



**GRAFEN NANOPARTİKÜL MQL SOĞUTMA VE YAĞLAMA TEKNİĞİ
KULLANARAK Tİ-6AL-4V ALAŞIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİR
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Kadir ÖZEN

Eskişehir 2022

**GRAFEN NANOPARTİKÜL MQL SOĞUTMA VE YAĞLAMA TEKNİĞİ
KULLANARAK Tİ-6AL-4V ALAŞIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİR
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Kadir ÖZEN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm yüksek lisans ğrencisi Kadir zen'in 'Grafen Nanopartikül MQL Soğutma ve Yağlama Tekniği Kullanarak Ti-6Al-4V Alaşımının Sürdürülebilir İşlenebilirliğinin İncelenmesi' başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınmasını bilimsel ve etik açıdan uygun grlmştr.

Tez Danişmanı

PROF. DR. Oğuz ÇOLAK

ÖZET

GRAFEN NANOPARTİKÜL MQL SOĞUTMA VE YAĞLAMA TEKNİĞİ KULLANARAK Ti-6Al-4V ALAŞIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİR İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Kadir ÖZEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2022

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Ti-6Al-4V alaşımı üstün mekanik özelliklerinin dolayı uçak, uzay, tıp ve denizcilik gibi endüstrilerde kullanılmaktadır. Titanyum alaşımları gibi talaşlı işlenebilirliği zor malzemelerin talaşlı imalat işlemlerinde ortaya çıkan yüksek ısı ve sürtünmeyi azaltmak için kesme sıvısı kullanımı önemli bir role sahiptir. Ancak geleneksel sentetik kesme sıvılarının zararları ve soğutma özelliklerinin iyileşmesi için yeni çözümler aranmaktadır. Minimum Miktarla Yağlama (MQL) sistemi araştırmacılar tarafından yenilikçi çözüm olarak görülmektedir. Gelişen endüstride MQL sisteminin performansını arttırmak için içerisine nano boyutlu katkı maddeleri kesme sıvısına eklenerek geliştirilebildiği bilinmektedir.

Bu çalışmanın amacı, MQL sisteminin gelişmesinde kesme hızı, ilerleme ve grafen esaslı nanoparçacıkların farklı konsantrasyonunun sürdürülebilir işlenebilirliğe etkilerinin araştırılmasıdır. Bu amaçla 80, 100 ve 120 m/dak kesme hızında, 0.12, 0.18 ve 0.24 ilerlemede baz sıvı, hacimce %0,5 Nano Grafen Parçacık (NGP) katkılı kesme sıvısı ve %1 NGP katkılı kesme sıvısı kullanılarak birçok test gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda kesme sıvısına hacimce %0,5 NGP takviyesinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve yanak aşınmasını (Vb) azalttığı ve baz kesme sıvısına NGP eklenmesinin talaş morfolojisini iyileştirdiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: MQL, Nanografen, Ti-6Al-4V, Kesme Sıvısı, Yüzey Pürüzlülüğü,

Talaş Morfolojisi, İşlenebilirlik

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE SUSTAINABLE WORKABILITY OF TI-6AL-4V ALLOY USING THE GRAPHEN NANOPARTICLE MQL COOLING AND LUBRICATION TECHNIQUE

Kadir ÖZEN

Department of Mechanical Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2022

Supervisor: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Due to its superior mechanical properties, Ti-6Al-4V alloy is used in industries such as aircraft, space, medicine and marine. The use of cutting fluid has an important role in reducing the high heat and friction that occurs in machining processes of difficult-to-cut materials such as titanium alloys. However, new solutions are sought for the harms of conventional cutting fluids and the improvement of their cooling properties. The MQL system is seen by researchers as an innovative solution. In the developing industry, it is known that the performance of the MQL system can be improved by adding nano-sized additives to the cutting fluid.

The aim of this study is to investigate the effects of cutting speed, feed rate and different concentration of nanoparticles on sustainable machinability in the development of the MQL system. For this purpose, many tests were carried out using base fluid, 0.5% Nano Graphene Particle (NGP) added cutting fluid by volume and 1% NGP added cutting fluid at a cutting speed of 80, 100 and 120 m/min, at 0.12, 0.18 and 0.24 feed rates. As a result of the tests, it was observed that 0.5% NGP supplementation by volume in the cutting fluid reduced the surface roughness and flank wear, and the addition of NGP to the base cutting fluid improved the chip morphology.

Keywords: MQL, Nanographene, Ti-6Al-4V, Cutting Fluid, Surface Roughness,

Chip Morphology, Machinability

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu tezin hazırlanması aşamasında gösterdiği her türlü destek ve yardımlarında dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Oğuz Çolak’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın deneysel aşamasında alt yapı imkanlarından faydalanmama imkân veren Eskişehir Teknik Üniversitesi Sn. Prof. Dr. Nuran Ay’a ve Afyon Kocatepe Üniversitesi Sn. Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ’a teşekkürü bir borç bilirim.

Yaşantımın her sürecinde bana desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Kadir ÖZEN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Kadir ÖZEN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABOLAR DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
GÖRESELLER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2.LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	3
3. TEMEL KAVRAMLAR	8
3.1. Titanyum ve Alaşımları.....	8
3.1.1. Ticari saflıktaki titanyum	9
3.1.2. α Titanyum Alaşımları.....	9
3.1.3. $\alpha + \beta$ Titanyum Alaşımları.....	10
3.1.4. β Titanyum Alaşımları	11
3.1.5. Ti-6Al-4V alaşımı.....	11
3.2. Tornalama.....	13
3.3. Talaş Kaldırma Mekanizması	14
3.3.1. Dik (Ortogonal) kesme	15
3.3.2. Eğik (Oblique) kesme	15

3.3.3. Talaş türleri.....	16
3.4 Takım Aşınması.....	17
3.5 Yüzey Pürüzlülüğü.....	18
3.6. Kesme Sıvıları MQL Sistemi ve Nanoakışkanlar.....	20
3.6.1. Kesme Sıvılarının Sınıflandırılması.....	21
3.6.2. Kesme Sıvılarının İnsan Sağlığına Etkisi	23
3.6.3. Minimum Miktarda Yağlama Yöntemi.....	23
3.6.4. Nanoakışkanlar ve özellikleri	26
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
4.1. Deneylerde Kullanılan İş Parçası	28
4.2. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı	28
4.3. Deneylerde Kullanılan Kesici Takım ve Takım Tutucu.....	29
4.4. Deneylerde Kullanılan Minimum Miktarda Yağlama Sistemi.....	30
4.5. Deneylerde Kullanılan Nanoakışkanların Hazırlanması	30
4.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı	32
4.7. Takım Aşınması Ölçülmesi	32
4.8 Deneysel Tasarım ve Kesme Parametreleri.....	33
5. SONUÇ	35
5.1. Kesme Parametreleri ile Nanoakışkan Konsantrasyon Oranının Optimize Edilmesi.....	35
5.1.1. Taguchi L27 deneyleri için S/N oranlarının analizi	35
5.1.2. Varyans analizi (ANOVA)	37
5.1.3. Regresyon analizi.....	38
5.1.4 .Yüzey pürüzlülüğü Ra değerlendirmesi.....	39
5.2 Kesici Takım Aşınması	41
5.2.1. Taguchi L9 deneyleri için S/N Analizi	41
5.2.2. Varyans analizi (ANOVA)	43

5.2.3. Regresyon analizi.....	43
5.2.4. Yanak aşınması (Vb) değerlendirilmesi	44
5.3 Talaş Morfolojisi	47
5.4. SONUÇLAR	51
KAYNAKÇA.....	53
ÖZGEÇMİŞ	



TABOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Kesme sıvılarının malzemeye, kesici takım, tezgâh ve çevreye etkileri [53]	21
Tablo 3.2. Kesme sıvılarının uygulanması [54]	22
Tablo 3.3. Kesme sıvısı tiplerinin avantaj ve dezavantajları [54]	22
Tablo 3.4. Dahili olarak beslenen tek ve çift kanallı sistemlerin kısa özeti [61]	25
Tablo 4.1. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal özellikleri (Ağırlıkça %)	28
Tablo 4.2. Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri	28
Tablo 4.3. CNC torna tezgahına ait teknik özellikler	29
Tablo 4.4. Blaser CSF 35 Kesme sıvısı özellikleri	31
Tablo 4.5. Nanografen özellikleri	31
Tablo 4.6. Deney tasarımında kullanılan parametreler	34
Tablo 5.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları ve S/N oranları	35
Tablo 5.2. Yüzey pürüzlülüğü S/N yanıt tablosu	37
Tablo 5.3. Yüzey pürüzlülüğü deneyleri ANOVA sonuçları	38
Tablo 5.4. Takım ucu yanak aşınması sonuçları ve S/N oranları (Devamı)	42
Tablo 5.5. Takım ucu yanak aşınması ve S/N yanıt tablosu	42
Tablo 5.6. Takım ucu yanak aşınması için ANOVA tablosu	43
Tablo 5.7. Deneyler ve talaş morfolojisine karşılık gelen değerler	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Alfa fazının birim hücresi [34]	10
Şekil 3.2. Işık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş Ti-6Al-4V alaşımına ait lamellerin görüntüsü [34]	10
Şekil 3.3. Beta fazının birim hücresi [34]	11
Şekil 3.4. Ti-6Al-4V alaşımının imalat işlemlerinin yorulma özelliklerine etkisi [37]	12
Şekil 3.5. β evresine dönüşüm sıcaklığı (Ti-6Al-4V) [35]	12
Şekil 3.6. Tornalama operasyonları [38]	13
Şekil 3.7. İşleme sırasında kullanılan parametreler [41].	14
Şekil 3.8. Talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kesitin görüntüsü [44]	14
Şekil 3.9. İki boyutlu görüntüde ortogonal kesme [46]	15
Şekil 3.10. Eğik kesme modeli [45]	15
Şekil 3.11. Kesintili talaş, Sürekli talaş, Yığılma kenarlı sürekli talaş ve Yarı kesintili talaş gösterilen talaş tipleri	16
Şekil 3.12. Kesici takımlarda oluşabilecek aşınma tipleri [48]	17
Şekil 3.13. Yüzey kalitesinin üç boyutlu şekli [52]	19
Şekil 3.14. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) [53]	19
Şekil 3.15. Ortalama mesafe (R_z) [54]	20
Şekil 3.16. MQL sistemlerinde harici ve dahili püskürtme [61]	24
Şekil 3.17. Tek ve çift kanallı MQL sistemleri [61]	26
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan kesici takıma ait geometri ve ölçüler	29
Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan takım tutucuya ait ölçüler	30
Şekil 5.1. L27 Yüzey pürüzlülüğü için ortalama S/N oranları grafiği	37
Şekil 5.2. L27 yüzey pürüzlülüğünde gerçek değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması	38
Şekil 5.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü R_a (μm)	39
Şekil 5.4. Takım ucu yanak aşınması deneylerinin S/N sonuçları grafiği	43
Şekil 5.5. L9 Takım ucu yanak aşınması gerçek değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması	44
Şekil 5.6. Takım ucu yanak aşınması (μm)	44
Şekil 5.7. Talaşın dış bölümü	47

Şekil 5.8. Tepe yüksekliği, vadi yüksekliği ve dış aralığının (a) ilerleme hızı, (b) kesme hızı ve (c) GNP konsantrasyonu ile değişimi..... 49



GÖRESELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 4.1. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi	30
Görsel 4.2. Nanoakışkanların hazırlanması için kullanılan manyetik karıştırıcı ve ultrasonik banyo	32
Görsel 4.3. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	32
Görsel 4.4. Optik Mikroskop	33
Görsel 4.5. Tipik deneysel sonuçlar (a) Yüzey pürüzlülük profili (Nanoeva profilometre), (b) Takım aşınması (optik mikroskop) ve (c) Talaş morfolojisi (optik mikroskop)	34
Görsel 5.1. Kesici takımların 80,100 ve 120 m/dak kesme hızı ve Baz sıvı, %0.5 GNP ve %1 GNP kesme sıvılarında aşınma resimleri	45
Görsel 5.2. a= 1 mm kesme parametrelerinde kesici takım uçlarının optik mikroskopta görüntüsü (x50) a) Baz sıvı, b) %0,5 GNP, c) %1GNP, 100 m/dak d) Baz sıvı, e) %0,5 GNP, f) %1 GNP, 120 m/dak g) Baz sıvı , h) %0,5 GNP, ı) %1 GNP	46
Görsel 5.3. 80 m/dak kesme hızı, 0.24 mm/dev ilerleme hızı, %1 NG katkılı kesme sıvısı parametrelerindeki talaşın optik mikroskopta görüntüsü (x50) (200 µm)	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ti	: Titanyum
NGP	: Nano grafen parçacıkları
MQL	: Minimum miktarda yağlama
MoS₂	: Molibden disülfür
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
GO	: Grafen oksit
WC	: Tungsten karbür
Cu	: Bakır
CuO	: Bakır oksit
SiC	: Silisyum karbür
CBN	: Kübik bor nitrür
MWCNT	: Karbon nanotüp
RPM	: Devir / dakika
f	: İlerleme
V	: Kesme hızı
a	: Kesme derinliği
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Φ	: Kayma düzlem açısı
μ	: Mikron

1. GİRİŞ

İş parçasının üretim aşamasında kesme koşullarına bağlı olarak ne kadar kolay veya zor kesilebilme kabiliyetini ifade etmek için kullanılan kavrama işlenebilirlik denir. Malzemelerin işlenebilirliği; maksimum talaş kaldırma oranı, takım ömrü, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü gibi ögelerin ölçümü yapılarak belirlenmektedir. Ancak Titanyum ve Nikel gibi Süperalaşımların talaşlı imalat işlemleri sırasında kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklarda kesici takım, mukavemet ve sertlik özelliklerinden ötürü kesici uçta bozulmalar görülür. Bu sebeplerden ötürü işlenmesi zor malzemelerin işlenmesi sırasında özel takımlar ve özel kesme şartları gerektirmektedir [1].

Titanyum (Ti) ve alaşımları son yıllarda yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek sıcaklıkta mükemmel mekanik özellikleri, iyi korozyon ve aşınma dayanımı gerektiren mühendislik ürünlerinde önemli bir paya sahiptir [2]. Uçak ve uzay endüstrisinde oldukça fazla karşımıza çıkan Ti ve alaşımları, tıp ve mühendislik endüstrilerinde de sıkça karşımıza çıkmaktadır [3]. Yüksek mukavemet-ağırlık ilişkisi ve kuvvetli korozyon direnci nedeniyle titanyum, enerji üretiminde ve taşımacılıkta kullanılan gelişmiş endüstriyel ekipman üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Pazarının %25'ini temsil eder ve havacılık endüstrisinin tamamının %75'inde bulunur [4].

Talaşlı üretim işlemleri, iş parçasını kesici takımlar ile işleyerek belirli bir şekle ve geometriye ulaştırmak için birçok işlemden oluşur. Talaş kaldırma sırasında meydana gelen enerji, işleme sürecinde ortaya çıkan bütün enerjinin üçte ikisine ulaşabilmektedir. Bu esnada meydana gelen enerjinin büyük kısmı ısı olarak dönüştürülürken, ısının uzaklaştırılabilmesi için işleme bölgesine metal kesme sıvıları uygulanmaktadır [5].

Günümüzde, metal kesme endüstrilerinde kaliteli boyutsal doğruluk ve hassasiyet, yüksek üretim hızı, yüksek yüzey kalitesi vb. talep edilmektedir. Bu sebeplerden ötürü, değişen müşteri ihtiyaçları, seri üretim eğilimleri, daha iyi takım ömrü, daha iyi yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına ulaşmak ve kesme bölgesindeki sıcaklığı sabit tutabilmek için gelişmiş soğutma tekniklerine ve gelişmiş soğutma sıvılarına ihtiyaç duyulmaktadır [6].

Talaş kaldırma işlemleri takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hassasiyet değerlerinde önemli gelişmeler sağlamak için kesme sıvısı kullanımını gerektirir. Talaşlı imalat işlemleri sırasında talaşlı uzaklaştırmak ve talaşlı kırmak için de kesme sıvıları

kullanılmaktadır. Bu gelişmelere rağmen büyük miktarlarda kesme sıvılarının kullanılması tedarik etme, kullanma, depolama ve uzaklaştırma gibi sebeplerden ötürü yüksek maliyetlere sebep olmasının yanı sıra, atıkların düzgün uzaklaştırılamaması sebebiyle belirli çevre kirliliklerine yol açmaktadır. Minimum miktarda yağlama (MQL) sistemi kesme sıvılarının olumsuz sonuçlarına alternatif olan başka yöntemlerden biridir. MQL sisteminde kullanılan sıvı miktarı diğer soğutma ve yağlama sistemlerine nazaran daha az miktarlarda olduğu için geleneksel kesme sıvılarına göre daha kuvvetli özelliklerle donatılmış olması gerekmektedir. Son dönemde araştırmacılar nano kesme sıvılarını incelediği gözlemlenmektedir. Çalışma sistemi belirli baz kesme sıvısına nano boyutunda partiküllerin eklenmesi olan nano kesme sıvıları geleneksel kesme sıvılarının kullanımını ortadan kaldırmak veya soğutma ve yağlama özelliklerini yükseltmek için kullanılmaktadır [7].

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasında belirli konsantrasyonlarda nanografen katkılı kesme sıvısının yüzey pürüzlülüğüne, takım ucu yan yüzey yanak aşınmasına ve talaş morfolojine etkileri incelenmiştir. Farklı kesme hızları, ilerleme hızları ve nanoparçacık konsantrasyonlarında gerçekleştirilen kesme şartlarında ANOVA analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.LİTERATÜR ÖZETLERİ

Bu bölümde, talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesme sıvılarının içerisine eklenen nanopartiküllerin işlenebilirliğe etkileri yapılan çalışmalarda ayrıntılı olarak verilmiştir.

Hegap ve diğ. [8], Ti-6Al-4V alaşımının tornalanması sırasında çok duvarlı karbon nanopartiküller (MWCNT) katkılı kesme sıvısının etkisini anlamak için farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve konsantrasyonlarda yüzey pürüzlülüğü incelemelerinde bulunmuşlardır. Deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğünü baz kesme sıvısına göre %4 MWCNT katkılı nanokesme sıvısı %38 azalttığı, %2 MWCNT katkılı nanokesme sıvısının ise %50 oranda iyileştirdiğini gözlemişlerdir. Sonuç olarak, kesme sıvısına nanopartikül eklenmesinin yüzey pürüzlülüğü performansını arttırdığını belirtmişlerdir.

Gupta ve diğ. [9], bitkisel bazlı kesme sıvısına %3 konsantrasyonda eklenen nanopartiküllerin (alüminyum oksit (Al_2O_3), molibden disülfür (MoS_2) ve grafit) MQL ortamında tornalanmasının kesme sıvısının sürdürülebilir işlenebilirliğe etkisini incelemişlerdir. Optimum koşullar incelendiğinde grafit eklenen baz yağ daha düşük kesme hızı, ilerleme hızı ve daha yüksek yaklaşma açısında sürdürülebilir işlenebilirlik için (kesme kuvveti, takım aşınması, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü) en iyi sonuçları vermiştir. Burada grafitin en iyi sonuçları vermesi ısı taşıma kapasitesinin diğer nanopartiküllere oranla daha yüksek olduğunu iddia etmişlerdir.

Singh ve diğ. [10], farklı ağırlıklardaki grafen ve kanola yağı karışımının Ti-6Al-4V iş malzemesinde tornalanması sırasında dokulu takımların aşınma davranışlarını ele almışlardır. Ağırlık yüzdesi 0,2; 0,5 ve 2.0 olan grafen parçacıkları 24 saat içinde parçacıkları birbirinden ayrılırken, ağırlıkça 1 grafen 72 saate kadar partikül stabilitesi gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Termal iletkenlik ve süspansiyon stabilite testlerinden aldıkları sonuçla deneylerde ağırlıkça %1 grafen bileşimi kullanmışlardır. MQL 'da kanola yağı kullanımının, kuru duruma kıyasla gelişmiş performans gösterdiğini, kanola yağı ile grafenin kullanılmasının dokulu takımın performansını iyileştirdiğini ve grafen kanola yağı koşulunda daha uzun takım ömrü sağladığını, grafen kanola yağı kullanımının kanola yağı ve kuruya göre daha üstün yüzey pürüzlülüğü performansı gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Yi ve diğ. [11], çalışmalarında Ti alaşımı olan Ti-6Al-4V alaşımını tornalama işleminde grafen oksit (GO) katkılı nanoakışkan ile işlenmesini araştırmışlardır. Deneylerinde kesme hızı parametrelerini 80; 160 ve 240 m/dak, ilerleme hızı parametrelerini 0,05 ve 0,1 mm/dev ve nanopartikül konsantrasyonlarını 0,1; 0,3 ve 0,5 olarak belirlemişlerdir. Talaş oluşumunu, kesme sıcaklığını ve yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek için toplamda 36 deney gerçekleştirmişlerdir. Yüksek kesme hızlarında yüksek sıcaklıklar meydana geldiğini ve bu sebepten takım ucunda yapışmalar olduğunu belirtmişlerdir. Geleneksel kesme sıvısı ile karşılaştırdıklarında ise GO katkılı nanoakışkanın yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğinden bahsetmişlerdir. Kesme sıcaklıklarının kesme hızı, ilerleme hızını azaltarak ve kesme sıvısını basıncını arttırarak azalttıklarını yaptıkları çalışmada göstermişlerdir.

