

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO MOLİBDEN DİSÜLFİT KATKILI BİTKİSEL ESASLI KESME
SIVISI KULLANARAK MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA İLE
ALÜMİNYUMUN FREZELENMESİNDE İŞLEM
PARAMETRELERİNİN TALAŞ KALDIRMA PERFORMANSINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Derviş Berk CÖNGER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmal Usulleri Yüksek Lisans Programı

Danışman

Prof. Dr. Erhan ALTAN

Temmuz, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO MOLİBDEN DİSÜLFİT KATKILI BİTKİSEL ESASLI KESME SIVISI
KULLANARAK MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA İLE ALÜMİNYUMUN
FREZELENMESİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN TALAŞ KALDIRMA
PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Derviş Berk Cönger tarafından hazırlanan tez çalışması 16/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Erhan Altan

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Erhan Altan , Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr.Yusuf Kaynak

Marmara Üniversitesi

Dr.Öğretim Üyesi Murat Kıyak

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Erhan ALTAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Nano MoS₂ katkılı Bitkisel Esaslı Kesme Sıvısı Kullanılarak Minimum Miktarda Yağlama İle Alüminyumun Frezelenmesinde İşlem Parametrelerinin Talaş Kaldırma Performansına Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Derviş Berk CÖNGER

Aileme

ve

tüm sevdiklerime

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Prof.Dr. Erhan ALTAN'a, Sayın Doç.Dr. Alper UYSAL'a ve Araştırma Görevlisi Sayın Uğur EMİROĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim. Manevi desteklerinden dolayı Şeyma Nur Cönger, Elif Cönger, Muhammed Emin Cönger ile anne ve babama çok teşekkür ederim.

Derviş Berk Cönger

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	VII
KISALTMA LİSTESİ	IX
ŞEKİL LİSTESİ	X
TABLO LİSTESİ	XIII
ÖZET	XIV
ABSTRACT	XVI
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı.....	24
1.3 Hipotez	25
2 Alüminyum ve Talaşlı İmalat	26
2.1 Alüminyum	26
2.1.1 Alüminyumun Tarihçesi ve Genel Özellikleri	26
2.1.2 Alüminyum Alaşımları ve Sınıflandırılması	29
2.1.3 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler	31
2.2 Talaşlı İmalat	33
2.2.1 Talaşlı İmalat Teknolojisinin Genel Tanımı ve Tarihçesi	33
2.2.2 Talaşlı İmalatta Talaş Oluşumu ve Malzeme Kaldırma İşlemleri	36

2.2.3 Kesici Takımlar	43
2.2.4 Takım Hasar Mekanizmaları	43
3 Deneysel Çalışmalar	47
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Takımlar.....	47
3.2 Deneylerde Kullanılan Tezgâh, Makine ve Ekipmanlar	50
3.3 Nano MoS ₂ Katkılı Akışkanın Hazırlanması	55
3.4 Deneylerin Yapılışı.....	55
4 Sonuç ve Öneriler	60
4.1 Yüzey Pürüzlülükleri.....	60
4.2 Kesme ve İlerleme Kuvvetleri	63
4.3 Takım Aşınmaları.....	68
4.4 Genel Sonuçlar ve Öneriler.....	74
Kaynakça	75
Tezden Üretilmiş Yayınlar	82

SİMGE LİSTESİ

A°	Angström (10^{-10} m)
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
°C	Santigrat derece
cm ³	Santimetre küp
Cst	Santistoke
CO ₂	Karbondioksit
Cu	Bakır
f	İlerleme Hızı
g	Gram
h	Saat
H ₃ BO ₃	Borik Asit
Li	Lityum
LN ₂	Sıvı Azot
Mg	Magnezyum
ml	Mililitre
Mn	Mangan
MPa	Mega paskal
MoS ₂	Molibden disülfid
nm	Nanometre
RA	Rockwell A
RC	Rockwell C
R _{MR}	Malzeme Kaldırma Hızı
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
SiO ₂	Silisyumdioksit

Sn	Kalay
TiO ₂	Titanyum dioksit
v	Kesme Hızı
WS ₂	Tungsten Disülfit
Zn	Çinko
ZrO ₂	Zirkonyum dioksit
α	Talaş Açısı

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alüminyum Birliği (ABD)
AISI	Amerikan Demir Çelik Enstitüsü
CNC	Bilgisayar Destekli Kontrol (Computer Numerical Control)
CNT	Karbon Nano Tüp
CVD	Kimyasal Buhar Kaplama
GnP	Grafit Nano Trombosit
ISO	Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
MIT	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
MQL	Minimum Miktarda Yağlama (Minimum Quantity Lubrication)
PCD	Çok Kristalli Elmas
PVD	Fiziksel Buhar Kaplama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Vd.	Ve Diğerleri

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Talaş kaldırma sırasında ısı oluşumu [87].....	1
Şekil 1.2	İşleme maliyeti genel analizi [7]	2
Şekil 1.3	10 dk işleme sonrası takım aşınmalarının SEM görüntüleri	6
Şekil 1.4	MQL sistemi monte edilmiş robotik işleme ünitesi a) İş mili eklenmiş mobil işleme robotu b) MQL nozülleri [20]	7
Şekil 1.5	Su ilaveli MQL konsepti [24]	8
Şekil 1.6	Farklı viskozitelerdeki bitkisel kesme yağlarının ısı transfer kapasiteleri [27]	9
Şekil 1.7	Nano parçaların sürtünme mekanizmalarına etkileri [28]	10
Şekil 1.8	Yüzey pürüzlülüğü değişimleri [32]	11
Şekil 1.9	Takım aşınmaları sonuçları [34]	12
Şekil 1.10	Elektrostatik MQL frezeleme işleminin şematik gösterimi [36]	13
Şekil 1.11	SiO ₂ Nano parçacık konsantrasyonun yağın a) Termal iletkenliğine ve b) Viskozitesine etkisi [46]	15
Şekil 1.12	MQL yönteminin takım içerisinde ve dışarıysından uygulanması[51]	17
Şekil 1.13	MQL yöntemi ile taşlama işleminde nano katkıların yağ filmi oluşumu ve sürtünmeye etkileri [55]	18
Şekil 1.14	Nano parçacıkların yuvarlanma ve parlatma etkisinin şematik gösterimi [58]	20
Şekil 1.15	(a) Sıvı soğutma ve (b) MQL yönteminde yağ damlacıkları [61] .	21
Şekil 1.16	Nano parçacık dağılımı [63]	22

Şekil 1.17	MoS2 ve CNT ‘nin mikro yapıları[63]	22
Şekil 1.18	Ganyometre ile MoS2 katkılı damlacığın yüzey temas açısı ölçümü [71]	24
Şekil 2.1	Otomotiv sanayinde kullanılan alüminyum turboşarj salyangozu [90]	27
Şekil 2.2	Gıda sanayinde kullanılan alüminyum kutu [78]	28
Şekil 2.3	Alüminyum otomobil motoru silindir kapağı [90]	29
Şekil 2.4	Antik Mısır’da yay ile tahrik edilen matkaplarla aynı anda üç delik delme işleminin yapılması [86]	34
Şekil 2.5	Ortaçağda topların delinmesi ve delik delme takımları[86]	35
Şekil 2.6	MIT tarafından 1952’de geliştirilen nümerik kontrollü freze tezgâhı[86]	36
Şekil 2.7	Malzeme kaldırma işlemlerinin sınıflandırılması [87]	37
Şekil 2.8	Talaş kaldırma işleminin kesit görüntüsü [87]	38
Şekil 2.9	Talaş tipleri : (a) Kesintili talaş , (b) Sürekli talaş ,(c) Yığma kenarlı sürekli talaş , (d) Yarı kesintili talaş [87]	39
Şekil 2.10	Tornalama işlemi [87]	40
Şekil 2.11	Delik delme işlemi [91]	41
Şekil 2.12	Çeşitli frezeleme işlemleri [87]	42
Şekil 2.13	Kesici uç deformasyon çeşitleri [86]	44
Şekil 2.14	Serbest yüzey aşınmasının zamana göre değişimi [89]	45
Şekil 2.15	Tez MQL deneyleri sırasında kırılmış kesici uç	46
Şekil 3.1	İş parçasının katı modeli	48
Şekil 3.2	Ø 16 mm takma uçlu freze	48
Şekil 3.3	APHT kesici uçlar	49
Şekil 3.4	Deneylerde kullanılan CNC dik işleme merkezi	50

Şekil 3.5	Mikro yağlama sistemi	51
Şekil 3.6	MQL sisteminde kullanılan eş merkezli yağ / hava hortumu	52
Şekil 3.7	Monoküler mikroskop.....	52
Şekil 3.8	Mitutoyo Surftest SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı	53
Şekil 3.9	Kuvvet ölçümlerinde kullanılan dinamometre	53
Şekil 3.10	Dijital homojenizatör	54
Şekil 3.11	Hassas terazi.....	54
Şekil 3.12	MoS2 kurutulması sırasında kullanılan etüv.....	55
Şekil 3.13	İş parçasına açılan kanallar	56
Şekil 3.14	MQL (a) tek ve (b) çift nozül uygulaması	57
Şekil 4.1	Yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ve soğutma / yağlama şartları ile değişimi.....	61
Şekil 4.2	Kesme kuvvetlerinin kesme hızı ve soğutma / yağlama şartları ile değişimi.....	64
Şekil 4.3	İlerleme kuvvetlerinin kesme hızı ve soğutma / yağlama şartları ile değişimi.....	66
Şekil 4.4	Kesici uç serbest yüzey aşınmasının soğutma / yağlama yöntemleri ve zamanla değişimi	69
Şekil 4.5	Kuru işleme sırasında takım aşınmaları(a)1,96.dak b) 19,88.dak c) 98.dak)	70
Şekil 4.6	MQL (26 ml/h) işleme sırasında takım aşınmaları (a)4,48.dak b) 47,08.dak c)96,88.dak)	71
Şekil 4.7	MQL (52 ml/h) işleme sırasında takım aşınmaları (a)11,2.dak b) 60,48.dak c)91,84.dak)	72
Şekil 4.8	MQL (52 ml/h) işleme sırasında takım aşınmaları a)17,92.dak b)69,44.dak c)98,56.dak	73

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Yağlama / Soğutma Sistemlerinin Maliyet Tahminleri [6]	16
Tablo 2.1	AA'ya Göre Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	30
Tablo 2.2	AA 'ya Göre Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması	31
Tablo 3.1	Alüminyum 6061 Malzemesinin Kimyasal Bileşenleri	47
Tablo 3.2	Alüminyum 6061 Malzemesinin Mekanik Özellikleri	47
Tablo 3.3	Eraoil KT/2000 Ticari Bitkisel Kesme Sıvısı Özellikleri	49
Tablo 3.4	Mikro Yağlama Sisteminin Özellikleri	51
Tablo 3.5	Yüzey Kalitesi ve Kuvvet Ölçümlerinin Yapıldığı İşlem Parametreleri	58
Tablo 3.6	Aşınma Ölçümlerinin Yapıldığı İşleme Şartları	59

Nano Molibden Disülfid Katkılı Bitkisel Esaslı Kesme Sıvısı Kullanılarak Minimum Miktarda Yağlama İle Alüminyumun Frezelenmesinde İşlem Parametrelerinin Talaş Kaldırma Performansına Etkilerinin İncelenmesi

Derviş Berk CÖNGER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof.Dr. Erhan ALTAN

