve uygun şekilde yapılmalıdır. Aksi halde kesme sıvılarında su buharlaşması, bakteri oluşumu, kirlilik veya kimyasal yapısında bozulmalar görülebilmektedir. Bozulan kesme sıvılarının kullanılması ile başta iş kalitesi olmak üzere kesici takım, tezgâh, çevre ve çalışan sağlığı olumsuz yönde etkilenebilmektedir. Kaldı ki bozulmamış kesme sıvıları bile çevre ve çalışan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle Çevre ve Şehircilik bakanlığı tarafından yayınlanan talimatlar bulunmaktadır. Bakanlığın yayınladığı bu kılavuzlardan imalat sektöründe atık oluşturmadan soğutma yağı kullanımı hakkında bilgiler verilmekte ve kesme sıvısı miktarını azaltmanın önemine değinilmektedir. Kesme sıvılarının neden olduğu sağlık problemlerinin şiddeti; maruz kalma süresi ve seviyesi, kirliliğin çeşidi, derecesi ve sıvının tipi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [50]. Kesme sıvılarının kullanımı sonucu bir takım sağlık sorunları çalışanlarda görülmektedir [58]. Bu sağlık sorunlarından başlıcaları aşağıda verilmiştir.

- **Dermatit:** Mesleki deri hastalıklarının %90-95'ini oluşturan bu hastalık önemli iş gücü kaybına yol açmaktadır. Bütün meslek hastalıklarının ise %40-70'ini oluşturur. İşleme sıvıları kullanımı sonucu en çok karşılaşılan cilt hastalığıdır. Tahriş edici dermatit ve alerjik dermatit olmak üzere ikiye ayrılır. Metal işleme sıvılarında kullanılan katkı maddeleri alerjik kontak dermatite (cilt iltihaplanması) neden olabilirler. Bu hastalık kendini, az miktardaki işleme sıvısının deri ile temas etmesiyle beraber, kızarıklık ve kaşıntı olarak belirten bir reaksiyondur [59].
- **Folliculitis ve Yağ Aknesi:** Saf kesme yağlarının neden olduğu ve cildin aşırı tahriş olmasından dolayı ortaya çıkan bir hastalık türüdür. Daha çok yağlı elbiselerin cilt ile temas ettiği bölgelerde görülmektedir. Kesme sıvısı içerisinde bulunan zararlı maddeler deri gözeneklerini tıkayarak yara veya sivilce gibi rahatsızlıklara neden olmaktadır. Daha çok boyun, eller, kollar ve uyluk

bölgelerinde görülmektedir. Ayrıca, çalışanın vücudunda daha önceden olan aknelere çok daha kötü duruma gelebilmektedir [59].

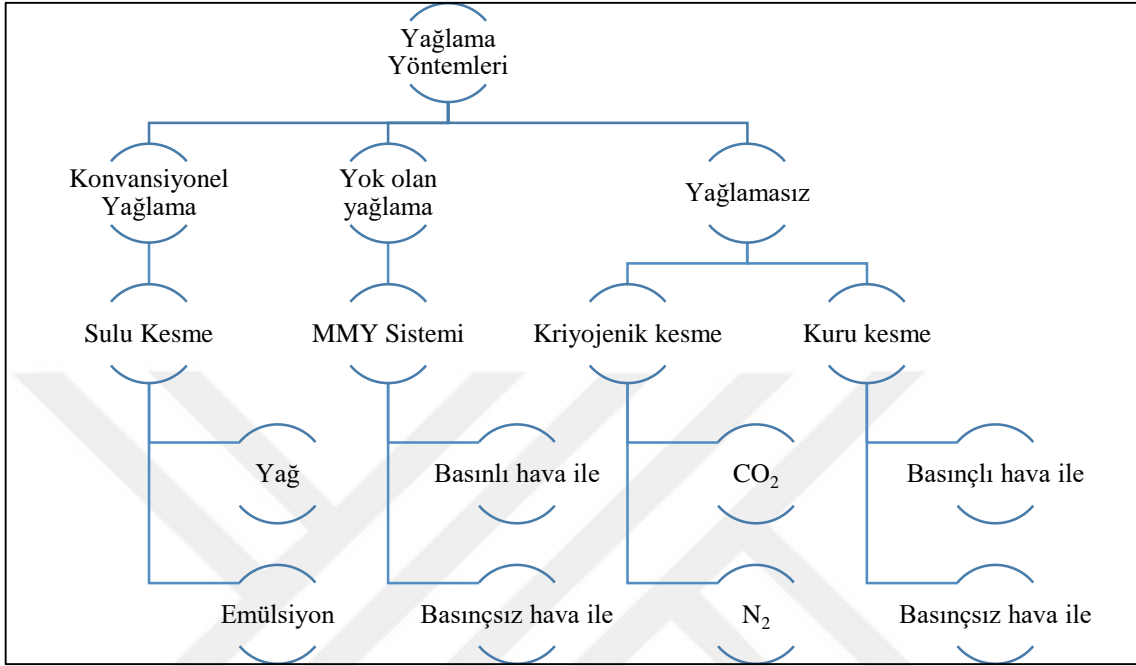
- **Cilt Kanseri:** Kesme sıvılarından kaynaklı ortaya çıkan cilt hastalıklarının en son halidir. Rafine edilmemiş mineral yağların kullanılması en büyük nedenlerinden biridir. Ayrıca yağla ıslanmış bez parçaları ve giysilerle uzun süreli temas da kansere neden olabilmektedir [59].
- **Solunum Rahatsızlıkları:** Kesme esnasında oluşan ısının etkisiyle buharlaşan kesme sıvıları, solunum yoluyla vücuda girerek çeşitli solunum rahatsızlıklarına neden olmaktadır. Boğaz ağrısı, burun kanaması, öksürük, hırıltı, aşırı balgam üretimi, nefes darlığı gibi rahatsızlıklar sık görülebilir. Dahası bu rahatsızlıklar ilerleyerek kronik bronşit, astım ve akciğer yetmezliği gibi çok daha önemli rahatsızlıkların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir [59].

#### 4.3. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MMY) SİSTEMİ

Kesme sıvıları, işleme kalitesini artırmak için kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Ancak, yukarıda belirtildiği üzere yüksek miktarda kesme sıvısı kullanımının çevre ve çalışan sağlığını tehlikeye attığı bir gerçektir. Dahası, tedarik etme, depolama, kullanma ve atığı yok etme gibi nedenlerden dolayı klasik kesme sıvısı kullanımı üretim maliyetlerini de önemli ölçüde etkilemektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı araştırmacılar kesme sıvısı miktarını tamamen ortadan kaldırmak veya olabildiğince azaltmak için çeşitli araştırmalar yapmışlardır [60].

Şekil 4.3'te soğutma-yağlama sistemleri şematik olarak verilmiştir. Şekil incelendiğinde üç farklı soğutma-yağlama yönteminin hâlihazırda kullanılmakta olduğu görülmektedir. Bunlar, konvansiyonel yani klasik kesme sıvısı kullanımı, az miktarda kesme yağının kullanıldığı minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi ve kuru kesmedir. Konvansiyonel kesme sıvısı kullanılan operasyonlarda yağlayıcı olarak emülsiyon ve yağ kullanılmaktadır. MMY sisteminde ise kesme sıvısı olarak mikro boyutta yağ ve hava karışımı yani emülsiyon kullanılmaktadır. Konvansiyonel kesme sıvısı kullanımı esnasında kullanılan kesme sıvısı miktarı çok fazla olduğu için soğutma yüksek ancak buna karşılık çevre ve çalışan sağlığına karşı oluşan riskler de yüksektir. Kuru kesme koşullarında ise kesme sıvısı kullanılmadığı için üretim maliyetleri son derece düşüktür ancak özellikle ağır kesme koşullarında işleme verimliliği son derece düşmektedir. MMY

sistemi ile konvansiyonel kesmenin soğutucu ve yağlayıcı özelliğinden faydalanılırken kuru kesmenin de çevre ve çalışan üzerindeki olumsuz herhangi bir durumu olmaması referans alınmıştır. Bir başka deyişle, MMY sistemi ile hem konvansiyonel kesmenin hem de kuru kesmenin olumlu özellikleri tek bir sistem üzerine toplanmıştır [61].



Şekil 4.3. Soğutma-yağlama sistemlerinin sınıflandırılması.

Talaş kaldırma operasyonlarının genelinde konvansiyonel soğutma-yağlama sistemi kullanılmaktadır. İçeriğinde yüksek miktarda su barındıran konvansiyonel kesme sıvıları bu özelliği nedeniyle ısıyı kesme bölgesinden uzaklaştırma konusunda çok iyidirler. Yağlayıcı özelliğin çok yüksek olmasının istendiği dişli çark üretimi ve kılavuz çekme gibi işlemlerde ise kesme yağları tercih edilmektedir. Bu yöntemlerin her ikisinde de talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması vardır. Eğer istenen talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırmak ise basınçlı hava tercih edilebilir ancak bu sefer de yağlayıcı özellik tamamen ortadan kalkmış olacaktır [63]. MMY sisteminin temelinde ise bu iki sistemin iyi yönleri bir arada kullanılması yatmaktadır.

MMY sistemi, minimum miktardaki kesme yağının basınçlı hava ile kesme bölgesine pulvarize bir şekilde püskürtülmesi prensibine göre çalışmaktadır. Kesme bölgesine püskürtülen yağ miktarı 10-100 ml/saat arasındadır. Bu miktar konvansiyonel soğutma-yağlama sisteminin yaklaşık yirmi binde biri kadardır [62]. MMY sistemi sayesinde kullanılan kesme sıvısı çok az bir seviyede olmaktadır. MMY sisteminin bir diğer avantajı ise kullanılan kesme sıvısı miktarı çok düşük olduğundan hemen buharlaşmaktadır ve böylece talaşın geri dönüşüm maliyetinin ortadan kalkmasıdır [64].

MMY sisteminin işlem sırasında uygulanabilmesi için iş parçasının kimyasal içeriği ve içyapısı çok iyi bilinmelidir. Soğutma sıvısındaki azalma abrasif aşınmaya pozitif yönde etki eder. Soğutma sıvısındaki azalmadan dolayı talaş, iş parçası ve takımdeki sıcaklıklar artacaktır. Sıcaklık artışı ile beraber plastik yumuşamaya ve ortamdaki sert parçacıkların talaş veya iş parçasına gömülmesine neden olabilir. Bu sert parçalar abrasif aşınmaya neden olur. Bu nedenle, değişik talaş kaldırma proseslerinde yüksek verim alabilmek için gerken kesme sıvısı miktarı değişecektir. MMY sisteminin uygulanması esnasında kinematik koşulların mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle de oluşan ısı seviyesi ve talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılma durumu mutlaka bilinmelidir [62].

MMY sistemi, dünyada otomotiv endüstrisinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ford Motor prizmatik alüminyum parçaların üretiminde, aktarma yuvalarının %100'ünde ve diğer güç aktarma organlarının işlenmesi sırasında MMY kullanılmaktadır. Fakat krank millerinin yağ deliklerinin açılması gibi bazı imalatlarda takım ömründeki azalma ve iş parçasında meydana gelen distorsiyondan dolayı MMY sistemi bu işleme uygulanamamıştır [65].

MMY sistemi delik delme [66]–[69], freze ile işleme [70]–[73], tornalama [74]–[77] ve taşlama [78]–[81] gibi talaşlı imalat işlemleri için uygulamaları üzerine literatürde yapılan çalışmalar günümüzde artan bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmaların sonuçları göstermiştir ki, eğer uygun MMY sistemi ve kesme parametreleri seçilir ise yağlama, takım ömrü ve yüzey kalitesi bakımından geleneksel sulu kesmedeki performans çok daha ekonomik olarak yakalanabilir [62].

## 5. DENEY TASARIMI VE TAGUCHI YÖNTEMİ

Hâlihazırda deneysel çalışmalarda kullanımına devam edilen klasik deney tasarım metotları genellikle verimlilikten uzak bir durum sergilemektedirler. Üretim sistemini etkileyen faktör sayısı arttıkça ihtiyaç duyulan deney sayısı da artmakta ve böylece deney maliyetleri önemli ölçüde artmakta veya uygulanabilirliği zorlaşmaktadır. Bu tür durumlarda tercih edilen en önemli deney tasarım metodu Taguchi yöntemidir. Yüksek faktör sayısının olduğu ve kontrol edilemeyen etmenlerin çoğaldığı durumlarda Taguchi yöntemi oldukça verimli sonuçlar verebilmektedir [82].

Taguchi yönteminde temel hedef, istenen değer etrafındaki değişkenlerin minimuma indirilmesidir. Bu yöntem, kesirli faktöriyel deney tasarımı yöntemine, robust tasarım ve ortogonal diziler gibi kavramları eklemektedir. Elde edilen deney sonuçları Taguchi aracılığıyla Sinyal/Gürültü (S/N) oranına dönüştürülerek yorumlanmaktadır. S/N oranlarının değerlendirilmesinde istenen hedef çıktıya göre “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” şeklinde kalite değerleri belirlenir ve bu değerlere göre analiz yapılmaktadır. Taguchi yöntemi için diğer bir önemli nokta ise deney tasarımında bir dengenin sağlanıyor olmasıdır. Bir başka deyişle, faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesini sağlamak ve bunun için tasarımdaki faktörlerin farklı seviyeleri için eşit sayıda deney belirlemesidir [82].

### 5.1. TAGUCHI DENEY TASARIMININ AŞAMALARI

Taguchi yöntemini kullanarak deney tasarımı yapılması için aşağıdaki adımların uygulanması gerekmektedir.

1. Analiz edilecek faktör ve etkileşimlerinin seçilmesi.
2. Faktör düzeylerinin belirlenmesi.
3. Ortogonal dizinin belirlenmesi.
4. Faktör ve etkileşimlerinin sütunlara atanması.
5. Deneylerin uygulanması.

6. Deney sonuçlarının analiz edilmesi.
7. Doğrulama deneylerinin yapılması.

Yukarıda verilen adımların uygulanması ile birlikte süreç için en yüksek performansın elde edileceği deney parametreleri belirlenecek, deneylerin uygulanması esnasında ele alınan faktörlerin süreç kalitesi üzerindeki etkisi tahmin edilebilecek ve böylece süreç sonunda elde edilecek kalite seviyesi öngörülebilecektir [83].

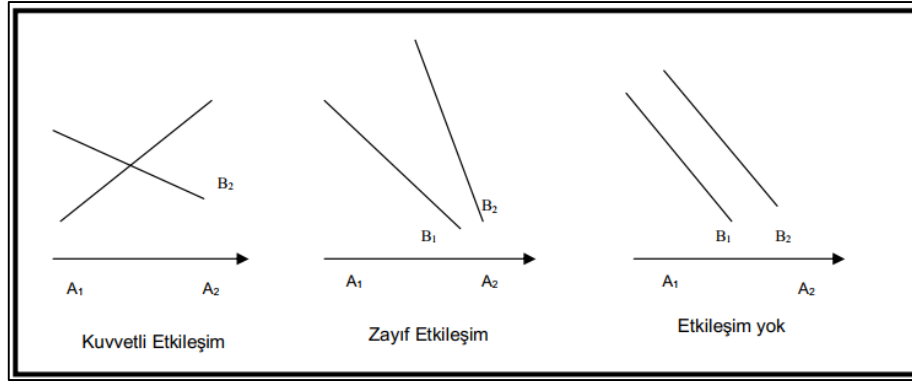
### **5.1.1. Analiz Edilecek Faktör ve Etkileşimlerinin Seçilmesi**

Çözülme istenen probleme ilişkin çözüm amacı ortaya konulduktan sonra klasik tasarımdakine benzer bir şekilde beyin fırtınası, süreç akış şeması ve sebep-sonuç diyagramı gibi teknikler aracılığıyla analizi yapılmak istenen faktörler ve bu faktörlere ait etkileşimler belirlenmelidir. Taguchi yönteminde faktörler, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dolayısıyla, faktör seviyeleri belirlenmeden önce faktörler belirlenmeli ve bunlar kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen diye ayrılmalıdır. Deney tasarımı burada kontrol edilebilen faktörler referans alınarak yapılmalıdır [83].