Eltagaz ve diğ. [12], AL_2O_3 nanopartikülleri ile zenginleştirilmiş kesme sıvısının MQL sistemi ile Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasının etkilerini incelemişlerdir. Baz yağ ve %2 ve %4 konsantrasyonlarda yapılan denelerde AL_2O_3 katkılı kesme sıvısı yüzey pürüzlülüğü iyileştirmede önemli rol oynamıştır. Burada ilerleme hızı ve nanopartikül konsantrasyonu yüzey pürüzlülüğü belirleyen önemli etmenlerdir. Ayrıca nanopartikül ilavesinin güç tüketimi ve takım ömrünü iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Sodavadia ve Makwana yaptıkları çalışmada [13], hindistan cevizi yağına nano borik asit partikülleri ekleyerek AISI 304 paslanmaz çeliğin tornalanmasının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Tornalama sırasında kesme sıvısına nano partikül konsantrasyonun termal iletkenliği ve ısı transferini arttırdığı, buna ters olarak özgül ısının azaldığını belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda baz yağ ile nanokesme sıvısı karşılaştırıldığında borik asit katkılı kesme sıvısının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını iyileştirdiğini belirlemişlerdir.

Gaurav ve diğ. [14], Ti-6Al-4V iş parçasının MQL sistemi yardımıyla tornalanmasında kesme sıvı olarak kullanılan saf jojoba yağı ile mineral yağ (LRT 30) karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak kesme sıvılarına yenilikçi çözümlerden biri olan nanopartiküller eklenerek (MoS_2) yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını ve takım aşınması değerlendirmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde jojoba yağının Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde sürdürülebilir işlenebilirlik için yenilikçi çözümlerden biri olmuştur. Düşük konsantrasyonda nano katkılı jojoba yağının yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerini

%35-47 oranda iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Konsantrasyon oranı arttıkça kesme kuvvetlerinde artış, yani daha büyük boyutlu partiküllerin oluştuğunu bildirilmiştirler.

Yi ve diğ. [15], nanografen oksit süspansiyonlu soğutma sıvısının kesme kuvveti, yüzey kalitesi ve talaş morfolojilerinin karakterizasyonu üzerindeki mekanizmasını ve etkilerini Ti-6Al-4V'nin delinmesinde incelemişlerdir. Delme testleri için ISCAR (SCD 080-043-080) tarafından üretilen tungsten karbür WC takımları kullanmışlardır. Delme şartlarını, mil hızı RPM (devir/dak) 800; 1600 ve 2400 ve 2880, 0.1; 0.12; 0.15 ve 0.18 ilerleme (mm/dev), 8 mm delik çapı ve 8 mm delik derinliği ve ağırlıkça %0,1 GO soğutma sıvısı belirlemişlerdir. GO süspansiyonlu kesme sıvısı kullanılarak kesme kuvvetinde %17,21'e varan önemli bir azalma ve yüzey pürüzlülüğünde %15,1'lik çarpıcı bir iyileşme verilerine ulaşmışlardır.

Songmei ve diğ. [16], Ti-6Al-4V alaşımının frezelenmesinde farklı konsantrasyonlarda (%1 ve %2) nanopartiküller (Cu, Grafit, MoS₂ ve Al₂O₃) eklenmesi ile optimum kesme parametreleri belirlemek istemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde optimum parametrelerin frezeleme kuvvetleri üzerinde kesme derinliği olduğunu varyans (ANOVA) analizi ile belirlemişlerdir. Nanopartikül türünün, konsantrasyonun ve ilerleme hızının da kesme kuvvetlerine etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Nanopartiküller arasında Cu ve Grafitin diğer partiküllere oranla daha yüksek etkiler gösterdiğini bildirmişlerdir.

Singh ve diğ. [17], titanyum alaşımlı (sınıf 5) tornalaması üzerine deneysel çalışmalar yapmış olup, hibrit nano kesme sıvısının MQL sistemi ile tornalama performansını, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde hibrit nano kesme sıvısı uygulaması ile saf hindistan cevizi yağına göre kesme kuvvetinde ve yüzey pürüzlülüğünde önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Hacimce %0,75 ve üzerinde hibrit nano kesme sıvısı konsantrasyonu için iyileşme o kadar önemli değerler göstermediği belirlemişlerdir.

Kumar ve Prasada [18], dubleks paslanmaz çelik-2205'in tornalanması sırasında yüzey pürüzlülüğünün MQL altında nano kesme sıvıları etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Nano kesme sıvıları, Al₂O₃, Bakır oksit (CuO) ve Silisyum karbür (SiC) nanopartiküllerin hacimce %0,3; %0,5 ve %0,7 şekilde hazırlamışlardır. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları incelendiğinde sırasıyla CuO, SiC ve Al₂O₃ katkılı kesme sıvısını

olduğunu belirtmişlerdir. İlerleme hızının en önemli parametre olduğunu diğer faktörlerin sırayla kesme derinliği, nanopartikül oranları ve kesme hızının izlediğini ortaya koymuşlardır.

Yıldırım ve diğ. [7], Waspaloy süper alaşımının nanoparçacık katkılı kesme sıvısı ile işlenmesi sırasında takım aşınmasını incelemişlerdir. Deneyler CNC freze tezgahında, üç farklı (kuru, MQL ve nano MQL) soğutma/yağlama koşullarında, kesme hızı (20; 40 ve 60 m/dak) ve ilerleme (0,05; 0,10 ve 0,15 mm/dev) hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, Al_2O_3 nanopartikülleri bitkisel esaslı kesme sıvısına karıştırılarak yapılan deneylerde kesme hızının daha düşük olduğu durumlarda aşınmanın en az olduğunu gözlemlemişlerdir. Takım aşınması için de kesme hızında olduğu gibi ilerleme hızının daha düşük olduğu durumlarda daha iyi sonuçlara ulaştığı sonucuna varmışlardır.

Gupta ve diğ. [19], farklı nano kesme sıvılarının Al_2O_3 , MoS_2 ve grafit özelliklerini Inconel-800 alaşımının MQL koşulları altında bir dizi tornalama deneyleri ile incelemişlerdir. Nano kesme sıvısının performansı, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve takım aşınması gibi işleme özelliklerini (ANOVA) testleri ile istatistiksel olarak gözlemlemişlerdir. Kesme hızı yükseldikçe MoS_2 ve grafit bazlı nanoakışkanların daha iyi sonuçlar verdiği, genel performans incelendiğinde grafit katkılı kesme sıvısının soğutma ve yağlama özelliklerinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Yıldırım [20], AISI 316 malzemesinin frezelenmesinde kesme sıvısına grafit partiküllerinin eklenerek yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı değerlerini araştırmışlardır. MQL yardımıyla yapılan deneylerde sonuçlar incelendiğinde optimum parametrelere yüzey pürüzlülüğünde %1 nano grafit içeren MQL sistemi, 40 ml/saat debi ve 8 bar basınç olurken kesme sıcaklığında optimum parametre grubu hacimce %1 nano grafit içeren MQL sistemi, 80 ml/saat debi ve 8 bar basınç sonucuna varmışlardır.

Usha ve Rao [21], bitkisel yağa eklenen Al_2O_3 nanopartiküllerinin MQL işlemi ile tornalanmasında AISI 1045 çeliğinin optimum kesme kuvveti F_z değerleri incelenmiştir. Yüksek hızlı hassas torna tezgahında yapılan deneylerde 80, 100, 120 kesme hızı, 0.051, 0.102, 0.153 ilerleme, 0.25, 0.5, 0.75 kesme derinliği parametreleri farklı hacim konsantrasyon yüzdeleriyle (%0,2, %0,4 ve %0,6) gerçekleştirmişlerdir. Optimum kesme

kuvveti değeri, 5ml/dak MQL akış hızı, %0,6 hacim konsantrasyonu, 120 m/dak hız, 0.096 mm/dev besleme hızı, 0.25mm kesme derinliğine karşılık gelen 35.7 Kg'dır.

Cönger ve diğ. [22], iş parçası olarak Alüminyum 6061 kullanılan deneylerde frezeleme işlemi MQL şartlarında nano katkılı (MoS_2) kesme sıvısının işleme performansına etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde %1 katkılı nanokesme sıvısının kuru işlemeye göre bütün parametrelerde avantaj sağladığı, debi miktarının artırılarak sonuçlarının daha da iyileştirildiğini bildirmişlerdir. İşleme işleminde kullanılan nanopartiküllerin yağlama kesme sıvısının yağlama özelliklerini arttırdığı ve takım ile malzeme yüzeyine daha fazla nüfus ederek sürtünmeyi azalttığını iddia etmişlerdir.

Anandan ve diğ. [23], kesme sıvısına grafen nanopartikül katkısının etkinliğini araştırmak için bir dizi deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kuru ve saf MQL ile karşılaştırılan nano akışkan, farklı kesme hızları ve ilerleme ile yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasını incelemişlerdir. Deneylerin optimum sonuçlarının belirlenmesi için Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile bütünleşmiş Oran Analiziyle Çok Amaçlı Optimizasyon (MOORA) olarak bilinen hibrit çok kriterli karar verme yaklaşım ile değerlendirmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde kesme sıvısına eklenen grafen nanopartiküller ile elde edilen nanokesme sıvısının yüzey pürüzlülüğüne, takım aşınmasına ve kesme sıcaklığına etkisi sırasıyla %91, %95 ve %82 oranında iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Amrita ve ark. [24], nanografite esaslı kesme sıvısı ile AISI1040 çeliğinin MQL sistemiyle tornalanması sırasında talaşlı imalat sürecinin performansını değerlendirmişlerdir. Nanoakışkan MQL uygulaması geleneksel kesme sıvısına kıyasla kesme kuvvetini %54, kesme sıcaklığını %25, takım aşınmasını %71 ve yüzey pürüzlülüğünü %30 oranda iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Yine nanoakışkan MQL uygulaması MQL geleneksel kesme sıvısına kıyasla kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla %50, %20, %37 ve %28 oranında iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Kesme sıvısına eklenen nanoparçacıklar termal iletkenliğin artmasına, bu sayede kesme sırasında meydana gelen sıcaklığın düşmesine neden olmaktadır. İyileştirilmiş soğutma ve yağlama kesme bölgesindeki sıcaklığı ve sürtünmeyi azaltarak aşınmanın azalmasına neden olmaktadır.

3. TEMEL KAVRAMLAR

3.1. Titanyum ve Alaşımları

Titanyum yıldızlarda, yıldızlararası tozda, meteorlarda ve dünya yüzeyinde bulunur. Titanyum alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dünyada bulunan yapısal metaller arasında dördüncü sırada bulunurlar. Her ne kadar fazla miktarda olsa da titanyum ekonomik olarak çıkarılabilen konsantrasyonlarda çok fazla bulunmaz [25]. Yine de titanyum üstün özellikleri sayesinde kullanımı yaygın malzemelerden olmaya devam etmektedir. Titanyumun üstün özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [26].

- Üstün düşük sıcaklık direnci,
- Yüksek spesifik dayanımı,
- Düşük yoğunluk,
- Yüksek sıcaklık direnci,
- Düşük termal iletkenlik,
- Düşük sıcaklık yükselişi,
- Yüksek termal büzülme direnci,
- Mükemmel korozyon direnci,
- Düşük mıknatıslık,
- Yüksek iletkenlik (Ti-Nb esaslı alaşımlarda görülür),
- Hidrojen absorpsiyon,
- Yüksek kimyasal tepkime.

Titanyumun üstün mekanik özellikleri onu endüstride geniş kullanım alanı olan bir malzeme yapar, ancak bazı özellikleri malzemenin işlenmesi sırasında birtakım zorluklar meydana getirmektedir. Titanyum ve alaşımları yüksek sıcaklıklara ulaştığında reaktif hale gelmektedir. Düşük termal iletkenliği, iş parçasındaki kesme işlemi sırasında sıcaklık artışına yol açar ve üretilen ısı takıma geçmesiyle takım ömründe azalmalar görülmektedir. Bu olduğunda, yüksek takım ve temas sıcaklıkları yüzey bütünlüğü etkiler ve yüzeyde tehlikeli olabilecek beyaz tabakaların oluşması gibi ilgili sorunlara neden olmaktadır [27].

Boya imalatı, kâğıt sanayi, yağlı boya, plastik imalatı, kaynak çubuğu kaplama, karbür, seramik, cam elyafı ve kozmetikte yaygın olarak kullanılan titanyumun genel kullanım alanı havacılık ve denizcilik endüstrisi olmasının nedeni aşınmaya karşı

dayanıklı olması ve beyaz pigment olarak ağartıcı özelliğine sahip olmasıdır. Titanyum metali son dönemlerde tıbbi cihaz ve ekipman endüstrisi için de önemli bir hale gelmektedir. Titanyum ve alaşımları yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olmasından ötürü birçok kullanım alanına sahiptirler. Askeri havacılık motorlarında, kapak yüzeylerinde, yağ ve yakıt tanklarında ve motor mandallarında, tuzlu sulardan kaynaklı aşınmalara karşı dirençli oldukları için deniz altı imalatında kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri uzay programı dahilinde Merkür'e gönderilen uzay aracının üretiminde oldukça fazla titanyum metali kullanılmıştır [28].

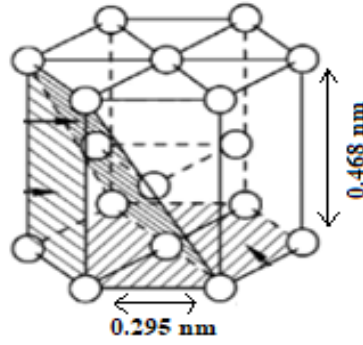
Titanyum ve alaşımlarının mükemmel özelliklerinin kombinasyonu, bu alaşımların sınıflandırılması için ciddi bir etkidir. Ticari saflıktaki titanyum, α Titanyum Alaşımları, $\alpha + \beta$ Titanyum Alaşımları ve β Titanyum Alaşımları olarak sınıflandırılırlar [29].

3.1.1 Ticari saflıktaki titanyum

Ticari saflıktaki titanyum, 1950'lerden beri yüksek mukavemet gerektirmeyen fakat şekillendirilebilme ve korozyon direnci ihtiyacı olan uygulamalarda kullanılmaktadır. Çelik ve alüminyuma nazaran daha iyi özellikler göstermesi havacılık ve uzay endüstrisinde üretimi yıllar geçtikçe artmaktadır. Ticari saflıktaki titanyumun yararlı metaller sınıfında bulunmasının sebebi korozyona dirençli olması ve kaynaklana bilirliğinin gelişmiş olmasındandır [30]. Ticari saflıktaki titanyum %99,5 ile %98,635 oranında titanyum içermektedir ve α fazındadır. Oda sıcaklığında sıkı düzen hekzagonal yapıda bulunurlar ve β fazına 885 °C' de geçmektedir [26].

3.1.2 α Titanyum Alaşımları

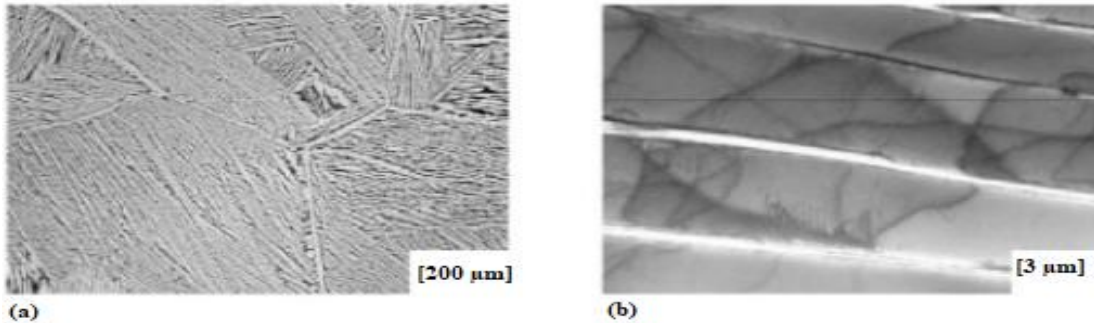
Alfa titanyum alaşımları, genellikle tek fazlı alaşımlardır. Şekil 3.1'de birim hücresi gösterilen alfa fazı titanyum alaşımları alüminyum miktarı %7'ye kadar (alfa dengeleyici) ve <%0,3 oksijen, nitrojen ve karbon bulundurlar. Titanyum alaşımları arasında en düşük mukavemete sahip olanıdır. Ancak kaynaklanabilme ve şekillendirilebilme niteliklerini barındırırlar. Alfa titanyum alaşımları çoğunlukla tavlanmış veya gerilimden temizlenmiş durumdadır. Tamamen tavlanmaları için 675 ila 790°'de 1 veya 2 saat boyunca ısıtılmaları gerekmektedir. 170 ile 480 N/mm² (Mpa) arasında akma dayanımları değişmektedir. Tavlanmış durumda alfa alaşımlarının üretimi çoğunlukla gerçekleştirilmektedir. Paslanmaz çelikler için uygun olan tüm üretim metotları yaygın olarak gerçekleştirilebilir. Kaynaklanabilirliğinin iyi olması için uygun gaz koruması olması gerekir. Alfa titanyum alaşımlarına R50400 ve R53400 örnek gösterilebilir [31].



Şekil 3.1. Alfa fazının birim hücresi [34]

3.1.3. $\alpha + \beta$ Titanyum Alaşımları

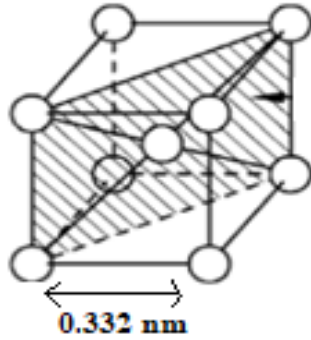
$\alpha + \beta$ titanyum alaşımları, parçaların daha sünek bir tavllanmış durumda üretilmesine olanak tanır; bu alaşımlar çözelti ısıtma işlemi ve yaşlandırma ile geliştirilebilen, ardından maksimum dayanım için ısıtma işleminden geçirilmektedir. Kullanım alanları genellikle uçak ve türbin parçaları, kimyasal işleme ekipmanları, deniz ekipmanları ve protez cihazlardır. $\alpha + \beta$ titanyum, titanyum alaşımı üretiminin yaklaşık yarısını oluşturur, normal ve ELI sınıflarında bulunurlar. Titanyum alaşımlarından en çok kullanılanlardan biri olan Ti-6Al-4V alaşımı $\alpha + \beta$ titanyum alaşımları grubunda yer almaktadır [32]. $\alpha + \beta$ mikro yapıları Ti-6Al-4V alaşımına ait lamellerin ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Alfa ve beta fazlarının stabilitelerini yükselten elementler titanyum alaşımının yapısında birlikte mevcut olurlar ve bu iki form arasında özelliklere sahiptirler. Tavlama sonrasında bile iyi süneklik, homojenlik ve direnç özelliği göstermektedirler. $\alpha + \beta$ Titanyum alaşımlarının gelişmiş şekillendirilebilirlik özelliklerinin yanı sıra hafif ve korozyona karşı dirençlidirler [33].



Şekil 3.2. Işık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş Ti-6Al-4V alaşımına ait lamellerin görüntüsü [34]

3.1.4. β Titanyum Alaşımları

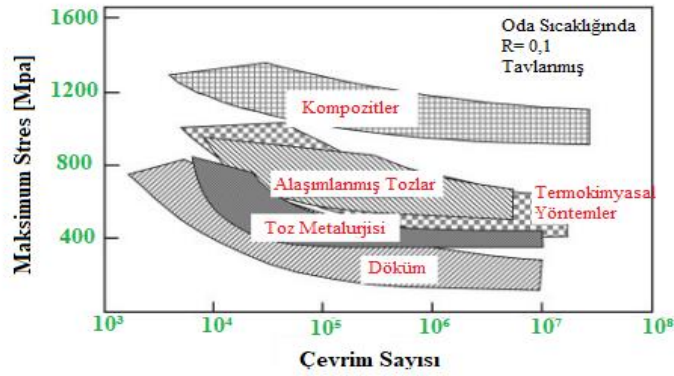
Titanyum alaşımlarının β fazı çoğunlukla yarı kararlıdır, su verilmiş biçimde işlenebilir ve ne yüksek dayanımlara kadar yaşlandırılabilirler ancak süneklilikten bahsedilemezler. Şekil 3.3'te beta fazı birim hücresi gösterilen beta alaşımları, büyük miktarlarda beta stabilizatörlerine (vanadyum, krom ve molibden) gerek dayarlar ve bundan ötürü yoğunurlar. 200 ila 300 ° C'de düşük stabiliteye sahiptirler, düşük sürünme direnci ve kaynaklanabilmek için gevrekleşmeye ihtiyaçları bulunurlar. Beta alaşımları, çözelti ile muamele edilmiş durumda soğuk şekillendirme de dahil olmak üzere, alfa alaşımları için kullanılan tekniklerin herhangi biri kullanılarak üretilebilir. Beta alaşımlarının yüksek dayanım sağlayabilmesi için kaynak sonrası yaşlandırılmaları gerekmektedir. Bu alaşıma örneklerden biri R56260 gösterilebilir. Yüksek mukavemetli bağlantı elemanları olarak yarı kararlı beta alaşımları kullanılabilmektedir [31].