Alüminyum malzemeler gerek hafiflikleri gerekse korozyona olan dayanımları sebebiyle havacılık, uzay, denizcilik ve otomotiv gibi birçok sektörde artan oranda kullanılmaktadır. Minimum miktarda yağlama (MQL) geleneksel sıvı soğutma yönteminin yerini alabilecek çevre dostu bir yağlama yöntemidir. Son yıllarda MQL gibi çevre dostu yağlama yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada da çevre ve insan sağlığına giderek artan duyarlılık göz önüne alınarak mineral bazlı kesme yağı yerine ticari bitkisel kesme yağı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada alüminyum 6061 malzemesi kuru işleme, MQL ve nano katkılı MQL şartları altında işlenerek yüzey pürüzlülükleri, kesme kuvveti bileşenleri ve takım aşınma değerleri ölçülmüştür. Frezeleme işlemleri

her bir soğutma/yağlama yöntemi için CNC dik işleme merkezinde, üç farklı kesme hızı, sabit kesme derinliği ve sabit ilerleme değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MQL performansını arttırmak amaçlı bitkisel kesme yağı içerisine nano MoS_2 katılmış ve talaş kaldırma performansına etkisi araştırılmıştır. MQL ve nano katkılı MQL yöntemlerinde iki farklı aerosol debisi kullanarak aerosol debisinin yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve takım aşınmasına olan etkileri incelenmiştir. Aynı aerosol debileri MQL ve nano MQL yöntemlerinde tek nozül yerine çift nozüle eşit olarak dağıtılarak, dağılımın talaş kaldırma performansına etkileri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Minimum Miktarda Yağlama, Molibden disülfür, Nano Akışkan, Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Kuvveti, Takım Aşınması

The Effects of Using Nano MoS₂ Additives MQL on Milling Performance in Machining Operation of Aluminum

Derviş Berk CÖNGER

Department of Mechanical Engineering

Master Thesis

Danışman: Prof.Dr. Erhan ALTAN

Aluminum materials are using increasingly in many sectors such as aerospace, marine and automotive because of their lightness and resistance to corrosion. The minimum quantity lubrication is one of the environmentally friendly processes that have the potentials to replaces with conventional cooling methods. In recent years, the studies have been performed on the environment-friendly lubrication methods such as MQL method in machining operations. These studies have also focused on the usage of vegetable cutting fluids instead of mineral-based oils due to increasing awareness of the environment and human health. In this experimental study, Aluminum 6061 was machined under dry, MQL, MoS₂ nanoparticle used MQL conditions and the cutting force components, surface roughness and tool wear values were measured. The experiments were carried out by the CNC milling machine tool at three different cutting speeds and constant depth of cut and feed for each cooling/lubrication conditions. In order to increase the performance of MQL, nano MoS₂ was added

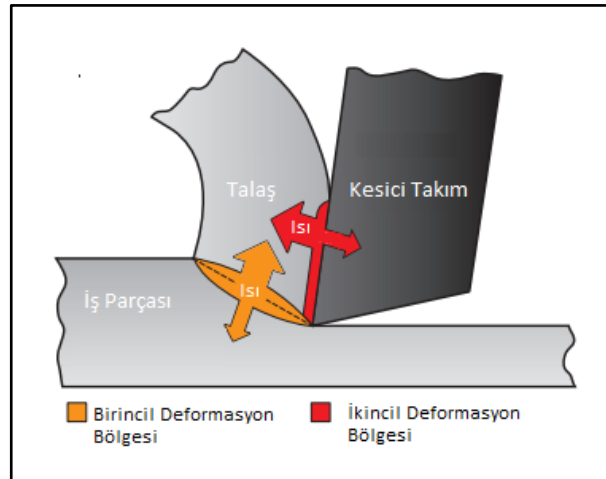
to the vegetable cutting oil and its effects on machining performance were investigated. The effects of aerosol flow on surface roughness, cutting forces and tool wear were investigated by using two different aerosol flow rates in MQL and nano additives MQL methods. In MQL and nanoparticle MQL methods, the same aerosol flow rates were equally distributed to double nozzles instead of the single nozzle to compare the effects of aerosol flow dispersion on machining performance.

Keywords: Minimum Quantity Lubrication, Molybdenum disulfide, Nanofluids, Surface Roughness, Cutting Force, Tool Wear

1.1 Literatür Özeti

Modern imalat endüstrisi, üretilen parçaların ölçüsel doğruluklarının artması, daha iyi yüzey kalitesine sahip olmaları, daha yüksek üretim adetlerini daha düşük takım aşınması ve maliyet ile elde etmek için sürekli olarak kendini geliştirmeye devam etmektedir[1]. Demir esaslı veya demir dışı yüksek mukavemetli parçalar talaşlı imalat yöntemleri ile işlenirken, kesme hızı ile birlikte yükselen sıcaklık takım dayanımını düşürür ve takımın aşınmasına, zarar görmesine sebep olur[2].

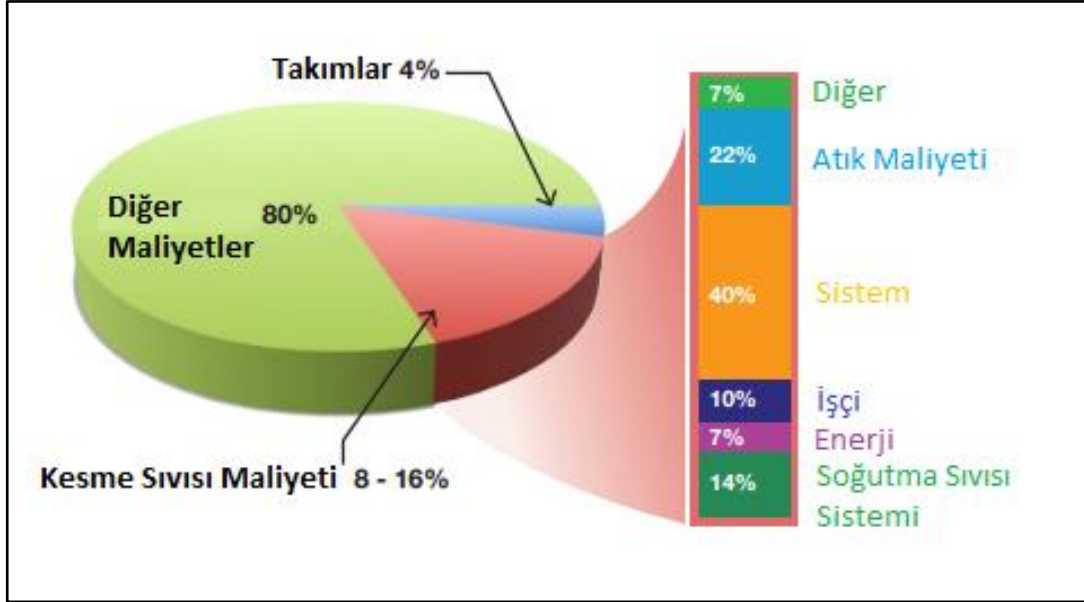
Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı düşürmek için, geleneksel sıvı soğutma yöntemleri endüstride sıkça kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de talaş kaldırma sırasında oluşan sıcaklık bölgeleri görülebilir.



Şekil 1.1 Talaş kaldırma sırasında ısı oluşumu [21]

Fakat gerek çevresel etkileri gerek maliyetleri bakımından soğutma sıvılarının kullanımının azaltılması kritik önem taşımaktadır [3]. Soğutma sıvılarının maliyetinin toplam maliyetin % 8-16'sı arasında olduğu kabul edilmektedir.

Bilindiği üzere endüstride kullanılan kesme sıvılarının büyük çoğunluğu mineral bazlı olup, insan sağlığına ve çevreye zararlı ağır elementler içirebilmektedir [4,5]. Şekil 1.2 'de işleme maliyetlerinin bileşenleri görülebilir.



Şekil 1.2 İşleme maliyeti genel analizi [7]

Minimum miktarda yağlama yönteminde; az miktarda yağ, yüksek basınçta hava ile karıştırılıp aerosol haline getirilerek bir nozül yardımıyla kesme bölgesine gönderilmektedir. MQL yönteminde kullanılan yağ miktarı genellikle 0,01-2 l/h arasında olmaktadır[6].

Alman DIN standartları kullanılan yağ miktarını 50ml/h, bazı uygulamalarda ise 150 ml/h olabilir olarak belirtmiştir[7]. Kullanılan yağ miktarı malzeme, işleme yöntemi ve takıma göre değişiklik gösterebilmektedir. Kullanılan yağın miktarının azaltılması toplam işleme maliyetlerini düşürmektedir. MQL sisteminde yağa nano katkısı takım aşınmalarını azaltarak takım maliyetlerini de düşürücü etki yapmaktadır.

MQL yönteminin diğer soğutma/yağlama sistemlerine karşı avantajları; daha düşük kesme yağı tüketimi, maliyet ve takım aşınmasını düşürmesi, yüzey kalitesini arttırması ve insan sağlığına ve çevreye olan zararları azaltması olarak sıralanabilir.

MQL yöntemindeki yağ tüketimi diğer yöntemlere göre çok daha az olduğundan, sıvı soğutma yönteminde büyük bir maliyet olan ömrünü tamamlamış yağların atık maliyetinden de kurtulmuş olmaktadır [6].

Bu avantajlara ek olarak, işleme sonrası elde edilen talaşlar da neredeyse yağsız olduğu için, talaşların geri dönüşümü de daha ekonomik olmaktadır.

MQL yönteminin frezeleme, tornalama, matkap ile delik delme ve taşlama gibi birçok işleme yöntemi ile kullanıldığı akademik çalışmalar yapılmaktadır. MQL yöntemi bu çalışmalarda diğer soğutma sistemleri ve kuru işlemler ile karşılaştırılmış; performansı, ekonomikliği ve çevreye etkileri araştırılmıştır.

Sadece akademik olarak değil, endüstriyel alanda da MQL bazı firmalar tarafında seri üretimde kullanılmaya başlanmıştır. Ginting vd. [8] Batı Avustralya'da küçük orta boy bir işletmede sıvı soğutma yerine MQL uygulamasının teknik, ekonomik ve çevresel açıdan faydalarını araştırmışlardır. MQL kullanımının sera gazı emisyonlarını ve sıvı atıklarını azaltmasıyla da ekotoksisiteyi azalttığını ve bu yeni soğutma/yağlama tekniğinin metal kesme operasyonlarında işleme performanslarını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak sıvı soğutma yerine MQL sisteminin kullanılmasının çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğe yardımcı olduğunu belirtmişlerdir.

Bir diğer endüstriyel uygulanma örneği de 2008 yılında Ford Motor Firmasının Kuzey Amerika'daki fabrikasında, alüminyum vites kutuları, tork konvektör kutuları ve valf gövdelerinin işlendiği 200 işleme merkezinde sıvı soğutma yerine MQL sistemine geçilmesidir. Bu parçaları için MQL sistemi firmanın öncelikli kullandığı soğutma sistemidir.

Firmanın Avrupa'da alüminyum silindir kapağı ve dökme demir motor blokları işlediği iki fabrikasında bazı uygulamalarda hala sıvı soğutma yöntemi kullanılsa da MQL yöntemi birinci soğutma yöntemi olarak 2011 yılından beri kullanılmaktadır. Yeni MQL uygulamaları da Brezilya ve Çin'de ki fabrikalarında sisteme alınmaya başlamıştır [9].