### **5.1.2. Faktör Düzeylerinin Belirlenmesi**

Sistem performansının etkileyen faktörlerin ve etkileşimlerinin seçimi yapıldıktan sonra bu faktörlere ait düzeylerin belirlenmesi gerekmektedir. Seviyeleri iki, üç veya daha çok şeklinde olabilen faktörlerin seviyeleri serbestlik dereceleriyle alakalıdır. Faktör seviyeleri aracılığıyla hesaplanan serbestlik derecesi deney büyüklüğünü belirlemek için önemli bir etkidir. Bir başka deyişle, bir faktöre ait serbestlik derecesi o faktörün seviyesinin bir eksiğine karşılık gelmektedir. Yani, etkileşim için gerekli olan serbestlik derecesi etkileşen faktörlerin serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir.

İki faktörün etkileşimli olması, bir faktörün (örneğin A), kalite değişkenine olan etkisi, diğer faktörün (örneğin B) hangi değerde bulunduğuna bağlıdır. Bu durum  $A \times B$  olarak gösterilir [82]. Etkileşimli ve etkileşimli olmayan faktörlerin grafikleri Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Etkileşimlerin şematik gösterimi [82].

### 5.1.3. Ortogonal Düzenin Belirlenmesi

Ortogonal dizinler yalnızca Taguchi yöntemi tarafından kullanılmamaktadır. Ancak, Taguchi diğerlerinden farklı olarak bu ortogonal dizi kullanımını daha basit bir yapıya büründürmüştür. 1930'lu yıllarda İngiliz Fisher tarafından ilk olarak oluşturulan ortogonal dizinler dengelenmiş dizi anlamına gelmektedir [84].

Sayısı fazla olan deneysel yapıları açıklamak için ortogonal dizileri oluşturan Taguchi, bunların en önemli özelliği olarak birçok faktörün en az sayıda test edilmesi ve faktör seviyelerinde eş zamanlı olarak değiştirme yapmaya olanak sağlaması olarak görmektedir. Problemin yapısına göre, 2 kademeli, 3 kademeli, 2 ve 3 kademeli olarak belirlenebilen ortogonal dizilere tasarım matrisi de denilmektedir. Genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [84].

$d$  : Toplam deney sayısı,

$a$  : Faktörlerin düzey sayısı

$k$  : Faktör sayısı,

$L$  : Ortogonal dizisi,

Ortogonal diziler genellikle 2 seviyeliler için L4, L8, L16 ve L32 ve 3 seviyeliler için L9, L18 ve L27 şeklinde tanımlanmaktadır. Dizilerin seçimi, düzey sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılmaktadır. Ortogonal dizi, ürün ortalaması ve varyansında etkili olan birçok faktörle aynı anda ve daha kısa sürede çalışmayı sağlamaktadır. L27 ( $3^{13}$ ) için etkileşim tablosu Şekil 5.2' de verilmiştir.

No.	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Şekil 5.2. L27 ( $3^3$ ) etkileşim tablosu.

#### 5.1.4. Faktör ve Etkileşimlerinin Sütunlara Atanması

Belirlenen Ortogonal dizinin yapısına göre faktör ve etkileşimlerinin sütunlara atanması için kullanılan doğrusal grafikler ve üçgensel tablolar Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Doğrusal grafikler, faktörlerin hangi sütunlara atanacağını, bu faktörlerin etkileşimi için kullanılacak sütunları göstermektedir. Faktörler arasındaki etkileşimlerin tamamını gösteren faktörler arasında üçgensel tablolar yer almaktadır [85].

#### 5.1.5. Deneylerin Uygulanması

Çözüme kavuşturulmak istenen sorunun çözülebilmesi için birden fazla performans karakteristiğinin özelliklerini taşıyabilen performans istatistiği seçilmektedir. Deney verilerinin analizi belirlenen performans istatistiğine göre yapıldığından bu istatistiğin

doğru belirlenmesi çok önemlidir. Taguchi aracılığıyla elde edilen deney tasarımlarında en çok tercih edilen performans istatistiği S/N oranıdır ve bu oran sağlam tasarımın performansını ölçmek için kullanılır.

Deneyler, daha önceden belirlenen ortogonal dizinin satırlarının öngördüğü denemelerden meydana gelmektedir. Deney boyunca hatayı minimize edebilmek, gürültü faktörlerinin etkisini görebilmek, gözlem değerleri sayısının çokluğuna bağlıdır. Seçilen her bir deney tasarımı ne kadar çok sayıda test edilirse deneyin güvenilirliği o ölçüde artış göstermektedir [85].

#### **5.1.6. Deney Sonuçlarının Analiz Edilmesi**

Sürecin performansını etkileyen faktörleri ve bu faktörlere ait uygun seviyeler belirlendikten sonra kritik öneme sahip faktörler ve bunların seviyelerinin yer aldığı bir model oluşturulmaktadır. Daha sonra bu modelin analizinin yapılması gerekmektedir. Elde edilen deney sonuçlarının analizini yapmak için varyans analizi, faktör etkilerinin grafiksel gösterimi metodu, hesap tablosu metodu gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bunların en bilineni ve en çok tercih edileni varyans analizidir [85].



## 6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Talaş kaldırma ile şekillendirme neredeyse yazılı tarihle eşdeğer bir geçmişe sahiptir. Ancak, işlenmesi zor malzemelerin ortaya çıkması ile birlikte talaş kaldırma operasyonları bazı kalite çıktılarıyla anılmaya başlanmıştır. Bu kalite çıktılarından bazıları takım ömrü, takım aşınması ve işlenmiş yüzeyin kalitesidir. İsmi zikredilen kalite çıktılarından yüksek performans elde edilebilmek için kullanılan yardımcılarından birisi de hiç kuşkusuz kesme sıvısı kullanımudur. Ancak, üretim maliyetleri, çevre bilinci ve çalışan sağlığı söz konusu olunca talaş kaldırma operasyonlarında kullanılan kesme sıvısı miktarının azaltılması kaçınılmaz bir zorunluluktur. Üretim kalitesini düşürmeden kesme sıvısı miktarını azaltmanın yollarından birisi de hiç kuşkusuz minimum miktarda yağlama (MMY) sisteminin kullanılmasıdır. Durum böyle olunca özellikle işlenebilirliği zor malzemelerin şekillendirilmesinde MMY sisteminin kullanımına ait birçok araştırma yapılmıştır ve yapılmaya da devam etmektedir. Bu araştırmaların bir kısmı aşağıda verilmiştir.

Borade ve Kadam yaptıkları çalışmada, EN353 çeliğin tornalanmasında bitkisel esaslı kesme sıvısı ve nano katkılı (hacimce %3  $Al_2O_3$ ) kesme sıvısı ile beraber kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneyler esnasında kesme parametresi olarak devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliğini kullanan araştırmacılar, deney tasarımı Taguchi L9 dikey dizinine göre yapmışlardır. Aynı kesme parametrelerini MMY ve nano katkılı MMY ile ayrı ayrı uygulayan araştırmacılar, daha sonra sonuçları birbiri ile karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre nano katkılı MMY sisteminin normal MMY'ye göre hem yüzey pürüzlülüğü hem de sıcaklık açısından daha iyi sonuçlar verdiğini iddia etmişlerdir [86].

Hadi ve Reza yaptıkları çalışma ile AISI D3 çeliğini frezelemişler ve gama- $Al_2O_3$  ile MMY sisteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nanopartikül takviyeli MMY sisteminin yanında kesme parametrelerinin de etkisini inceleyen araştırmacılar deney tasarımı ve sonuçların analizi için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar, gama- $Al_2O_3$  nanopartikülünün hacim fraksiyonu %1 olan bitkisel yağ ile yapılan deneyler sonucunda

yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık 0,3 µm azaldığını ve saf MMY'den yaklaşık %15 daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, gama- $Al_2O_3$  nanopartikülünün hacim fraksiyonu %2 olan bitkisel yağa dağıtılmasıyla yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 0,5 µm azaltılmış ve saf MMY'den yaklaşık %25 performans artışı gözlemlemişler. Bu sonuçlarla, bitkisel yağ içinde dağıldığında gama- $Al_2O_3$  nanopartiküllerin daha iyi performans verdiğini iddia etmişlerdir [87].

Vasu ve Pradeep Kumar Redy çalışmalarında,  $Al_2O_3$  (alüminyum oksit) nanopartiküllerinin farklı hacimlerde bitkisel yağa katılması sonucu elde edilen nanoakışkanı MMY sistemini kullanarak Inconel 600 süper alaşımını işlemişlerdir. Deneysel sonuçlar, soğutma-yaglama yöntemi olarak kuru, MMY, MMY +  $Al_2O_3$  nanopartiküller tercih edilmiştir. İş parçasının yüzey bitirme ve sıcaklık dağılımının  $Al_2O_3$  nanopartikül ilavesinin farklı hacim fraksiyonlarıyla arttığını gözlemleyip, Inconel 600 alaşımının işlenmesinde MMY'ye yapılan  $Al_2O_3$  nanoparçacık ilavesi sayesinde kesme kuvvetlerinde ve takım aşınma hızında bir azalma ve negatif çevresel etkilerde azalma olduğunu iddia etmişlerdir [88].

Anburaj ve Elansezhian bu çalışmada ağırlıklı olarak Inconel 718 malzemesinin işlenmesi sırasında kullanılan değişik yapıdaki nanoakışkanlarının işlenebilirlik üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması üzerinde durmuşlardır.  $Al_2O_3$ , ZnO ve SiO nanoparçacıklarını farklı ağırlık oranlarında baz yağ SAE20W40 ile karıştırmışlardır. Bu nanoakışkanları, Inconel 718 süper alaşımını MMY sistemi ile tornalamak için kesme sıvısı olarak kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar, 1 gm  $Al_2O_3$ 'ün 100 gm SAE20W40 yağı içerisinde dağıldığı zaman, yüzey pürüzlülüğü ve talaş kalınlığı konusunda  $Al_2O_3$ , ZnO ve SiO'ya oranla daha iyi sonuç verdiğini iddia etmişlerdir [89].

Ali ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, Inconel 718'i tornalamışlar ve bu esnada soğutma-yaglama yöntemi olarak farklı oranlarda katılmış  $Al_2O_3$  nanopartikül katkılı MMY sistemini tercih etmişlerdir. Kesme parametresi olarak kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğini kullanan araştırmacılar kalite göstergesi olarak yüzey pürüzlülüğünü referans almışlardır. Deney tasarımı Taguchi L9 dikey dizine göre yapmışlar ve deney sonuçlarının analizi için S/N oranı ve ANOVA'yı tercih etmişlerdir. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar, aktif madde eklenmiş  $Al_2O_3$  nanopartikül kullanılarak elde edilen MMY sisteminin hem yüzey pürüzlülüğü açısından hem de ekolojik açıdan faydalı olduğunu iddia etmişlerdir [90].

Khalila ve arkadaşları bu çalışmada, AISI 1050'nin tornalanması esnasında kesme yağı içindeki yüzey aktif Sodyum Dodesilbenzen Sülfonat (SDBS) ile  $Al_2O_3$  nanopartiküllerin takım aşınmasına etkisini araştırmışlardır. Deneyler esnasında soğutma-yağlama yöntemi olarak, kuru, nanopartikül ve nanopartikül ile sodyum dodesilbenzen sülfonat karışımı kullanılmıştır. Kesme parametresi olarak ise 1273 rpm sabit devir sayısı, 0,2 mm/dev ilerleme hızı ve 0,1 mm kesme derinliğini tercih etmişlerdir. Analizler neticesinde,  $Al_2O_3$  nanopartikül maddesinin sürtünme işlemi esnasında takım aşınmasının azaltılmasında yüzey aktif madde ile olumlu etki gösterdiğini iddia etmişlerdir [91].

Uysal, AISI 430 paslanmaz çeliğini frezelediği çalışmasında, kesici takım kaplama türü ve nano kesme sıvısının sürdürülebilir imalat üzerindeki etkisini incelemiştir. Kesici takım olarak kaplamasız tungsten karbür ve TiN kaplamalı tungsten karbür kullanan araştırmacı nano katkı maddesi olarak molibdendisülfür tercih etmiş ve bunu bitkisel esaslı kesme yağının içerisine eklemiştir. Uysal bu çalışmasında nano katkı maddesini %0,5-%1-%2 oranlarında eklemiş ve performansını tam anlamıyla test edebilmek için kuru işleme ve saf MMY ile de karşılaştırmıştır. Ayrıca, işleme parametresi olarak da debiyi de kullanan araştırmacı işlenebilirlik çıktısı olarak yüzey pürüzlülüğünü tercih etmiştir. Araştırmacı deney sonuçlarına göre, nano katkılı kesme sıvısının işleme verimliliğini artırdığını iddia etmiştir [92].

Uysal bir başka çalışmasında, AISI 430 paslanmaz çeliğini MMY yöntemi kullanarak frezelemiştir. Bu işlem sırasında araştırmacı nano katkı maddesi olarak MWCNT (çok duvarlı karbon nanotüp) kullanmış ve bu katkı maddesini ticari bitkisel kesme yağının içerisine katmıştır. Katkı oranını işleme parametresi olarak seçen araştırmacı kesme sıvısının içerisine ağırlıkça %0,1, %0,15 ve %0,2 oranlarında MWCNT eklemiştir. Diğer işleme parametresi olarak MMY debisini seçen araştırmacı çıktı parametresi olarak kesme sıcaklığını seçmiştir. Araştırmacı sonuç olarak, nano katkı maddesinin eklenmesi ile birlikte kesme sıcaklığının azaldığını iddia etmiştir. Ancak katkı oranının gerekenden fazla olması kesme sıcaklığında artışa neden olmuştur [93].

Duc ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sertleştirilmiş 60Si<sub>2</sub>Mn çeliğini frezelemiştir. Frezeleme esnasından farklı işleme şartlarının yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkisini araştıran araştırmacılar nano katı yağlayıcı olarak  $Al_2O_3$ 'ü kullanmışlardır. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar, hacimce %0,5  $Al_2O_3$  içeren kesme sıvısının en iyi sonucu verdiğini iddia etmişlerdir. Bu işlem sonunda takım ömründe yaklaşık %177-%230 oranında bir artış gözlemlenirken

yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetinde azalma gözlemlenmiştir. Dahası, nanoakışkan saf kesme yağının tribolojik özelliklerini %35 ile %60 arasında değişen bir oranda iyileştirmiştir [94].

Khandekar ve arkadaşları bu çalışmada, geleneksel kesme sıvısına %1  $Al_2O_3$  nanopartiküllerin eklenmesi ile nano-kesme sıvısı oluşturmuşlardır. Bu nano-kesme akışkanının karbür takım ucundaki ıslanabilirlik özelliği, mikroskobik temas açısı yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Kuru işleme, geleneksel kesme sıvısı ve nano-kesme sıvısı ile işleme arasındaki takım aşınması, kesme kuvveti, iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve talaş kalınlığının karşılaştırmalı çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde geleneksel kesme sıvısı ve kuru işleme ile karşılaştırıldığında, nanoakışkan kullanımı kesme kuvveti, iş parçası yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş kalınlığı açısından daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [95].

Altın yaptığı çalışmada, kesici takım kaplama malzemesinin ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini Taguchi deney tasarımı kullanılarak araştırmıştır. Bu amaçla, nikel bazlı süper alaşım Hastelloy X, üç farklı sementit karbür takımla kuru kesme koşullarında işlenmiştir. Ana kesme kuvveti, Fz, bir kriter olarak düşünülmüştür. Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, takım kaplama malzemesine bağlı olarak, en düşük ana kesme kuvvetinin 538 N olduğu ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün 0,755  $\mu m$  olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler 100 m/dak kesme hızında, üst katmanı TiN olan çok katlı kaplanmış sementit karbür uç (KC9240) ile elde edilmiştir. Deney sonuçlarının analiz edilmesiyle birlikte araştırmacı, CVD kesici takımların PVD'den ve kaplanmamış kesici takımlardan daha iyi performans gösterdiğini iddia etmiştir [32].