Şekil 3.3. Beta fazının birim hücresi [34]

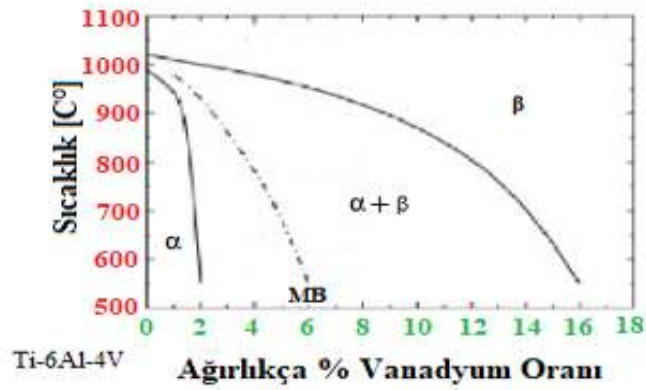
3.1.5. Ti-6Al-4V alaşımı

Ti-6Al-4V alaşımı, ağırlıkça %6 Alüminyum ve %4 Vanadyum içeren iki fazlı bir titanyum alaşımıdır. Ti-6Al-4V alaşımı uçak gaz türbini diskleri, tıbbi uygulamalar, havacılık endüstrisinin %60'ı, uçak gövdelerinin %90'ı, diş tedavisinde kullanılan implantlar ve kompresör kanatlarında kullanılmaktadırlar. Döküm, dövme ve haddeleme gibi işlemler ile bu alaşımın üretimi ve şekillenmesi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler yorulma özelliklerinde etkilidirler (Şekil 3.4). Üretilen parçanın mekanik özellikleri, mikroyapıyı etkileyen üretim aşamasındaki sıcaklık ve şekil verme işlemlerine göre değişmektedir.



Şekil 3.4. Ti-6Al-4V alaşımının imalat işlemlerinin yorulma özelliklerine etkisi [37]

Ti-6Al-4V alaşımı oda sıcaklığında %90 α fazı içerir. %6 ağırlıktaki alüminyumu α fazı kararlı hale getirir ve dayanıklılığının artmasını sağlar. %4 ağırlıktaki vanadyum ise beta fazını kararlı hale getirir. β faz bölgesinde yüksek sıcaklıktan oda sıcaklığına yavaş soğuma gerçekleştirildiğinde, mikroyapıda %90 alfa fazı ve %10 beta fazı oluşur. Alfa ve beta fazlarının miktarları ısıtılma işlemine göre değişiklik gösterebilmektedir. Saf titanyumda β fazı dönüşüm sıcaklığı 882°C gözlemlenir iken Ti-6Al-4V alaşımında dönüşüm sıcaklığı 985-995°C arasında gerçekleşmektedir (Şekil 3.5). [35,36]



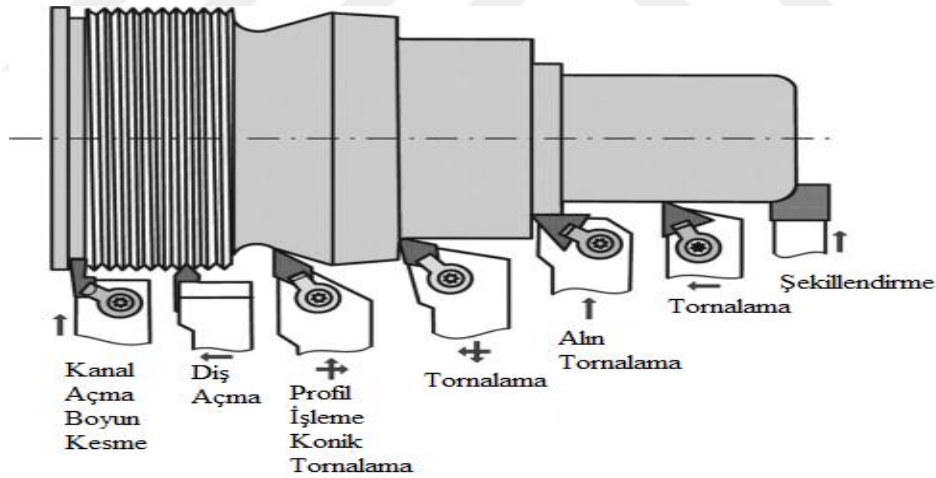
Şekil 3.5. β evresine dönüşüm sıcaklığı (Ti-6Al-4V) [35]

Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal özellikleri mekanik özelliklerinin gölgesinde kalmaktadır. Koruyucu oksit tabakası sayesinde kimya, petrokimya, biyomedikal ve madencilik endüstrisinde sıkça rastlanmaktadır. Difüzyon, korozyon, biyoyumluluk ve oksidasyon önemli kimyasal özelliklerinden bazılarıdır [37].

3.2. Tornalama

Tornalama, takım besleme hareketini gerçekleştirirken iş parçasının dönme hareketini sağlandığı bir takım işleme operasyonudur. Tornalama işlemi sırasındaki hareket, yüzeylerin dış ve iç alanlarının tornalanması için gerçekleştirilir. İşlem torna tezgâhı olarak bilinen bir takım tezgâhı tarafından gerçekleştirilir. Bu işlem silindirik yüzeylerin işlenmesi için kullanılır. İşlem sırasında ilk hareket, iş parçasının dönme eksenini etrafındaki dönme hareketidir. İkinci hareket ise, besleme hareketi yani ilerleme hareketidir. Modern CNC torna tezgahında gerçekleştirilen çeşitli tornalama işlemleri Şekil 3.6’da gösterilmiştir [38].

Tornalamada daha verimli sonuçlar elde etmek için kesici takımın dayanımı ve yüzey pürüzlülüğü önemlidir. Takım geometrisi parametreleri, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği gibi kesme parametrelerine, iş parçası özelliklerine ve kesme sıvısının türüne dikkat edilmesi tornalamada aşınmaları azaltır. Kesici takım tipi tornalama işlemine göre seçilmektedir. Tornalama işlemi bölümleri, Şekil 3.6’da gösterilmiştir [39].

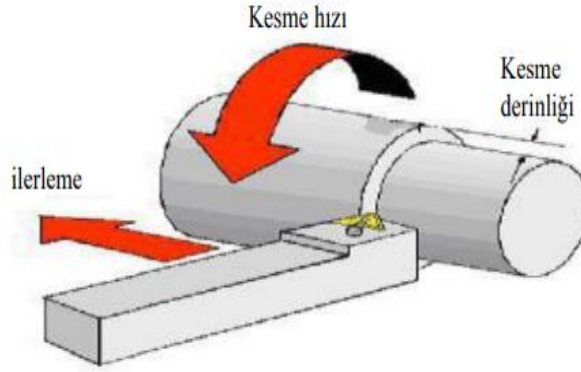


Şekil 3.6. Tornalama operasyonları [38]

Çeşitli faktörler tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrelerdendir. [40].

Malzemenin yüzeyinin kesici kenardan geçme hızına kesme hızı (V) denir. Metre/dakika olarak ölçülür. İlerleme (f), ilerleme hareketi alete veya iş parçasına

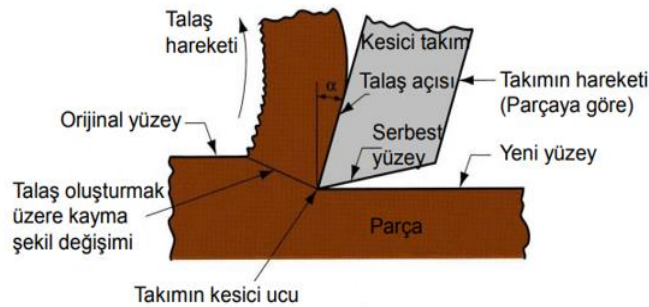
sağlanır ve birincil harekete eklendiğinde, tekrarlanan veya sürekli talaş kaldırma ve istenen işlenmiş yüzeyi oluşturur. İlerleme, kesme takımının bir devirde iş parçasına doğru ilerlediği hareketi yönündeki mesafedir, dolayısıyla ilerleme, devir başına milimetre (mm/dev) olarak ölçülür [38]. Malzeme yüzeyinden kaldırılan iş parçasının derinliğine kesme derinliği (a) denir ve malzeme eksenine dik olarak ölçülür (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. İşleme sırasında kullanılan parametreler [41]

3.3. Talaş Kaldırma Mekanikliği

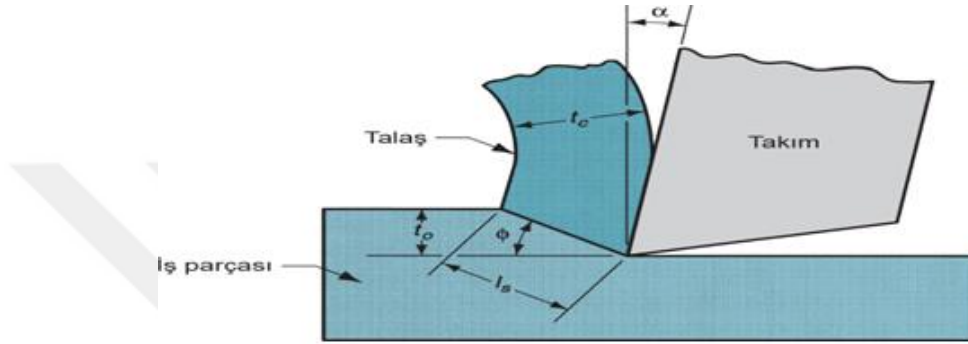
Talaşlı imalat, kullanılan malzemenin istenilen formlara getirilmesi için iş parçası üzerinde kesici takımlar yardımıyla talaş kaldırarak gerçekleştirilir (Şekil 3.8). İş parçası işlenmesi sırasında oluşan talaşlar gözlemlenebilmektedir. İşlem sırasında meydana gelen yüksek ısı deformasyonlara sebebiyet vermektedir. Bunlar Dik (Ortogonal) kesme ve Eğik (Oblique) kesmedir. Talaşlı imalattaki birincil öncelik parçayı istenilen şekle getirmektir. Böylece kusursuz talaş oluşturmak için kesici takım ve iş parçası üzerinde meydana gelebilecek hasarları bertaraf etmek ve oluşan ısıyı engellemek oldukça önemlidir [42,43].



Şekil 3.8. Talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kesitin görüntüsü [44]

3.3.1. Dik (Ortogonal) kesme

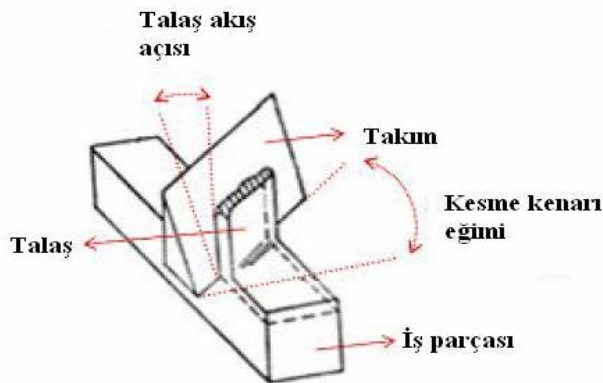
Kesici takım kenarının kesici takım hareket hızı doğrultusuna dik yönlü olmasına ortogonal kesme denir (Şekil 3.9). Talaş, takımından iş parçasına doğru hareket edildikçe kayma düzlemi üstünde oluşan kayma bozulmaları ile oluşur. Kayma düzlemi ile malzeme yüzeyi arasındaki açı, kayma düzlemi açısı (Φ)' dır. Talaşlı imalat işlemlerinde mekanik gücün önemli bir payı plastik deformasyonun olduğu kayma düzleminde tüketilir [45].



Şekil 3.9. İki boyutlu görüntüde ortogonal kesme

3.3.2. Eğik (Oblique) kesme

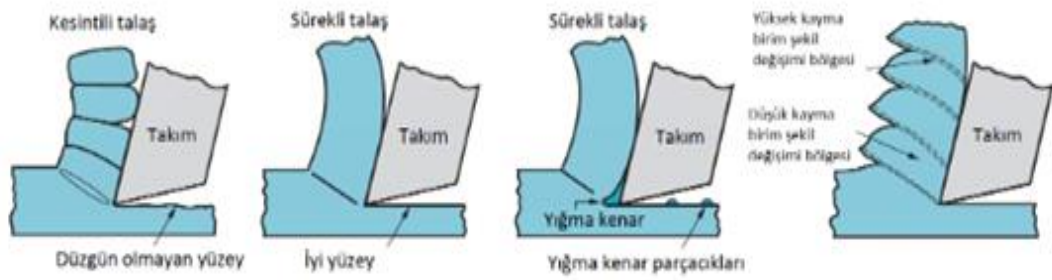
Eğik (Oblique) kesme kenarının iş parçası üzerinde kesici takımın hareketine açı yapması durumuna denir (Şekil 3.10). Talaşlı imalatla genellikle açılı kesme kullanılmakta olup bu modelin hesaplanma zorluklarından ötürü imalat yöntemleri dik kesme olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.10. Eğik kesme modeli [45]

3.3.3. Talaş türleri

Talaş kaldırma işlemlerinde farklı tiplerde talaşlar meydana gelmektedir. Talaşın kalitesi deformasyon miktarına, sıcaklığa ve kuvvete göre değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 3.11’de farklı tiplerdeki talaşlar gösterilmiştir. Talaş kaldırma işleminde oluşan sıcaklık işleme önemli oranda etki ederken, sıcaklığın artması kesici takım malzemesi üzerinde de bozulmalara sebebiyet vermektedir. Kesici uç tasarımlarında operasyon sıcaklığı, kesme kuvveti ve talaş formları dikkate alınmaktadır. Talaşın iş parçasında kesici kenara yaklaşmasıyla oluşan gerilmeler artmaktadır [43].



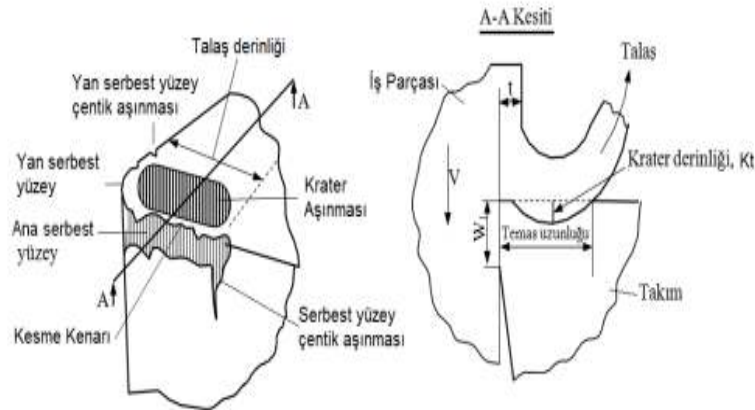
Şekil 3.11. Kesintili talaş, Sürekli talaş, Yığılma kenarlı sürekli talaş ve Yarı kesintili talaş gösterilen talaş tipleri

Dökme demir gibi kırılganlığı fazla olan malzemeler düşük kesme hızlarında işlendiğinde kesintili talaş oluşur. İş parçası üzerinde düzensiz dokular gözlemlenir. Takım ve talaş arasında meydana gelen sürtünme kaynaklı talaşın bu şekilde oluşmasına sebebiyet verir. Sürekli talaş ise sünek iş parçalarının yüksek kesme hızı ve düşük ilerlemede hızında işlenmesinde meydana gelir. Sürekli talaşta yüzey pürüzlülüğü iyi sonuçlar gösterir. Ancak talaşın uzun olması talaşın takıma sarılması gibi problemler oluşturur. Orta veya düşük kesme hızlarında sünek malzemelerin işlenmesi takım talaş sürtünmesini malzemenin belirli oranda kesme kenarı yanındaki talaş yüzeyi üzerine bağlanmasına yığılma kenarlı sürekli talaş denir. Yığılma kenarı büyür ve ardından kopar. Bu durum takımın aşınmasına ve bundan dolayı takım ömründe azalmalara sebebiyet verebilir. Testere dişi şekilli talaşlar yarı süreklidirler. Testere dişi şekilli talaşlar yüksek kayma birim şekil değişiminden sonra düşük kayma birim şekil değişimin dönemsel etkilenmesiyle meydana gelir. Genellikle işlenmesi zor malzemelerin yüksek hızlarda kesilmesinde meydana gelir.

3.4 Takım Aşınması

İş parçası işlenmesi sırasında meydana gelen sürtünme beraberinde kesici takımın ısınmasını getirir. Oluşan bu ısı ile takım aşınması kaçınılmaz olur. Bu sebeple takım aşınmasına sebebiyet veren parametrelere dikkat edilmesi gerekir. Takım ucu türü, iş parçası malzemesi, kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği, talaş geometrisi, takım geometrisi ve soğutma sıvısı parametrelerdir. Kesici takımda oluşan hasar büyük ölçekli veya kademeli bir şekilde meydana gelebilir. Büyük ölçekli meydana gelen hasarlar genellikle parametrelerin yanlış seçilmesi ile bağlantılıdır. Oluşacak takım aşınması kesme kenarı mukavemetinde azalmalara, takım kuvvetlerinde artışa, kesme sıcaklıklarında yükselişe, güç tüketiminin fazlalaşmasına, kötü yüzey kalitesine, üretkenlik kaybına sebebiyet verir. Bundan dolayı takım aşınmasının en aza indirilmesi hedeflenmiştir [46]. Kesici takımlarda meydana gelen takım aşınmaları aşağıdaki gibidir (Şekil 3.12).

- Ana serbest yüzey aşınması,
- Talaş yüzeyi aşınması,
- Çentik aşınması,
- Yan serbest yüzey aşınması,
- Plastik deformasyon,
- Termal ve mekanik çatlaklar,
- Parçacık kopması,
- Kenar yığılması,
- Talaş yığılması.



Şekil 3.12. Kesici takımlarda oluşabilecek aşınma tipleri [47]

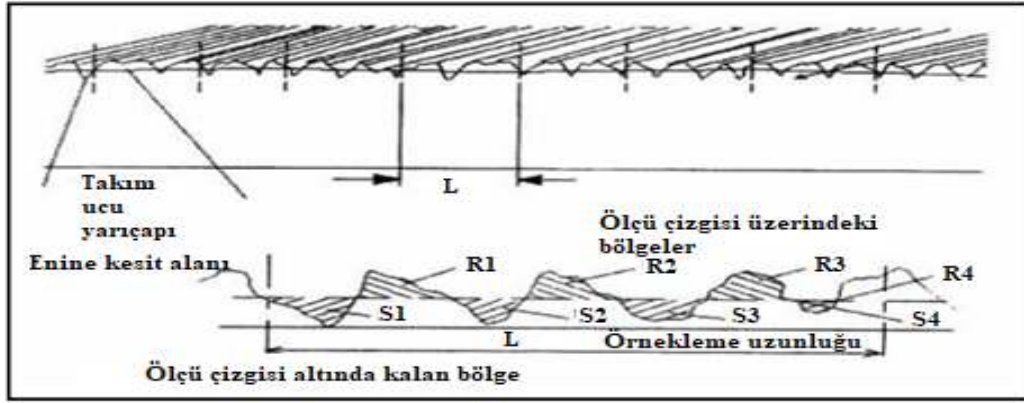
Talaşlı imalat işlemlerinde takım aşınmasını hesaplamak için oldukça fazla parametre gereklidir. Bu parametreler kesici takım cinsine, iş parçası mukavemetine, işleme sırasında oluşan ısıya bağlıdır. Meydana gelen aşınmaların %50'si sürtünme kaynaklı olup, aşınma kaynaklı, kimyasal aşınmalar ve diğer aşınmaların oranları sırasıyla %20, %10 ve %20 olduğu iddia edilmektedir [48].

3.5 Yüzey Pürüzlülüğü

Tornalama işleminde en önemli proseslerden biri yüzey pürüzlülüğüdür. İşlenmiş parçalar için gerekli özellikler karşılaması için yüzey pürüzlülüğünün spesifikasyonlarını karşılamalıdır. Bir referans çizgisinden aritmetik ortalama sapma yüksekliği belirlenerek yüzey pürüzlülüğü ölçüsü hesaplanabilir. İşleme sırasında meydana gelen takım aşınması yüzey pürüzlülüğünde bozulmalar yaratır. Takımın körleşmesi kesme kuvvetinde artışa neden olacak ve daha fazla titreşime sebebiyet verecektir. Takım aşındıkça takım geometrisinde bozulmalar meydana gelir ve iş parçası yüzeyinde bozulmalara sebebiyet verir. Takım aşınması daha düşük yüzey pürüzlüklerine sebebiyet verse de takım uç yarıçapı aşınması daha yüksek yüzey pürüzlü hale getirir. İşleme sırasında oluşan ısı da plastik deformasyonlara sebebiyet verir bunun da yüzey pürüzlülüğüne olumsuz sonuçları olmaktadır [49].