S.Niketh ve G.L.Samuel (2018) yaptıkları deneysel çalışmada , yüzeyine çeşitli mikro yapılar açtıkları matkap ile Ti-6Al-4V titanyum alaşımını kuru , sıvı ve

MQL yöntemi ile işlemişler ; yüzey kalitesi, takım aşınması ve kesme kuvvetlerini incelemişler. En iyi sonuçları sıvı soğutmada almışlar fakat MQL yönteminin kuru işlemekten daha iyi sonuçlar vermesi, sıvı soğutmaya yakın değerler çıkarması ve enerji kaynaklarının tüketimi açısından tercih edilebileceğini belirtmişlerdir[10].

P.Sivaiah ve D.Chakradhar (2018) çalışmalarında AISI 630 paslanmaz çeliği kuru, sıvı soğutma, karyojenik ve MQL yöntemleri ile farklı kesme derinliklerinde tornalamışlar, takım aşınmaları ve talaş formlarını incelemişlerdir. Karyojenik soğutmada kesici takıma sıvı nitrojen göndermişlerdir. Yaptıkları yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde paso arttıkça yüzey kalitesini düştüğünü, en iyi yüzey kalitesini karyojenik soğutmada; karyojenik soğutmadan sonraki en iyi yüzey kalitesini ise MQL ile yapılan soğutma da elde etmişlerdir. MQL soğutma sistemi sıvı soğutmaya göre daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri vermiştir. Yüzey kalitesinde olduğu gibi serbest yüzey aşınmasında da, en az aşınma karyojenik soğutma ile elde edilmiş, karyojenik soğutmadan sonra en az aşınma değerleri MQL soğutma ile elde edilmiştir. MQL soğutma / yağlama sistemi geleneksel sıvı soğutmadan daha uzun takım ömrü göstermiştir[11].

V. Songmene vd. (2018) yaptıkları incelemede, siyah ve beyaz granitin parlatılması işleminde insan sağlığına zararlı olan küçük ve ultra küçük parçacıkların oluşumuna karşı MQL soğutma sisteminin kullanılmasının etkilerini araştırmışlardır. 7-100 nm arasındaki parçacıkları ultra küçük parça olarak adlandırmışlardır. MQL su sistemi ile parlatma işleminde işlem sonucunda çalışma ortamında oluşan orta boyuttaki partiküllerin, dönme hızı ve MQL debisine bağlı olarak %20-90 arasında azaldığını gözlemlemişlerdir. Ultra küçük parçacıklara ise bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir[12].

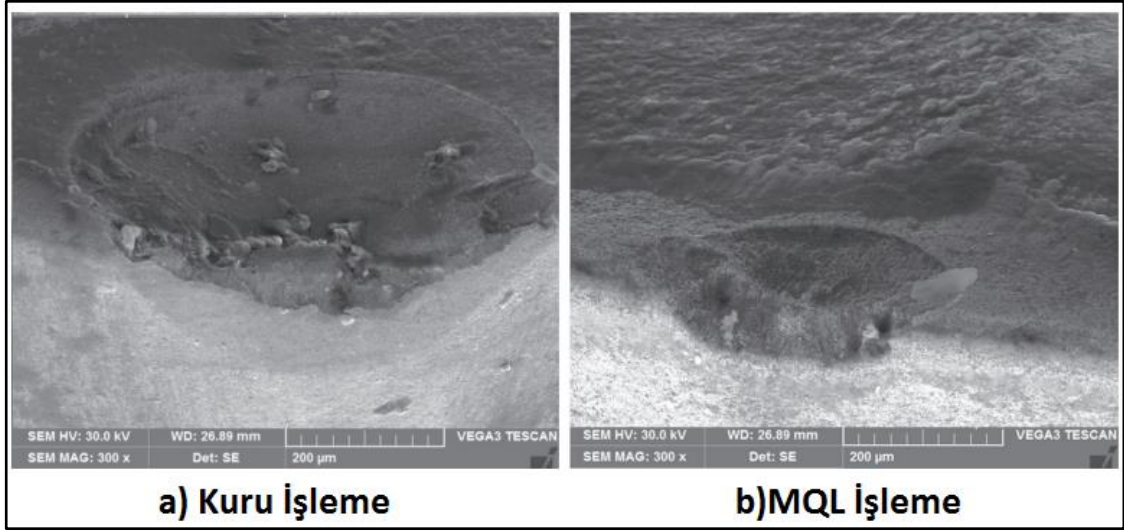
Erween Abd Rahim ve Hemarani Dorairaju (2018) yaptıkları deneysel çalışmada AISI 1045 malzemesini MQL soğutma sistemi kullanarak tornalamışlardır. Farklı nozül püskürtme çapı, farklı hava basıncı ve farklı nozül-kesici uç mesafeleri deneyerek en uygun değerleri elde etmeye çalışmışlardır. Daha büyük çaplı nozül ile yağlayıcı miktarının artmasıyla daha düşük kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıkları elde etmişlerdir. 3-9 mm arasında denedikleri nozül kesici uç

mesafesinde de 6-9 mm arasında daha iyi sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir[13].

MQL soğutma/yağlama sisteminin diğer yöntemler ile birlikte hibrit olarak da kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Wojciech Stachurski vd. (2018) yaptıkları çalışmada soğutulmuş basınçlı hava ve MQL yöntemleri birleştirerek kullanmışlardır. Dişli üretiminde kullanılan azdırma takımlarının bilenmesi sırasında yüzeyde oluşan mikro sertlik düşüşü bu hibrit yöntemle aşılmıştır. İki yöntemin birlikte kullanılması tek tek kullanılmaları veya sıvı soğutma ile soğutulmuş basınçlı havanın beraber kullanılmasından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bileme sırasında tüketilen yağ miktarının azaltılmasıyla operatörün sağlığına ve çevreye olan olumlu etkilerin sistemin avantajı olduğunu belirtmişlerdir[14].

Mozammel Mia (2018) çalışmasında AISI 4140 malzemesinin MQL yöntemi ile frezelemesinde Taguchi ve Tepki Yüzeyi Metodolojisi kullanarak optimum kesme hızı, kesme derinliği ve soğutucu debisini hesaplamıştır. Spesifik kesme enerjisi ve yüzey kalitesi parametrelerine göre MQL sisteminde optimum debinin 150 ml/h olarak bulunduğunu belirtmiştir[15].

Magnezyum alaşımlarının otomotiv ve havacılık sanayine daha sık kullanılmasıyla bu malzemeye ile ilgili çalışmalar da artmıştır. R. Viswanathan vd. (2018) çalışmalarında 300 mm uzunluğundaki magnezyum alaşımından iş parçasını kuru ve MQL soğutma yöntemi ile işlemiştir. MQL yönteminde 6 bar basınç ve 60 ml/h debi kullanmışlardır. Ölçtükleri takım aşınması ve sıcaklıklarında en uygun değerleri elde etmek için gerekli kesme hızı, ilerleme, paso ve soğutma sistemini Taguchi destekli GRA analizi ile hesaplamışlardır. Genel olarak elde edilen sonuçlarda MQL sisteminin kuru işlemeden daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir[16]. Şekil 1.3'de çalışmalarında paylaştıkları taramalı elektron mikroskobunda takım aşınmalarının karşılaştırıldığı görüntü gösterilmektedir.



Şekil 1.3 10 dk işleme sonrası takım aşınmalarının SEM görüntüleri
(a) Kuru işleme b) MQL işleme [16])

Araştırmacılar MQL sisteminin verimliliğini arttırmak için yağın içine nano parçacık ilaveleri yapmaktadır. Patole P. B. ve Kulkarni V. V (2018) yaptıkları deneylerde AISI 4340 malzemesini sıvı soğutma ve çok duvarlı karbon nano tüp katkı MQL yöntemi kullanarak farklı ilerleme, debi, kesme derinliği ve kesici uç radyüs değerlerinde tornalamışlardır. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinde en iyi sonuçları almak için optimizasyon hesaplamaları yapmışlardır. Doğru bir şekilde uygulandığında nano katkı MQL yönteminin, kesme kuvvetlerinde ve yüzey kalitesinde ciddi iyileştirmeler yaptığını ve sıvı soğutmaya alternatif olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir[17].

Sanayide kullanılan kesme sıvılarının çoğu sentetiktir ve mineral bazlı oldukları için ağır kimyasallar içerip, insan sağlığına ve çevreye zararları bulunmaktadır. Bitkisel yağların çevre dostu, insan sağlığına zararsız ve sürdürülebilir olması; araştırmacıları bu konuda çalışmaya yönlendirmektedir. Sachin M. Agrawal vd. (2017) , yüksek hız çeliğinin tornalamasında mineral bazlı ve aleo vera bitkisel bazlı MQL sistemleri kullanmışlardır. Bitkisel bazlı yağ ile mineral bazlı geleneksel yağa göre yüzey kalitesinde %6,7, takım aşınmasında ise % 0,14 daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir[18] .

Armando Marques vd. (2015) , süper alaşım İnconel 718 'i bitkisel kesme yağının içerisine grafit ve MoS_2 ekleyerek MQL yöntemiyle tornalamışlar ve grafit ve MoS_2 katkısının yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğünü belirtmişlerdir[19].

Lutfi Taner Tunc vd.(2016) yaptıkları deneysel çalışmada, nükleer santral, havacılık, enerji santralleri gibi alanlarda sıkça kullanılan portatif frezeleme işleminde, MQL sistemini AISI 316L malzemesinin frezelemesinde kullanmışlardır. MQL yağ debisinin artmasının yüzeydeki artık gerilmeleri azalttığını ifade etmişlerdir. Bu tip açık alanda işleme gerektiren çalışmalarda, MQL sisteminin uygulanabileceğini ifade etmişlerdir. Şekil 1.4'de portatif frezeleme robotuna monte ettikleri MQL sistemi görülebilir[20].



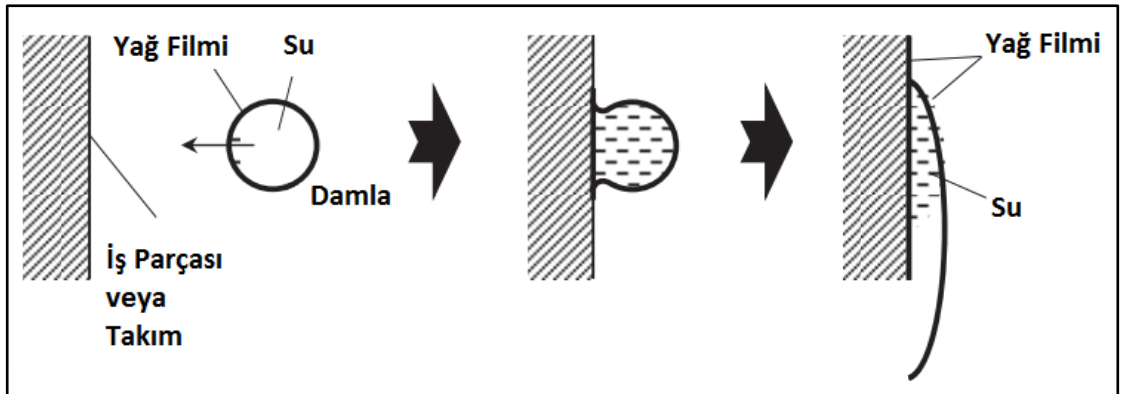
Şekil 1.4 MQL sistemi monte edilmiş robotik işleme ünitesi a) İş mili eklenmiş mobil işleme robotu b) MQL nozülleri [20]

Mohammadjafar Hadad ve Alireza Sharbati (2016) sertleştirilmiş 100Cr6 çeliğinin taşlanması kuru, MQL ve sıvı soğutma yöntemlerini kullanmışlar ve hem deneysel olarak ölçtükleri yüzey sıcaklıklarında hem de doğrulamak için yaptıkları sonlu elemanlar yöntemindeki sıcaklık hesaplarında, en düşük sıcaklığı sıvı soğutma, daha sonra ise MQL yöntemi ile elde etmişlerdir[21]. Taşlama gibi operasyonlarda sıvı soğutmada kullanılan yağın, yağlama ve soğutma dışında, oluşan talaş ve abrazif takım parçalarını takım iş parçası ara yüzünden uzaklaştırmak gibi bir görevi daha olduğu için MQL yöntemi üzerinde bu konuda çeşitli denemeler ve çalışmalar yapılmaktadır.