## 7. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Hastelloy C276 süper alaşımın frezelemesinde farklı soğutma-yağlama şartlarının ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkileri araştırılarak optimum işleme şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda deneysel çalışmada kullanılan malzeme ve cihazlar ile çalışmada izlenen yöntemler aşağıda başlıklar halinde detaylı bir şekilde sunulmuştur.

### 7.1. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEME VE CİHAZLAR

#### 7.1.1. Malzeme

Deney malzemesi olarak, ASTM B575 Din 17750 standartlarına sahip nikel esaslı bir süper alaşım olan Hastelloy C276 malzemesi kullanılmıştır. Deney numunesine ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikler sırası ile Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Hastelloy C276 alaşımının kimyasal bileşenleri (Ağırlıkça %).

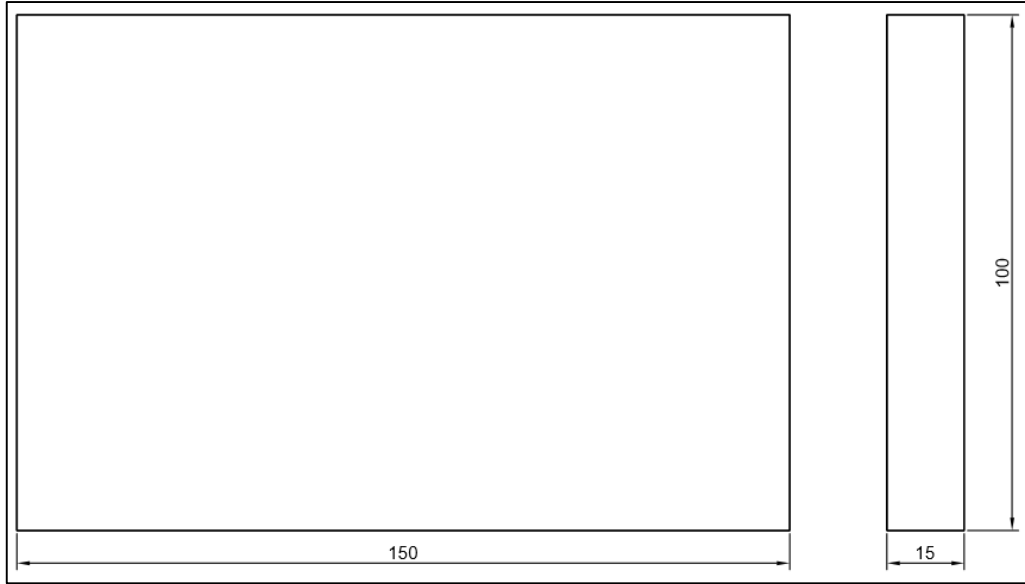
Co	Cr	Mo	Fe	W	Mn	V	Si	C	Cu	Ni
0,134	14,13	15,84	5,74	3,62	0,43	0,14	0,03	0,025	0,02	Geriye kalan

Çizelge 7.2. Hastelloy C276 alaşımının mekanik özellikleri.

Sertlik (HRB)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (MPa)
90	355	728	73

#### 7.1.2. Deney Numuneleri

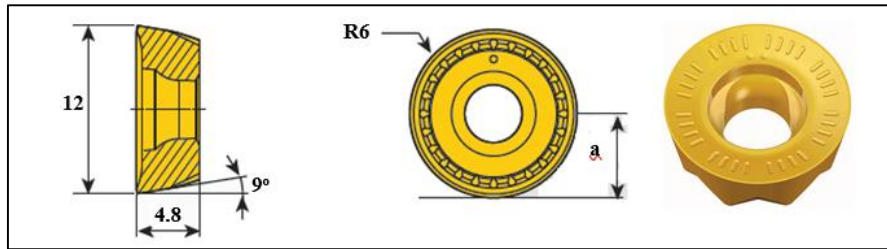
İşleme deneylerinde, Şekil 7.1’de detay resimleri verilen 150 x 100 x 15 mm ebatlarında plakalar kullanılmıştır. Deney numuneleri, tel erozyon tezgâhında kesilerek hazırlanmıştır.



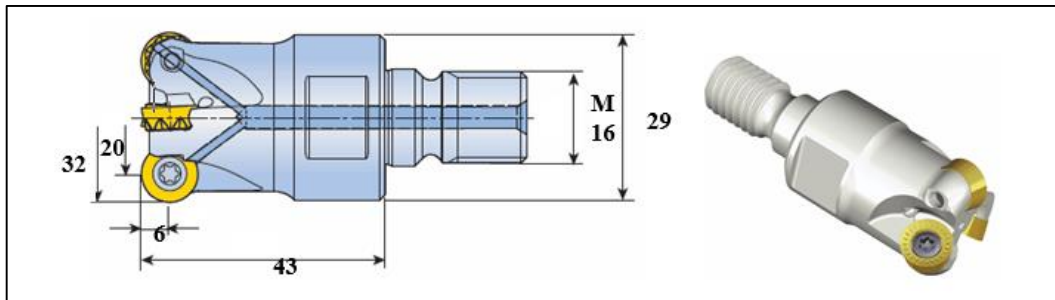
Şekil 7.1. Frezeleme deneylerinde kullanılan numune boyutları.

### 7.1.3. Kesici Takım ve Takım Tutucu

Frezeleme deneylerinde, TaeguTec firması tarafından üretilen RYMX 1205-ML kodlu CVD TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN kaplamalı sementit karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Kesici takımlara ait detay resimleri Şekil 7.2’de verilirken takım tutucuya ait detay resimleri ise Şekil 7.3’te verilmiştir. Bu kesiciler için yine TaeguTec firması tarafından üretilen ve 32 mm çapında BT40 ODP 16x66 kodlu takım tutucu kullanılmıştır. Bağlantının rijit olması için vidalı takım tutucu tercih edilmiştir.

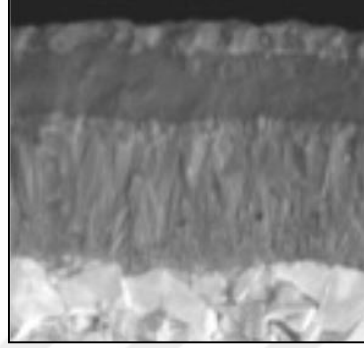


Şekil 7.2. Deneylerde kullanılan kesici takımlara ait geometri ve ölçüler.



Şekil 7.3. Deneylerde kullanılan vidalı takım tutucuya ait ölçüler.

İşleme deneylerinde üç ağızlı takım tutucuya tek uç bağlanmış olup her deneyde yeni uç bağlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney malzemesinin düşük işlenebilirlik özelliğine sahip olması nedeniyle kesici takım dayanımını artırmak amacıyla yuvarlak geometriye sahip uçlar tercih edilmiştir. Süper alaşımların işlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılan CVD yöntemiyle kaplanmış çok katlı TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN kaplı takımlar tercih edilmiş olup kaplama yapısı Şekil 7.4’te verilmiştir.



Şekil 7.4. Kesici takımlara uygulanan kaplama yapısı.

#### 7.1.4. Takım Tezgâhı

Frezeleme deneylerinde maksimum devri 10.000 dev/dak olan DELTA SEIKI CNC-1050 A marka CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. Tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 7.3’de verilmiştir.

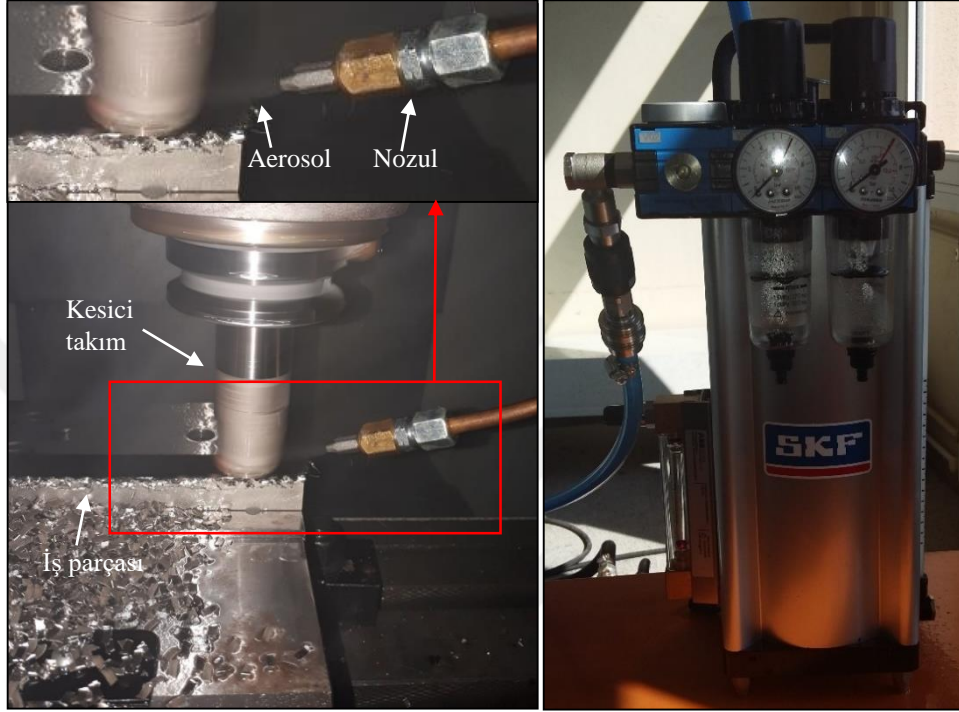
Çizelge 7.3. CNC dik işleme merkezinin özellikleri.

Markası	DELTA SEIKI CNC-1050 A
Tabla ölçüsü	1270-400 mm
En yüksek iş parçası ağırlığı	500 kg
En yüksek devir sayısı	10.000 dev/dak
Kesici bağlama hane sayısı	24 Adet
İş mili motor gücü	11 kW
İşletim sistemi	Fanuc OT

#### 7.1.5. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

Minimum miktarda yağlama sistemi, çok küçük miktarda yağı yüksek basınçta hava vasıtasıyla pulvarize bir şekilde kesme bölgesine gönderme prensibi ile çalışmaktadır. Bu sayede kesme bölgesinde oluşan ısıyı azaltmakta, talaşları kesme bölgesinden uzaklaştırarak takım-talaş ara yüzeyinde bir yağlayıcı film oluşturarak sürtünmeyi azaltmaktadır. Bunun sonucu olarak da takım ömrü artmakta, yüzey kalitesi iyileşmekte ve üretim maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. Ayrıca kullanılan bitkisel esaslı yağlarla da çevre ve insan sağlığı olumsuz yönde etkilenmemektedir. Yapılan çalışmada

MMY'nın etkin bir şekilde uygulanabilmesi amacıyla SKF firması tarafından üretilen Vario model MMY sistemi kullanılmıştır. İşleme deneylerinde, kesme sıvısı basınçlı hava ile beraber pulvarize bir şekilde nozul yardımıyla kesme bölgesine püskürtülmüştür. Deney seti kurulumu ve deneylerde kullanılan MMY sistemi Şekil 7.5'te, MMY sistemine ait teknik detaylar ise Çizelge 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.5. Deney seti kurulumu ve MMY sistemi.

Çizelge 7.4. SKF marka MMY sisteminin teknik özellikleri.

Metal Gövde	Var
Kapasite (Litre)	1.8
Takım İçinden Yağlama	Var
Takım Dışından Yağlama	Var
Basınçlı Hava Kapasitesi (Bar)	En düşük 6 En yüksek 8
Çalıştırma	Manuel Sürgülü Vana
Yağ Seviyesi İzleme	Var
Akış Sensörü	Yok
Basınç Kontrolü	Yok
Çıkış Deliklerinin Sayısı	1-3
Hava Tüketimi (NI/min)	15-300
Yağ Miktarı (ml/s)	1-150
Ağız Pozisyonu	Dikey
Boş Ağırlık (kg)	6.1

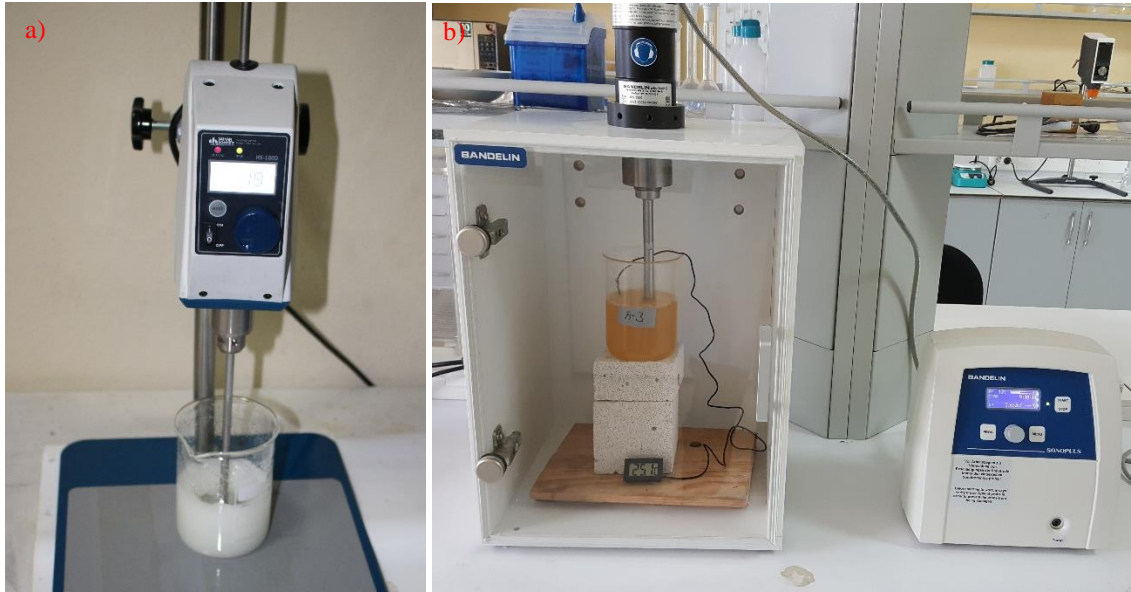
İşleme deneylerinde, MMY sisteminde bitkisel esaslı kesme yağı kullanılmış olup kesme yağına ait teknik özellikler Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5. Bitkisel esaslı kesme yağının teknik özellikleri.

Kinematik Viskozitesi (40°C, cSt)	10
Kırılma İndisi (nD20)	1.46
Parlama Noktası (°C, min)	170
Bakır Korozyonu (3h, 100°C)	1
Yoğunluk (g/mL, 20 °C)	0.895

#### 7.1.6. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı nanoakışkanların hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanmasında bitkisel esaslı kesme yağına hacimce % 0,5, % 1 ve % 1,5 oranlarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (saflık +%99,5, küresel 18 nm çapında) nanopartikül ilave edilmiştir. Homojen karışım elde edilebilmesi için karışımlar iki aşamada hazırlanmıştır. İlk olarak Daihan marka HS-100D model mekanik karıştırıcı ile 700 dev/dak'da 30 dak karıştırılmıştır. Daha sonra Bandelin Sonopuls marka UW-3200 model ultrasonik karıştırıcı yardımıyla 30 dak daha karıştırılarak fresh karışımlar elde edilmiştir. Nanoakışkanların hazırlanmasında nanopartiküllerin baz sıvı içerisinde topaklanması yada çökmesi en büyük problemlerin başında gelmektedir. Bunun engellenebilmesi için baz sıvı içerisine yüzey gerilimini azaltıcı bazı surfaktanlar katılmaktadır. Fakat bu surfaktanlar katıldığı sıvının özelliklerini (Saflık, termal iletkenlik vb.) olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple yapılan çalışmada nanoakışkanların hazırlanmasında surfaktan kullanılmamıştır. İşleme testlerinde fresh hazırlanmış karışımlar kullanılmıştır.