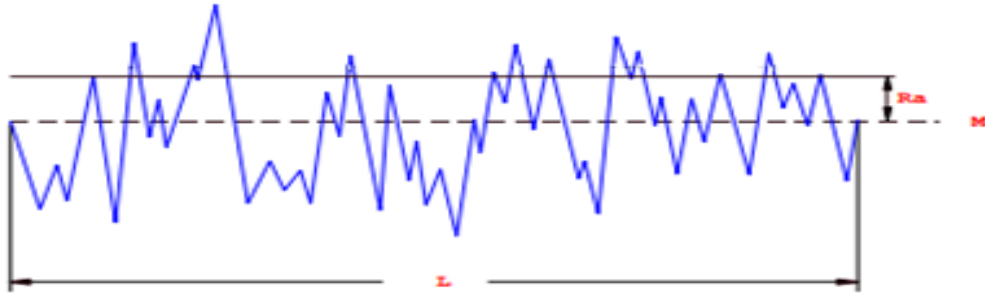
Birçok etken malzemenin yüzey kalitesini etkilemektedir. İş parçasında meydana gelen deformasyonlar, ilerleme miktarındaki değişkenlikler, iş parçası yapısal sıkıntılar, gevrek iş parçası işlenmesinde meydana gelen karışık talaş, soğutma ve yağlama durumu, iş parçasının kimyevi ve atomik yapısı, kesici takım şekli, takım tezgahının türü, sertliği ve çalışma koşulu, kalıp ve bağlama aygıtları ve talaş kaldırma şekli en önemlilerinden bazılarıdır [50].

Ra değeri 1,6 μm 'den fazla olduğunda pürüzlülük profili ölçümü yerine görsel kontrol kullanılır. Ancak mühendislik malzemeleri üretimi veya işlenmesi sırasında fazla stresli veya alışılmışın dışında çevresel etkilere sahip parçalar oldukları için daha ayrıntılı yüzey kalitesi özellikleri bulundurulur. Bu malzemelerin yüzey yapılarının ölçümleri için kalite kontrol şarttır. Yüzey kalitesinin üç boyutlu şekli aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.13. Yüzey kalitesinin üç boyutlu şekli [51]

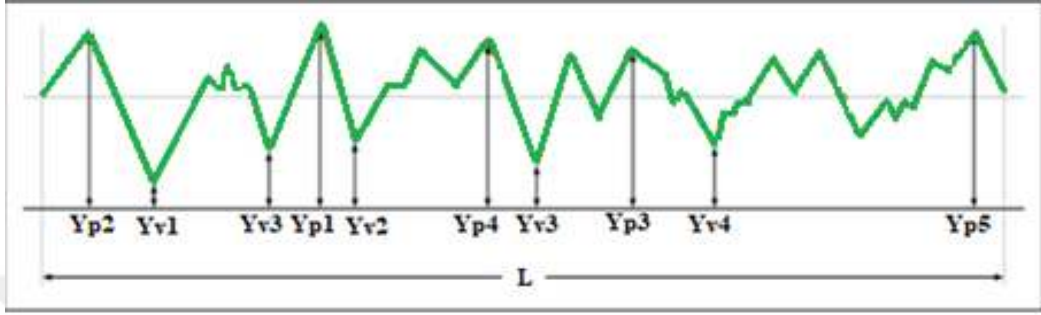
Kabalık, hatalar, izler ve dalgalık yüzey kalitesini belirleyen dört temel bileşendir. İşlenme sırasında kaynaklanan ince düzensizlikler pürüzlülük (kabalık) denir. Dalgalık, iş parçası yüzey yapısının daha yaygın aralıklı bileşenlerinin ölçümüdür. Hatalar, artıklar, çizgiler, çatlaklar ve delikler şeklinde olup hepsini kapsamaktadır. Hatalar belirtilmediği durumlarda yüzey pürüzlülüğüne dahil edilmezler. Ra sembolü pürüzlülük değerini göstermektedir (Şekil 3.15). Rz, ise on nokta yüksekliği olup örnekleme uzunluğu içerisinde beş derin çukur ve beş en yüksek tepe noktası arasındaki ortalama mesafeyi gösterir (Şekil 3.16).



Şekil 3.14. Ortalama yüzey pürüzlüğü (Ra) [52]

Örnekleme uzunluğu (I), pürüzlülük ve dalgalılığı ayırmak için kullanılan nominal dalga boyudur. Değerlendirme uzunluğu (L), yüzey parametre değerlerinin değerlendirildiği uzunluktur. Herhangi bir sayıda örnekleme uzunluğundan oluşabilmesine rağmen, değerlendirme uzunluğunun beş örnekleme uzunluğundan oluşması önerilir. Ortalama Çizgi, M, profil sapmalarının ölçüldüğü referans çizgisidir. Pürüzlülük profilinin ortalama çizgisi, genellikle, pürüzlülük örnekleme uzunluğuna karşılık gelen seçilen kesim ile analog veya dijital filtreler tarafından oluşturulur. Profil

Tepesi, ortalama çizginin üzerinde ve profilin ortalama çizgi ile iki kesişimi arasında kalan bir profil parçası üzerindeki maksimum yükseklik noktasıdır. Profil Vadisi, ortalama hattın altında ve profilin ortalama hattı ile iki kesişimi arasında kalan bir profil parçası üzerindeki maksimum derinlik noktasıdır. Profil Düzensizliği bir profil tepe noktası ve bitişiğindeki profil vadisidir.



Şekil 3.15. Ortalama mesafe (Rz)

3.6. Kesme Sıvıları MQL Sistemi ve Nanoakışkanlar

İmalat işlemlerinde düşük maliyet, yüksek verimlilik ve iyi ürün kalitesi beklentisi günümüzde giderek artmaya devam etmektedir. Yüksek kesme, ilerleme hızları ve kesme derinlikleri yüksek verimlilik ile ilişkilidir. Bundan dolayı kesme bölgesinde sıcaklık artışı kaçınılmaz olur. Sonuç olarak, malzemede boyut doğruluğu, takım ömrü ve yüzey bütünlüğünde bozulmalar oluşur. Kesme sıvıları iş parçasını ve kesici aletin kenarlarını işleme sırasında soğutma ve yağlamasını sağlamaktadır. İş parçasına, kesici takıma, çevreye ve tezgâha kesme sıvılarının etkisi Tablo 3.1’de bir arada gösterilmiştir.

Kesme sıvıları, yüksek kesme hızlarında ve yüksek işleme sıcaklıklarında makineyi ve iş parçasını soğutmaya yarar. Bozulmalar en aza indirilmiş olur. Soğutma sıvılarının takım malzemesinin termal yumuşatma sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda koruma kabiliyeti takım ömrünü uzatmasına da sebebiyet verir. Yağlayıcı özelliği ise tırmık yüzeyi, talaşlar, yan yüz ve iş parçası yüzeyi arasındaki temas alanlarını yağlar ve düşük kesme hızlarında yapışmayı ve aşınmayı azaltır. Kesme açısını arttırmaya yardımcı olur. Daha ince ve sıkı talaşların üretimine olanak sağlar, kesme bölgesindeki ısıyı azaltır ve güç tüketimini en aza indirir [54].

Tablo 3.1. Kesme sıvılarının malzemeye, kesici takım, tezgâh ve çevreye etkileri [53]

Malzeme	Kesici Takım	Tezgâh	Çevre
Geometrik Tamlık	Takım ömrünü uzatır	Talaşı uzaklaştırır	Havayı kirletir
Termal şok	Yapışmayı engeller	Isıyı azaltır	Toprağı kirletir
sebebiyle yüzeyin zarar görmesini engellemek			
Yüzey pürüzlülüğünü iyileştirme	Talaş formunu etkiler	Temizlik sağlar	Suyu kirletir
Talaşı uzaklaştırması	Kesici takımı temiz tutar		Deriyi tahriş eder
Korozyonu engellemesi			Akciğere zararlıdır

3.6.1. Kesme Sıvılarının Sınıflandırılması

Her bir kesme işleminde farklı performanslar gerektirdiği için kesme sıvılarının oldukça fazla kullanım alanı bulunur. Kesme sıvıları değişken özellikleri nedeniyle kategorize edilmek için su bazlı ve yağ bazlı olarak 2 gruba ayrılırlar.

Su bazlı kesme sıvıları kullanılmadan önce belirlenen konsantrasyonda su ile karıştırılırlar. Ürün su ile karıştırıldığında emülsifiye edilebilir bir emülsiyon oluştururken çözünür tipte bir çözelti oluşturur. Sudaki yağa, emülsifiye edici madde katılması ile emülsiyon oluşur (Tablo 3.2). Emülsiyonun stabilitesi, çözünür yağların en önemli özelliğidir. Suyun varlığı emülsiyonları soğutmada başarılı olurken, yağın varlığı suyun oksidasyona neden olma eğilimini azaltır. Yangın tehlikesi olmaması, daha düşük yağ buğulanma oranına sahip olmaları ve su ile seyreltildiği için maliyetinin düşük olması emülsiyonların avantajı olurken, yüksek miktarda su kullanılmasından kaynaklı bakteri, maya ve mantar gibi mikroorganizmaların istilası emülsiyonların zayıflıklarıdır. Bu zayıflıklar korozyona, yağlama özelliklerine ve malzeme görüntüsünde kötü sonuçlara sebep olabilir.

Yağ bazlı kesme sıvıları mineral, hayvan, sebze ve sentetik yağlardan sağlanır. Mineral yağlar, istenilen yağlama özellikleri nedeniyle öne çıkarlar. Bu yağlayıcılar takım-talaş ara bölgesine yağlama görevi için kullanılır ve işleme bölgesinde oluşan

sürtünme sebebiyle meydana gelen ısıyı en aza indirmiş olur. İş parçası yüzeyi ile takım tezgahında aşınmayı önlediği için takım tezgahının hareketli parçalarının yağlanması yararlıdır. Yağlama ve korozyon dirençlerinde iyi olmaları yağ bazlı kesme sıvılarının avantajları iken soğutmada zayıf oldukları için yüksek sıcaklıklarda yanıcılıkları dezavantajlarıdır (Tablo 3.3).

Tablo 3.2. Kesme sıvılarının uygulanması [54]

Yağ Türü	Görünüm	Kullanım	Seyrelti
Düzgün / Düz Yağlar	Yağlı, susuz	Ağır malzeme, korozyon inhibisyonu	Gerekli değil
Çözünür / Emülsifiye edilebilir yağlar	Süt rengi, sulu	Soğutma sıvısı ve yağlama korozyon inhibisyonu	Evet, %2-3
Yarı sentetik yağlar, çözünür	Yarı saydam	Soğutma sıvısı ve sulu yağlara göre daha az yağlama	Evet, %1-3
Sentetik yağlar	Şeffaf sulu	Mükemmel soğutma sıvısı, minimum yağlama	Evet, %1-5

Tablo 3.3. Kesme sıvısı tiplerinin avantaj ve dezavantajları [54]

Kesme Sıvısı Türü	Avantajlar	Dezavantajlar
Düz yağlar	Mükemmel yağlama ve pas kontrolü	Soğutmanın azlığı, yangın oluşturma ihtimali, sis oluşumu, yavaş ve ağır işleme işlemleri ile sınırlıdır
Çözünür yağlar	Soğutma ve yağlama	Pas sorunları, bakteri oluşması, buharlaşma
Yarı Sentetikler	Soğutma, pas ve mikrobiyal kontrol	Kolayca köpürür, stabilite su sertliğinden etkilenir ve diğer makine sıvıları tarafından kolayca kirlenir
Sentetikler	İyi soğutma yeteneği, mikrobiyal kontrol, alev almaz, iyi aşınma kontrolü, buğulanma ve köpürme sorunlarının azaltılması	Zayıf kayganlık

3.6.2. Kesme Sıvılarının İnsan Sağlığına Etkisi

Kesme sıvılarının soğutma ve yağlama özelliklerinin iyi olması beklenmektedir. Bunun yanında insan sağlığını da kötü etkilemelidir. Kesme sıvılarının sağladıkları birçok avantaj her geçen gün kullanımını daha da arttırmaktadır. 320.000 ton kesme sıvısının sadece Avrupa birliği içinde kullanıldığı bilinmektedir [55]. Kesme sıvılarının ömürlerini uzatmak için bakımlarının yapılması gerekmektedir. Kesme sıvılarının bakımları önemlidir. Bakımları yapılmayan sıvıları iş parçası, kesici takım, tezgâh ve operatör sağlığını doğrudan etkileyebilmektedir. Kesme sıvılarının insan sağlığı üzerindeki etkileri iyi araştırılması gereken konulardandır. Bu konuda Çevre ve Şehircilik Bakanlığı yazılar yayınlamıştır. Yayınlarında atık oluşumu olmadan kesme sıvısı kullanımına ve MQL sistemine önem vermiştir. Kesme sıvılarına maruz kalma zamanı ve seviyesi, kirlilik biçimi ve sıvının çeşidi kesme sıvılarının sağlık sorunun düzeyini tanımlar [56].

Soğutma sıvıları belirli şekillerde insan vücuduna temas ederek, bazı hastalıklara sebebiyet verebilmektedir. Yüksek hızlarda yapılan işlerde havalandırma sistemlerinin yetersiz olması operatörün yoğun kimyasala maruz kalmasına sebep olur. El ile temas, yüz maskesi kullanılmaması ve uygun iş kıyafeti seçilmemesi cilt rahatsızlıklarına, tahrişlere, kızarıklık, şişme ve isilikleri oluşturur. Cilt tahrişleri hafif veya yüksek şiddetlerde gözükabilir. Saf kesme yağlarının neden olduğu cilt tahrişine Folliculitis denir. Esas olarak yağlı giysilerin operatörün cildi ile temasında oluşur. Arıtılmamış mineral yağların cilt kanserine sebep olduklarına rastlanmıştır [57].

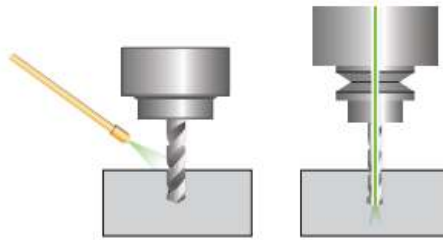
3.6.3. Minimum Miktarda Yağlama Yöntemi

Günümüz sektörde üretim ekonomisi kaynaklı iş parçası niteliği, işleme süreleri ve üretilen miktarlar kadar operatör ve çevre sağlığı da önemlidir. İşleme sırasında meydana gelen yüksek ısıyı düşürmek için kesme sıvısı kullanımı gerekmektedir. Kesme sıvılarının kimyasal unsur bulundurması beden ile temasında insan sağlığına veya atık yönetiminde uygulanan hatalar çevreye kötü sonuçlar barındırmaktadır. Kesme sıvılarının zararları ve maliyetlerinden ötürü kullanımını azaltmak ise ürün kalitesini ve takım ömrünü olumsuz etkiler. MQL yöntemi yağ damlacıklarını tazyikli hava ile kesme işlemi yapılan yüzeye püskürtülmesi ile kesici takımı soğutmaya, yüzey kalitesini iyileştirmeye, talaşları uzaklaştırmaya ve takımda oluşabilecek aşınmaları engellemeye yardımcı olur [58].

MQL sistemi diğer soğutma sistemlerinden farklı olarak kesici takım ve iş parçası arasına soğutma ve yağlama görevi görmek için az miktarda kesme sıvısı gönderilmesi

prensibi ile çalışır. Su bazlı soğutma işlemleri MQL işlemlerine göre 3 ila 4 kat daha verimlidir ve soğutma sırasında soğutma sıvısı pompası, soğutma veya filtreleme gerektirmediği için maliyetleri düşürür [59]. MQL sisteminde yağlama için kesme yağı, soğutma için ise tazyikli hava kullanılır. MQL sistemleri hem su bazlı hem de yağ bazlı kesme sıvıları kullanılması için elverişlidir. Kesme işlemi yapılan yüzeye çok az düzeyde kesme sıvısının tedarik edilmesi ile kuruya benzeyen işleme olarak da söylenir. Çok yüksek düzeylerde sıvı kullanımı olmadığı için çevre kirliliği oluşumunun önüne geçilmiş hem de maliyetler düşmüş olur. Bazı geleneksel talaş kaldırma işlemlerinde (tornalama, frezeleme, delme) MQL sistemleri kullanılabilir. İşlem sırasında kullanılan sıvı çoğu zaman 20 ile 150 ml/saat arasındadır ve sıvının hemen hemen tamamı bitmektedir [60].

MQL kesme bölgesine iletilen yağlayıcıya bağlıdır. Bazı işleme işlemlerinde harici püskürtme yeterli olurken bazı işlemlerde ise dahili püskürtme (Şekil 3.17) gereklidir. Dahili püskürtmeli sistemlerde maliyet dıştan püskürtmeye göre fazladır. Harici püskürtme kesici takım ve iş parçasının yüzeyine uygulanır. Çift kanallı sistemlerde dıştan püskürtme hava ve yağlayıcıyı ayrı biçimde alarak, bunları ucunda veya yakınında karıştırmak üzere tasarlanmıştır.



Şekil 3.16. MQL sistemlerinde harici ve dahili püskürtme [61]

Dahili püskürtmeli sistemlerde harici püskürtmeli gibi tek kanallı veya çift kanallı kullanılabilir (Şekil 3.18). Tek kanallı sistemde, aerosol aplikatörde veya kesme işlemine yakın bir yerde gerçekleşir. Çift kanallı sistemlerde ise hava ve yağ ayrı ayrı gönderilir ve aerosolü doğrudan takımın hemen önünde üretmek için kullanılır.

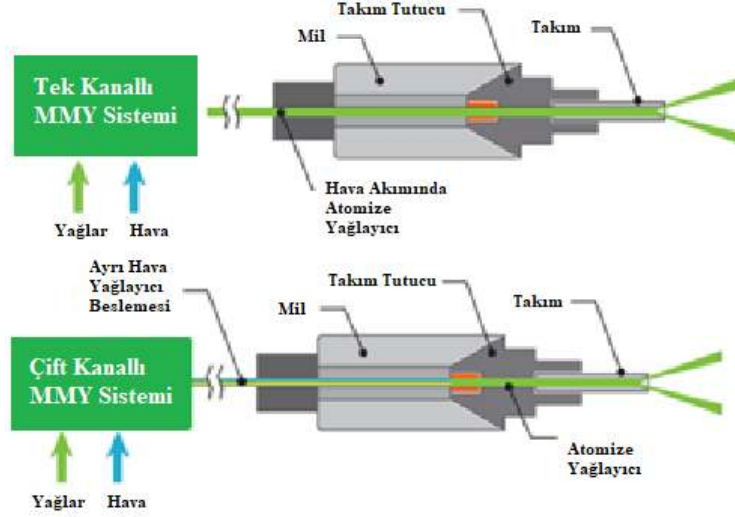
Harici püskürtmeli sistemde maliyetin düşük olması ve kurulumunun basit olması temel avantajlarıdır. Harici püskürtme sisteminin manuel olarak ayarlanması ve konumlandırması dezavantajıdır. Farklı uzunluktaki takımlara uyum sağlaması için ayarlanması gerekir. Yağlayıcının kesme bölgesine iletilirken dağılmasından dolayı

kayıplar meydana gelir. Bu olumsuzluklara rağmen harici püskürtme sistemi birçok işleme sisteminde başarılıdır. Dahili püskürtme ise makine mili, takım tutucu ve takım üzerinden kesme bölgesine iletilir. Genellikle yüksek hızlı işlemlerde kullanılır. Dahili püskürtme sistemi aerosolün kesime doğrudan, tutarlı ve hassas bir şekilde iletilmesini sağlar.

Çift kanallı sistemlerde (Şekil 3.18) hem harici hem de dahili püskürtmelerde daha iyi sonuçlar görülür. Kanallar iyi korunmalıdır. MQL sistemi için tasarlanmış makinelerde ayrı kanallar mile getirilir ve iğ boyunca taşınır. İş miline geldiğinde, yağlayıcı takım tutucuya dağıtım borusu vasıtasıyla taşınabilir. Hava, sıvının geçtiği boruyu çevreleyen bölmeden geçer. MQL'e özgü olmayan makinelerde, iş milinin sonuna yakın bir yerde karıştırılır. Aerosol alet vasıtasıyla gönderilir. Dahili olarak beslenen tek kanallı ve çift kanallı sistem Tablo 3.4'te kısa özeti verilmiştir.

Tablo 3.4. Dahili olarak beslenen tek ve çift kanallı sistemlerin kısa özeti [61]

Tek kanallı sistem	Çift kanallı sistem
Sel ve MQL arasında geçiş yapılabilir	İşleme merkezlerinde takımlar ve kesimler arasında geçiş için iyi yanıt
Aerosol akışının birden fazla iş miline basit şekilde yönlendirilmesi	Bir üniteden birden fazla iğ tedarik etmek daha karmaşıktır
Döner bağlantıları ve diğer iç parçaları yağlayabilir	Kuru çalışabilen bir döner bağlantı gerektirir
Dahili sıvı beslemesi için standart takım tutucu mümkün	Mevcut MQL 'ya özgü takım tutucular sadece HSK (İç boş konik shaft) tarzındadır
Karmaşık kanallardan besleme genellikle mümkündür	Karmaşık kanallardan geçmek zor
Devir hızından etkilenen etkili yağlama maddesi	RPM'den bağımsız olarak teslim edilen yağlayıcı
Yağlayıcıyı ve havayı değiştirmek için reaksiyon süresi nispeten yavaştır	Yağlayıcı ve hava akışındaki değişikliklere hızlı tepki verme süresi
Daha fazla hava basıncı gerekli (> 4 bar veya 60 psi)	



Şekil 3.17. Tek ve çift kanallı MQL sistemleri [61]

3.6.4. Nanoakışkanlar ve özellikleri

Sürdürülebilir üretim sırasında takım tezgahlarının enerji tüketiminin verimliliğini artırmak için talaşlı imalat işlemlerinin optimum seviyelerini bulmak önemlidir. Bunun için endüstri ve araştırmacılar talaşlı imalat sırasında kullanılan kesme sıvılarının maliyetleri, depolama, çevresel ve operatör sağlığı gibi olumsuz öğelerinden dolayı MQL ve kriyojenik işleme gibi alternatif çözümleri araştırmaya başlamışlardır. Talaş kaldırma işlemi sırasında sürdürülebilir üretim için kesici takım ömrünün uzatılması önemlidir. Geleneksel kesme sıvılarına belirli konsantrasyonlarda nanopartikül ilave ederek işleme sırasında verimliliğin arttırarak kesme sıvılarının termo-fiziksel özelliklerinin geliştirdiğini bulunmuştur [73].