Uma Maheshwera Reddy Paturi vd. (2016) deneysel çalışmalarında İnconel 718'in tornalamasında MQL ve yağa ağırlıkça % 0,5 oranında mikro boyutlarda tungsten disülfid (WS_2) ekledikleri MQL yöntemlerini karşılaştırmışlardır. MQL yağına WS_2 katkısının yüzey kalitesini %35 'e kadar iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir[22].

E. A. Rahim vd. (2015) yaptıkları deneysel çalışmada, AISI 1045 malzemesini kuru ve yağ olarak sentetik ester kullandıkları MQL yöntemi ile tornalamışlardır. MQL yönteminin kuru işlemeye göre kesme kuvvetlerini, kesme sıcaklığını, takım talaş temas mesafesini önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir[23].

S. Ekinovic vd.(2015) st52 çeliğinin tornalamasında kuru ve MQL de oluşan yağ-hava aerosolüne su ekledikleri iki yöntemi karşılaştırmışlardır. Yağ debisini 10-50 ml/h, su debisini ise 0,3-0,7 ml/h olarak ayarlamışlardır. Kesme kuvvetlerinin kuru işlemeye oranla %17 oranına kadar düştüğünü ifade etmişlerdir. Optimum değerleri 10ml/h yağ ve 1,7 ml/h su debisi kullandıkları karışımda elde ettiklerini belirtmişlerdir. Sulu ve su eklemedikleri MQL yöntemlerini karşılaştırmamış oldukları için su eklemelerinin avantaj veya dezavantajlarından bahsetmemişlerdir. Şekil 1.5 'de uyguladıkları yöntemin konsept olarak yağ ve su birleşimi çizilmiştir[24].

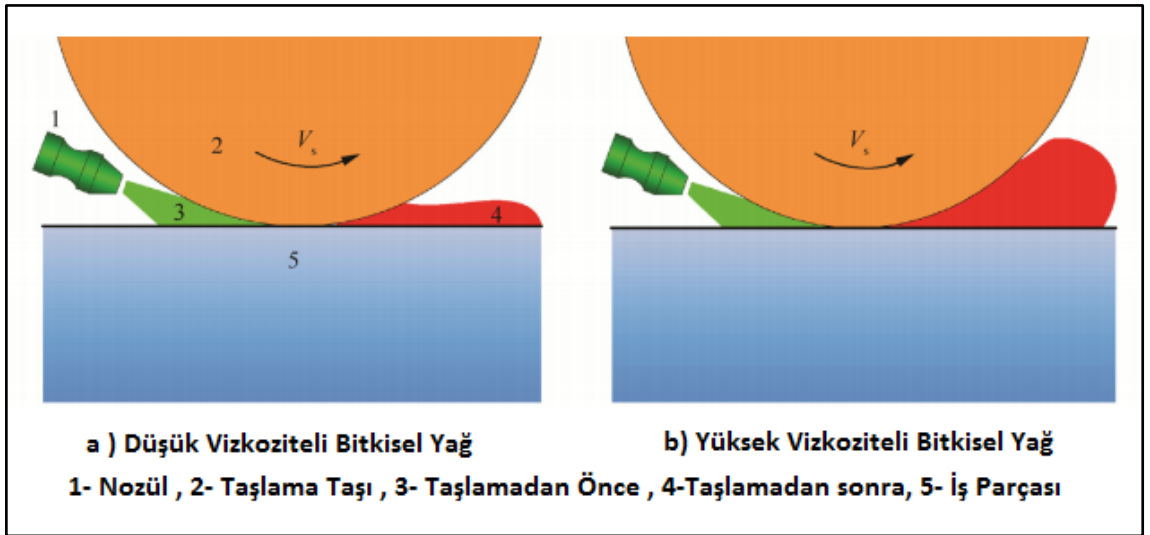


Şekil 1.5 Su ilaveli MQL konsepti [24]

MQL yönteminin sıvı soğutmaya üstünlük sağladığı birçok çalışma vardır. Kedare S. B vd.(2014), kalıp çeliğinin parmak freze ile frezelenmesi işleminde MQL ve sıvı soğutma yöntemlerini karşılaştırmış ve MQL soğutma / yağlama yöntemi ile yüzey kalitesinin %27 'ye kadar iyileştiğinin ölçmüşlerdir[25].

Bir diğerk hibrid soğutma / yağlama yöntemide O. Pereira vd. (2015) tarafından denenmiştir. İncinel 718 malzemesinin tornanlaması işleminde, sıvı soğutma, kuru işleme, MQL, karyojenik soğutma ve karyojenik ile MQL yöntemini beraber uyguladıkları hibrit yöntemleri karşılaştırmışlardır. Karyojenik soğutmada sıvı karbondioksit (CO₂) kullanmışlardır. Koanda efektine sebep olan bir nozül kullanmanın spray sıcaklığı düşürdüğünü belirtmişlerdir. Kullandıkları hibrit yöntemin sıvı soğutmaya %90 oranında yakın bir performans gösterdiğini ve çevreye olan etkilerini daha az olacağı için sıvı soğutmaya alternatif olduğunu belirtmişlerdir[26].

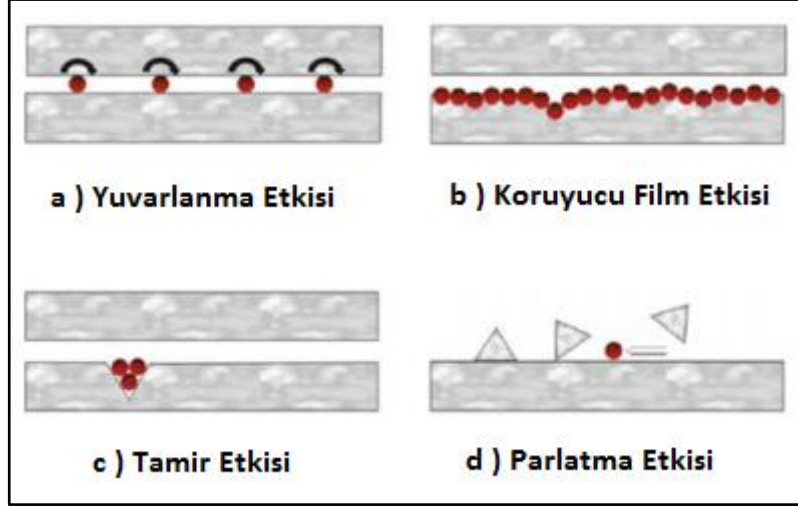
Li Benkai vd. (2016) nikel alaşımlı süper alaşımın taşlanması MQL sistemini kullanmışlardır. Yağ olarak hint, soya, kolza, mısır, ayçiçek, yerfıstığı ve palm yağlarını ayrı ayrı kullanmış ve karşılaştırmışlardır[27].



Şekil 1.6 Farklı viskozitelerdeki bitkisel kesme yağlarının ısı transfer kapasiteleri [27]

Hint yağı en düşük kesme kuvvetlerini verirken en yüksek sıcaklık ölçümü de bu yağ tipinde ölçmüşlerdir. Bunun sebebini, hint yağının yüksek viskozitesinden dolayı taşlama taşını geç terk etmesi olarak göstermişlerdir. Palm yağı ikinci en düşük kesme kuvvetini verirken, aynı zamanda en düşük taşlama sıcaklığı da bu yağ tipinde ölçülmüştür. Yüksek viskoziteye sahip bitkisel yağların, yağlama özelliği ile taşlama kuvvetlerini düşürdüğünü ancak taşlama sıcaklığını arttırdığını ifade etmişlerdir[27].

Lanny Kirkhorn vd. (2018), çalışmalarında plastik şekil verme yöntemini kullanarak bükükleri saç parçada MQL ve GnP katkılı MQL yöntemlerini kullanmışlardır. GnP katkısının sürtünme performansına olumlu etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Nano katkı ilavesinin takım – iş parçası ve takım- talaş ara yüzündeki etkileri Şekil 1.7 ‘de gösterilmiştir[28].



Şekil 1.7 Nano parçaların sürtünme mekanizmalarına etkileri [28]

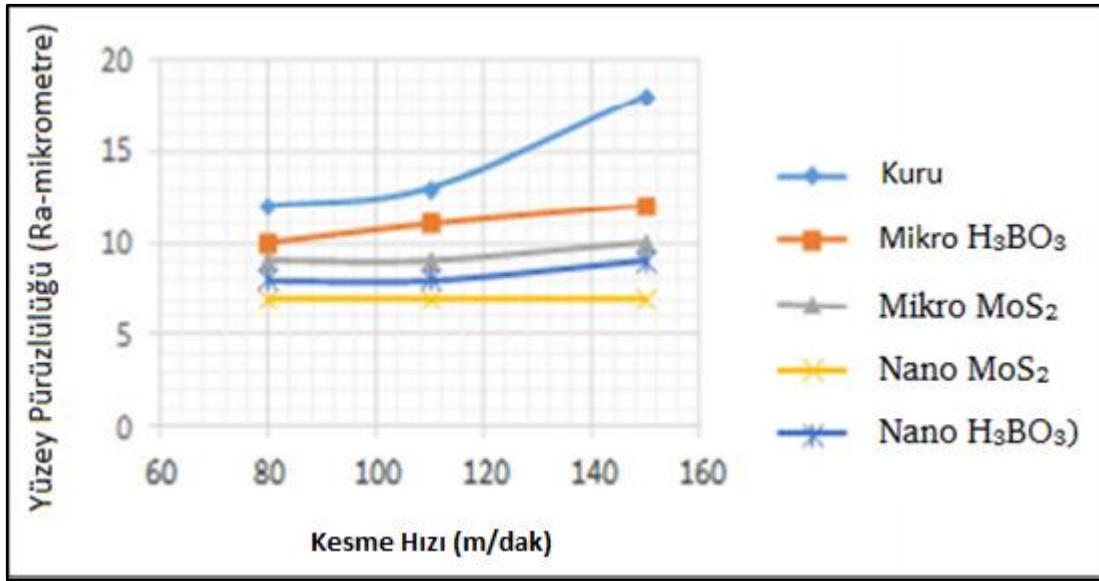
A. Santana vd. (2018) İncel 800 malzemesinin tornalanması işleminde kuru, sıvı soğutma ve iki farklı debi de MQL yöntemlerini kullanmışlardır. Yüksek debili kullandıkları (230ml/h) MQL yöntemi en düşük takım aşınması değerini vermiştir[29].