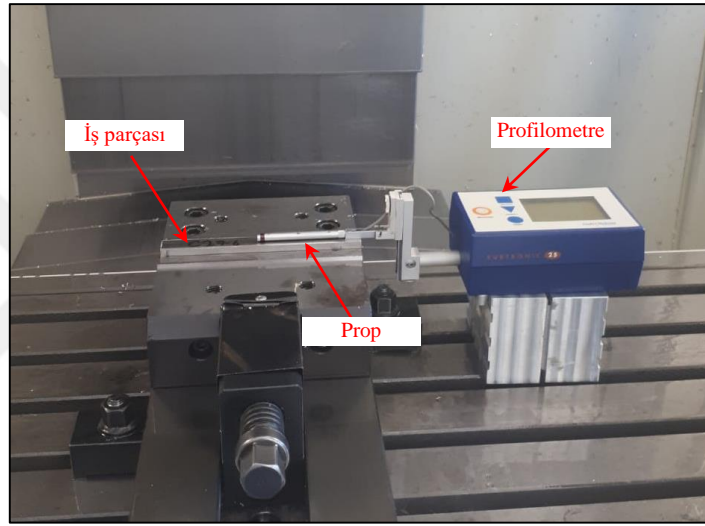


Şekil 7.6. Nanoakışkanların hazırlanması a) mekanik karıştırıcı, b) ultrasonik homojenizatör.

## 7.2. DENEYSEL ÖLÇÜMLER

### 7.2.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Frezeleme deneylerinde yüzey pürüzlülük ölçümü Taylor Hobson marka ve Surtronic 25 modeli taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde ortalama yüzey pürüzlülük değeri olan Ra dikkate alınmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümü için örneklem uzunluğu 4 mm olarak alınmıştır ve ölçüm şekli işleme yüzeyine paralel olacak şekilde dört ayrı noktadan ölçülerek yapılmıştır. Şekil 7.7’de yüzey pürüzlülük ölçümlerinin nasıl yapıldığı görülmektedir. Çizelge 7.6’da ise deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 7.7. Yüzey pürüzlülük ölçümü.

Çizelge 7.6. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapıldığı cihaza ait teknik özellikler.

Model	Surtronic 25
Ölçme aralığı ( $\mu\text{m}$ )	300
Kararlılık ( $\mu\text{m}$ )	0,01
Tarama metodu	Diferansiyel indüksiyon
Ölçme kuvveti (mg)	150-300
Dedektör ucu ( $\mu\text{m}$ )	Elmas, radyus: 5
Örnekleme uzunluğu (mm)	0.25-0.8-2.5-8
Tarama uzunluğu (mm)	0.25-25 mm
Tarama hızı (mm/sn)	1
Görüntüleme birimi	$\mu\text{m}/\mu\text{in}$
Parametreler	Ra, Rz, Rt, Rp, Rmr, Rpc, Rsm, Rz1max, Rsk, Rda
Çalışma sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	5-40
Ölçüler (mm)	127x85x60
Ağırlık (g)	450

### 7.2.2. Takım Aşınmasının Ölçülmesi

Takım aşınması deneylerine geçmeden önce kesme hızı, ilerleme vb. kesme parametrelerinin aralıklarını belirlemek için bir dizi ön deney yapılmıştır. Ön deneyler esnasında kullanılan parametreler katalog bilgileri, üretici firma tavsiyesi ve literatür taraması sonucu belirlenmiştir. Ön deneyler sonucunda çalışmayı yapmak için en uygun strateji belirlenmiş ve ana deneylere geçilmiştir. Deneyler, ISO 8688-1 frezeleme standardı dikkate alınarak yapılmıştır.

Ana deneyler yapılırken her deney daha önce kullanılmamış bir kesici ile yapılmış ve deneyler sonucunda kesici uçlar AM 4113ZT (Dino-Lite) polarize dijital mikroskopla kontrol edilmiş ve aşınma değerleri ölçülmüştür. Ölçümlerde kullanılan dijital mikroskop Şekil 7.8’de verilirken Çizelge 7.7’de ise dijital mikroskoba ait teknik özellikler yer almaktadır.



Şekil 7.8. AM 4113ZT polarize dijital mikroskop ile ölçüm.

Çizelge 7.7. AM 4113ZT polarize dijital mikroskobunun teknik özellikleri.

Model	AM413ZT
Çözünürlük	1.3 mega piksel (1280x1024 piksel)
Büyütme	10x~70x, 200x
Ara yüz	USB 2.0
LED Sayısı	8
LED Açıp Kapanabilir	Evet
LED Rengi	Beyaz
Materyal	Kompozit
Microtouch	Evet
Çıkış	Resim, video ve time-lapsed video
Görüntü Hızı	Saniyede 30 kare, 15fps at 1.3M
Ölçüm	Evet, (Çizgi, Yarıçap, Daire, 3 Noktadan daire)

### 7.3. DENEYSEL TASARIM VE KESME PARAMETRELERİ

Çalışmanın deneysel bölümü iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana hedefi

nanopartikül katkıli kesme sıvısının MMY sistemi aracılığıyla işlenebilirliğe etkisini araştırmaktır. Ancak, bundan önce MMY sisteminin kendi içindeki değişkenleri optimize edilmeli ve ana deneylerde kullanılacak MMY parametreleri belirlenmelidir. Çünkü MMY sistemi kendi içerisinde yağ tipi, debi, püskürtme açısı, püskürtme basıncı vb. gibi birçok değişkeni barındırmaktadır. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde, MMY sistemine ait bu değişkenlerin bir kısmını optimize etmek için bir dizi deney yapılmıştır. Geriye kalan değişkenler ise literatür taraması ve ön deneyler neticesinde belirlenmiştir. İkinci aşamada ise kaplamalı karbür kesiciler kullanılarak kesme hızı ve ilerleme hızı gibi kesme parametrelerinin yanı sıra nanopartiküllerin kesme sıvısı içerisindeki miktarlarının değişken olarak kabul edildiği bir dizi deney yapılmıştır. Deneysel çalışma tamamlandıktan sonra elde edilen deney verileri kullanılarak analizler yapılmış, tahmin modelleri oluşturulmuş ve yorumlamaya geçilmiştir.

### 7.3.1. MMY Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Deneysel Tasarımı

Çalışmanın bu bölümü deneysel çalışmanın ilk aşamasını oluşturmaktadır ve Taguchi L9 dikey dizini kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneyler sırasında, kaplamalı karbür uçlar tercih edilmiş olup ön deneyler, literatür ve üretici firmanın tavsiyesine göre, kesme hızı (75 m/dak), ilerleme (0,15 mm/dev) ve kesme derinliği (0,5 mm) sabit tutulmuştur. Çıktı değeri olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) dikkate alınmıştır. Çizelge 7.8'de deney girdi parametreleri, Çizelge 7.9'da Taguchi L9 dikey dizini deney tasarımı verilmiştir.

Çizelge 7.8. Deney girdi parametreleri.

Debi (ml/s)	Püskürtme Açısı (der)	Püskürtme Basıncı (bar)
20	30	4
60	45	6
100	60	8

Çizelge 7.9. Taguchi L<sub>9</sub> dikey dizini.

Deney No	Debi	Püskürtme Açısı	Püskürtme Basıncı
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

### 7.3.2. Ana Deneyler İçin Deneysel Tasarım

Bu aşamada, karbür kesiciler ile optimum kesme parametrelerini belirlemek için Taguchi L<sub>27</sub> dikey dizini kullanılarak farklı işleme parametreleri (kesme hızı, ilerleme hızı ve hacimce farklı oranlarda nanopartikül içeren bitkisel esaslı kesme sıvısı) ile bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Kesme derinliği ve ilerleme ISO 8688-1'e uygun olacak şekilde seçilmiştir. Her bir deney sabit kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme hızları, üretici firma önerileri ve örnek literatür çalışmalarına bağlı olarak tespit edilmiş ve ön deneyler neticesinde nihai olarak belirlenmiştir. Çizelge 7.10'da deney girdi parametreleri, Çizelge 7.11'de de Taguchi L<sub>27</sub> düşey dizini deney tasarımı verilmiştir. Deneyler sonucunda işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğü, kesici uç aşınması ve kesici takım ömrü ölçülmüştür.

Çizelge 7.10. Deney tasarımında kullanılan etkenler ve düzeyleri.

Seviyeler	(A)	(B)	(C)
	Kesme hızı V (m/dak)	İlerleme hızı f (mm/dev)	Katkı oranı (% hacimce)
1	60	0,10	0,5
2	75	0,15	1,0
3	90	0,20	1,5

Çizelge 7.11. Taguchi L<sub>27</sub> dikey dizini.

Deney No	Kesme Hızı	İlerleme	Katkı Oranı
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	2	1	1
11	2	1	2
12	2	1	3
13	2	2	1
14	2	2	2
15	2	2	3
16	2	3	1
17	2	3	2
18	2	3	3
19	3	1	1
20	3	1	2
21	3	1	3
22	3	2	1
23	3	2	2
24	3	2	3
25	3	3	1
26	3	3	2
27	3	3	3

## 8. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, nikel esaslı bir süper alaşım olan Hastelloy C276 malzemesi frezeleme yöntemi ile işlenmiştir ve çalışma üç aşamada yürütülmüştür. Çalışmanın ana ekseninde hacimce farklı oranlarda olan nanopartikül katkılı MMY sistemi ve kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Ancak, bunun için öncelikle MMY sisteminin kendi içindeki parametreleri optimize edilmeli ve en uygun parametre grubu belirlenmelidir. Bu nedenle birinci aşamada MMY sistemine ait optimum kesme parametrelerini belirlemek için debi, püskürtme açısı ve püskürtme basıncı gibi değişkenlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu incelemeye ait deney tasarımının belirlenmesi için Taguchi L9 dikey dizini tercih edilmiştir. İkinci aşamada, kaplamalı karbür kesici takımlar kullanılarak kesme parametreleri ve kesme sıvısı içine katılan nano boyuttaki partiküllerin yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkilerini araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu aşama için seçilen kesme parametreleri kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme sıvısı içerisine katılan nanopartiküllerin hacimce oranları olmuştur ve deney tasarımını oluşturmak için Taguchi L27 dikey dizini kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise deneyler aracılığıyla elde edilen verilerin analizi yapılmış ve yorumlanmıştır.

### 8.1. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MMY) PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, ana deneylerde kullanılan MMY sistemine ait optimum parametreleri elde etmek için bir grup deney yapılmıştır. Deneyler esnasında kesme parametresi olarak, sabit kesici takım (TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN kaplamalı karbür), sabit kesme hızı (75 m/dak), sabit ilerleme hızı (0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0,5 mm) seçilmiştir. Bu parametre seçimlerinde ön deneyler, literatür ve kesici takım firmasına ait katalog bilgileri etkili olmuştur. MMY parametresi olarak ise debi (20, 60 ve 100 ml/h), püskürtme açısı (30, 45 ve 60°) ve püskürtme basıncı (4, 6 ve 8 bar) seçilmiştir. Deneylere ait çıktı değeri olarak yüzey pürüzlülüğü seçilmiş ve debi, püskürtme açısı ve püskürtme basıncı gibi MMY parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Böylece ana

deneyleerde kullanılacak MMY sistemine ait optimum parametrelerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

### 8.1.1. Yüzey Pürüzlülüğü

Çalışmanın bu bölümünde, kalite özelliği olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) dikkate alınmıştır. Kontrol faktörleri ise debi (ml/h), püskürtme açısı (derece) ve basınç (bar) olarak belirlenmiştir. Deneyleerin tamamında kesme derinliği (0,5 mm) sabit tutulmuştur. Her bir kontrol faktörü üç seviyede tamamlanmış olup Taguchi'nin L9 dikey dizini kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, sonuçları incelemek için S/N oranı denilen istatistiksel bir ölçü kullanmaktadır. Bu yöntemde, “sinyal” çıkış karakteristiği için istenilen değeri belirtirken “gürültü” istenmeyen değeri ifade etmektedir. S/N oranlarının analizinde “en büyük en iyi”, “en küçük en iyi” ve “nominal en iyi” olmak üzere üç ana karakteristik değeri vardır [96]. Bu çalışmanın amacı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini elde etmek olduğu için S/N (sinyal/gürültü) oranlarının hesaplanmasında “en küçük en iyi” değerini veren Eşitlik (8.1) tercih edilmiştir.

$$S/N = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (8.1)$$

Burada;

Y : Performans karakteristik değeri (yüzey pürüzlülüğü)

n : Y değerlerinin sayısını ifade etmektedir.

Yüzey pürüzlülüğüne ait kontrol faktörlerinin seviyeleri, deneysel çalışma sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değeri ve bu değerlere ait S/N oranları Çizelge 8.1'de verilmiştir. Deneyleer sonucunda ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra<sub>ort</sub>) 0,481 µm çıkarken deney sonuçlarına ait S/N oranlarının ortalama değeri 6,44 dB olarak elde edilmiştir.

Çizelge 8.1. Deney sonuçları ve S/N oranları.

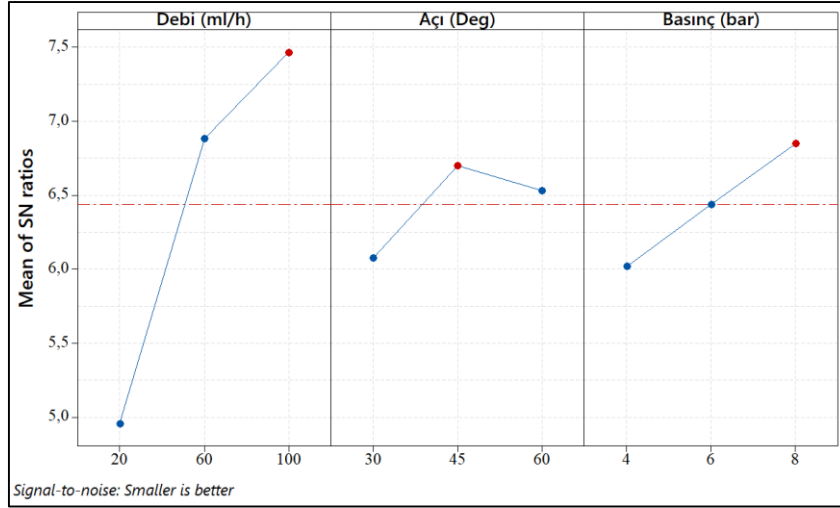
Deney No	Debi (ml/h)	Püskürtme Açısı (Derece)	Püskürtme Basıncı (Bar)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	S/N Oranı (dB)
1	20	30	4	0,62	4,15
2	20	45	6	0,56	5,04
3	20	60	8	0,52	5,68
4	60	30	6	0,46	6,74
5	60	45	8	0,42	7,54
6	60	60	4	0,48	6,38
7	100	30	8	0,43	7,33
8	100	45	4	0,42	7,54
9	100	60	6	0,42	7,54

Deneyler sonucunda elde edilen S/N oranlarının optimizasyonu Taguchi yöntemi aracılığıyla yapılmıştır. Çizelge 8.2’de yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu verilmiştir. Bu tabloda optimum yüzey pürüzlülük değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri yer almaktadır.

Çizelge 8.2. S/N yanıt tablosu.

	Kontrol Faktörleri		
	A	B	C
Seviye 1	4,956	6,076	6,021
Seviye 2	6,885	<b>6,702</b>	6,439
Seviye 3	<b>7,467</b>	6,530	<b>6,849</b>
Delta	2,511	0,626	0,828

En iyi yüzey pürüzlülük değerini veren faktörlere ait seviye ve S/N oranları A faktörü için (Seviye 3, S/N=7,467), B faktörü için (Seviye 2, S/N=6,702) ve C faktörü için (Seviye 3, S/N=6,849) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 8.1’de yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörleri ve bu kontrol faktörlerine ait seviye değerlerini gösteren ana etki grafiği verilmiştir.