Nanoakışkan, baz sıvı içerisine (su, yağ, alkol, soğutucu vb.) 100 nm altında metal veya metalik oksit nanoparçacıkların süspanse edilmesi olarak tanımlanır. Kesme sıvısının ısı iletkenliği, viskozitesi, özgül ısı ve yoğunluğu nanoparçacıklar katıldıktan sonra farklılık gösterebilir [62]. Talaşlı üretim işlenebilirlik araştırmalarında birçok araştırmacı kesme sıvısının nanoparçacık eklenmesiyle kullanımını araştırmaya başlamışlardır. Bu araştırmaların neticesinde nanoparçacıkların kesme sıvısına süspanse edilmesi ile soğutma ve yağlama özelliklerinde gelişme olmasını beklenir. Nano teknolojiye bu ilerleme kesme sıvısının termo - fiziksel ve tribolojik özelliklerini inceleyerek işleme performansını arttırmayı hedeflemişlerdir [63].

Kesme sıvılarına nanoparçacıkların homojen süspanse edilmesi ile oluşturulan sıvıya nanoakışkanlar denir. Birçok araştırmacı tarafından Cu, O, Al₂O₃, grafen ve grafit gibi farklı katı parçacık yağlayıcıları denenmiştir. Kesme sıvısına eklenecek olan partiküllerin seçimi büyük öneme sahiptir. Termal özelliklerin iyileşmesi metalik oksit eklenmesinde gözlemlenirken, grafit ve MoS₂ gibi parçacıkların sürtünmede azalmalara ve baz sıvının yağlama özelliklerinde iyileşmelere yol açar. Tanecik büyüklüklerine göre nanoakışkanlar değişik performanslar göstermektedir [63].

Nanoakışkan hazırlanması için kullanılan nanoparçacıkların metal bazlı, metal oksit bazlı, karbon bazlı ve hibrit/karışık metal bazlı olarak sınıflandırılırlar. Bu parçacıklar su, etilen glikol, yağ vb. gibi akışkanlarla karıştırılırlar. Nanoakışkanların karalılığı da önemli araştırma konularından bir tanesidir. Metal bazlı nanoakışkanlar (Cu, Ag, Au vb.) nanoparçacıkların eklenmesi ile oluşur. Metal oksit nanoakışkanlar (TiO₂, Fe₃O₄, ZnO, Al₂O₃ vb.) ekonomik nanoparçacıkların kullanmasından dolayı endüstride kullanılan en yaygın türdür. Termal özelliklerinde en iyi gelişmeyi karbon bazlı nanoakışkanlar gösterse de yüksek maliyeti caydırıcıdır. Birden fazla nanoparçacığın bir araya gelerek oluşturduğu nanoakışkan türü hibrit/karışık metal bazlı nanoakışkanlardır [62].

Kesme sıvılarının ısı iletkenliklerinin performanslarını arttırmak için nanoparçacık kullanımı önemlidir. Kesme sıvılarına nanopartiküllerin ilave edilmesi için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar tek adımlı ve iki adımlı olarak adlandırılırlar. Tek adımlı yöntem nanoparçacıkların doğrudan fiziksel buhar biriktirme tekniği veya kimyasal yöntemle hazırlanan Nanoakışkanların sentezi ile birleştirilmesi olarak tanımlanır. İki aşamalı yöntem ise nanoparçacıkların baz sıvı içerisine dağıtılması ile gerçekleştirilir [64].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Dördüncü bölümde işleme testlerinde kullanılan materyal ve yöntemlerden bahsedilerek, Ti-6Al-4V alaşımının nano grafen parçacık (NGP) takviyeli kesme sıvısının MQL sistemi ile işlenmesinde, kesme parametreleri ve kesme şartlarının, yüzey pürüzlülüğü (Ra), takım aşınması ve talaş formlarının üzerindeki sonuçları araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar farklı kesme hızı, ilerleme hızı, nanoakışkan konsantrasyon oranında ve sabit kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Böylece nanoakışkanın konsantrasyon oranlarının hem de kesme parametrelerinin MQL sisteminde etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır.

4.1. Deneylerde Kullanılan İş Parçası

Bu çalışmada tornalama işleminde, iş parçası olarak Ø50x100 mm ölçülerinde silindirik Ti-6Al-4V alaşımı kullanılmıştır. Titanyum alaşımının kimyasal içeriği Tablo 4.1’ de, mekanik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal özellikleri (Ağırlıkça %)

% ağırlık olarak elementlerin bileşimi								
C	Ti	Al	V	Fe	O ₂	Cu	H	N
0.02%	88%	5.72%	4.10%	<0.02%	<0.2%	0.12%	0.005%	0.022%

Tablo 4.2. Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	4,42	g/cm ³
Kesme mukavemeti,	760	MPa
Çekme mukavemeti, nihai	1170	MPa
Çekme mukavemeti, verim	1100	MPa
Özgül ısı kapasitesi	0,5263	J/g-C°
Termal iletkenlik	6,7	W/m-K
Erime noktası	1660	C°

4.2. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı

Deneyler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında, Mekanik Testler bölümünde bulunan SIEMENS kontrol ünitesine sahip

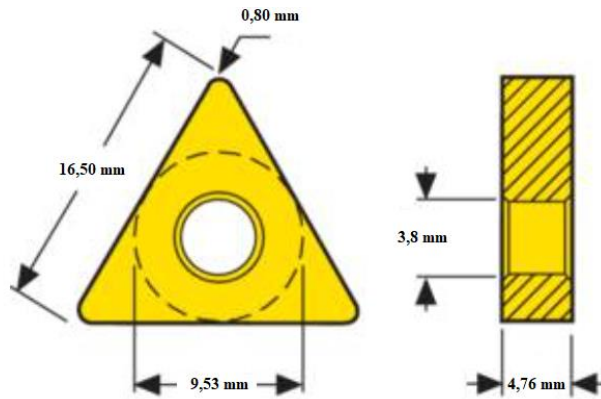
SPINNER marka TC400 52 MC model CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. CNC torna tezgahına ait teknik açıklamalar Tablo 4.3’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. CNC torna tezgahına ait teknik özellikler

Özellik	Değer	Birim
Ticari Marka	Spinner TC400	
Çevirme Çapı	400	mm
Maksimum Tornalama Çapı	280	mm
Maksimum Tornalama Boyu	400	mm
Maksimum Çubuk İşleme Çapı	52	mm
Fener Mili Sistemi	Built-In 5000	RPM
Kontrol Paneli	Fanuc 32 iTb / Siemens 840 D SL	

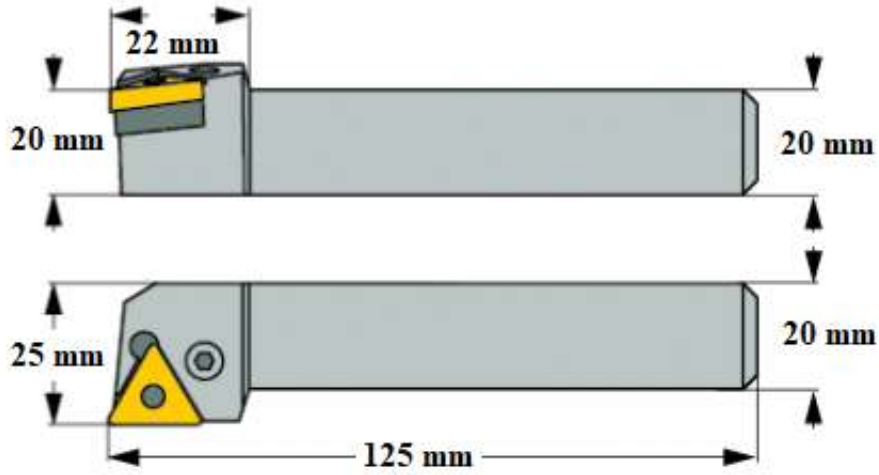
4.3 Deneylerde Kullanılan Kesici Takım ve Takım Tutucu

Tornalama deneyleri Secotools tarafından imal edilen TNMG160408 – MF1, TS2000 kodlu PVD kaplı karbür kesici takımlarla gerçekleştirilmiştir. Kesici takımlara ait detay resimleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan kesici takıma ait geometri ve ölçüler

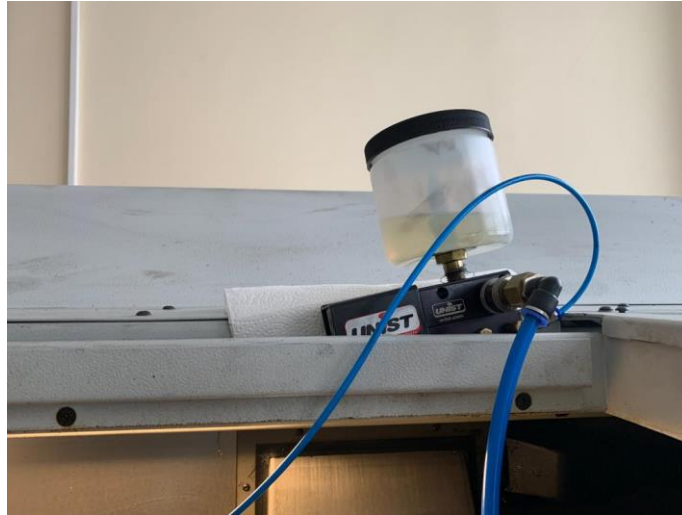
İşleme deneylerinde torna tezgahına kesici takımın bağlanması için ISCAR firması tarafından üretilen PTG NR 2020K-16 kodlu takım tutucu kullanılmıştır. İşleme deneylerinde kullanılan takım tutucuya ait detay resim Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan takım tutucuya ait ölçüler

4.4. Deneylerde Kullanılan Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

Yapılan çalışmada minimum miktarda yağlama sisteminin uygulanması için UNİST firması tarafından üretilen soğutma/yağlama sistemi kullanılmıştır. Kesme işlemi sırasında baz yağ ve nanogرافen katkılı kesme sıvısı az miktarlarda basınçlı havayla birlikte nozul yardımıyla kesme bölgesine püskürtülmüştür. MQL sistemi Görsel 4.1’te gösterilmiştir. 4 bar basınçla kesme bölgesinde minimal yağlama uygulaması yapılmış olup kullanılan yağın debisi 100 ml/saat’dir.



Görsel 4.1. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

4.5. Deneylerde Kullanılan Nanoakışkanların Hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanması Eskişehir Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümü, Bor Uç laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanların

hazırlanmasında baz sıvı, Blaser marka CSF 35 model ester bazlı kesme sıvısı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme sıvısının teknik özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. *Blaser CSF 35 Kesme sıvısı özellikleri*

40 ° C'de viskozite	20 ° C'de yoğunluk	Parlama noktası	Ester oranı	Mineral Yağ içeriği	Çinko içeriği	Klor içeriği	Sülfür içeriği	Renk
35 mm2	0,90 g/cm3	333 °C	>90 %	%0	%0	%0	%0	Sarı

Kesme sıvısının işleme işlemleri sırasında daha iyi soğutma ve yağlama görevi sağlması için hacimce %0,5 ve %1 NGP partiküller eklenerek hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan nanopartiküllerin teknik özellikleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

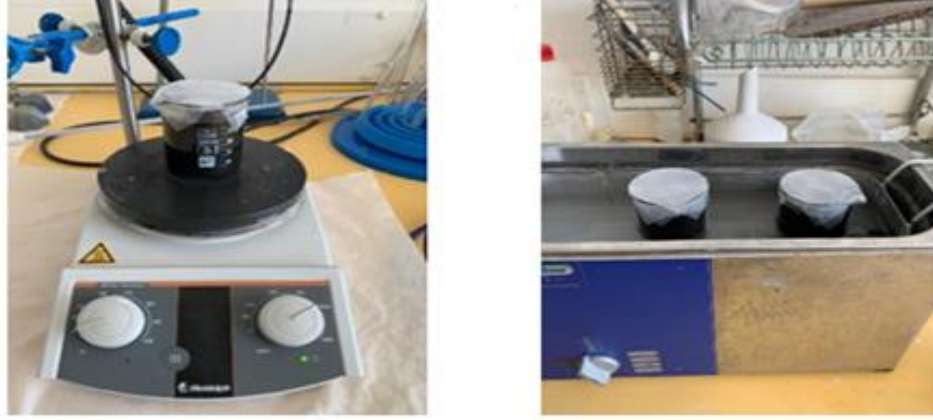
Tablo 4.5. *Nanografen özellikleri*

Nanografen	Değer	Birim
Safılık	99.9+	%
Kalınlık	5	nm
Çap	7	µm
Yüzey alanı	135	m ² /g
İletkenlik	1100-1600	s/m

Nanoakışkanların hazırlanması için tek aşamalı ve iki aşamalı dediğimiz iki hazırlama yöntemi bulunur. Tek aşamalı yöntemde daha küçük boyutlu parçacıklar oluşması avantaj olarak görünse de sadece düşük buhar basıncına sahip kesme sıvılarının hazırlanmasında kullanılması uygundur. Bir diğer hazırlama yöntemi olan iki aşamalı yöntem ultrasonik, manyetik ve mekanik karıştırıcılar ile gerçekleştirilir. Parçacık boyunun küçük olması ve homojen dağılımın olması için nanoparçacıklar kesme sıvısına sık sık karıştırılması gerekir [75].

Ester bazlı kesme sıvısına hacimce %0, %0,5 ve %1 konsantrasyon oranında NGP partikülleri, literatürden edinilen bilgiler doğrultusunda iki aşamadan oluşan karıştırma işlemi ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak NGP partikülleri Heidolph marka mekanik karıştırıcıyla 90 dakika 750 dev/dak 'da karıştırılmıştır. Elma marka S70 model ultrasonik banyo yardımıyla 60 dakika boyunca karıştırma işlemi devam etmiştir. Kullanılan

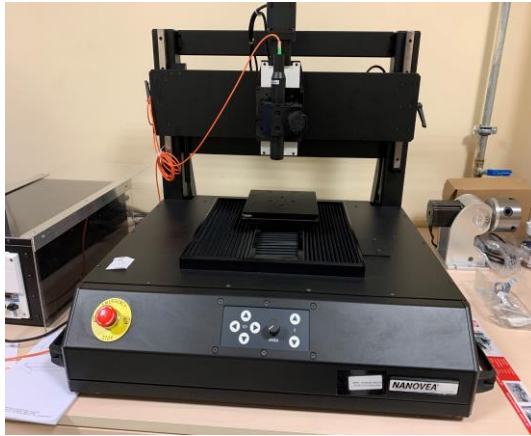
karıştırıcılar Görsel 4.2’te gösterilmiştir. Aglomerasyon oluşmaması ve homojenliğin kaybolmaması için sıvılar uzun süreler bekletilmeden deneyler gerçekleştirilmiştir.



Görsel 4. 2. Nanoakışkanların hazırlanması için kullanılan manyetik karıştırıcı ve ultrasonik banyo

4.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

Yüzey pürüzlülük ölçümleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Mikro İşleme bölümünde bulunan ise NANOVEA markalı profilometre cihazı kullanılmıştır. Ölçümler işlenen parça yüzeyinde 30 mm uzunluğunda gerçekleştirilmiş olup Ra değeri sonuçları incelenmiştir. Görsel 4.3’te yüzey pürüzlülük ölçümleri için kullanılan cihaz gösterilmiştir.



Görsel 4.3. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

4.7. Takım Aşınması Ölçülmesi

Yanal yüzey aşınmaları, takım aşınması ve talaşlar Görsel 4.4’te gösterilen Zeizz marka optik mikroskop yardımıyla deneyler sonrasında ölçülmüştür. Ölçümler X50 seviyesinde gerçekleştirilmiştir.



Görsel 4.4. *Optik Mikroskop*

4.8 Deneysel Tasarım ve Kesme Parametreleri

Çalışmanın amacı nanopartikül katkılı kesme sıvısının MQL sistemi ile işlenebilirliğinin etkisini incelemektir. Değişkenler literatür taraması neticesinde belirlenmiştir. İşleme testleri sonucunda kaydedilen verilerin ANOVA analizi gerçekleştirilmiş ve yorumlanmıştır.

Taguchi metodu malzemenin verimliliğini arttıran yaygın bir işlemdir. Yapılan deneylerin sayısını minimuma indirmesi ve deneylerin optimum seviyelerini belirlemesi Taguchi metodunun son yıllarda yoğun şekilde kullanımını arttırmıştır. Bu çalışmada kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme sıvısına eklenen farklı nanopartikül konsantrasyonun yüzey pürüzlülüğü ve takım ucu yan yüzey yanak aşınmasına etkileri belirlenmiş ve optimum seviyeler gösterilmiştir. Faktör seviyeleri Tablo 4.6’da gösterilmiştir. Burada Tablo 5.1’de gösterildiği gibi deney parametreleri incelendiğinde faktörlerin tüm kombinasyonları içerdiği için yüzey pürüzlülüğü deneylerinde Taguchi L27 ortogonal dizisinin en uygun olduğu belirlenmiştir. Bu şekilde regresyon analizi aktif şekilde yapılması muhtemel olmuştur [74].

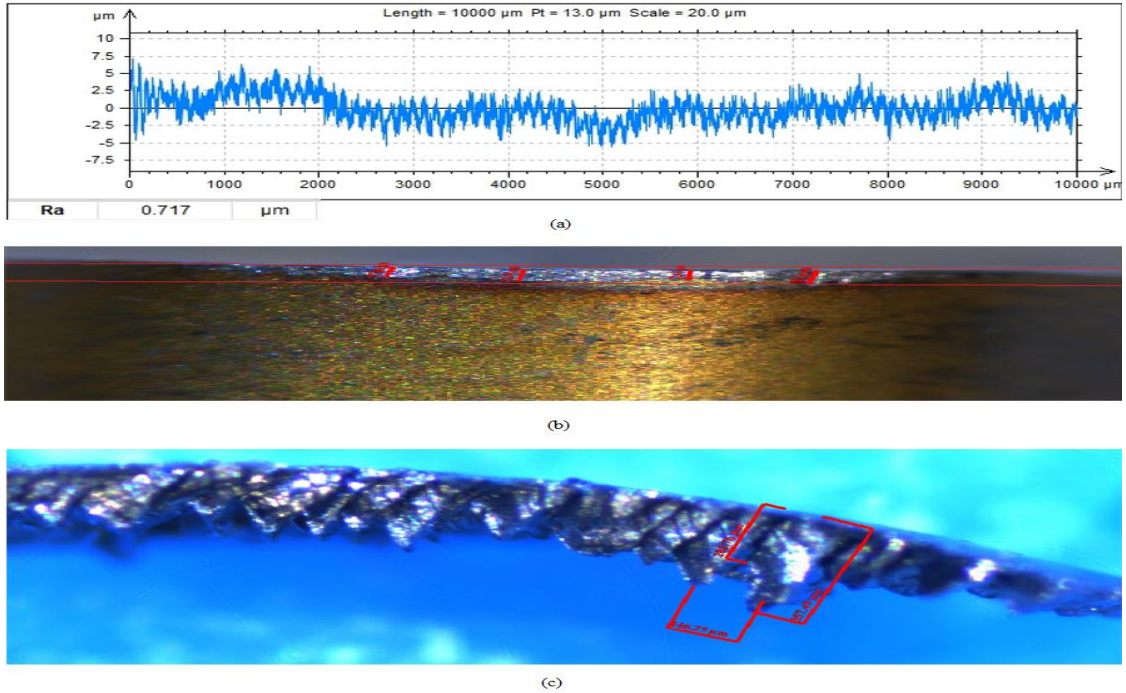
Optimum kesme parametrelerini belirlenmesi için deneyler Taguchi L27 metodunda güvenilirlik için 2’şer defa gerçekleştirilmiştir. Farklı işleme parametreleri (kesme hızı, ilerleme ve ester bazlı kesme sıvısına hacimce farklı oranlarda nanopartikül ilavesi) ile bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 1mm sabit kesme derinliği kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kesme hızı ile ilerleme hızı literatür taraması ve üretici firma önerilerine göre belirlenmiştir. Tablo 4.6’da deney girdi parametreleri verilmiştir.

Deneyler sonucunda işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğü ve takım aşınması ölçülmüş olup talaş morfolojisi belirlenmiştir.

Tablo 4.6. Deney tasarımında kullanılan parametreler

Seviyeler	Kesme hızı V (m/dak)	Katkı oranı (% hacimce)
1	80	0
2	100	0,5
3	120	1

Deneyler gerçekleştirildikten sonra ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ele alınmıştır. İşleme testleri 40 mm boyunca gerçekleştirilmiş olup her 10 mm’de bir Ra değeri alınmış ve ortalama değeri Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Deney sırasın sonuçların etkilenmemesi ve yüzey oksitlenmesi gibi durumlardan kaçınmak için yüzey pürüzlülük ölçümleri her işleme sonrası yapılmıştır. Çalışma sonrasında literatür taraması ve takım özellikleri dikkate alınarak belirli parametrelerde Zeizz marka optik mikroskop yardımıyla yanak aşınması ve talaş morfolojisi incelenmiştir. Görsel 4.5’te (a,b,c) tornalanmış yüzeyin yüzey pürüzlülük profili, yan yüzey yanak aşınması (Vb) ve talaş morfolojisi için tipik sonuçlar verilmiştir.