MQL yönteminde kullanılan yağ miktarı ve yağ basıncı işleme performansına etki etmektedir. Nilanjan Banerjee ve Abhay Sharma (2018) , Ti-6Al-4V malzemesinin tornalanması işleminde MQL yöntemi kullanmışlardır. MQL sistemindeki yağ debisi, basıncı ve yağın serbest yüzey ile kesme yüzeyindeki dağılım oranının, yüzey pürüzlülüğüne, takım aşınmasına, malzeme kaldırma oranına ve yağ tüketimine etkilerini incelemişlerdir. MQL parametrelerinin değiştirilmesinin sonuçları etkilediğini belirtmişlerdir[30].

Kamal Kishore Joshi vd.(2018), çalışmalarında İncel 600 malzemesini, kuru, MQL ve nano Al_2O_3 katkılı MQL yöntemleri ile tornalamışlardır. Nano katkılı MQL yöntemi diğer soğutma yöntemlerinden daha iyi yüzey kalitesi değerleri vermiştir. Yüksek kesme hızı, paso ve ilerlemede işlem yaptıklarında MQL'in

etkisini azalttığını belirtmiş, bunu da hava-yağ karışımı aerosolün efektif olarak kesme bölgesine ulaşamamasına bağlamışlardır[31].

Vamsi Krishna Pasam vd.(2018), ise MQL yönteminde performansı arttırmak için yağa katılan katkıların nano veya mikro boyutta olmasının farklarını araştırmışlardır. 1040 çeliğinin tornalanmasında nano ve mikro ölçeklerde MoS_2 ve borik asit (H_3BO_3) katkılı MQL yöntemlerini kullanmışlardır. MoS_2 katkılı MQL yöntemi yüksek kesme hızlarında daha düşük takım aşınması, yüzey pürüzlülük değeri, kesme kuvveti ve sıcaklık değerleri vermiştir[32].

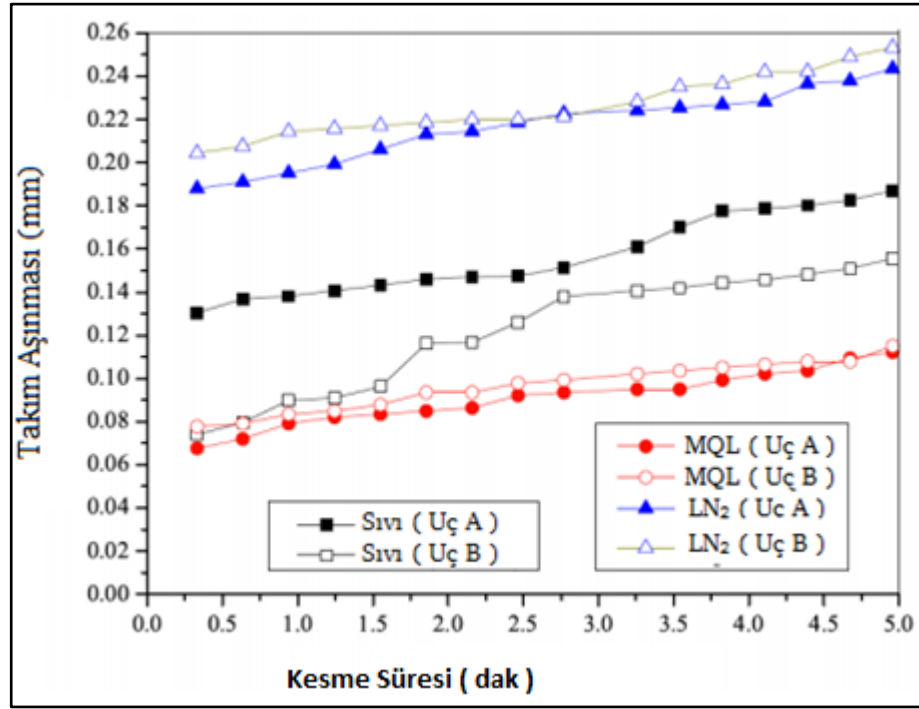


Şekil 1.8 Yüzey pürüzlülüğü değişimleri [32]

Şekil 1.8 'de çalışmalarında elde ettikleri yüzey pürüzlülüğü değerlerinin grafiği görülmektedir. Bunu nano parçacıklı MQL yönteminde takım-talaş ara yüzeyinde kapilerite ve daha tutarlı bir yağ filmi oluşmasına bağlamışlardır. MoS_2 'nin daha iyi adsorpsiyon ve daha düşük vander vals bağına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu özellikleri dokular arasında daha kolay kaymasına ve sürtünmeyi azaltmasına sebep olmaktadır. Böylelikle sıcaklıkta daha düşük olmakta takım ömrü uzamaktadır[32].

Bir diğer hibrit yöntem çalışması da A Mehta vd.(2018) tarafından yapılmıştır. Inconel 718 'in tornalanmasında kuru, MQL, soğuk hava ile beraber MQL, karyojenik ve karyojenik ile beraber MQL olmak üzere beş farklı soğutma/yağlama yöntemi kullanmışlardır. Soğuk hava ile beraber uygulanan

MQL yönteminde yüzey pürüzlülüğünün %86 daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. En düşük serbest yüzey aşınması MQL ve karyojenik soğutmada ölçülmüş, takım aşınmasının ise kuru işlemeye göre %92 düştüğünü belirtmişlerdir. Kesme kuvvetlerinin karyojenik ve karyojenik ile beraber uygulanan MQL 'de yüksek çıkmasını, yüzey soğuması ile beraber, iş parçasının sertliğinin bu bölgede artmasına bağlamışlardır[33].

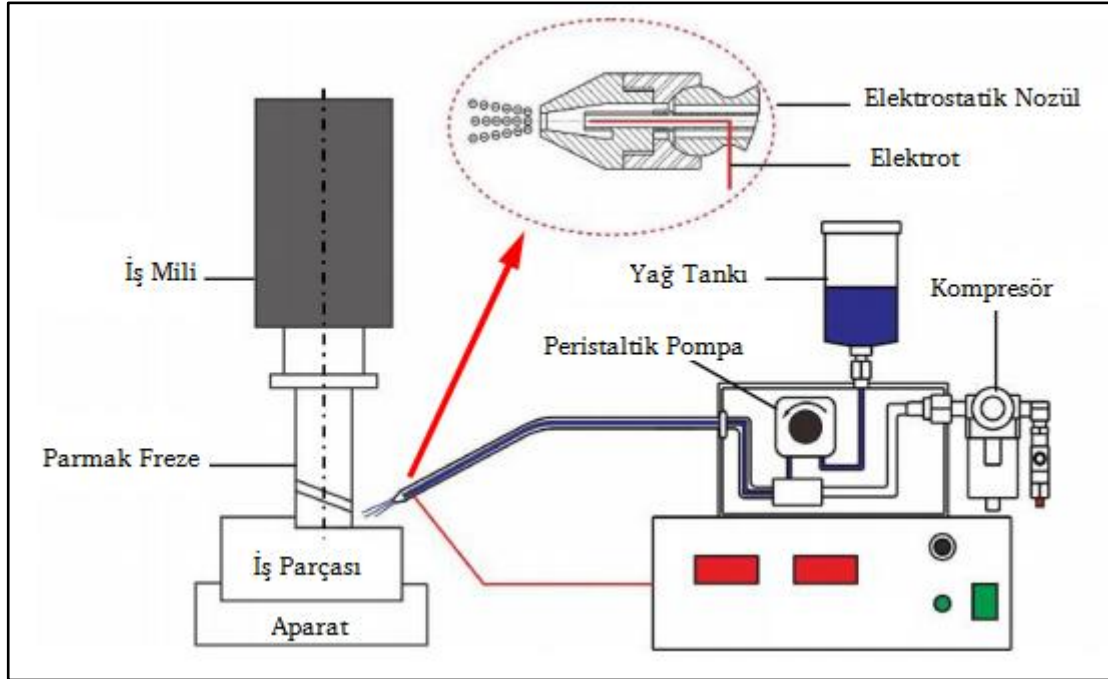


Şekil 1.9 Takım aşınmaları sonuçları [34]

Gleiton de Paula Oliveira vd.(2018) ise yine aynı malzemenin frezelenmesi işlemini kuru, MQL ve LN₂ kullandıkları karyojenik ortamda gerçekleştirmişlerdir. En az takım aşınması değerlerini MQL yönteminde elde etmişlerdir. Çalışmalarına ait takım aşınması grafiği Şekil 1.9 'da görülebilir[34].

Oleksandr Gutnichenko vd. (2018) soğuk iş takım çeliğini kuru, MQL, ve GnP katkılı MQL şartları altında tornalamışlardır. Kullanılan bitkisel yağa eklenen Gnp nin sürtünmeyi önemli derecede düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Benzer bir çalışmada Tao Lv vd. (2018) yapmışlardır. AISI 304 çeliğinin frezelenmesi işleminde GnP katkılı elektrostatik MQL yöntemi ve geleneksel MQL yöntemi uygulamış, bu iki yöntemi karşılatırmışlardır. GnP katkılı yöntemin sürtünme bölgesine daha iyi nüfus ettiğini, sürtünmeyi düşürdüğünü buna bağlı olarak

yağlama performansını arttırdığını ve takım ömrünü uzatacağını belirtmişlerdir [36].Elektrostatik MQL yönteminin şematik gösterimi Şekil 1.10 ‘da görülebilir.



Şekil 1.10 Elektrostatik MQL frezeleme işleminin şematik gösterimi [36]

K. Aslantas ve A. Çiçek (2018) İnconel 718 ‘in mikro frezelenmesi işleminde sıvı, MQL ve kuru ortamı kullanmışlardır. Soğutucu olarak etanolü seçmişlerdir. Etanolün düşük viskozitesi ve düşük buharlaşma sıcaklığının etanolü etkin bir soğutucu yaptığını belirtmişlerdir. Takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinde en iyi performansı MQL yöntemi ile elde etmişlerdir[37]. MQL tekniğinin mikro frezeleme işleminde kullanıldığı bir başka çalışma da Sonja Kieren-Ehses vd.(2018) tarafından yapılmıştır. Titanyum malzemenin mikro frezelemesini kuru ve üç farklı soğutucu kullandıkları MQL yöntemleri ile gerçekleştirmişlerdir. Soğutucu olarak MQL ‘de izopropil alkol, sodyum dodesil sülfat ve ticari kesme yağı kullanmışlardır. En iyi performansı ticari kesme yağından elde etmişlerdir[39]. Ajithkumar J P vd.(2018) , derleme yaptıkları akademik çalışmalarında, nano parçacık katkılı MQL yöntemlerini yüzey kalitesini arttırdığını ve takım ömrünü uzattığını belirtmişlerdir[40].

Amiril Sahab Abdul Sani vd.(2019) ise yaptıkları çalışmada MQL yönteminde 1045 malzemesinin ortogonal tornalanması işleminde bitkisel yağa iyonik sıvı ekleyip etkilerini incelemişlerdir. İyonik tuzlar 100 °C sıcaklığın altında sıvı

olabilen tuzlardır. Ağırlıkça %1-10 arasında yağa kattıkları iyonik sıvı çeşitlerinin kesme kuvvetlerini %5-7 oranında, kesme sıcaklığını ise %7-10 arasında düşürdüğünü belirtmişlerdir[41].