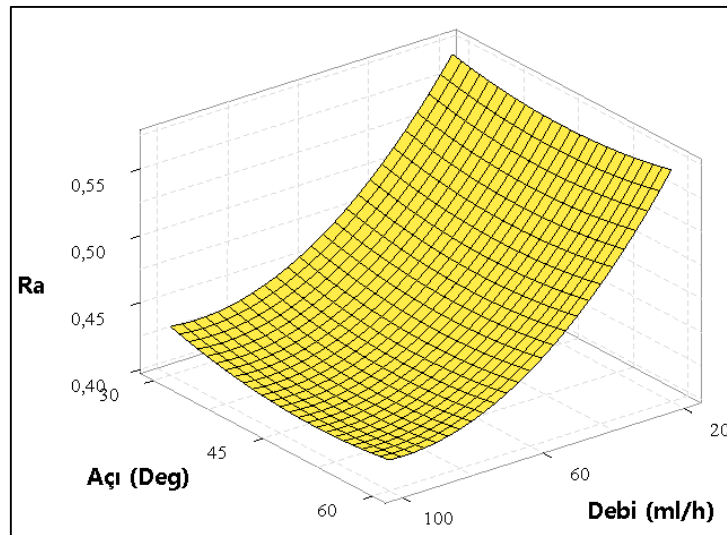


Şekil 8.1. S/N oranları ana etki grafiği.

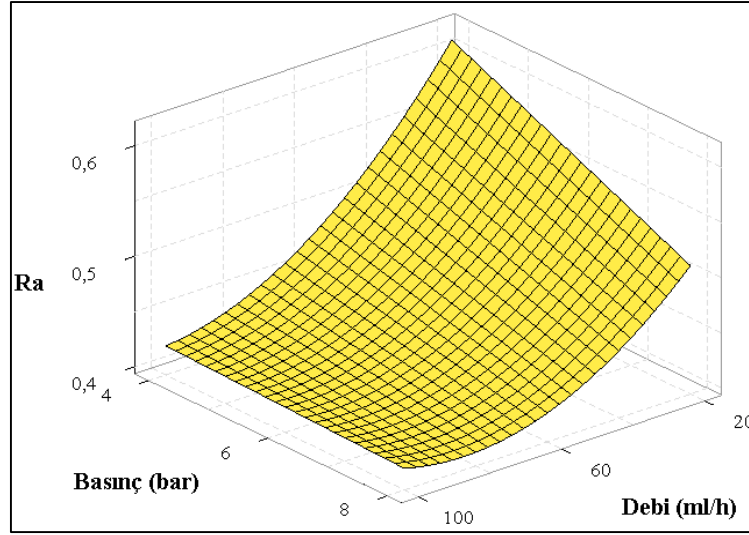
Şekil 8.1 incelendiği takdirde en iyi yüzey pürüzlülük değerini A faktörü için 3. seviye, B faktörü için 2. seviye, C faktörü için ise 3. seviyenin verdiği görülecektir. Bir başka deyişle, en iyi yüzey pürüzlülük değeri 100 ml/h debi, 45° ve 8 bar basınç kombinasyonu sonucunda elde edilmiştir.

#### 8.1.1.1. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Hastelloy C276 malzemesinin MMY sistemi altında frezelenmesi sonucu elde edilen deney sonuçlarının incelenmesi neticesinde elde edilen ve püskürtme açısı ile debiye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişimi gösteren üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 8.2’de verilmiştir. Püskürtme basıncı ve debiye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişimi gösteren üç boyutlu yüzey grafiği ise Şekil 8.3’te verilmiştir.



Şekil 8.2. Püskürtme açısı ve debiye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim.



Şekil 8.3. Püskürtme basıncı ve debiye bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.

Püskürtme açısı ve debiye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişimi gösteren grafik incelendiğinde, debinin artması ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde azaldığı görülmektedir (Şekil 8.2). Kesme bölgesine gönderilen kesme sıvısı miktarının artması ile birlikte takım/iş parçası ara yüzünde oluşan ısının azalması hem işlenmiş yüzeyin kalitesini hem de kesici takımın aşınmasını doğrudan etkilediği için yüzey pürüzlülüğünü de önemli ölçüde etkilemektedir. Yine Şekil 8.2 incelendiğinde, deneyler esnasında test edilen üç püskürtme açısının içinde en düşük yüzey pürüzlülük değerini veren açının  $45^\circ$  olduğu görülmektedir.  $30^\circ$  ve  $60^\circ$  açı ile yapılan püskürtmede aerosolün kesme noktasına daha az ulaşması ve tam etki edememesi nedeniyle yüzey pürüzlülük değerinde artışlar olduğu düşünülmektedir. Püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini gösteren Şekil 8.3 incelendiğinde ise basınç değişiminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin az olduğu görülmesinin yanında basıncın artması ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün bir miktar azaldığı görülmektedir. Basıncın artması ile birlikte kesme bölgesine gönderilen hava miktarı da artacağından hem soğutma hem de talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırma görevini daha iyi yapacaktır. Bu durum ise daha düşük basınç değerleri ile karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülüğündeki iyileşmenin nedenini açıklar niteliktedir.

#### 8.1.1.2. ANOVA

Bu çalışmada, deneylerde kullanılan faktörlerin (debi, püskürtme açısı, püskürtme basıncı) deney çıktısı (ortalama yüzey pürüzlülüğü) üzerindeki etkisini belirlemek için ANOVA kullanılmıştır. %95 güven aralığında gerçekleştirilen ANOVA sonuçları Çizelge 8.3'te verilmiştir. Çizelgede yer alan katkı oranları işleme parametrelerinin

ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki önem derecesini göstermektedir. Katkı oranlarının hesaplanmasında F oranları kullanılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktör %74,6 katkı oranı ile debi (faktör A) olmuştur. Bunu %9,1 ve %3,3 katkı oranları ile sırasıyla püskürtme basıncı (faktör C) ve püskürtme açısı (faktör B) takip etmiştir.

Çizelge 8.3. ANOVA tablosu.

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
A	1	0,030817	0,030817	28,68	0,003	74,6
B	1	0,001350	0,001350	1,26	0,313	3,3
C	1	0,003750	0,003750	3,49	0,121	9,1
Hata	5	0,005372	0,001074	-	-	13,0
Toplam	8	0,041289	-	-	-	100

### 8.1.1.3. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, işleme parametreleri arasındaki ilişkileri dikkate alan en güvenilir veri tahmin yöntemlerinden biridir. Bir başka deyişle, bir sistemin bağımsız ve bağımlı değişkenleri arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Optimizasyon ve tahmin modelleme problemleri için basit ama sağlam bir araçtır [97]. Çalışmanın bu bölümünde, deneysel çalışma aracılığıyla elde edilen 9 adet ortalama yüzey pürüzlülük değeri regresyon analizi uygulanmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü denklemlerini oluşturmak için debi, püskürtme açısı ve püskürtme basıncı kontrol faktörü olarak kullanılmıştır. Regresyon denklemlerinin oluşturulması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalardan birincisi olan ve lineer denklemi yani faktörlerin ana etkileriyle elde edilen denklem oluşturulmuş ve güvenilirlik düzeyi incelenmiştir. Lineer denklem aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

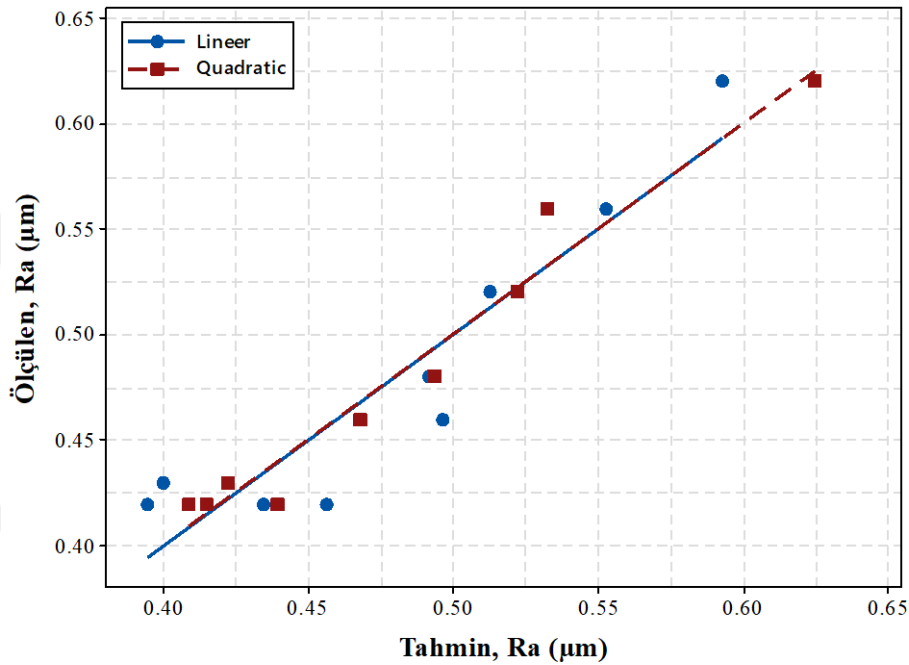
$$Ra = 0,7086 - 0,001792 \text{ Debi} - 0,001 \text{ Açılı} - 0,01250 \text{ Basıncı} \quad (8.2)$$

Elde edilen lineer denklemin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0.8699 olarak hesaplanmıştır. Ancak, %95 güvenilirlik seviyesi ile yapılan bu çalışmada lineer denklem aracılığıyla elde edilen tahminsel değerlerle gerçek değerler arasında farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan kuadratik denklem üretilmiştir. Debi, püskürtme açısı ve püskürtme basıncı ile birlikte bu faktörlere ait etkileşimlerin de katıldığı kuadratik denklem aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$Ra = 1,119 - 0,00299 \text{ Debi} - 0,00414 \text{ Açı} - 0,01246 \text{ Basınç} \quad (8.3)$$

$$-0,000055 \text{ Debi} * \text{Açı} + 0,000696 \text{ Debi} * \text{Basınç} + 0,001381 \text{ Açı} * \text{Basınç}$$

Kuadratik denkleme ait belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ise 0,9607 olarak hesaplanmıştır. Gerçek deney sonuçları ile tahmin modelleri sonucu elde edilen tahmin sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 8.4'te verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın sonuçlar kuadratik denklemlerle elde edilen tahmin değerleri olmuştur.



Şekil 8.4. Deney sonuçları ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

## 8.2. TAKIM ÖMRÜ ANALİZİ

### 8.2.1. S/N Oranlarının Analizi

İşlenebilirliğin değerlendirilmesi için kullanılan çıktı parametrelerinden biri de takım ömrüdür [98]. Kesme parametrelerinin optimum seviyelerinin belirlenmesinde S/N oranları kullanılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde amaç en büyük takım ömrü değerini elde etmek olduğu için S/N (sinyal/gürültü) oranlarının hesaplanmasında “en büyük en iyi” değerini veren Eşitlik (8.4) tercih edilmiştir.

$$S/N = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (8.4)$$

Burada;

Y : Performans karakteristik değeri (takım ömrü)

n : Y değerlerinin sayısıdır.

Çizelge 8.4'te deneyler sonucunda elde edilen takım ömrü değerleri ve bunlara karşılık gelen S/N oranları yer almaktadır. Deney sonuçlarına göre ortalama takım ömrü değeri 31,03 dakika olurken buna karşılık gelen ortalama S/N değeri 27,33 dB olmuştur.

Çizelge 8.4. Takım ömrü için deney sonuçları ve S/N oranları.

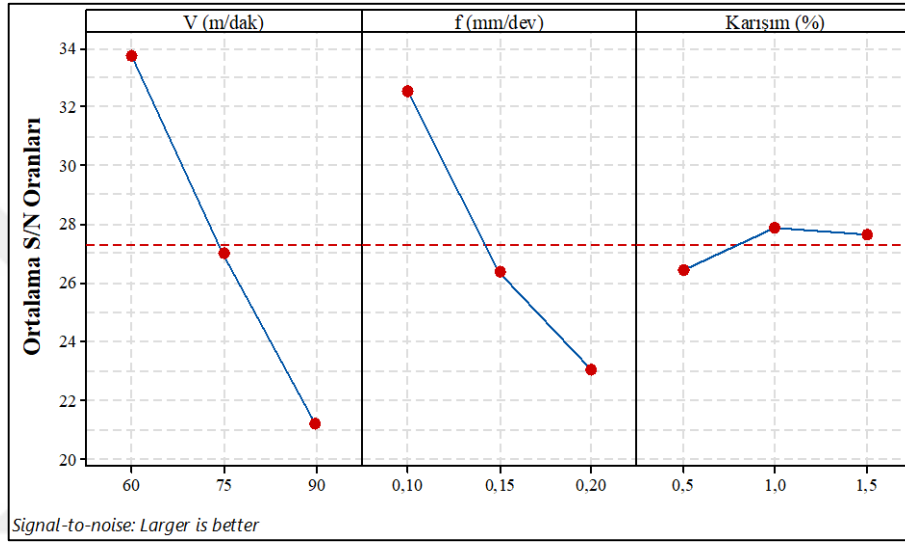
Den No.	Kontrol faktörleri			Takım ömrü, (dak)	S/N oranı (dB)
	A Kesme hızı (V) (m/dak)	B İlerleme hızı (f) (mm/dev)	C Nanopartikül oranı (%)		
1	60	0,10	0,5	85,4	38,63
2	60	0,10	1,0	95,5	39,60
3	60	0,10	1,5	93,0	39,37
4	60	0,15	0,5	36,9	31,33
5	60	0,15	1,0	40,2	32,08
6	60	0,15	1,5	43,6	32,78
7	60	0,20	0,5	28,9	29,22
8	60	0,20	1,0	31,4	29,94
9	60	0,20	1,5	32,7	30,28
10	75	0,10	0,5	40,2	32,09
11	75	0,10	1,0	44,2	32,92
12	75	0,10	1,5	46,2	33,30
13	75	0,15	0,5	17,4	24,82
14	75	0,15	1,0	21,4	26,63
15	75	0,15	1,5	22,8	27,15
16	75	0,20	0,5	11,1	20,87
17	75	0,20	1,0	14,1	22,97
18	75	0,20	1,5	13,1	22,33
19	90	0,10	0,5	16,7	24,48
20	90	0,10	1,0	21,8	26,75
21	90	0,10	1,5	18,4	25,30
22	90	0,15	0,5	10,0	20,04
23	90	0,15	1,0	12,3	21,78
24	90	0,15	1,5	11,2	20,95
25	90	0,20	0,5	6,7	16,52
26	90	0,20	1,0	8,4	18,46
27	90	0,20	1,5	6,7	16,52

Takım ömrüne etki eden kontrol faktörlerinin her birini analiz etmek için S/N yanıt tablosu kullanılmıştır. Takım ömrüne ait S/N yanıt tablosu Çizelge 8.5'te verilmiştir. Çizelge 8.5'te verilen takım ömrü değerleri için kontrol faktörlerinin seviye değerleri

Şekil 8.5'te ki grafikte gösterilmiştir.

Çizelge 8.5. S/N yanıt tablosu.