Görsel 4.5. Tipik deneysel sonuçlar (a) Yüzey pürüzlülük profili (Nanoeva profilometre), (b) Takım aşınması (optik mikroskop) ve (c) Talaş morfolojisi (optik mikroskop)

5. SONUÇ

Bu çalışma, titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V malzemesi tornalama yöntemi ile işlenmiştir. Çalışma kesme sıvısına farklı konsantrasyonlarda nano grafen ilavesinin MQL sistemi ile farklı kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerinde etkilerini araştırmayı amaçlamıştır. Belirlenen parametreler sonucunda yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü, takım ucu yan yüzey aşınması ve talaş morfolojisi üzerine etkileri araştırılmıştır. Deney tasarımında yüzey pürüzlülüğü için Taguchi L27 dikey dizini, takım ucu yan yüzey aşınması için Taguchi L9 dikey dizini kullanılmıştır. Yapılan bu deneylerin sonuçları, sonuçların analizi ve analizlerin yorumları verilmiştir.

5.1 Kesme Parametreleri ile Nanoakışkan Konsantrasyon Oranının Optimize Edilmesi

Taguchi L27 dikey dizini kullanılarak farklı kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenerek optimum parametre sonuçları bulunmaya çalışılmıştır.

5.1.1 Taguchi L27 deneyleri için S/N oranlarının analizi

Nano akışkan konsantrasyon oranı, kesme hızı ve ilerleme hızının kontrol faktörü olarak kullanıldığı Taguchi'nin L27 dikey dizinine göre tornalama deneyleri yapılmıştır. Tablo 5.1'de deneysel çalışma sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları ve analizi ile elde edilen S/N oranları verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük olması istendiğinden S/N oranlarının hesaplanmasında en küçük en iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) 1,126 μm , yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranı ise -0,0017 dB olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları ve S/N oranları

	A	B	C		
Deney No	Kesme Hızı (v) (m/dak)	İlerleme Hızı (f) (mm/dev)	Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı (%)	Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) (μm)	Yüzey Pürüzlülüğü S/N Oranı (dB)
1	80	0,12	0	0,763	2,349509
2	80	0,12	0,5	0,63	4,013189
3	80	0,12	1	0,875	1,15 9839
4	80	0,18	0	0,86	1,310031

Tablo 5.1. L27 Deney sonuçları ve S/N oranları (Devamı)

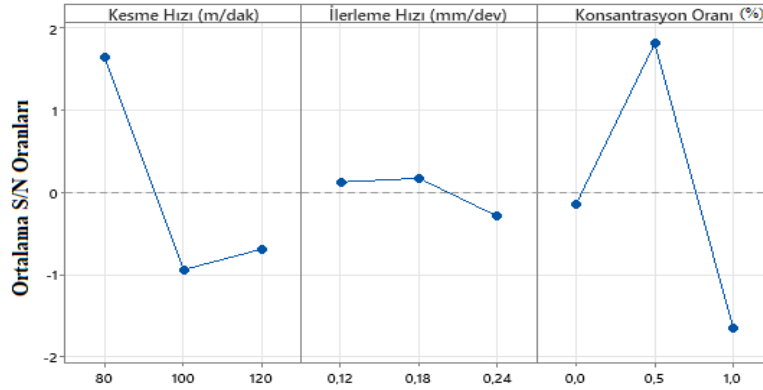
	A	B	C		
Deney	Kesme	İlerleme	Nanoakışkan	Yüzey	Yüzey
No	Hızı	Hızı	Konsantrasyon	Pürüzlülüğü	Pürüzlülüğü
	(v)	(f)	Oranı	(Ra)	S/N Oranı
	(m/dak)	(mm/dev)	(%)	(μm)	(dB)
5	80	0,18	0,5	0,611	4,279176
6	80	0,18	1	0,904	0,876631
7	80	0,24	0	0,93	0,658405
8	80	0,24	0,5	0,81	1,8303
9	80	0,24	1	1,23	-1,7981
10	100	0,12	0	1,22	-1,7272
11	100	0,12	0,5	1,04	-0,3407
12	100	0,12	1	1,26	-2,0074
13	100	0,18	0	1,06	-0,5061
14	100	0,18	0,5	0,871	1,19964
15	100	0,18	1	1,44	-3,1672
16	100	0,24	0	1,14	-1,1381
17	100	0,24	0,5	0,825	1,67092
18	100	0,24	1	1,33	-2,477
19	120	0,12	0	1,12	-0,9065
20	120	0,12	0,5	0,888	1,03174
21	120	0,12	1	1,33	-2,477
22	120	0,18	0	1,11	-0,9844
23	120	0,18	0,5	0,82	1,72372
24	120	0,18	1	1,45	-3,2274
25	120	0,24	0	1,05	-0,4238
26	120	0,24	0,5	0,909	0,82872
27	120	0,24	1	1,23	-1,7981

S/N yanıt tablosu Taguchi metodundaki parametrelerin yüzey pürüzlülüğü için en iyi seviyeleri hangi faktörlerin belirlediğini ve faktörlerin yanıtlarını göstermektedir. Tablo 5.2’te S/N yanıt tablosu verilmiştir. Tabloda kontrol faktörlerindeki en yüksek değerler en iyi seviyeyi göstermektedir.

Tablo 5.2. Yüzey pürüzlülüğü S/N yanıt tablosu

Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			
Kontrol Faktörleri			
Seviyeler	A	B	C
Seviye 1	1,6310	0,1217	-0,152
Seviye 2	-0,9437	0,1671	1,8041
Seviye 3	-0,6925	-0,2941	-1,6573
Delta	2,5747	0,4612	3,4614

En iyi yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını gösteren faktörler sırasıyla faktör A (Seviye 1, S/N=1,6310), faktör B (Seviye 2, S/N=0,1671) ve faktör C (Seviye 2, S/N=1,8041) olarak sonuçlanmıştır. Diğer bir ifadeyle; optimum yüzey pürüzlülüğü değeri 80 m/dak kesme hızında (A1) ve 0.18 mm/dev ilerleme hızında (B2) ve %0,5 konsantrasyon oranında (C2) elde edilmiştir. Şekil 5.1’de yüzey pürüzlülüğü için ortalama S/N oranlarını gösteren grafikler verilmiştir. Grafikte optimum seviyeler S/N oranının en yüksek olduğu noktalardır. Yüzey pürüzlülüğü için en önemli değişkenin katkı oranı olduğu söylenebilir.



Şekil 5.1. L27 Yüzey pürüzlülüğü için ortalama S/N oranları grafiği

5.1.2 Varyans analizi (ANOVA)

Bu çalışmada kullanılan faktörlerinin (nano akışkan konsantrasyon oranı ve kesme hızı ve ilerleme hızı) yüzey pürüzlülüğüne etki seviyelerinin anlaşılması için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ANOVA analizi sonuçları Tablo 5.3’te verilmiştir. Tablo 5.3’teki varyans analizi (ANOVA) tablosu incelendiğinde yüzey

pürüzlülüğü için en önemli faktörün konsantrasyon oranı (%52,65) olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla kesme hızı (%31,68) ve ilerleme hızı oranı (%0,56) takip etmiştir.

Tablo 5.3. *Yüzey pürüzlülüğü deneyleri ANOVA sonuçları*

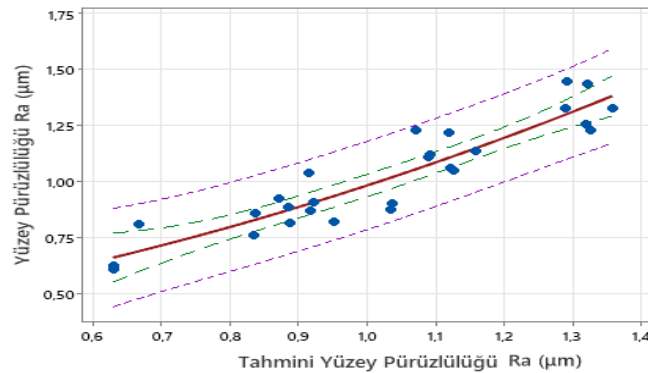
Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı Oranı (%)
A	2	0,44407	0,222034	20,96	0,0000	31,68
B	2	0,00785	0,003923	0,37	0,695	0,56
C	2	0,73815	0,369077	34,84	0,0000	52,65
Hata	20	0,21188	0,010594	-	-	15,11
Toplam	26	1,40195	-	-	-	100

5.1.3 Regresyon analizi

Yüzey pürüzlülüğü sonuçları için lineer regresyon denklemleri bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirinin bağlantılarının açıklanması için oluşturulmuştur. Burada bağımlı değişken yüzey pürüzlülüğü, bağımsız değişkenler ise NGP katılı nano kesme sıvısı konsantrasyon oranı (%) ve kesme hızı (V)'dır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için ulaşılan denklem Eşitlik 5.1'de belirtilmiştir;

$$\text{Yüzey Pürüzlülüğü } R_a \text{ (}\mu\text{m)} = 0,232 + 0,00638 \text{ Kesme Hızı (m/dak)} + 0,310 \text{ İlerleme (mm/dev)} + 0,1999 \text{ Konsantrasyon Oranı (\%)} \quad (5.1)$$

Kuadratik denklem sonucunda R^2 değeri yüzey pürüzlülüğü için 0,985 olduğu bulunmuştur. Gerçek değerler ile tahmini yüzey pürüzlülüğü değerlerinin karşılaştırılması Şekil 5.2'te verilmiştir.



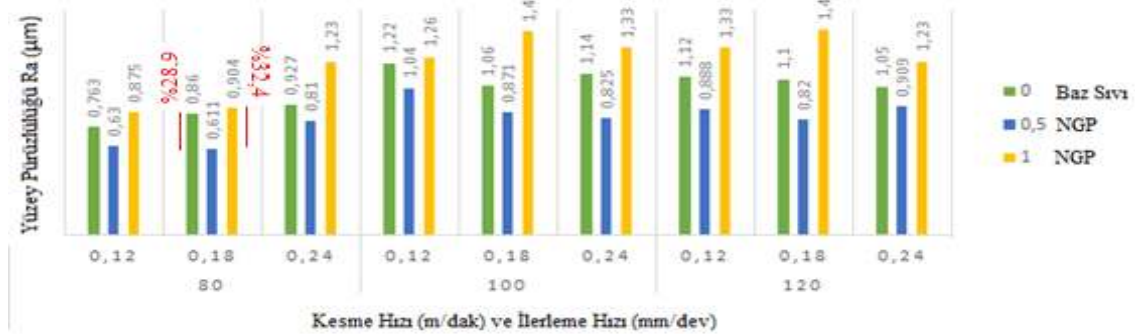
Şekil 5.2. *L27 yüzey pürüzlülüğünde gerçek değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması*

Şekil 5.2’de pembe çizgiler tahmini değerlerin sınırı, yeşil çizgiler güven aralığı ve bordo çizgi regresyon sınırını göstermektedir.

Ti-6Al-4V malzemesinin işlenmesi sırasında meydana gelen ısıyı azaltmak ve talaşı uzaklaştırmak için kullanılan kesme sıvısına farklı konsantrasyonlarda uygulanan NGP ilavesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değişimi üzerinde etkileri incelenmiştir.

5.1.4 Yüzey pürüzlülüğü Ra değerlendirmesi

Şekil 5.3’te işleme sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri kesme sıvısına eklenen NGP partiküllerinin belirli konsantrasyonlarda, kesme hızlarında ve ilerleme hızlarında gösterilmiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülüğü sonucu kesme hızında 80 m/dak, ilerleme hızında 0.18 mm/dev ve NGP (%0,5) katkılı kesme sıvısı parametreleri kullanılan işlemede görülmektedir. Bu deney sonucu baz kesme sıvısı ve NGP (%1) katkılı kesme sıvısı MQL kesme koşuluna göre sırasıyla %28,9 ve %32,4 daha iyi sonuç vermektedir.



Şekil 5.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (μm)

Yapılan işleme testleri incelendiğinde (Şekil 5.3) baz kesme sıvısına hacimce %0,5 eklenen NGP katkılı nanokesme sıvısı yüzey pürüzlülükleri için en iyi sonuçları vermektedir. 80 m/dak kesme hızında ve sırasıyla 0.12, 0.18 ve 0.24 mm/dev ilerlemede %17,43- %28,9 ve %12,6 oranında, NGP (%0,5) katkılı kesme sıvısı baz kesme sıvısına göre daha iyi yüzey pürüzlülüğü sonucu vermiştir. Aynı şekilde 100 m/dak kesme hızında ve aynı ilerleme parametrelerinde yapılan deneylerde NGP (%0,5) katkılı kesme sıvısı baz kesme sıvısına sırasıyla %14,75 - %17,83 - 27,63 oranında ve 120 m/dak kesme hızında, aynı ilerleme parametrelerinde %20,7 - %25,45 ve %14,5 oranında iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir.

Malzemelerin işlenmesi sırasında meydana gelen yüksek sıcaklıklar takım ve iş malzemesi yüzeyine zarar vermektedir. Geleneksel kesme sıvıları üretim aşamasında ve sonrasında çalışan sağlığına ve doğaya zarar vermektedir. Maliyet, depolama ve uzaklaştırma gibi etkenlerde yüksek maliyetlere etki etmektedir [65]. Üretim maliyetleri ve işleme sırasında meydana gelen sıcaklıkların giderilmesi için kullanılan geleneksel kesme sıvılarının gelişen endüstride yenilikçi sistemlere geçilmesi öngörülmektedir [23].

Nitekim Zeyrek ve Er [66], yaptıkları çalışmada Ti-6Al-4V alaşımının tornalanması sırasında kuru ve bitkisel bazlı MQL ile işlenebilirliğini incelemişlerdir. Kesme derinlikleri ve kesme hızlarının arttığı durumlarda sıcaklığın çok yükseldiğini, kuru kesmenin bu şartlarda kesme sıvılarına nazaran yetersiz kaldığını belirlemişlerdir. Kesme sıvılarının malzeme ve kesici uç arasında ısılatma görevi gördüğünden kesme kuvvetinde iyileşme ve yüzey pürüzlülüklerinde kuru işlemeye göre daha iyi sonuçlar gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Burada çözüm geleneksel kesme sıvıları olarak görünse de artan maliyetler, çevre ve operatör sağlığına zararlar alternatif soğutma sistemlerinin araştırılmasının önünü açmıştır. MQL sistemleri geleneksel sıvılara göre daha az sıvı kullanılması ve kesme bölgesine yüksek basınçla püskürtülmesi kesici takım ve iş parçası için daha avantajlı olmaktadır. MQL sistemlerinde kesme sıvılarına nanoparçacıkların ilavesiyle ısı iletkenliklerinde ve yağlayıcılık gibi özelliklerinde gelişme amaçlanmış, işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Uysal [67], yaptığı çalışmada kesme sıvısına belirli konsantrasyonlarda nano MoS_2 parçacıkları ilave ederek frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüklerini kuru, MQL ve MQL (MoS_2) ile karşılaştırmıştır. Kesme sıvısında nanoparçacık kullanımının yüzey pürüzlülük değerinde kuru ve MQL'ye göre iyileşme gözlemlenmiştir.

Burada aynı durum NGP (%1) katkılı kesme sıvısı için söylenememektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde tüm durumlar için kesme sıvısı içerisine eklenen NGP miktarının artması yüzey pürüzlülük sonuçlarında bozulmalara neden olmuştur. Kesme sıvılarında nanoparçacık kullanımının konsantrasyon oranında belirli bir noktaya kadar olumlu etkisi olduğunu göstermektedir. Konsantrasyon oranının artması ile daha büyük boyutlu partiküllerin oluşması yani yapışma veya gruplaşmasına neden olabilmektedir. Bu durum yağlama kararlılığının zayıf olmasına sebep olabilmektedir [68]. Bir başka etken daha fazla nanoparçacığın işleme sırasında yüzeyde bulunan pürüzler ile çarpışması daha yüksek kesme kuvvetlerine ihtiyaç duymasını gerektirecektir [69].

5.2 Kesici Takım Aşınması

Taguchi L9 deney tasarımı kullanılarak kesme parametrelerinin (kesme hızı ve konsantrasyon oranı) kesici takım yanak aşınması üzerindeki etkileri incelenerek optimum işleme koşulları sonuçları bulunmaya çalışılmıştır.

Malzemelerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar kesici takım ömrünü doğrudan etkilemektedir. Takım aşınması talaşlı imalat sırasında meydana gelen en önemli sorunların başında gelir. Kesici takımın aşınması iş parçası yüzey pürüzlülüğünde bozulmalara, kesme kuvvetlerinde artışa sebebiyet vermektedir. Sürtünme ve kesme sıcaklığı kesici takım aşınmasını arttıran parametrelerdir. Mevcut çalışmada farklı kesme hızlarında (80, 100, 120 m/dak) 120 mm boyunca tornalama işlemi yapılmış, kesici takımın yanak aşınması farklı kesme sıvısı konsantrasyonlarında (0, 0.5, 1 % hacimce) incelenmiştir.

5.2.1 Taguchi L9 deneyleri için S/N Analizi

Tornalama deneyleri sonucunda takım ucu yanak aşınması için S/N analizi Taguchi'nin L9 dikey dizinini kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada kontrol faktörleri olarak farklı konsantrasyon oranlarında nano grafen katkılı kesme sıvısı ve kesme hızı kullanılmıştır. Tablo 5.4'te deneyler sonucunda elde edilen takım ucu yanak aşınması sonuçları analizi ile elde edilen S/N oranları verilmiştir. Yanak aşınması değerlerinin düşük olanının daha verimli olduğu bilindiğinden en küçük en iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, yanak aşınması için ortalama (μm) 104,764 μm ortalama S/N değeri ise -40,3206 dB olarak çıkarılmıştır.

Tablo 5.4. Takım ucu yanak aşınması sonuçları ve S/N oranları

Deney No	A	B	Yanak Aşınması (μm)	Yanak Aşınması S/N Oranı (dB)
	Kesme Hızı (v) (m/dak)	Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı (%)		
1	80	0	95,21	-39,5737
2	80	0,5	93,02	-39,3715
3	80	1	94,87	-39,5426
4	100	0	98,64	-39,8811
5	100	0,5	93,21	-39,3893

Tablo 5.4. Takım ucu yanak aşınması sonuçları ve S/N oranları (Devamı)

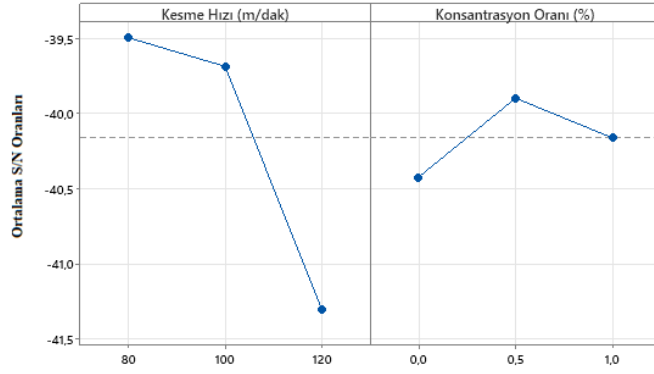
Deney No	A	B	Yanak Aşınması (Vb) (μm)	Yanak Aşınması S/N Oranı (dB)
	Kesme Hızı (v) (m/dak)	Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı (%)		
6	100	1	97,61	-39,7899
7	120	0	123,28	-41,8179
8	120	0,5	111,36	-40,9346
9	120	1	114,24	-41,1564

S/N yanıt tablosu Taguchi metodundaki parametrelerin takım ucu yanak aşınması için en iyi seviyeleri hangi faktörlerin belirlediğini ve faktörlerin yanıtlarını göstermektedir. Tablo 5.5'te S/N yanıt tablosu verilmiştir. Tabloda kontrol faktörlerindeki en yüksek değerler en iyi seviyeyi göstermektedir.

Tablo 5.5. Takım ucu yanak aşınması ve S/N yanıt tablosu

Takım Ucu Yanak Aşınması		
Kontrol Faktörleri		
Seviyeler	A	B
Seviye 1	-39,50	-40,42
Seviye 2	-39,69	-39,90
Seviye 3	-41,30	-40,16
Delta	1,81	0,53

En iyi takım ucu yanak aşınması sonuçlarını gösteren faktörler sırasıyla faktör A (Seviye 1, S/N=-39,50) ve faktör B (Seviye 2, S/N=39,90) olarak sonuçlanmıştır. Diğer bir ifadeyle; optimum yanak aşınması değeri 80 m/dak kesme hızında (A1) ve %0,5 konsantrasyon oranında (B2) elde edilmiştir. Şekil 5.4'te yanak aşınması için ortalama S/N oranlarını gösteren grafikler verilmiştir. Grafikte optimum seviyeler S/N oranının en yüksek olduğu noktalardır. Yanak aşınması için en önemli değişkenin kesme hızı olduğu söylenebilir.