L. Samyilingam vd.(2018) , MQL yönteminde nano katkı olarak nanoselüloz kullanmışlardır. Paslanmaz malzemeyi tormaladıkları deneysel çalışmalarında MQL yönteminde yağa nanoselüloz katkısının takım ömrünü önemli derecede arttırdığını belirtmişlerdir[42].

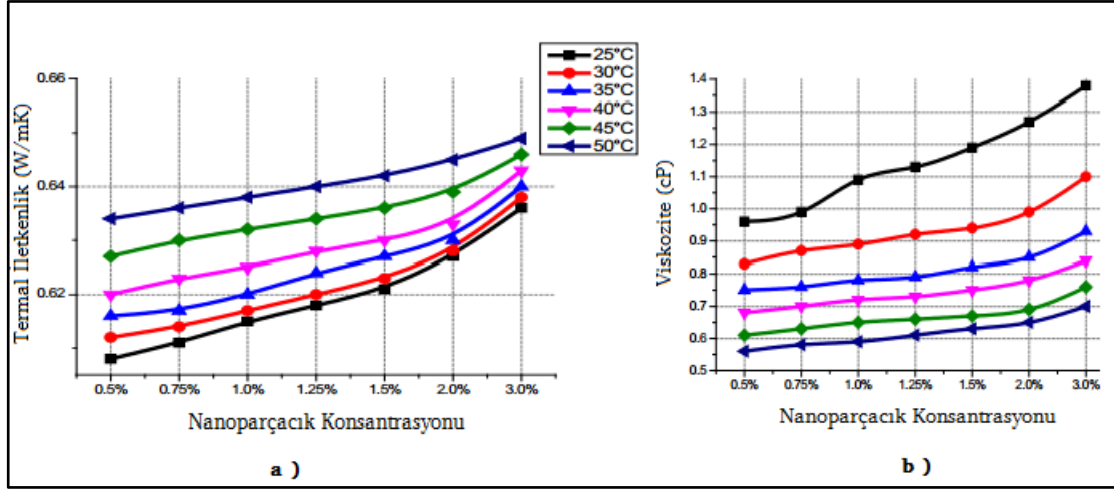
M. Venkata Ramana, deneysel çalışmasında titanyum alaşımını kuru, sıvı soğutma ve MQL yöntemleri ile tormalamıştır. En iyi yüzey kalitesi aynı işleme parametreleri altında MQL yöntemi ile elde etmiştir[43].

K.Ch. Sekhar vd.(2017), bizimde tez çalışmamızda kullandığımız nano MoS₂ katkılı MQL yöntemini AISI 1040 çeliğinin tormalanmasında; nano MoS₂ katkısını kanola, ayçiçeği ve ticari yağlarda kullanarak, MQL ile kuru işlemeyi ve yağların işleme performanslarını karşılaştırmışlardır. Yağdaki nano katkı oranının ağırlıkça %0,5 olduğu durumda en iyi yüzey kalitesini elde etmişler. Nano MoS₂ tozlarının ise 70-80 nm boyutlarında olması durumunda en iyi yüzey kalitesini elde etmişlerdir[44].

MQL yönteminde oluşan yüzey kalitesinin geleneksel sıvı soğutma yöntemine göre üstün olduğuna dair sonuçlarını açıklayan başka bir çalışmayı da Sanjeev Kumar vd.(2017) yapmışlardır. Çalışmalarında AISI 4340 malzemesini kuru, sıvı soğutma ve MQL şartlarında tormalamışlardır. Varyans analizi sonuçlarına göre MQL yönteminin kuru ve sıvı soğutma işlemelerine kıyasla yüzey kalitesini arttırdığını ifade etmişlerdir[45].

Anuj Kumar Sharma vd.(2016) , AISI 1040 malzemesinin tormalanması işlemini kuru, sıvı soğutma, MQL ve SiO₂ katkılı MQL yöntemini kullandıkları şartlar altında gerçekleştirebilirler. Elde ettikleri sonuçlara göre nano SiO₂ katkılı MQL yöntemi; MQL ve sıvı soğutma yöntemlerine karşı yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme kuvvetlerinde daha iyi değerler vermiştir. Ölçümlerine göre yağ içerisine kattıkları nano parçacığın miktarı arttıkça hem yağın termal iletkenliğini hem de viskozitesini artmaktadır(Şekil 1.11). Termal iletkenliğin artması takım-iş parçası ara yüzündeki sıcaklığı düşürmede olumlu etki yaparken,

artan viskozite spray basınç düşüşüne sebep olduğu için negatif bir etki yapmaktadır. Bu sebepten dolayı çalışmalarında optimum değer olarak ağırlıkça %1 nano katkı oranında karar kılınmışlardır[46].



Şekil 1.11 SiO₂ Nano parçacık konsantrasyonunun yağın a) Termal iletkenliğine ve b) Viskozitesine etkisi [46]

Aynı ekip 2015 yılındaki çalışmalarında, aynı malzemenin tornalanması işleminde kuru, sıvı, MQL ve nano TiO₂ katkılı MQL yöntemlerini kullanmışlar ve nano TiO₂ katkılı MQL yönteminde takım aşınmasının nano katkısız MQL yöntemine göre %35,85 düştüğünü belirtmişlerdir[47]. 2016 yılındaki çalışmalarında ise Al₂O₃ katkılı MQL yöntemini aynı malzeme ve işleme yönteminde denemişler ve nano katkısız MQL yöntemine göre kesme kuvvetlerinin %29,2 düştüğünü belirtmişlerdir[48]. Ekibin 2017'de ki bir diğer çalışmasında ise, nano Al₂O₃ katkılı MQL, nano MoS₂ katkılı MQL ve hem Al₂O₃ hem de MoS₂ katkısı kullandıkları hibrit MQL yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Hibrit yöntemde kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve yüzey kalitesinin sırasıyla %7,35 , % 18,08 ve %2,38 oranında Al₂O₃ katkılı MQL yöntemine göre azaldığını belirtmişlerdir.

F. Berzosa vd. magnezyum alaşımına MQL ve kuru işleme yöntemi ile delik açmışlardır. Magnezyum alaşımları hafifliklerinden dolayı havacılık ve uzay sanayinde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Magnezyum alaşımlarının su bazlı yağlarla sıvı soğutma ile soğutma/yağlama yapılması durumunda alev alabilir

hidrojen oluşumunun, alternatif soğutma yöntemleri aranmasına yol açtığını belirtmişlerdir[49] .

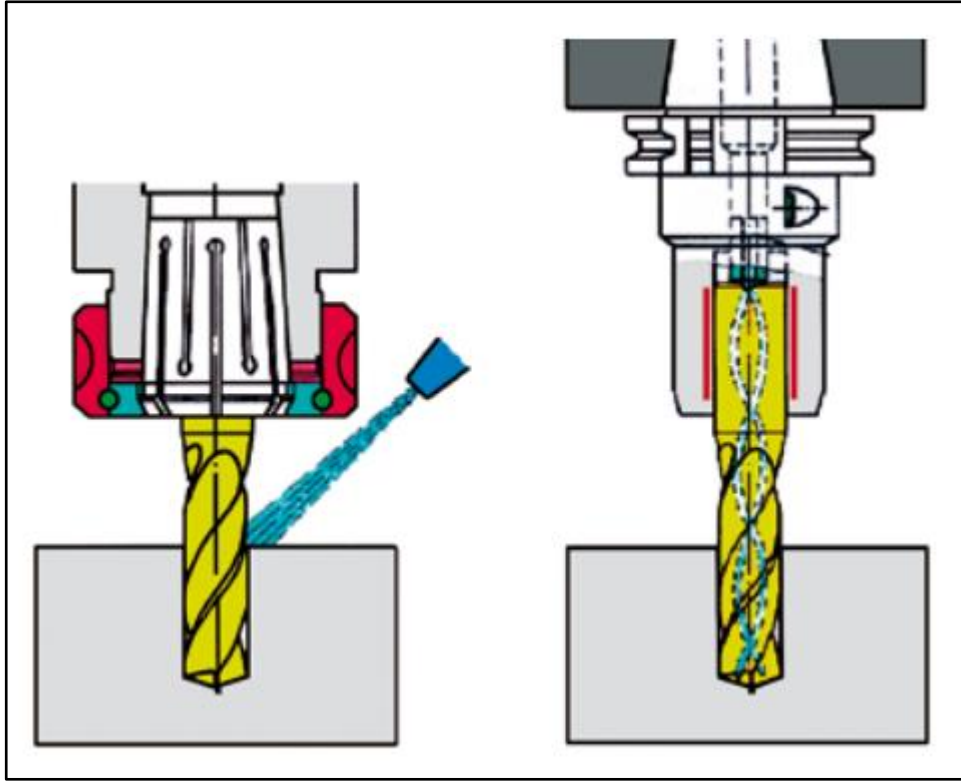
E.Benedicto vd.(2017) , soğutma tekniklerini ekonomik, teknik ve çevreye olan etkileri bakımından incelemişlerdir. Birçok firmanın geleneksel sıvı soğutma yöntemi yerine MQL yöntemine geçiş yapmaya başladığını, MQL yönteminin enerji tüketimini düşürdüğünü, yağ tüketimini %95 oranında azalttığını, takım ömrünü uzattığını belirtmişlerdir. Tablo 1.1 ‘de soğutma sistemlerinin maliyetlerinin karşılaştırılmasını görülebilir[6].

Tablo 1.1 Yağlama / Soğutma sistemlerinin maliyet tahminleri [6]

	Ham Madde Maliyeti	Yağ Tüketimi	Ekipman Maliyeti	Takım Maliyeti	Temizlik Maliyeti	Atık Maliyeti
Kesme Sıvıları	**	*****	****	***	*****	*****
Kuru İşleme	*	*	*	*****	*	*
MQL	**	**	***	**	**	**
Karyojenik Soğutma	***	***	*****	***	*	*
Gaz Soğutma	***	***	****	****	*	*

Radoslaw W. Maruda vd.(2016) AISI 1045 malzemesinin tornalanması işleminde kuru, MQL ve fosfat ester katkılı MQL yöntemlerini kullanmışlardır. Fosfat ester katkısının takım aşınmasına ve talaş formuna önemli ölçüde etki ettiğini belirtmişlerdir. Farklı kesme hızlarında takım aşınmasının fosfat ester katkılı MQL yönteminde kuru işlemeye oranla %27 ‘ye kadar, MQL yöntemine göre ise %2-20 oranında azaldığını belirtmişlerdir[50].

MQL yöntemi de geleneksel sıvı soğutma/yağlama sistemleri gibi takım içerisinden ve takım dışarısından akışkan gönderilerek uygulanabilir. Arnaud Duchosal vd.(2015) sonlu elemanlar yöntemi ile yaptıkları nümerik hesaplamalar ve deneyler ile takım içindeki kanal şekillerinin akışkan hızına etkilerini incelemişlerdir. Partikül boyutlarının, giriş basıncı ve kanal geometrisinin püskürtmeye önemli ölçüde etki ettiğini belirtmişlerdir.