Seviyeler	Kontrol faktörleri		
	A	B	D
Seviye 1	<b>33,69</b>	<b>32,49</b>	26,44
Seviye 2	27,01	26,40	<b>27,90</b>
Seviye 3	21,20	23,01	27,63
Delta	12,49	9,48	1,46



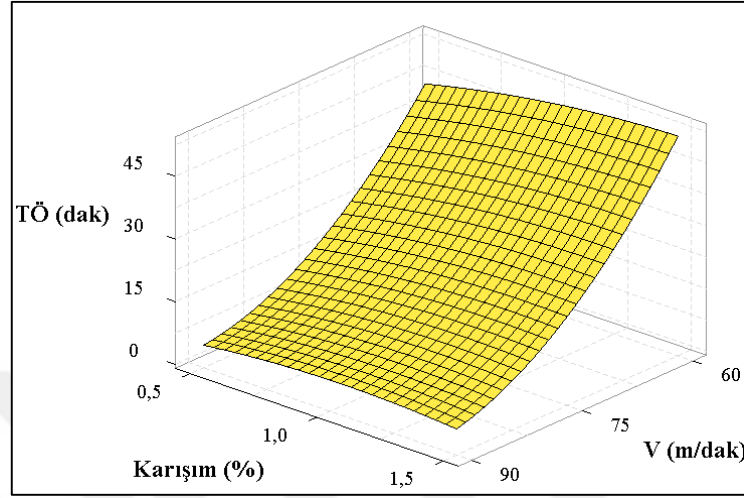
Şekil 8.5. Takım ömrü için S/N oranları ana etki grafiği.

Bir kontrol faktörü için optimum seviye o kontrol faktörünün tüm seviyeleri içerisindeki en büyük S/N oranı ile bulunmuştur. Buna göre, en iyi takım ömrü değeri için kontrol faktörleri ve S/N oranları sıralanırsa, faktör A (Seviye 1, S/N=33,77), faktör B (Seviye 1, S/N=32,57) ve faktör C (Seviye 2, S/N=27,90) olarak belirlenmiştir. Bir başka deyişle, optimum takım ömrü değerini veren parametreler; 60 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme hızı ve %1 nanopartikül içeren kesme sıvısı ile elde edilmiştir (Şekil 8.5).

### 8.2.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

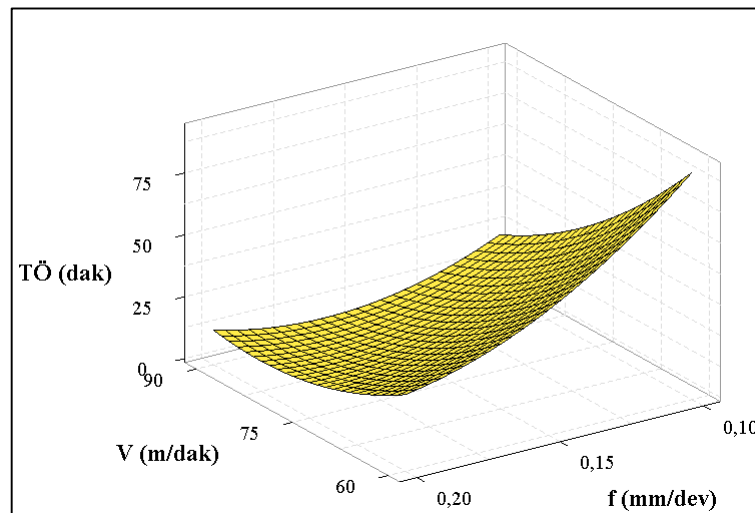
İşleme parametreleri ve seviyelerine bağlı olarak takım ömründeki değişimleri gösteren yüzey grafikleri Şekil 8.6 ve Şekil 8.7'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde kesme yağı içerisindeki nanopartikül oranının takım ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir. Ancak kendi içinde değerlendirildiğinde düşük karışım oranında takım ömrünün düşük olduğu karışım oranının %1 seviyesine çıkması ile birlikte takım ömrünün arttığı ancak karışım oranının %1,5 seviyesine çıkması ile birlikte takım

ömründe az da olsa bir düşüş olduğu görülmektedir (Şekil 8.6). Bunun sebebinin ise nanopartiküllerin oranın belli bir seviyenin üzerine çıkması ile birlikte çökme olduğu ve kesme sıvısının kesme bölgesine nüfuziyetinin azalması neticesinde olduğu söylenebilir [99].



Şekil 8.6. Kesme hızına ve nanoyağlayıcı karışım oranına göre takım ömrü.

Şekil 8.6’da verilen ve kesme hızına bağlı olarak takım ömründeki değişim incelendiğinde kesme hızının artması ile birlikte takım ömrünün azaldığı görülmektedir. Kesme hızının artması ile birlikte takım-talaş ara yüzünde oluşan ısının artması kesici takımın aşınmasını tetiklemektedir. Ayrıca kesme hızının artması ile birlikte oluşan talaş hacminin artması ve dolayısıyla sürtünmenin artması da takım ömrünü olumsuz anlamda etkilemektedir [100]. İlerleme hızına bağlı olarak takım ömründeki değişimi gösteren grafik incelendiğinde, ilerlemenin artması ile birlikte takım ömrünün azaldığı görülmektedir (Şekil 8.7).



Şekil 8.7. Kesme hızına ve ilerleme hızına göre takım ömrü değişimi.

### 8.2.3. ANOVA

Hastelloy C276 süper alaşımının frezelenmesi ile elde edilen takım ömrü deneylerine ait ANOVA sonuçları Çizelge 8.6’da verilmiştir. Deney sonuçları üzerinde yapılan analiz %95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül karışım oranına ait P değerinin 0,05’ten büyük olması bu faktörün takım ömrü üzerinde belirli bir etkiye sahip olmadığını gösterir. Faktörlere ait katkı oranlarının belirlenmesinde F değerleri dikkate alınmıştır. Çizelge 8.6’ya göre takım ömrü üzerinde faktör A, B ve C’nin yüzde katkıları sırasıyla %49,1, %35,7 ve %0,7 olarak bulunmuştur. Böylece takım ömrünü etkileyen en önemli faktörün kesme hızı (faktör A) olduğu tespit edilmiştir. Hata yüzdesi ise %14,5 olarak bulunmuştur. ANOVA tablosundaki veriler dikkate alınarak istatistiksel veriler ile deney sonuçlarının birbirini doğrular nitelikte olduğu söylenebilir.

Çizelge 8.6. Takım ömrü için ANOVA tablosu.

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	2	8536,1	4268,05	33,78	0,000	49,1
B	2	6222,5	3111,27	24,63	0,000	35,7
C	2	113,5	56,76	0,45	0,644	0,7
Hata	20	2526,6	126,33	-	-	14,5
Toplam	26	17398,8	-	-	-	100,0

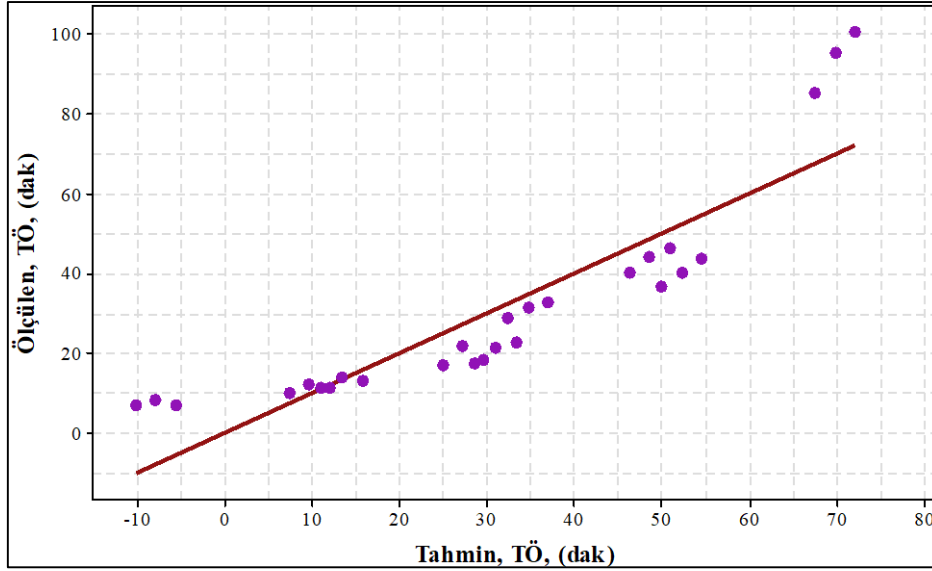
### 8.2.4. Regresyon Analizi

Hastelloy C276 süper alaşımının frezelenmesi sonucu elde edilen takım ömrü değerlerinin tahmin eşitliğinin oluşturulmasında çoklu regresyon analizi kullanılmıştır. Takım ömrünün lineer regresyon modeli için elde edilen tahmin eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$TÖ(dk) = 185,4 - 1,418 * V(m/dk) - 351,2 * f(mm/dev) + 4,64 * Karışım(\&) \quad (8.5)$$

$$R^2 = \%85,48 \quad R^2 \text{ (Düzeltilmiş)} = \%81,12$$

Şekil 8.12’de deneysel sonuçlar ve regresyon modeli aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerine ait karşılaştırma verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere gerçek değerler ile tahmin değerleri arasında yüksek bir ilişki vardır. Takım ömrü için elde edilen denklemin  $R^2$  değeri %85,48 olarak bulunmuştur.



Şekil 8.12. Ölçülen takım ömrü değerleri ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

### 8.2.5. Takım Ömrüne Ait Genel Değerlendirme

Nikel esaslı bir süper alaşım olan Hastelloy C276'nın frezelenmesinde işleme parametrelerinin takım ömrü üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde en yüksek takım ömrü 60 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme hızı ve %1 oranında nanoyağlayıcı içeren kesme sıvısının kullanıldığı durumda ortaya çıktığı görülmektedir. Kesme hızının artması ile kesme bölgesindeki sürtünme ve dolayısıyla sıcaklığın artması sonucunda takım ömründe azalma görülmüştür. İlerleme en düşük değerde en yüksek takım ömrünü verirken ilerlemenin artması da takım ömrünün azalmasına neden olmuştur. Kesme sıvısı içerisine çeşitli oranlarda katılan nanoyağlayıcı açısından takım ömrüne bakıldığında, yağlayıcı oranının belli bir yere kadar artması takım ömrünün artmasına yardımcı olmuş olsa da bir noktadan sonra takım ömrünün azalmasına neden olmuştur. Bunun sebebinin ise gereğinden fazla partikülün kesme sıvısının içerisine konulmasının çökelmeye neden olduğu düşünülmektedir.

## 8.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ANALİZİ

### 8.3.1. S/N Oranlarının Analizi

Çalışmanın bu bölümünün hedefi en küçük yüzey pürüzlülük değerini elde etmek olduğundan S/N oranlarının hesaplanmasında “en küçük en iyi” değerini veren Eşitlik (8.6) kullanılmıştır. Ayrıca, Çizelge 8.7’de deneyler aracılığıyla elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ve bu değerlere ait S/N oranları bulunmaktadır.

Deney sonuçlarına göre ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0,37 µm olurken ortalama S/N değeri 8,72 dB olmuştur.

$$S/N = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (8.6)$$

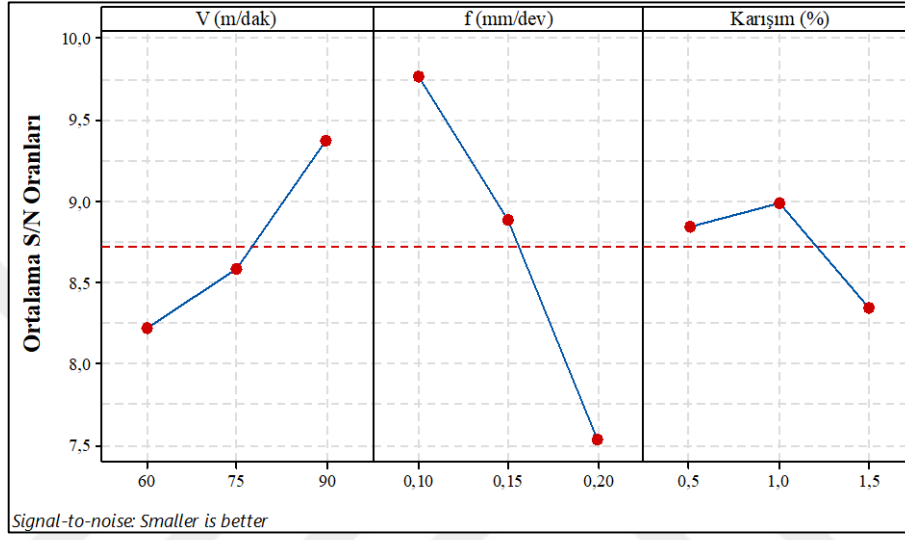
Çizelge 8.7. Takım ömrü için deney sonuçları ve S/N oranları.

Den No.	Kontrol faktörleri			Yüzey pürüzlülüğü, (µm)	S/N oranı (dB)
	A Kesme hızı (V) (m/dak)	B İlerleme hızı (f) (mm/dev)	C Nanopartikül oranı (%)		
1	60	0,10	0,5	0,38	8,40
2	60	0,10	1,0	0,35	9,12
3	60	0,10	1,5	0,37	8,64
4	60	0,15	0,5	0,38	8,40
5	60	0,15	1,0	0,36	8,87
6	60	0,15	1,5	0,4	7,96
7	60	0,20	0,5	0,4	7,96
8	60	0,20	1,0	0,38	8,40
9	60	0,20	1,5	0,49	6,20
10	75	0,10	0,5	0,28	11,06
11	75	0,10	1,0	0,35	9,12
12	75	0,10	1,5	0,37	8,64
13	75	0,15	0,5	0,39	8,18
14	75	0,15	1,0	0,37	8,64
15	75	0,15	1,5	0,38	8,40
16	75	0,20	0,5	0,41	7,74
17	75	0,20	1,0	0,4	7,96
18	75	0,20	1,5	0,42	7,54
19	90	0,10	0,5	0,29	10,75
20	90	0,10	1,0	0,28	11,06
21	90	0,10	1,5	0,28	11,06
22	90	0,15	0,5	0,32	9,90
23	90	0,15	1,0	0,31	10,17
24	90	0,15	1,5	0,34	9,37
25	90	0,20	0,5	0,44	7,13
26	90	0,20	1,0	0,42	7,54
27	90	0,20	1,5	0,43	7,33

Yüzey pürüzlülük değerlerine ait S/N yanıt tablosu Çizelge 8.8’de verilmiştir. Burada verilen yüzey pürüzlülük değerleri için kontrol faktörlerinin seviye değerlerinin gösteren grafik Şekil 8.13’te verilmiştir.

Çizelge 8.8. S/N yanıt tablosu.

Seviyeler	Kontrol faktörleri		
	A	B	D
Seviye 1	8,22	<b>9,76</b>	8,84
Seviye 2	8,59	8,88	<b>8,99</b>
Seviye 3	<b>9,37</b>	7,53	8,35
Delta	1,15	2,23	0,64

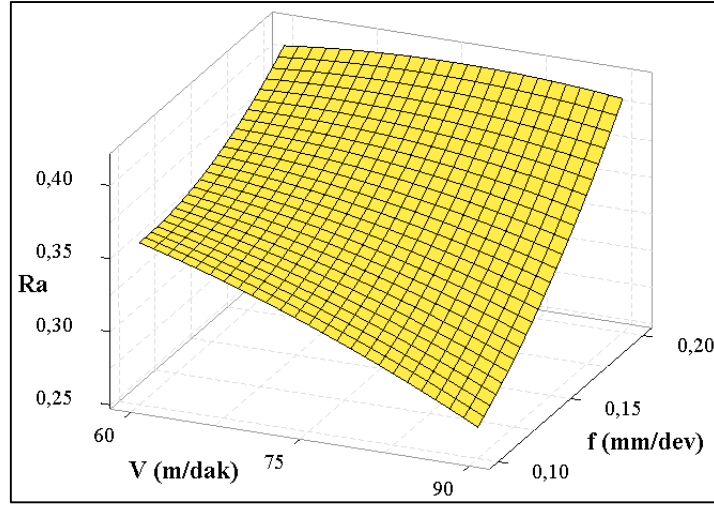


Şekil 8.13. Yüzey pürüzlülüğü için S/N oranları ana etki grafiği.