Şekil 5.4. Takım ucu yanak aşınması deneylerinin S/N sonuçları grafiği

5.2.2 Varyans analizi (ANOVA)

Bu çalışmada kullanılan faktörlerinin (nano akışkan konsantrasyon oranı ve kesme hızı) takım ucu yan yüzey yanak aşınmasında etki seviyelerinin anlaşılması için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Yanak aşınması ANOVA analizi sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir. Tablo 5.6'daki varyans analizi (ANOVA) tablosu incelendiğinde takım ucu yanak aşınması için en etkili faktörün kesme hızı (%90,07) olduğu görülmüştür. Bunu konsantrasyon oranı (%6,54) takip etmiştir.

Tablo 5.6. Takım ucu yanak aşınması için ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı Oranı (%)
A	2	877,58	438,789	53,10	0,001	90,07
B	2	63,73	31,863	3,86	0,117	6,54
Hata	4	33,05	8,264	-	-	3,39
Toplam	8	974,36	-	-	-	100

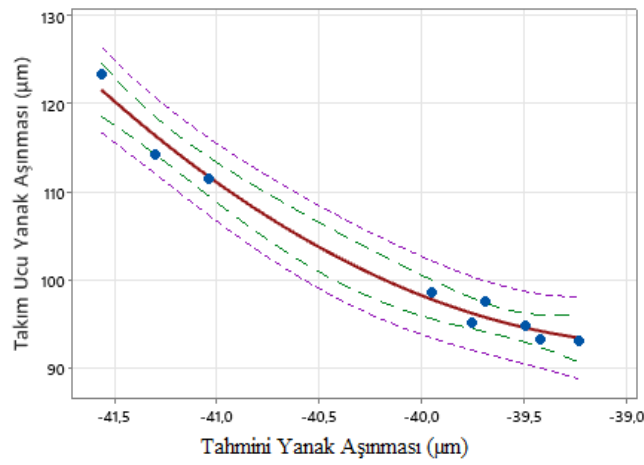
5.2.3 Regresyon analizi

Takım ucu yanak aşınması sonuçları için lineer regresyon denklemleri bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirinin bağlantılarının açıklanması için oluşturulmuştur. Burada bağımlı değişken yanak aşınması, bağımsız değişkenler ise NGP katılı nano kesme sıvısı konsantrasyon oranı (%) ve kesme hızı (V)'dir. Takım ucu yanak aşınması için ulaşılan denklem Eşitlik 5.2'de belirtilmiştir;

$$\text{Yanak Aşınması } (\mu\text{m}) = 49,3 + 0,548 \text{ Kesme Hızı (m/dak)} - 3,47 \text{ Konsantrasyon Oranı (\%)} \quad (5.2)$$

Kuadratik denklem sonucunda R^2 değeri yüzey pürüzlülüğü için 0,985 olduğu bulunmuştur. Gerçek değerler ile tahmini takım ucu yanak aşınması değerlerinin karşılaştırılması Şekil 5.5'te verilmiştir.

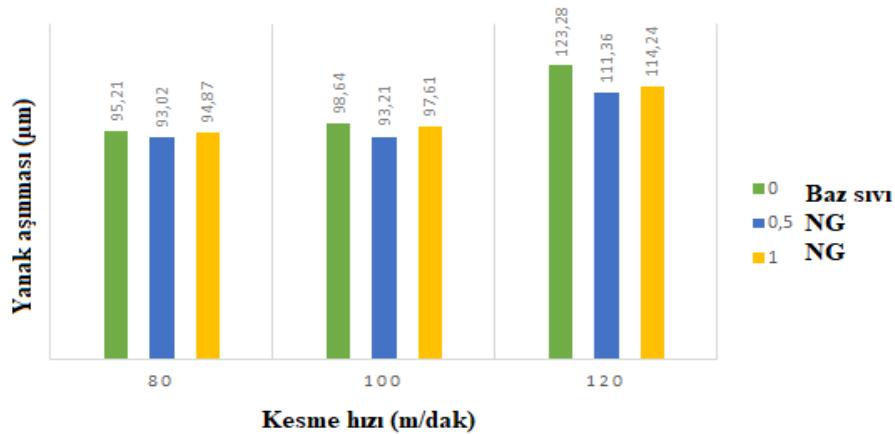
Şekil 5.5'te pembe çizgiler tahmini değerlerin sınırı, yeşil çizgiler güven aralığı ve bordo çizgi regresyon sınırını göstermektedir.



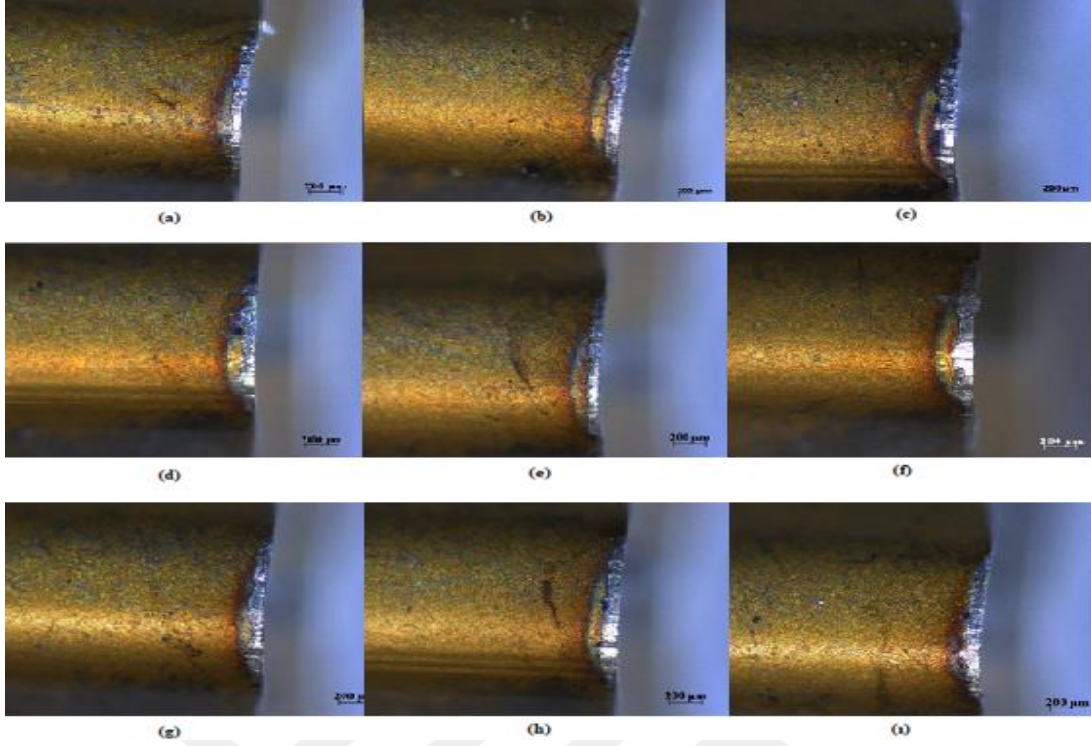
Şekil 5.5. L9 Takım ucu yanak aşınması gerçek değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması

5.2.4 Yanak aşınması (Vb) değerlendirilmesi

Şekil 5.6'da takım ucu yanak aşınması verileri gösterilmiştir. İşleme sonrasında aşınma değerleri optik mikroskop ile ölçülmüştür. Takımlara ait görseller Görsel 5.1'de verilmiştir.

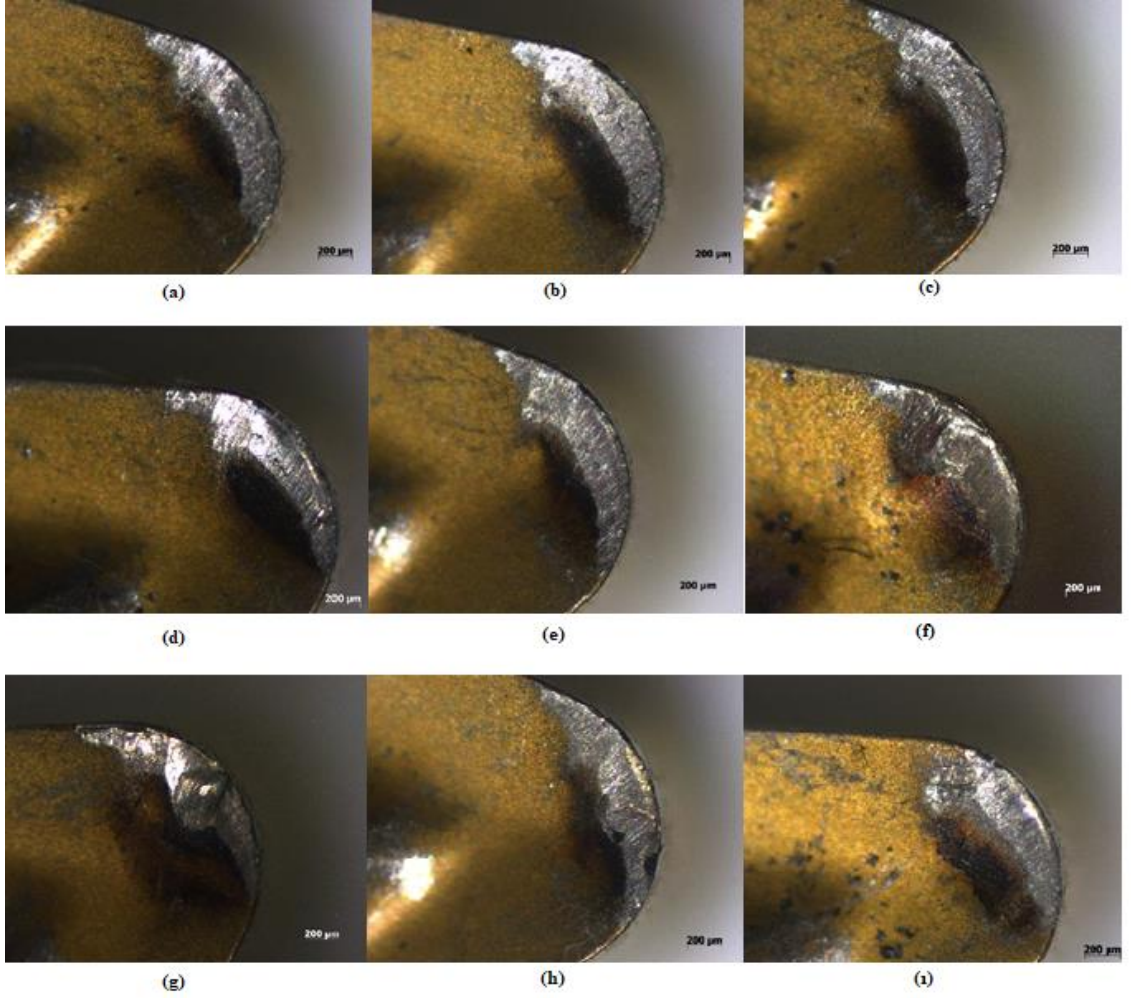


Şekil 5.6. Takım ucu yanak aşınması (μm)



Görsel 5.1. Kesici takımların 80,100 ve 120 m/dak kesme hızı ve Baz sıvı, %0,5 NGP ve %1 NGP kesme sıvılarında aşınma resimleri

Şekil 5.6 incelendiğinde 120 mm boyunca kesme işlemi gerçekleştirildiğinde kesme sıvısında %0,5 NGP kullanımının yanak aşınmasında diğer parametrelere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kesme sıvısına nanoparçacık eklenmesinin kesme işlemi sırasında sıcaklığı azalttığı ve daha kolay kayma hareketi elde ettiği aşınmanın NGP parçacıkları kullanımında daha az olduğu için düşünülmektedir. Grafenin termal iletkenlik özelliğinin son derece iyi olması takım – iş parçası ara yüzeyinde sürtünmeyi azalttığı anlaşılmaktadır [24]. Şekil 5.6’da görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğünde de olan durum burada da söz konusudur. Nanopartikül miktarının artması yanak aşınmasında da 0,5 NGP’e göre daha kötü sonuçlar vermektedir. Kesme hızının artması yanak aşınması miktarını da arttırdığı gözlemlenmiştir. Kesme hızının artması ile takım – iş parçası arasında oluşacak yüksek ısı hem takımda hem de malzemede bozulmalara neden olur. En yüksek aşınmanın 120 m/dak kesme hızında baz kesme sıvısı ile yapılan deneylerde görülmektedir. Görsel 5.2’de yanak aşınması için yapılan testlerdeki takım aşınmasının optik mikroskop yardımı ile görüntüleri gösterilmiştir.



Görsel 5.2. $a = 1$ mm kesme parametrelerinde kesici takım uçlarının optik mikroskopta görüntüsü (x50)
a) Baz sıvı, b) %0,5 NGP, c) %1 NGP, 100 m/dak d) Baz sıvı, e) %0,5 NGP, f) %1 NGP, 120 m/dak g) Baz sıvı, h) %0,5 NGP, ı) %1 NGP

Yanak aşınması grafiği incelendiğinde kesme hızı ve nanopartikül konsantrasyonunun yanak aşınmasında önemli parametreler olduğu görülmektedir. Genel olarak düşük kesme hızlarında ve %0,5 NGP kullanımının yüksek kesme hızlarına, baz sıvı ve %1 NGP kesme sıvısına göre daha az aşındığı görülmektedir. Daha düşük kesme hızlarına ve %0,5 NGP kullanımında kesme işlemi gerçekleştirilirken daha az sürtünme ve sıcaklık oluşacağı için aşınmanın daha az olduğu görülmüştür. Kesme sıvılarında nanopartikül kullanılmamasının kesici takımı daha fazla aşındırdığı grafik üzerinde görülmektedir. Bu artan kesme kuvvetleri ve sıcaklık ile doğru orantılıdır. Takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü kesme işlemi sırasında meydana gelen ısı, kesme kuvveti ve talaş biçimine bağlıdır [70].

5.3 Talaş Morfolojisi

Bu çalışmada elde edilen talaşların bir kısmı optik mikroskop yardımıyla görüntüleri alınıp incelenmiştir. Şekil 5.7’de testere tipi talaş görseli verilmiştir. Malzemelerin işlenmesi sırasında oluşan talaşlar değişkenlik gösterirler. Talaşlarda tepe yüksekliği (t_p), vadi yüksekliği (t_v) ve diş aralığı (p_c) oluşmaktadır. Bu parametreler elde edilen talaşlarda incelendiğinde ortaya çıkan sonuçlar Tablo 5.7’de gösterilmiştir. Talaşın sürekli ve ayrılmış kısmı olan toplam yüksekliğine tepe yüksekliği (t_p) denir. Vadi ve tepe arasındaki boşluğa diş yüksekliği (t_T) denir ve bağlantı ile hesaplanır. Bağlantı denklemi Eşitlik 5.3’te verilmiştir;

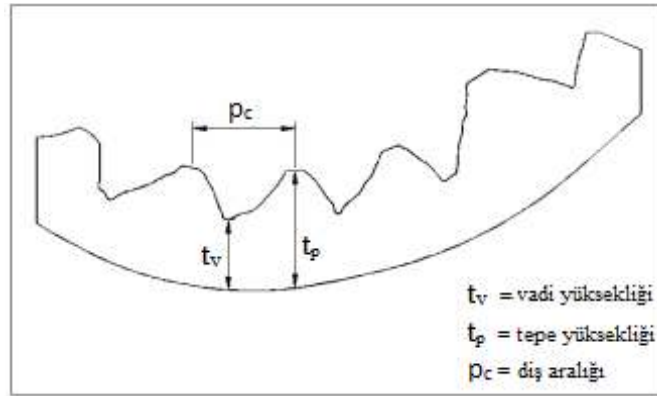
$$t_T = t_p - t_v \quad (5.3)$$

Segmentasyon derecesi (G_s), diş yüksekliği ile tepe yüksekliğinin oranıdır ve bağlantı ile hesaplanır. Bağlantı denklemi Eşitlik 5.4’te verilmiştir;

$$G_s = (t_p - t_v) / t_p = t_T / t_p \quad (5.4)$$

Talaş segmentasyon frekansı (f_{CS}) bağlantı ile hesaplanır. Bağlantı denklemi Eşitlik 5.5’te verilmiştir;

$$f_{CS} = V_c / p_c \text{ burada } V_c \text{ çip hızıdır [71,72].} \quad (5.5)$$



Şekil 5.7. Talaşın dış bölümü

Talaş morfolojisi; ilerleme hızı, kesme hızı ve NGP konsantrasyon seviyelerine bağlı olarak farklı parametrelerde incelenmiş olup sonuçlar Şekil 5.7’te pik yüksekliği, vadi yüksekliği ve diş aralığı verilerine göre gösterilmiştir.

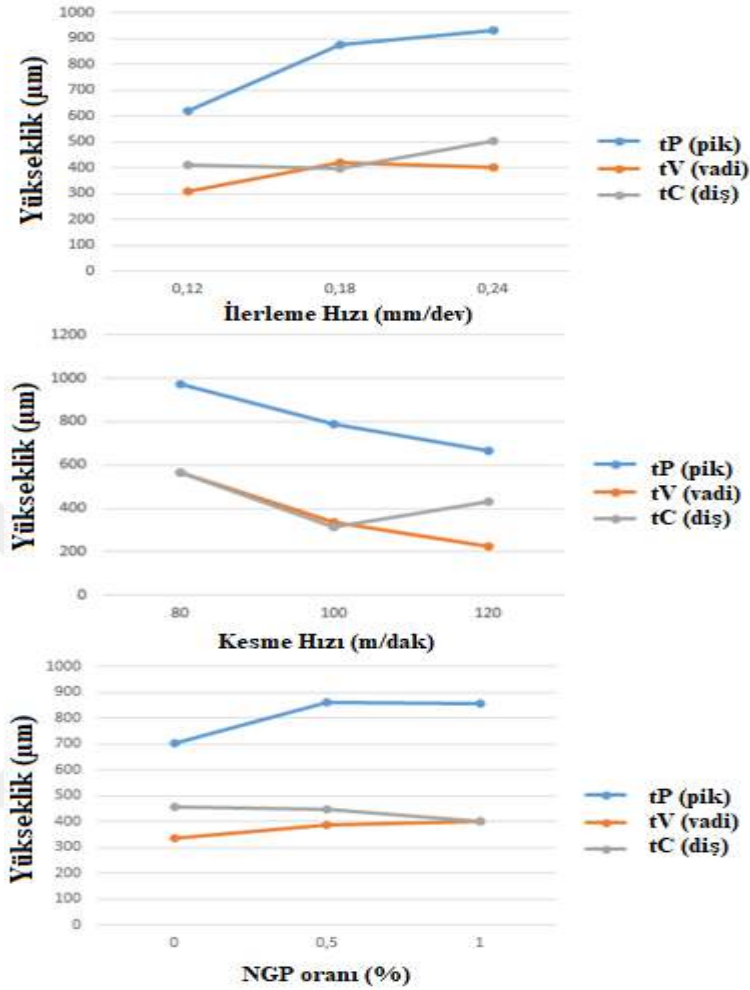
Tablo 5.7. Deneyler ve talaş morfolojisine karşılık gelen değerler

Kesme parametreleri			Talaş morfolojisi parametreleri		
V	f	NGP	t _p	t _v	p _c
(m/dak)	(mm/dev)	(%)	(μm)	(μm)	(μm)
80	0,12	0	229,25	149,34	220,03
80	0,18	0,5	357,49	203,76	153,73
80	0,24	1	386,39	211,57	197,95
100	0,12	0	220,84	97,3	98,39
100	0,18	0,5	303,53	132,58	112,39
100	0,24	1	261,73	103,78	101,1
120	0,12	0	168,74	59,08	90,45
120	0,18	0,5	212,02	83,04	137,55
120	0,24	1	282,3	84,82	202,41

Şekil 5.8 incelendiğinde Ti-6Al-4V malzemesinin belirli parametrelerde tornalanmasında talaş morfolojisi için kesme hızının önemli bir etken olduğu gözlemlenmiştir. Pik yüksekliği ilerleme hızına bağlı olarak arttığı, kesme hızı arttıkça ise buna tersi olarak azaldığı görülmektedir. Burada NGP konsantrasyonu diğer parametrelere göre daha az değişkenlik göstermiştir. Talaşlara ait görseller Görsel 5.3'te verilmiştir.

İşleme sırasında oluşan takım talaş yüzeyindeki sıcaklığın artması kesme hızının artmasını ile sağlanacağı için kayma kararsızlığı olmaktadır. Pik yüksekliğinde sıcaklığın artması ile azalma gözlemlenmiştir. Bunun nedeni kesici takımın oksidasyon sıcaklığına ulaştığında takım talaş ara yüzeyindeki sürtünme katsayısını azalttığı bu nedenle pik yüksekliğinin düştüğü düşünülmektedir. Kesme hızının artması ile talaşın şekillendirme hızı artar. Bu durumda talaş kesme bölgesini daha hızlı terk edeceği için talaşa geçen ısı miktarı azalır. Buda talaşın pik yüksekliğini düşürdüğü düşünülmektedir. Vadi yüksekliği de artan kesme hızı ile kayma kararsızlığından ötürü azalma göstermektedir. Kesme hızının artması ile diş yüksekliğinin (adım) 100 m/dak kadar düştüğü sonra yükseldiği görülmektedir. Buda kesme hızının artması sıcaklığın artmasına, talaş miktarının

artmasına oda segmentlerin daha yakın olmasına sebebiyet verir. Buda diş yüksekliğini (adım) azaltmaktadır.