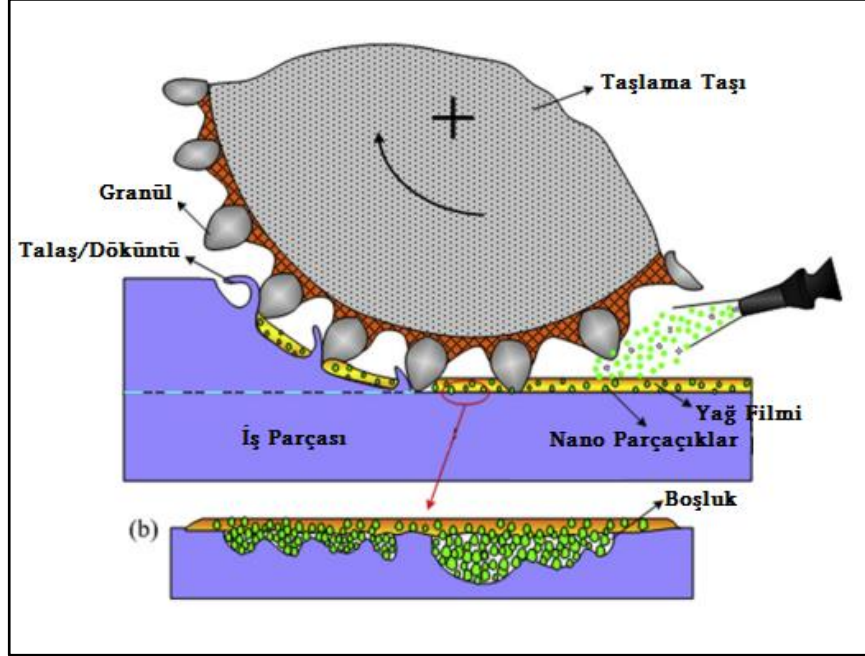
Şekil 1.12 MQL yönteminin takım içerisinde ve dışarısından uygulanması[51]

MQL sisteminde kanal içinden geçerek püskürtülen partikül boyutlarının küçük olması durumunda ($1\mu\text{m} < \text{Ø} < 10\mu\text{m}$) akış hızında bir düşüş olmadığı fakat partikül boyutları arttığı zaman ($10\mu\text{m} < \text{Ø} < 100\mu\text{m}$) duvar etkisinden dolayı akış hızının azaldığını belirtmişlerdir[52].

Rabesh Kumar Singh vd. (2017) AISI 304 paslanmaz çeliğin tornalanmasında Al_2O_3 ve GnP katkılı MQL yöntemleri ile bu iki nano katkı maddesini aynı anda kattıkları MQL yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Hibrit nano katkılı yöntemde nano Al_2O_3 katkılı MQL yöntemine göre kesme kuvvetlerinde %17,38 'e kadar, yüzey pürüzlülüğü değerinde ise %20,28 oranında düşüş ölçülmüştür[53].

Benkai Li vd. (2017) , Ni alaşımlı malzemenin taşlanması kullandıkları MQL yöntemlerinde altı farklı nano katkıyı ayrı ayrı kullanarak performanslarını karşılaştırmışlardır. Nano katkı olarak MoS_2 , Al_2O_3 , CNT , ZrO_2 , SiO_2 ve PCD kullanmışlardır. CNT katkılı MQL yönteminde en düşük taşlama sıcaklığı ölçülmüşlerdir. En düşük taşlama kuvvetlerini ise MoS_2 ve ZrO_2 nano katkılı MQL yöntemlerinde ölçmüşlerdir[54].

Nano katkılı MQL yöntemi taşlama işleminde Yaogang Wang vd.(2017) de çalışmalarında kullanmışlardır. Nano Al_2O_3 katkılı ve nano katkısız MQL yöntemlerini Ni bazlı süper alaşımın taşlaması sırasında kullanmışlardır.



Şekil 1.13 MQL yöntemi ile taşlama işleminde nano katkıların yağ filmi oluşumu ve sürtünmeye etkileri [55]

Spesifik taşlama enerjisi nano Al_2O_3 katkılı MQL yönteminde, nano katkısız yöntemle göre %34,1 oranında düşmüştür. Optimum nano katkı oranını hacimsel olarak %2 tespit etmişlerdir. Bu oranın üzerindeki kullanımlarda yağ filmi kalınlığının artmasına rağmen, sürtünme ve takım aşınmasında bir düşüş olmadığını belirtmişlerdir. Şekil 1.13'de nano partiküllerin aşınma ve yağ filmindeki etkileri görülebilir[55].

Bitkisel kesme yağları, biyolojik olarak doğada parçalanabilmeleri, doğayı kirletmemeleri ve insan sağlığına zararsız olmaları sebepleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Shuming Guo vd.(2017) ise MQL yöntemi ile taşıdıkları Inconel 718 malzemesinin işlenmesinde bitkisel hint yağına altı farklı diğer bitkisel yağı ayrı ayrı eklemişler ve oluşan yağ karışımlarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Hint yağı yağlama özellikleri iyi olan, fakat yüksek viskozitesi ve düşük akışkanlığından dolayı kullanımı kısıtlanan bir yağdır. Hint yağına soya yağı, mısır yağı, fıstık yağı, ayçiçeği yağı, palm yağı, kolza yağı ile karıştırarak, hint yağının bu dezavantajını ortadan kaldırmayı denemişlerdir.

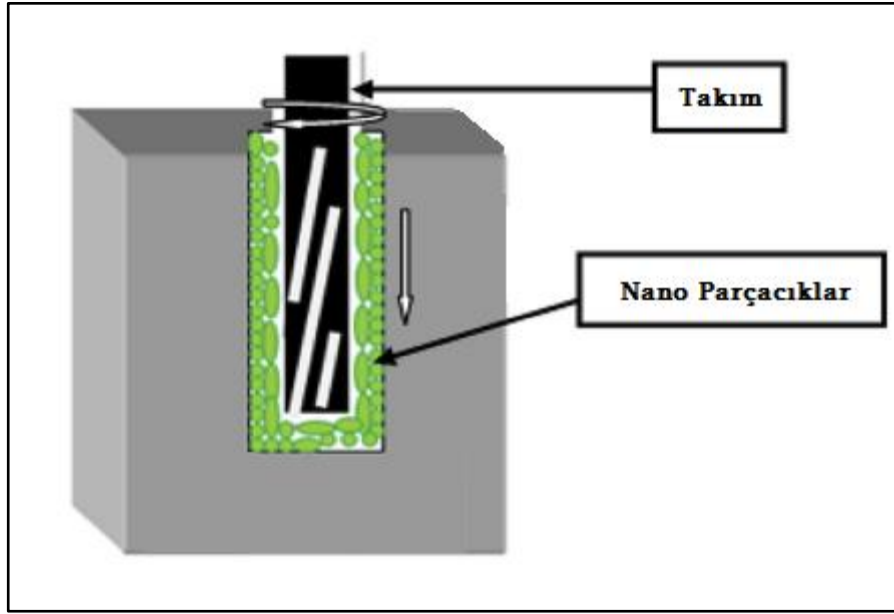
Optimum performansı hint yağı – soya yağı karışımında elde etmişlerdir. Spesifik taşlama kuvveti, hint yağına göre %27,03 oranında düşmüştür[56].

Asif Iqbal vd.(2016) , soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesi işleminde MQL ve kuru işleme yapmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. MQL yöntemi ile takım ömrünün arttığını ve işlem maliyetinin düştüğünü belirtmişlerdir[57].

Sukhpal Singh Chatha vd.(2016) , alüminyum 6063 malzemesine delik delme işlemini kuru, sıvı soğutma, MQL ve nano katkılı MQL yöntemleri ile gerçekleştirmişlerdir. Nano katkısı olarak Al_2O_3 kullanmışlardır. Nano katkılı MQL yönteminde diğer yöntemlere göre daha düşük kesme kuvvetleri, daha iyi yüzey kalitesi ve daha uzun takım ömrü ölçmüşlerdir. Nano parçacık katkısı sürtünmeyi düşürmüş ve takım aşınmasını azaltmıştır. Takım-iş parçası ara yüzeyindeki nano parçacıklar ve yağ filmi, sürtünmeyi azaltan mekanizmayı oluştururlar. Nano parçacıklar sürtünme yüzeyleri arasında yuvarlanma etkisine ve sürtünme katsayısının azalmasına sebep olurlar. Şekil 1.14 'de nano parçacıkların yuvarlanma ve parlatma etkisini şematik gösterimi görülebilir[58].

Nano parçacıkların yağ içerisinde homojen olarak dağılması, yağlama/soğutma performansı açısından önemlidir. Wei Tai Huang vd.(2016), kalıp çeliğinin taşlanmasında kuru işleme, MQL ve nano katkılı MQL yöntemlerini kullanmışlardır. Nano katkının yağ içerisinde homojen dağılması ve topaklanmaması için nano katkı ile yağı ultrasonik osilatör kullanarak karıştırmışlardır. Ultrasonik osilatör ile karıştırdıkları nano MQL yönteminde, ultrasonik osilatör kullanmadıkları nano katkılı MQL yöntemine göre daha düşük taşlama kuvvetleri, taşlama sıcaklığı ve daha iyi yüzey kalitesi ölçmüşlerdir[59].

M.M. Molaie vd.(2016) nano katkı olarak MoS_2 kullandıkları taşlama işleminde, nano katkılı MQL yöntemi ile beraber ultrasonik taşlama yapmışlardır. Ultrasonik titreşimle sürtünme yüzeyine parçacıkların daha iyi nüfuz ederek sürtünmeyi düşürdüğünü, yüzey kalitesini arttırdığını belirtmişlerdir. Ultrasonik taşlama ile MQL yönteminin birlikte kullanılmasının maliyetleri düşürdüğünü ve yağ tüketimini azalttığını belirtmişlerdir[60].

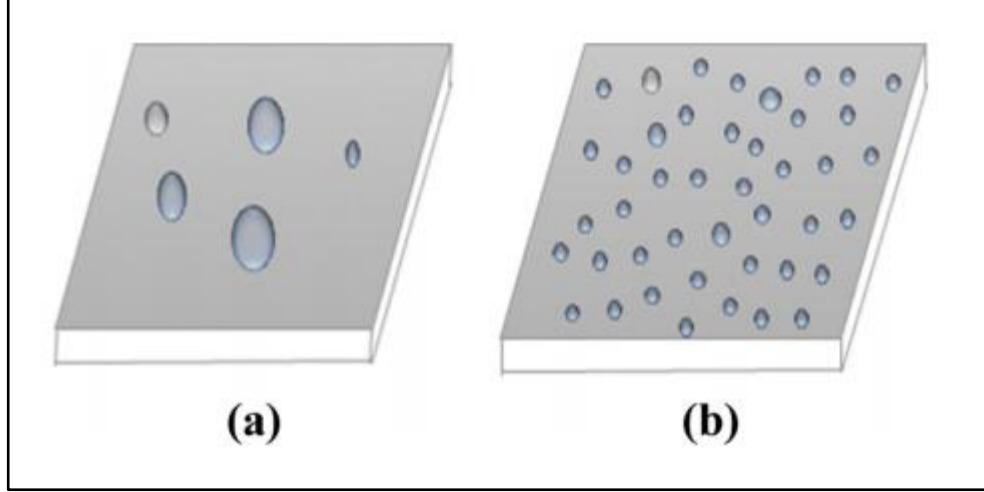


Şekil 1.14 Nano parçacıkların yuvarlanma ve parlatma etkisinin şematik gösterimi [58]

MQL yönteminde aerosolde ki yağ damlacıklarının küçük boyutları ve homojen dağılımı, yüzeyde yüksek derecede yüzey ıslanmasına sebep olur. Aynı zamanda küçük damlacıklar sürtünme yüzeyinde sıvı soğutma ile ulaşamayan bölgelere yağın ulaşmasını sağlar. Geleneksel sıvı soğutma yönteminde damlacıklar MQL'e göre daha büyüktür ve homojen bir yapıya sahip değildir. Bu da ısı transferinin MQL yöntemine göre daha zayıf olmasına sebep olur. Şekil 1.15 'te MQL ve geleneksel sıvı soğutmada damlacıkların yüzeyde dağılımı temsili olarak görülebilir[61].