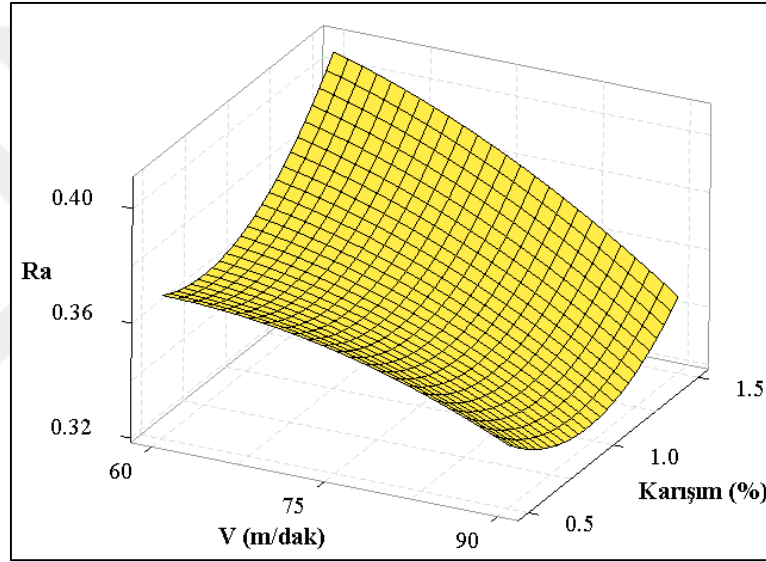
Bir kontrol faktörü için optimum seviyenin o kontrol faktörüne ait en büyük S/N değeri olduğu göz önünde bulundurularak en iyi yüzey pürüzlülük değeri için faktörlerin durumu, faktör A (Seviye 3, S/N=9,37), faktör B (Seviye 1, S/N=9,76) ve faktör C (Seviye 2, S/N=8,99) olarak belirlenmiştir. Buna göre en iyi yüzey pürüzlülük değerini 90 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme hızı ve %1 nanopartikül içeren kesme sıvısının oluşturduğu kombinasyon vermiştir.

### 8.3.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmadaki talaş kaldırma parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişimi gösteren yüzey grafikleri Şekil 8.14 ve Şekil 8.15’de verilmiştir.



Şekil 8.14. Kesme hızına ve ilerleme hızına göre yüzey pürüzlülüğü değişimi.



Şekil 8.15. Kesme hızına ve karışım oranına bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.

Şekil 8.14'te verilen ve kesme hızındaki değişime bağlı olarak yüzey kalitesindeki değişimi gösteren bölüm incelendiğinde, kesme hızının artması ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve işlenmiş yüzey kalitesinin arttığı görülmektedir. Bu durum kesme hızıyla birlikte kesme sıcaklığının artması, kesme bölgesinde iş parçası malzemesinin yumuşaması ve dolayısıyla kesmenin daha kolay olmasıyla açıklanabilir. Kesici takım aşınmadığı sürece bu bölgede artan sıcaklıklar kesmeyi kolaylaştırıcı ve bu nedenle de yüzey kalitesini iyileştirici bir etki göstermektedir. Yine Şekil 8.14'te verilen ve ilerleme hızındaki değişimin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini gösteren bölüm incelendiğinde ilerlemenin artması ile birlikte yüzey pürüzlülüğünde önemli bir artış olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ilerlemenin doğal bir fonksiyonudur ve kesici takım uç radiusuna da bağlı olarak kesici takımın ilerleme değerinin artması işlenen yüzey üzerindeki kesici ucun daha hızlı hareket etmesi ve yüzeyde oluşacak

çukurcukların artması anlamına gelmektedir. Şekil 8.15'te ise kesme sıvısı içerisindeki nanoyağlayıcı oranının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde %1 karışım oranının en iyi sonucu verdiği görülürken %1,5 oranının en kötü sonucu verdiği görülmektedir (Şekil 8.15).

### 8.3.3. ANOVA

Yüzey pürüzlülüğü deneylerine ait ANOVA sonuçları Çizelge 8.9'da verilmiştir. Deney sonuçları üzerinde yapılan analiz %95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül karışım oranına ait P değerinin 0,05'ten büyük olması bu faktörün yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirli bir etkiye sahip olmadığını gösterir. Faktörlere ait etki katkı oranlarının belirlenmesinde F değerleri dikkate alınmıştır. Çizelge 8.9'a göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde faktör A, B ve C'nin yüzde katkıları sırasıyla %12,8, %56,2 ve %5,6 olarak bulunmuştur. Böylece yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün ilerleme hızı (faktör B) olduğu tespit edilmiştir. Hata yüzdesi ise %25,4 olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.9. Takım ömrü için ANOVA tablosu.

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	2	0,009156	0,004578	5,04	0,017	12,8
<b>B</b>	<b>2</b>	<b>0,040267</b>	<b>0,020133</b>	<b>22,18</b>	<b>0,000</b>	<b>56,2</b>
C	2	0,004022	0,002011	2,22	0,135	5,6
Hata	20	0,018156	0,000908	-	-	25,4
Toplam	26	0,071600	-	-	-	100,0

### 8.3.4. Regresyon Analizi

Hastelloy C276 süper alaşımının frezelenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tahmin eşitliğinin oluşturulmasında çoklu regresyon analizi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün lineer regresyon modeli için elde edilen tahmin eşitliği aşağıdadır;

$$Ra(\mu m) = 0,32 - 0,001481 * V + 0,933 * f + 0,0211 * Karışım(\%) \quad (8.7)$$

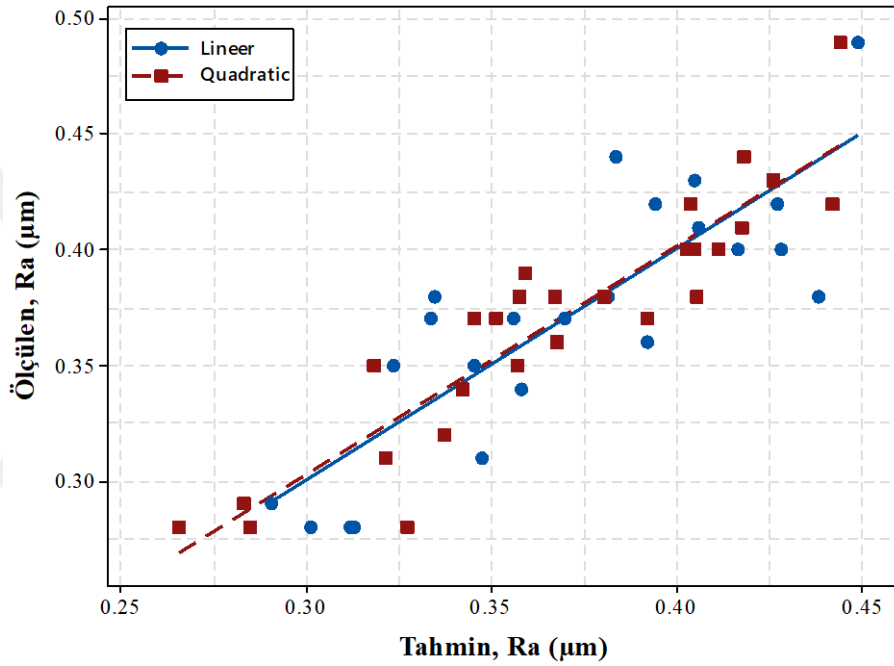
$$R^2 = \%69,96 \quad R^2 \text{ (Düzeltilmiş)} = \%66,05$$

Ancak burada R<sup>2</sup> düşük çıktığı için tahmin değerleri ile ölçülen değerler arasındaki farklar fazla olacaktır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırıp daha yüksek tahmin değeri elde etmek için faktörlerin birbirleriyle etkileşimlerini de hesaba katan quadratic denklem oluşturulmuş ve Formül 8.8'de verilmiştir.

$$Ra = 0,594 - 0,00043V(m/dk) - 2,98f(mm/dev) - 0,052Karışım(\%) - 0,000030v * v + 5,33f * f + 0,0733\% * \% + 0,03000v * f - 0,001111v * \% + 0,067f * \% \quad (8.8)$$

$$R2 = \%84,34 \quad R2 \text{ (Düzeltilmiş)} = \%76,05$$

Şekil 8.16'da deneysel sonuçlar ve regresyon modelleri aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerine ait karşılaştırma verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki en yüksek ilişki quadratic denklem aracılığıyla elde edilmiştir.



Şekil 8.16. Ölçülen deney sonuçları ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

### 8.3.5. Yüzey Pürüzlülüğüne Ait Genel Değerlendirme

Çalışmanın bu bölümünde Hastelloy C276'nın frezelenmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel ve istatistiksel analizlere göre en düşük yüzey pürüzlülüğü 90 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme hızı ve %1 oranında nanoyağlayıcı içeren kesme sıvısının kullanıldığı durumda ortaya çıktığı görülmektedir. Kesme hızının artması ile takım talaş temiz alanındaki azalmaya bağlı olarak yüzey kalitesinin daha iyi çıktığı düşünülmektedir. İlerleme hızı en düşük değerde en yüksek yüzey kalitesini vermiş ve ilerleme hızının artması ile birlikte yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir artış görülmüştür. Kesme sıvısı içerisine çeşitli oranlarda katılan nanoyağlayıcı açısından yüzey pürüzlülüğüne bakıldığında ise yağlayıcı oranının belli bir yere kadar artması yüzey kalitesinin artmasına yardımcı olmuş belli bir noktadan

sonra işlenmiş yüzey kalitesinin azalmasına neden olmuştur. Bunun sebebinin ise gereğinden fazla partikülün kesme sıvısının içerisinde konulmasının çökelmeye neden olması ve buna bağlı olarak kesme sıvısının takım talaş ara yüzeyine nüfuziyetinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 9.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada, CVD yöntemiyle kaplanmış karbür uçlar kullanarak Hastelloy C276 süper alaşımının frezelenmesinde takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen işleme parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodu kullanılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünü optimize etmek için kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin belirlenmesinde S/N oranları kullanılmıştır.
2. Minimum miktarda yağlama (MMY) parametrelerinin optimizasyonu için yapılan deneylere göre optimum MMY parametreleri 100 ml/h debi (A<sub>3</sub>), 45° püskürtme açısı (B<sub>2</sub>) ve 8 bar basınç (C<sub>3</sub>) olarak belirlenmiştir.
3. CVD kaplamalı karbür takımlar için en uzun takım ömrü değeri 60 m/dak kesme hızı (A<sub>1</sub>), 0,10 mm/dev ilerleme hızı (B<sub>1</sub>) ve %1 oranında nanopartikül içeren karışım (C<sub>2</sub>) ile elde edilmiştir.
4. Optimum yüzey pürüzlülüğü değeri 90 m/dak kesme hızı (A<sub>3</sub>), 0,10 mm/dev ilerleme hızı (B<sub>1</sub>) ve %1 oranında nanopartikül içeren karışım (C<sub>2</sub>) ile elde edilmiştir.
5. MMY parametrelerinin elde edilmesi için yapılan deneylere göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde %74,6 katkı oranı ile en etkili parametre debi olduğu görülmüştür.
6. Takım ömrü deneylerinde en etkili parametre kesme hızı (%49,1) çıkarken yüzey pürüzlülüğü deneylerinde %56,8 katkı oranı ile en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu tespit edilmiştir.
7. MMY parametrelerinin optimize edilmesi için yapılan deney sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğünün tahmininde lineer regresyon modelinin R<sup>2</sup> değeri 86,99 olurken kuadratik regresyon denkleminde ait R<sup>2</sup> değeri 0,9607 olarak elde edilmiştir.

8. Takım ömrü değerlerinin tahmininde regresyon modeli ile oluşturulan eşitliklerin  $R^2$  değeri 85,48 çıkarken yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tahmini için  $R^2$  değeri 84,34 olarak elde edilmiştir.

## 9.2. ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada ilk olarak ana deneylerde kullanılacak MMY parametrelerini optimize etmek için bir dizi deney yapılmış ve MMY sistemine ait debi, püskürtme açısı ve püskürtme mesafesi gibi parametreler belirlenmiştir. Daha sonra bu MMY değerleri kullanılarak ana deneyler yapılmış ve burada CVD kaplamalı karbür takımların kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrünün ölçüldüğü bir dizi deney yapılmıştır. En son olarak da deney sonuçları ve bazı istatistiksel yöntemler kullanılarak çalışmanın üreteceği katma değerler ortaya konulmuştur. Bunlardan farklı olarak yapılabilecek çalışma önerileri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Kesici takım özellikleri ve işleme parametreleri değiştirilerek yeni takım ve kaplama türlerinin işlenebilirlik üzerindeki etkileri incelenebilir.
2. MMY sistemi kendi içerisinde birçok değişkeni de barındırmaktadır. Bu çalışmada debi, püskürtme açısı ve püskürtme basıncı denenmiştir ancak bu parametreler değiştirilerek MMY sisteminin işlenebilirliğe etkisi araştırılabilir.
3. Bu çalışmada kullanılan nanoyağlayıcı değiştirilebilir veya farklı oranlardaki karışımların işlenebilirlik üzerindeki etkileri incelenebilir.
4. Deneyler esnasında kullanılan malzeme ve talaş kaldırma türü değiştirilebilir.

## 10. KAYNAKLAR

- [1] N. Tosun, C. Kuru, E. Altıntaş, ve O. E. Erdin, “Hava ve geleneksel soğutma yöntemi ile frezelemede yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 25, sayı 1, ss. 141–146, 2010.
- [2] A. Öndaş, “Sert tornalama işleminde minimum miktarda yağlama yönteminin etkisinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2016.
- [3] W. Grzesik, “*Advanced Machining Processes of Metallic Materials*,” içinde Theory, Modeling and Applications, 1. baskı, Oxford, UK: Elsevier Science, 2008, ss.78-79.
- [4] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, ve F. Erzincanlı, “Minimum miktarda yağlama tekniğinin tornalama ve frezeleme işlemlerindeki uygulamaları üzerine bir derleme,” 6. *Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2015, ss. 247–263.
- [5] R. U. Shingarwade and P. S. Chavan, “A review on mql in reaming,” *International Journal of Mechanical Engineering Robotics Research*, c. 3, sayı 3, ss. 1–2, 2014.
- [6] R. M. Mortier, M. F. Fox, and S. T. Orszulik, *Chemistry and Technology Of Lubricants*, 3. baskı, Berlin, Germany: Springer, 2010, ss.45-46.
- [7] E. Kuram, B. Ozcelik, E. Demirbas, E. Şik, ve I. N. Tansel, “Evaluation of new vegetable-based cutting fluids on thrust force and surface roughness in drilling of AISI 304 using Taguchi method,” *Materials and Manufacturing Processes*, c. 26, sayı 9, ss. 1136–1146, 2011.
- [8] S. A. Lawal, I. A. Choudhury, and Y. Nukman, “Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals - A review,” *International Journal of Machine Tools Manufacture*, c. 52, sayı 1, ss. 1–12, 2012.
- [9] H. Demir, H. B. Ulaş, ve M. Zeyveli, “Talaşlı üretimde kullanılan kesme sıvılarından istenen özellikler,” 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 2009, ss. 1–3.
- [10] V. P. Astakhov, “*Ecological Machining*” içinde Dry Machining, 1. baskı, London, UK: Springer, 2008, ss. 25-26.
- [11] V. S. Sharma, M. Dogra, and N. M. Suri, “Cooling techniques for improved productivity in turning,” *International Journal of Machine Tools Manufacture*, c. 49, sayı 6, ss. 435–453, 2009.
- [12] L. Dan and J. Mathew, “Tool wear and failure monitoring techniques for turning,” *International Journal of Machine Tools Manufacture*, c. 30, sayı 4, ss. 579–598, 1990.
- [13] K. Kılıçay, “AISI 1020 çeliğinin frezelenmesinde katı yağlayıcı kullanımının araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2012.
- [14] Y. Yürekli, “Frezeleme işleminde eş yönlü ve ters yönlü talaş kaldırmanın

- Cvd/Pvd kaplanmış sert metal uçların ömrüne etkisi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [15] G. Tlustý, *Manufacturing Process and Equipment*, 1. baskı, New Jersey, USA: Prentice Hall, 2000, ss. 201-203.
- [16] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 7. baskı, New York, USA: Prentice Hall, 2006, ss. 624-626
- [17] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 2. baskı, New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 2002, ss. 34-37.
- [18] M. C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*, 1. Bölüm Bursa, Türkiye: Vipaş Yayınları, 2000.
- [19] E. Şirin, “AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezede işlenebilirliğinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [20] M. Aydın, “Parmak freze takımı ile talaş kaldırmada kesme kuvvetleri ve boyut hatalarının kesme kuvveti dağılımı metodu ile analizi,” Doktora tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2014.
- [21] E. O. Ezugwu, “Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys,” *International Journal of Machine Tools Manufacture*, c. 45, sayı 12–13, ss. 1353–1367, 2005.
- [22] M. C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalatın Esasları*, 1. Bölüm Bursa, Türkiye: Ceylan Matbaacılık, 1999.
- [23] U. Şeker ve M. Günay, İM 322-kesici takım tasarımı, *Ders Notları*, Ankara, 2008.
- [24] S. Filiz, “Alüminyum alaşımlarının frezelenmesinde kesme parametrelerinin ve soğutma şartlarının işlenebilirliğe etkisinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye, 2015.
- [25] M. Bayrak, “Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi ve uzman sistemle karşılaştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2002.
- [26] M. Kurt, *Talaşlı İmalat Yöntemleri ve Takım Tezgahları*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 1996, böl. 4, ss. 141-143.
- [27] J. F. W. Galýer, *Metrology for Engineers*, 9. baskı, London, UK: Cassel Publishers Limited, 1993, ss.67-68.
- [28] A. M. Pınar, K. Fırat, A. F. Pınar, ve S. Filiz, “Kanal torna kaleminin yüzey pürüzlülük performansının optimizasyonu,” 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 2012, ss. 4–5.
- [29] B. Özses, “Bilgisayar Sayısal denetimli takım tezgahlarında değişik işleme koşullarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 17, sayı 1, ss. 59-75, 2002
- [30] A. J. T. Scar, *Metrology and Precision Engineering*, 1. baskı, New York, United States: Mc Graw-Hill Publishing Company Limited, 1991, ss.167-169.
- [31] E. S. Gadelmavla and M. M. Koura, “Roughness parameter,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 123, sayı 1, ss. 133–145, 2002.