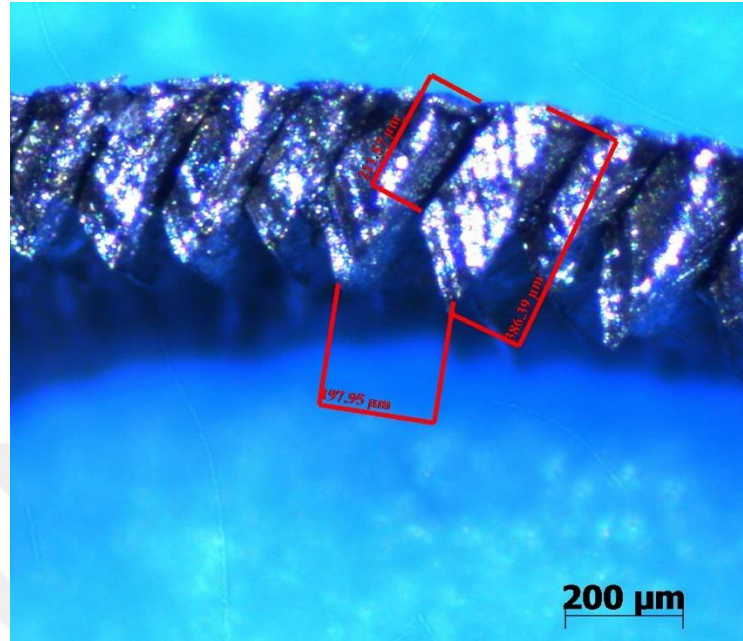


Şekil 5.8. Tepe yüksekliği, vadi yüksekliği ve diş aralığının (a) ilerleme hızı, (b) kesme hızı ve (c) NGP konsantrasyonu ile değişimi

İlerleme değerinin düşük olduğu durumlarda pik yüksekliği daha düşüktür. İlerleme hızındaki artış ile talaş kesiti hacimsel olarak artar. Buda pik yüksekliğinin artması ile sonuçlanmıştır. İlerleme hızının artması ile birim zamanda kesilen malzeme miktarı artacağı için kesme hızı ile karşılaştırıldığında tam tersi bir durum olduğu görölmektedir. İlerleme hızı için diş yüksekliği (adım) çok fazla değişkenlik göstermemiştir.

NGP konsantrasyonun artması ile pik yüksekliğinde (tepe) artış görölmektedir. Kesme sıvılarında NGP kullanılması ile kesme bölgesindeki sıcaklığın azaldığı pik yüksekliğinin artması ile görölmektedir. NGP katkısı diş yüksekliği (adım) değerini de arttırdığı görölmüştür. NGP'ler kesme bölgesindeki sıcaklığın azalması ile birim

zamanda oluşan talaş miktarını azaltarak, segmentlerin birbirinden uzaklaşmasını sağlamaktadır. Buda diş yüksekliğini (adım) arttırmıştır.



Görsel 5.3. 80 m/dak kesme hızı, 0.24 mm/dev ilerleme hızı, %1 NG katkı kesme sıvısı parametrelerindeki talaşın optik mikroskopta görüntüsü (x50) (200 μ m)

5.4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, baz kesme sıvısına farklı konsantrasyonlarda (%0; %0,5 ve %1) NGP eklenmesi ile MQL sisteminde Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasının işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 80,100 ve 120 m/dak kesme hızında, 0.12, 0.18 ve 0.24 mm/dev ilerleme hızında %0,%0,5 ve %1 oranda farklı konsantrasyonlarda ve sabit kesme derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiş olup yüzey pürüzlülüğü, takım ucu yan yüzey yanak aşınması ve talaş morfolojisi incelenmiştir. Mevcut araştırmanın sonuçları aşağıda sıralanmıştır:

1. MQL sistemlerinde kesme sıvılarına NGP eklenmesi, tornalama işlemlerinde sürdürülebilir işlenebilirlik için soğutma yeteneklerinde kesme sıvılarına göre yenilikçi çözümlerden biridir.
2. Tornalama işleminde baz sıvısının MQL ile işlenmesi sırasında yüzey pürüzlülük değerleri NGP (%0,5 ağırlık) kullanılan kesme sıvısı en iyi değeri vermiştir. NGP partiküllerinin kesme sıvısına eklenmesi kesme bölgesindeki sıcaklığı azaltarak termal iletkenliği iyileştirdiği deneysel sonuçlardan anlaşılmaktadır.
3. Kesme sıvılarına nanopartikül eklenmesinin konsantrasyon oranına bağlı olarak olumlu etkileri olmaktadır. Kesme sıvısındaki NGP oranı %1'e arttırıldığında yüzey pürüzlülüğü sonuçlarında artış gözlemlenmektedir. Artan nanografen partikülleri yapışma veya gruplaşmaya neden olduğundan yağlama ve soğutmanın azalmasına, yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olduğu düşünülmektedir.
4. Yan yüzey yanak aşınmaları incelendiğinde yüzey pürüzlülüğündeki aynı durum burada da görülmüştür. Kesme sıvısına NGP (%0,5 ağırlık) eklenmesi en iyi sonucu vermektedir. Nanopartiküllerin eklenmesi ile kesme bölgesinde işleme ve kayma hareketi daha kolay olacağından aşınma miktarı azalmaktadır.
5. Talaş morfolojisi incelendiğinde kesme hızının artması ile kesme bölgesinde sıcaklık artacağı için pik yüksekliğinin azaldığı görülmektedir. Artan sıcaklıklar kayma kararsızlığı oluşturduğu için vadi yüksekliğinde azalma olduğu sonucuna varılmıştır. NGP ilavesinin kesme bölgesindeki sıcaklığı azaltacağı, pik yüksekliğinde artış olacağı kaçınılmazdır.
6. MQL ile işleme sayesinde kesme sıvısı miktarı oldukça azalır. Buda geleneksel kesme sıvılarının operatör, çevre sağlığı zararlarının ve işleme maliyetlerinin azalmasına

sebebiyet verir. Kesme sıvılarına belirli oranlarda grafen nanopartikül ilavesi ile artan sürdürülebilirliği ve soğutma yeteneklerinin iyileştirdiği görülmüştür.

Taguchi için;

1. Yüzey pürüzlülüğü deneylerinde optimal parametreler kesme hızı için Seviye 1 (80 m/dak), ilerleme hızı için Seviye 2 (0.18 mm/dev) ve konsantrasyon oranı için Seviye 2 (%0,5 NGP) olduğu belirlenmiştir.

2. Takım ucu yanak aşınması deneylerinde optimal parametreler kesme hızı için Seviye 1 (80 m/dak) ve konsantrasyon oranı için Seviye 2 (%0,5 NGP) olduğu belirlenmiştir.

ANOVA için;

1. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün %52,65 ile konsantrasyon oranı 'dır. Kesme hızı %31,68 ile ikinci en etkili faktör, ilerleme hızı ise %0,56'lık oranla yüzey pürüzlülüğüne en az etki eden oran olduğu gözlemlenmiştir.

2. Takım ucu yanak aşınması için en etkili faktörün kesme hızı (%90,07) olduğu görülmüştür. Bunu konsantrasyon oranı (%6,54) takip etmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Motorcu, A. R. (2009). Nikel Esaslı Süperalaşımların ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği 1. Bölüm: Sinterlenmiş Karbür Takımların Performanslarının Değerlendirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 25(1), 302-330.
- [2] Siju, A. S., & Waigaonkar, S. D. (2021). Effects of rake surface texture geometries on the performance of single-point cutting tools in hard turning of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 235-252.
- [3] ENSARİOĞLU, C., & ÇAKIR, M. C. (2005). Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü-Bölüm I. *Mühendis ve Makina*, 46(546), 36-46.
- [4] Ribeiro, M. V., Moreira, M. R. V., & Ferreira, J. R. (2003). Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining. *Journal of materials processing technology*, 143, 458-463.
- [5] Sankaranarayanan, R., & Krolczyk, G. M. (2021). A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 67, 286-313.
- [6] Patole, P. B., Pol, G. J., Desai, A. A., & Kamble, S. B. (2021). Analysis of surface roughness and cutting force under MQL turning using nano fluids. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5684-5688.
- [7] YILDIRIM, Ç. V., ŞİRİN, Ş., & KIVAK, T. Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde nanopartikül katkılı yağlamanın takım aşınması üzerindeki etkisinin araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 466-476.
- [8] Hegab, H., Kishawy, H. A., Gadallah, M. H., Umer, U., & Deiab, I. (2018). On machining of Ti-6Al-4V using multi-walled carbon nanotubes-based nano-fluid under minimum quantity lubrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5), 1593-1603.
- [9] Gupta, M. K., Sood, P. K., & Sharma, V. S. (2016). Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano-fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1276-1288.

- [10] Singh, R., Dureja, J. S., Dogra, M., Gupta, M. K., Mia, M., & Song, Q. (2020). Wear behavior of textured tools under graphene-assisted minimum quantity lubrication system in machining Ti-6Al-4V alloy. *Tribology International*, 145, 106183.
- [11] Shuang, Y., John, M., & Songlin, D. (2019). Experimental investigation on the performance and mechanism of graphene oxide nanofluids in turning Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 164-174.
- [12] Eltaggaz, A., Nouzil, I., & Deiab, I. (2021). Machining Ti-6Al-4V Alloy Using Nano-Cutting Fluids: Investigation and Analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2), 42.
- [13] Sodavadia, K. P., & Makwana, A. H. (2014). Experimental investigation on the performance of coconut oil based nano fluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 4(1), 55-60.
- [14] Gaurav, G., Sharma, A., Dangayach, G. S., & Meena, M. L. (2020). Assessment of jojoba as a pure and nano-fluid base oil in minimum quantity lubrication (MQL) hard-turning of Ti-6Al-4V: A step towards sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122553.
- [15] Yi, S., Li, G., Ding, S., & Mo, J. (2017). Performance and mechanisms of graphene oxide suspended cutting fluid in the drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 182-193.
- [16] Songmei, Y., Xuebo, H., Guangyuan, Z., & Amin, M. (2017). A novel approach of applying copper nanoparticles in minimum quantity lubrication for milling of Ti-6Al-4V. *Advances in Production Engineering & Management*, 12(2).
- [17] Singh, V., Sharma, A. K., Sahu, R. K., & Katiyar, J. K. (2021). Novel application of graphite-talc hybrid nanoparticle enriched cutting fluid in turning operation. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 378-387.
- [18] Kumar, S. P., & Prasada, H. T. (2021). Investigate the effect of nano cutting fluid and cutting parameters under minimum quantity lubrication (MQL) on surface roughness in turning of DSS-2205. *Materials Today: Proceedings*, 43, 3643-3649.

- [19] Gupta, M. K., Jamil, M., Wang, X., Song, Q., Liu, Z., Mia, M., ... & Imran, G. S. (2019). Performance evaluation of vegetable oil-based nano-cutting fluids in environmentally friendly machining of inconel-800 alloy. *Materials*, 12(17), 2792.
- [20] YILDIRIM, Ç. V. (2019). Grafit parçacık takviyeli nano akışkan kullanılarak AISI 316'nın frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 326-341.
- [21] Usha, M., & Rao, G. S. (2020). Optimisation of parameters in turning using herbal based nano cutting fluid with MQL. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1535-1544.
- [22] CÖNGER, D., EMİROĞLU, U., UYSAL, A., & ALTAN, E. (2019). Alüminyum 6061 Malzemenin MQL Yöntemi ile Frezelenmesinde Nano MoS₂ Katkılı Kesme Sıvısı Kullanımının Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 17(1), 31-37.
- [23] Anandan, V., Babu, M. N., Sezhian, M. V., Yildirim, C. V., & Babu, M. D. (2021). Influence of graphene nanofluid on various environmental factors during turning of M42 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 90-103.
- [24] Amrita, M., Srikant, R. R., & Sitaramaraju, A. V. (2014). Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(5), 600-605.
- [25] Collings, E. W. (1988). Physical metallurgy of titanium alloys.
- [26] KILIÇ O. (2019) Ti-6al-4v Alaşımının İşlenmesinde Farklı Soğutma Sistemlerinin Takım Ömrü ve Yüzey Kalitesi Üzerinde Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar
- [27] Minton, T., Ghani, S., Sammler, F., Bateman, R., Fürstmann, P., & Roeder, M. (2013). Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 75, 27-35.
- [28] Gültekin, A. H. (1993). Titanyum mineral yatakları kayaçlarda titanyum: içeriği ve bölümlenmesi. *İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği*, (42), 21-37.
- [29] ÇELİK, Y. H., & KILIÇKAP, E. (2018). Titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V'nın işlenmesinde karşılaşılan zorluklar: Derleme. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6(1), 163-175.

- [30] SİCAKYÜZ Ö. (2007), Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Anodik Oksidasyon Davranışı ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [31] Roberge, P. R. (2019). *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill Education.
- [32] Brady, G. S., Clauser, H. H., & Vaccari, J. A. (2002). *Materials handbook: an encyclopedia for managers, technical professionals, purchasing and production managers, technicians, and supervisors*. McGraw-Hill Education.
- [33] Perihan, O. Y. A. R. TİTANTUM VE ÖZELLİKLERİ. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 25, 151-159.
- [34] Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Titanium matrix composites* (pp. 367-382). Springer Berlin Heidelberg.
- [35] G. Ateş, (2018), Ti-6al-4v Titanyum Alaşımının İç Yapısı ve Yüzey Özellikleri Üzerine Termokimyasal İşlem Parametrelerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- [36] MEMU F. (2019), Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Ti-6al-4v Alaşımının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [37] COŞKUN M.K. (2011), Biomalzeme Amaçlı Ti-6al-4v Alaşım Tozlarının Sps ile Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [38] Astakhov, V. P. (2011). Turning. In *Modern machining technology* (pp. 1-78). Woodhead Publishing.
- [39] Atwater, M. A. (2019). *Materials and Manufacturing: An Introduction to How They Work and Why It Matters*. McGraw-Hill Education.
- [40] Harun, Y. A. K. A., Akkuş, H., & Levent, U. Ğ. U. R. (2016). AISI 1040 Çeliğinin Tornalamasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu. *Celal Bayar University Journal of Science*, 12(2).
- [41] GÖNÜLAÇAR Y. E. (2018), AISI 4140 Malzemesinin Tornalanmasında Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Kullanımının İşlenebilirlik Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman

- [42] ATAÖÖÖ G. (2008), CNC Tornada Talaş Kaldırma İşlemlerinde Talaş Kırıcı Geometrisinin İşlenebilirliğe Etkilerinin Deneyisel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [43] SERTSÖZ ř. (2018), Küresel Grafitli Ggg-70 Dökme Demirin Minimum Miktarda Yağlama Tekniği Kullanılarak Tornalanmasında İşlenebilirliğinin Deneyisel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya
- [44] PINARLIK, G., & ABDULLA, G. (2015). Kesme Yöntemleri. *Yekarum*, 3(1).
- [45] YILMAZ E. (2019), Takım Çeliğinden (AISI 4340) Farklı İki Yöntemle Üretilen Takım Tutucularının Kesme Anındaki Performanslarının Deneyisel Olarak Karşılaştırılarak, Uygun Takım Seçimine Karar Verilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [46] Sheikh-Ahmad, J., & Davim, J. P. (2012). Tool wear in machining processes for composites. In *Machining technology for composite materials* (pp. 116-153). Woodhead Publishing.
- [47] PARKAK N. (2012), AISI D6 Soğuk İş Takım Çeliğinin Tornalanmasında Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlüğünün İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ
- [48] Özdemir, K., & Çakır, M. C. (2008). Kesme parametrelerinin başlangıç aşınmasına etkisinin deneyisel olarak incelenmesi.
- [49] Kwon, Y. (2000). *Robust control of surface roughness in a turning operation*. The University of Iowa.
- [50] Güllü, A., Özdemir, A., & Demir, H. (2003). YÜZEY PÜRÜZLÜLÜğÜ ÖLÇME YÖNTEMLERİ VE MUKAYESESİ. *Teknoloji*, 6.
- [51] YILMAZ E. (2010), ETİAL 180 Alüminyum Alaşımının İşlenmesinde Kesici Takım Geometrisi ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- [52] Hommel A. Surface Roughness Terminology and Parameters. CT, USA: New Britain; 1988.
- [53] ÖZCAN A. E. (2019), Minimum Miktarda Yağlama Sistemine Katılan Aşındırıcı Toz Miktarının Kesme İşlemine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

- [54] Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2014). Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of cleaner production*, 83, 33-47.
- [55] Abdalla, H. S., Baines, W., McIntyre, G., & Slade, C. (2007). Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. Part 1. Formulation development. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(1), 21-33.
- [56] İLHAN M. (2014), Talaş Kaldırma İşlemlerinde Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Uygulamasının Kesme Hızı ve Yağlama Debisinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [57] DEMİR, H., ULAŞ, H., & ZEYVELİ, M. (2009). Talaşlı üretimde kullanılan kesme sıvılarından istenen özellikler.
- [58] Gürbüz, H., Baday, Ş., & Gönülaçar, Y. E. (2017). Minimum miktarda yağlamanın frezeleme işlemleri üzerine etkisinin araştırılması: Derleme. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 59-78.
- [59] Furness, R., Shih, A., Stephenson, D., & Tai, B. (2017). Minimum quantity lubrication for sustainable machining. *Encyclopedia of sustainable technologies*, 477-485.
- [60] YALILI H. (2019), AISI 904L Paslanmaz Çeliğin MQL Yöntemi Kullanılarak Tornalanmasında Nanografen Katkılı Kesme Yağının İşleme Performansı Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce
- [61] Walker, T. (2015). A Guide to Machining with Minimum Quantity Lubrication. Unist.
- [62] Chakraborty, S., & Panigrahi, P. K. (2020). Stability of nanofluid: A review. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115259.
- [63] Revuru, R. S., Pasam, V. K., Syed, I., & Paliwal, U. K. (2018). Development of finite element based model for performance evaluation of nano cutting fluids in minimum quantity lubrication. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, 75-85.
- [64] Li, Y., Tung, S., Schneider, E., & Xi, S. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder technology*, 196(2), 89-101.

- [65] ÇAKIR, A., YILDIRIM, F., & ŞEKER, U. AA7075 Alüminyum Alaşımının Delinmesinde Farklı Soğutma Şartları ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi.
- [66] ER, A. O., & ZEYREK, K. Ti-6Al-4V Alaşımının Tornalanmasında Minimum Miktarla Yağlama (MMY) Yöntemi İle Kesme Sıvısı Uygulamanın İşlenebilirliğe Etkilerinin Araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 653-665.
- [67] UYSAL, A. (2016). Ferritik paslanmaz çeliğin nano MoS₂ parçacık takviyeli kesme sıvısı kullanılarak MQL yöntemi ile frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(1), 151-158.
- [68] Talib, N., & Rahim, E. A. (2018). Performance of modified jatropa oil in combination with hexagonal boron nitride particles as a bio-based lubricant for green machining. *Tribology International*, 118, 89-104.
- [69] Sayuti, M., Sarhan, A. A., & Salem, F. (2014). Novel uses of SiO₂ nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel AISI4140 for less tool wear, surface roughness and oil consumption. *Journal of Cleaner Production*, 67, 265-276.
- [70] ÖZÇATALBAŞ, Y., & Ali, B. A. Ş. TORNALAMADA HAVA PÜSKÜRTME İLE SOĞUTMANIN KESME KUVVETLERİ VE TAKIM ÖMRÜNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3).
- [71] Upadhyay, V., Jain, P. K., & Mehta, N. K. (2014). Comprehensive study of chip morphology in turning of Ti-6Al-4V. In *5th Int. 26th All India Manuf. Technol. Des. Res. Conf* (pp. 2-7).
- [72] Singh, B. K., Roy, H., Mondal, B., Roy, S. S., & Mandal, N. (2019). Measurement of chip morphology and multi criteria optimization of turning parameters for machining of AISI 4340 steel using Y-ZTA cutting insert. *Measurement*, 142, 181-194.
- [73] Khan, A. M., Anwar, S., Jamil, M., Nasr, M. M., Gupta, M. K., Saleh, M., ... & Mia, M. (2021). Energy, environmental, economic, and technological analysis of Al-GnP nanofluid-and cryogenic LN₂-assisted sustainable machining of Ti-6Al-4V alloy. *Metals*, 11(1), 88.

- [74] Pinar, A. M., Uluer, O., & Kırmacı, V. (2009). Optimization of counter flow Ranque–Hilsch vortex tube performance using Taguchi method. *International journal of refrigeration*, 32(6), 1487-1494.
- [75] Mukherjee, S., & Paria, S. (2013). Preparation and stability of nanofluids-a review. *IOSR Journal of Mechanical and civil engineering*, 9(2), 63-69.
- http-1 <https://docplayer.biz.tr/4688114-Talasli-imalat-talas-kaldirma-yontemlerinin-siniflandirilmesi-1-geleneksek-talasli-imalat-1a-tornalama-ve-iliskili-operasyonlar.html>
(Erişim Tarihi:13.03.2022)
- http-2 <https://web.itu.edu.tr/gulmezt/Metroloji/Metroloji%20Bolum%208.pdf>
(Erişim Tarihi:15.03.2022)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kadir ÖZEN

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

Lise	2010 – 2014	Oktay Olcay Yurtbay Anadolu Lisesi
Lisans	2014 – 2019	Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans	2019 – 2022	Eskişehir Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

Korkmaz, S., Cetin, M. Dogan, S. Ozen, K. Ayhan, E. Ozgul, M. Ozdemir, S. A Comprehensive Investigation on Tribological Performance of Nano-Silver and Nano-Gold Additivated Fluids on Wearing Surfaces. JOURNAL of Tribology, 13.