- [32] A. Altın, “Nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımının işlenebilirliğinin incelenmesi,” Doktora tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2005.
- [33] M. J. Donachie and S. J. Donachie, *Yüksek Çalışma Sıcaklıklarının Inconel 718 Alaşımının Yapısal ve Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*, 2. baskı, New York, USA: ASM International, 2002, ss.57-58.
- [34] C. H. White, “In The Development of Gas Turbine Materials,” içinde *Nickel Base Alloys*, 1. baskı, New Jersey, USA: Springer, 1981, ss. 89–119.
- [35] A. Çini, “Inconel 718 malzemesinin tornalama işleminde yüksek basınçlı jet soğutmanın yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etkisi,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2010.
- [36] Z. İnanır, “Yüksek çalışma sıcaklıklarının inconel 718 alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, İleri Teknolojiler, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [37] S. Sarıköse, “Fe esaslı süperalaşımın tuz banyosunda korozyon davranışının incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.
- [38] A. K. Jena and M. C. Chaturvedi, “The role of alloying elements in the design of nickel-base superalloys,” *Journal of Materials Science*, c. 19, sayı 10, ss. 3121–3139, 1984.
- [39] E. F. Bradley, “*Superalloys*,” içinde *A Technical Guide*, 2. baskı, New York, USA: ASM Intern., 1989, ss.124-125.
- [40] Ç. V. Yıldırım, “Süper alaşımların talaşlı imalat yöntemiyle işlenmesinde minimum miktarda yağlama uygulamaları,” *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 5, sayı 3, ss. 86–105, 2016.
- [41] E. O. Ezugwu, “Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 185, sayı 1–3, ss. 60–71, 2007.
- [42] E. O. Ezugwu, J. Bonney, and Y. Yamane, “An overview of the machinability of aeroengine alloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 134, sayı 2, ss. 233–253, 2003.
- [43] O. Yazıcıoğlu ve B. M. Yazıcıoğlu, *Makina Elemanları*, 1. baskı, Ankara: Nobel Yayınevi, 2011, böl. 2, ss. 56-58.
- [44] G. W. Goward, *Source Book on Materials for Elevated Temperature Application*, 1. baskı, New York, USA: ASM International, 1979, ss.157-158.
- [45] O. Bıyık, “Demir bazlı süperalaşımların işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, İleri Teknolojiler, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2016.
- [46] E. A. Loria, “140 recent developments in the progress of superalloy 718,” *JOM*, c. 44, sayı 6, ss. 33–36, 1992.
- [47] V. V. Cay ve S. Ozan, “Süper alaşımlar ve uygulama alanları,” *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, c. 178, ss. 178–188, 2005.

- [48] A. Altın, H. Gökkaya, ve M. Nalbant, “İşleme parametrelerinden kesme hızının Inconel 718 süperalaşımının işlenebilirliğine etkisi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 21, sayı 3, ss. 581–586, 2006.
- [49] T. Kıvak ve K. Habalı, “Inconel 718’in delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin araştırılması,” *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 2009, ss. 286–292.
- [50] M. İlhan, “Talaş kaldırma işlemlerinde minimum miktarda yağlama (MQL) uygulamasının kesme hızı ve yağlama debisinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [51] K. Aggeliki. (2011, 16 Ekim). *Hydrostatic Lubrication*. [Online]. Erişim: <https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/73568-hydrostatic-lubrication>.
- [52] Y. Şahin, *Talaş Kaldırma Prensipleri I*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayınevi, 2002, böl. 3, ss. 78-79.
- [53] R. Bassani and B. Piccigallo, *Hydrostatic Lubrication*, 1. baskı, New York, USA: Elsevier, 1992, ss.65-66.
- [54] Anonim, (2018, 10 Şubat). *What is coolant?* [Online]. Erişim: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.coolantmaintenance.com>.
- [55] M. A. El Baradie, “Cutting Fluids:Part II. recycling and clean machining,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 56, sayı 1–4, ss. 798–806, 1996.
- [56] H. Popke, T. Emmer, and J. Steffenhagen, “Environmentally clean metal cutting processes—machining on the way to dry cutting,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, c. 213, sayı Part B, ss. 329–332, 1999.
- [57] J. M. Vieira, A. R. Machado, and E. O. Ezugwu, “Performance of cutting fluids during face milling of steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 116, sayı 1, ss. 244–251, 2001.
- [58] E. Yücel, M. Günay, M. Ayyıldız, Ö. Erkan, ve F. Kara, “Talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının insan sağlığına etkileri ve sürdürülebilir kullanımı,” *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Türkiye, 2011, ss.116-121.
- [59] Ş. Şirin ve E. Şirin, “Merkezi soğutma sisteminde kullanılan metal işleme sıvılarının insan sağlığına olumsuz etkileri,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 4, sayı 2, ss. 444–457, 2014.
- [60] A. Çakır, “AA 7075 ve AA2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi,” Tübitak, Türkiye, Rap. 115M106, 2015.
- [61] S. Tumis, J. Xu, and K. Weinert, “Dry cutting and minimum quantity lubrication (MQL) machining of low-sulfur stainless steel as a contribution to sustainable manufacturing,” *15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Sidney, Avustralya, 2008, ss. 618-623.
- [62] A. T. Kuzu, “Kompakt Grafitli dökme demirin delik delme işleminin incelenmesi ve sıcaklık modelinin oluşturulması,” Doktora tezi, Makine Mühendisliği, Fen

Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2016.

- [63] K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland, and T. Wakabayashi, “Dry machining and minimum quantity lubrication,” *CIRP Annals Manufacturing Technology*, c. 53, sayı 2, ss. 511-537, 2004.
- [64] F. Klocke and G. Eisenblätter, “Dry cutting,” *CIRP Annals Manufacturing Technology*, c. 46, sayı 2, ss. 519–526, 1997.
- [65] A. Filipovic and D. A. Stephenson, “Minimum quantity lubrication (MQL) applications in automotive power-train machining,” *Machining Science and Technology*, c. 10, sayı 1, ss. 3–22, 2006.
- [66] E. A. Rahim and H. Sasahara, “A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys,” *Tribology International*, c. 44, sayı 3, ss. 309–317, 2011.
- [67] B. Tasdelen, T. Wikblom, and S. Ekered, “Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 200, sayı 1, ss. 339–346, 2008.
- [68] D. U. Braga, A. E. Diniz, G. W. Miranda, and 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.
- [69] R. Heinemann, S. Hinduja, G. Barrow, and G. Petuelli, “Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 46, sayı 1, ss. 1–6, 2006.
- [70] M. Rahman, A. S. Kumar, and M. U. Salam, “Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 42, sayı 5, ss. 539–547, 2002.
- [71] L. L. De Lacalle, C. Angulo, A. Lamikiz, and J. A. Sanchez, “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.
- [72] Z. Q. Liu, X. J. Cai, M. Chen, and Q. L. An, “Investigation of cutting force and temperature of end-milling Ti–6Al–4V with different minimum quantity lubrication (MQL) parameters,” *Part B Journal of Engineering and Manufacturing*, c. 225, sayı 8, ss. 1273–1279, 2011.
- [73] N. Tosun and M. Huseyinoglu, “Effect of MQL on surface roughness in milling of AA7075-T6,” *Material and Manufacturing Processes*, c. 25, sayı 8, ss. 793–798, 2010.
- [74] N. R. Dhar, M. W. Islam, S. Islam, and M. A. H. Mithu, “The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 171, sayı 1, ss. 93–99, 2006.
- [75] M. Hadad and B. Sadeghi, “Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy,” *Journal of Cleaner Production*, c. 54, sayı 1, ss. 332–343, 2013.
- [76] Y. Kamata and T. Obikawa, “High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 192, sayı 1, ss. 281–286, 2007.

- [77] N. R. Dhar, M. Kamruzzaman, and M. Ahmed, "Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 172, sayı 2, ss. 299–304, 2006.
- [78] L. M. Barczak, A. D. L. Batako, and M. N. Morgan, "A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 50, sayı 11, ss. 977–985, 2010.
- [79] L. R. da Silva, E. C. Bianchi, R. Y. Fusse, R. E. Catai, T. V. França, and P. R. Aguiar, "Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 47, sayı 2, ss. 412–417, 2007.
- [80] M. H. Sadeghi, M. J. Haddad, T. Tawakoli, and M. Emami, "Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 44, sayı 5–6, ss. 487–500, 2009.
- [81] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stöckert, and A. Rasifard, "An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication— MQL grinding," *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, c. 49, sayı 12, ss. 924–932, 2009.
- [82] O. Koçar, "Derin çekme işleminde ürün kalitesinin tahmini ve kontrolü," Doktora tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2014.
- [83] M. Şirvancı, *Kalite İçin Deney Tasarımı*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık, 1997, böl. 4, ss. 88-89.
- [84] C. Hamzaçebi ve F. Kutay, "Taguchi metodu bir uygulama," *Gazi Üniversitesi Teknoloji Dergisi*, c. 6, sayı 3–4, ss. 7–17, 2003.
- [85] D. Taylan, "Taguchi deney tasarımı uygulaması," Yüksek lisans tezi, Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2009.
- [86] Shrikant Borade and M. . Kadam, "Comparison of main effect of vegetable oil and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids used with MQL on surface roughness and temperature," *International Journal of Mechanical Engineering Technology*, c. 7, sayı 1, ss. 203–213, 2016.
- [87] M. Hadi and R. Atefi, "Effect of minimum quantity lubrication with gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on surface roughness in milling AISI D3 steel," *Indian Journal of Science and Technology*, c. 8, sayı 3, ss. 130–135, 2015.
- [88] V. Vasu and G. Pradeep Kumar Reddy, "Effect of minimum quantity lubrication with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining Inconel 600 alloy," *Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, c. 225, sayı 1, ss. 3–16, 2011.
- [89] R. Anburaj and R. Elansezhian, "Investigation on influence of nano cutting fluid in machining of Inconel 718," *Asia Pacific Journal Research*, c. 1, sayı 43, ss. 154–160, 2016.
- [90] M. A. M. Ali, A. N. M. Khalil, A. I. Azmi, and H. M. Salleh, "Optimization of cutting parameters for surface roughness under MQL, using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanolubricant, during turning of Inconel 718," *IOP Conference Series Materials Science and*

*Engineering*, c. 226, sayı 1, ss. 1–7, 2017.

- [91] A. N. M. Khalil, M. A. M. Ali, and A. I. Azmi, “Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanolubricant with SDBS on tool wear during turning process of AISI 1050 with minimal quantity lubricant,” *Procedia Manufacturing*, c. 2, sayı 2, ss. 130–134, 2015.
- [92] A. Uysal, “Ferritik paslanmaz çeliğin nano MoS<sub>2</sub> parçacık takviyeli kesme sıvısı kullanılarak MQL yöntemi ile frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 7, sayı 1, ss. 151–158, 2016.
- [93] A. Uysal, “Ferritik paslanmaz çeliğin çok duvarlı karbon nanotüp katkılı kesme sıvısı kullanılarak minimum miktarda yağlama yöntemi ile frezelenmesinde kesme sıcaklığının incelenmesi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 32, sayı 3, ss. 645–650, 2017.
- [94] D. T. Minh, L. T. The, and N. T. Bao, “Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in minimum quantity lubrication in hard milling of 60Si<sub>2</sub>Mn steel using cemented carbide tools,” *Advances in Mechanical Engineering*, c. 9, sayı 7, ss. 168–176, 2017.
- [95] S. Khandekar, M. R. Sankar, V. Agnihotri, and J. Ramkumar, “Nano-cutting fluid for enhancement of metal cutting performance,” *Material Manufacturing Processes*, c. 27, sayı 9, ss. 963–967, 2012.
- [96] Ç. V. Yıldırım, T. Kivak, F. Erzincanlı, İ. Uygur, ve M. Sarıkaya, “Optimization of MQL parameters using the Taguchi method in milling of nickel based waspaloy,” *Gazi University Journal Science*, c. 30, sayı 2, ss. 173–186, 2017.
- [97] A. Kumar, P. B. Kumar, and D. R. Parhi, “Intelligent navigation of humanoids in cluttered environments using regression analysis and genetic algorithm,” *Arabian Journal Science and Engineering*, c. 43, sayı 12, ss. 7655-7678, 2018.
- [98] Ç. V. Yıldırım, T. Kivak, ve F. Erzincanlı, “Nikel esaslı waspaloy süper alaşımının seramik takımlarla frezelenmesinde kesme kuvvetinin Taguchi metodu ile optimizasyonu,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 5, sayı 1, ss. 400–414, 2017.
- [99] P. H. Lee, T. S. Nam, C. Li, and S. W. Lee, “Environmentally-friendly nano-fluid Minimum Quantity Lubrication (MQL) meso-scale grinding process using nano-diamond particles,” *2010 International Conference on Manufacturing Automation*, Hong Kong, China, 2010, ss. 44–49.
- [100] V. T. G. Naves, M. B. Da Silva, and F. J. Da Silva, “Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel,” *Wear*, c. 302, sayı 1–2, ss. 1201–1208, 2013.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Fatih GÜNAN  
Doğum Tarihi ve Yeri : İstanbul, 16.10.1988  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : fgunann@gmail.com

## ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İmalat Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Talaşlı İmalat Öğretmenliği	Marmara Üniversitesi	2011
Lise	Makine Bölümü	Haydarpaşa A.M. Lisesi	2006

## YAYINLAR

Günan, F., Kıvak, T., Yıldırım, Ç.V., “Hastelloy C276’nın frezelenmesinde minimum miktarda yağlama parametrelerinin optimizasyonu”, *II. International INES Academic Researches Congress*, 18-21 Ekim 2017, Antalya, Türkiye.