Chetan vd.(2015) yaptıkları derlemede, sürdürülebilir soğutma/yağlama tekniklerini karşılaştırmışlardır. MQL yönteminin diğer soğutma/yağlama yöntemlerine göre daha ekonomik olduğunu belirtmişlerdir. MQL yönteminde karyojenik soğutmanın aksine, soğutmanın yanında yağlama özelliğinin de olmasını avantaj olarak değerlendirmişlerdir. Nano katkı oranının yüksek tutulmasının talaş kaldırma performansını çok değiştirmedeğini belirtmişlerdir. Bunun sebebi olarak nano parçacıkların artan oranla beraber topaklanmaya başlamasını göstermişlerdir. Şekil 1.16'da nano parçacık oranının yüksek seçilmesi durumunda oluşan topaklanma ve çökme görülebilir[63]. MQL de

bitkisel yağ kullanılabilmesinin sürdürülebilirlik açısından önemli olduğunu belirtmişlerdir. MQL yönteminin dezavantajları olarak ise işlem sırasında oluşan buharı ve kesme sırasında sürekli hava basıncı uygulanması gerekliliğini göstermişlerdir. [62].

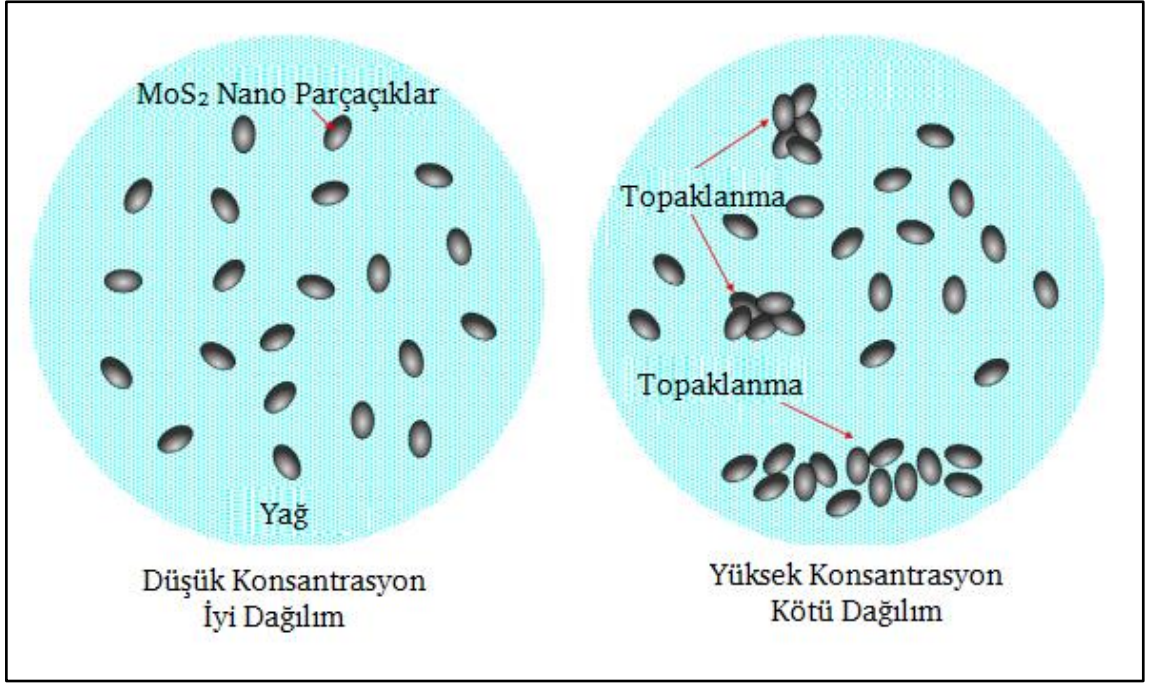


Şekil 1.15 (a) Sıvı soğutma ve (b) MQL yönteminde yağ damlacıkları [61]

Yanbin Zhang vd.(2016) nikel alaşımlı malzemenin taşlanması sırasında MoS_2 ve CNT katkı ve ayrıca ikisini birlikte kullandıkları MQL yöntemlerini kullanmışlardır. Nano katkı oranının belli bir miktardan sonra artması viskoziteyi önemli ölçüde değiştirmemektedir.

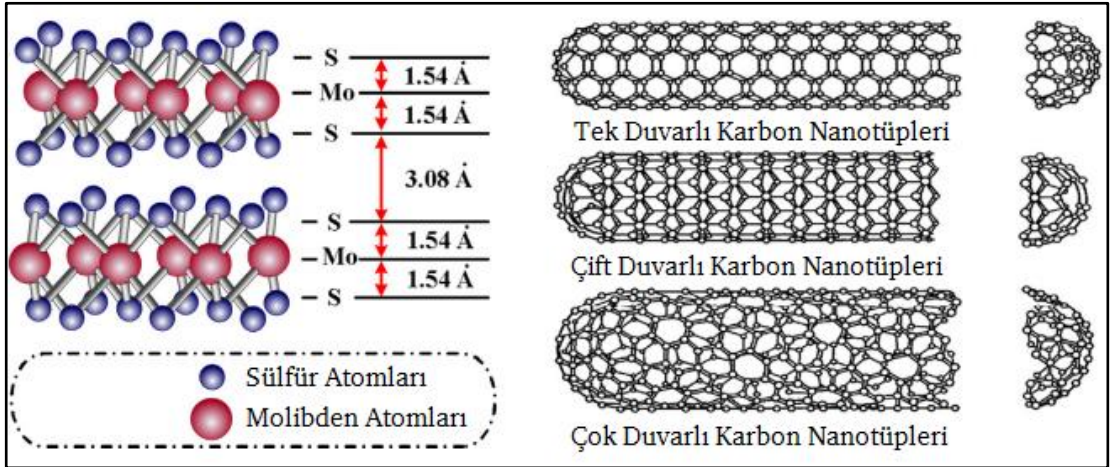
Taşlama kuvveti oranı, nano katkı MoS_2 kullanılan MQL yönteminde CNT katkı MQL yöntemine göre daha düşük çıkmıştır. Yağ içerisindeki MoS_2 oranı ağırlık %8 'e kadar arttıkça kuvvette düşmüştür.

Bu orandan sonraki konsantrasyonlarda kuvvet değerleri artışa geçmiştir. CNT kullanılan MQL yönteminde ise bu oran %6 olarak belirlenmiştir. Bunu iki nano katkının yapısal farklılığına bağlamışlardır. Şekil 1.17'de MoS_2 ve CNT'nin mikro yapıları görülebilir[63]. Yanbin Zhang vd.(2015) benzer çalışmalarında İnconel 718'in taşlanmasında MoS_2 ve CNT'yi beraber kullandıkları yöntemde ayrı ayrı kullandıkları yöntemlere göre daha düşük taşlama kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçmüşlerdir[64].



Şekil 1.16 Nano parçacık dağılımı [63]

Kyung-Hee Park vd.(2010) , yaptıkları çalışmada lazer taramalı konfokal mikroskop ile MQL yöntemindeki damlacıkların boyutları ve yüzey üzerindeki dağılımının basınç ve nozül uzaklığı ile değişimini araştırmışlardır. Yüzeydeki maksimum ıslanma alanını nozülün 30mm uzaklıkta olduğu durumda ölçmüşlerdir[65].



Şekil 1.17 MoS2 ve CNT 'nin mikro yapıları[63]

Damlacık boyutları ile ilgili bir başka çalışmayı da Radoslaw W. Maruda vd.(2016) yapmışlardır. Damlacık çaplarını etkileyen en büyük faktörün aerosol debisi ve nozülün takım iş parçası sürtünme yüzeyine olan uzaklıkları olduğunu

belirtmişlerdir. Nozülün kesme bölgesine uzaklığının ve aerosol debisinin artmasıyla damlacık boyutunun düştüğünü ve birim alandaki damlacık sayısının azaldığını belirtmişlerdir[66].

D. Carou vd.(2016) ,magnezyum parçaların tornalanması işleminde kuru ve MQL yöntemlerini kullanmışlar ve takım tutucusu içerisine yerleştirdikleri sensör ile titreşim ölçümü yapmışlardır. Titreşim değerlerinin yüzey kalitesiyle doğru orantılı olduğunu , MQL yönteminde kuru işlemeye göre titreşim değerlerinin düştüğünü ölçmüşlerdir[67].

Xianpeng Zhang vd.(2017) Al_2O_3 ve SiC nano katkılarının ikisini beraber yağa ekleyerek MQL yöntemi ile İncel 718 malzemesini taşlamışlardır. Al_2O_3 parçacıklarının boyutu küçüldükçe yüzey kalitesinin arttığını belirtmişlerdir[69].

Kuru işleme ile MQL yönteminin karşılaştırıldığı bir başka çalışma Mohamed Handawi Saad Elmunafi vd.(2015) tarafından yapılmıştır. Sertleştirilmiş AISI 420 çeliğini kuru ve MQL yöntemleri ile tornalamışlardır. MQL yönteminde takım ömrünün daha uzun olduğunu belirtmişlerdir[68].

Kishor Kumar Gajrani vd.(2019) farklı oranlarda karıştırdıkları bitkisel yağları MQL yöntemiyle tornalama işleminde kullanmışlardır. Kesme kuvvetleri ve ıslatma alanı göze alınarak takım-iş parçası sürtünme yüzeyine optimum nozül uzaklığının 30 mm olduğunu belirtmişlerdir. 45°'lik nozül açısıyla en iyi penetrasyonun sağlandığını belirtmişlerdir[70].

Anil Kumar vd.(2017) , silikon nitrit seramik malzemenin taşlanması işlemini, kuru işleme ve üç farklı nano katkıyı ayrı ayrı kullandıkları MQL yöntemleri ile gerçekleştirmişlerdir. Nano katkı olarak MoS_2 , WS_2 ve grafit kullanmışlardır. Nano katkının işleme kuvvetlerini düşürdüğünü ve daha iyi yüzey kalitesi verdiğini belirtmişlerdir. Nano akışkanların ıslatma özellikleri ganyometre ile yüzey temas açıları ölçülerek karşılaştırılmıştır. En iyi yüzey ıslatma özelliği nano MoS_2 katkılı akışkanda elde edilmiştir. Buna bağlı olarak en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerlerini nano MoS_2 katkılı MQL yönteminde ölçmüşlerdir. Şekil 1.18 'de MoS_2 katkılı damlacığın temas yüzeyi ölçüm görüntüsü paylaşılmıştır[71].



Şekil 1.18 Ganyometre ile MoS₂ katkılı damlacığın yüzey temas açısı ölçümü
[71]

1.2 Tezin Amacı

Literatürde MQL yöntemi ile yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak süper alaşım ve paslanmaz çelik malzemeler ile yapılmıştır. Alüminyum ile yapılan çalışmalar oldukça azdır. Sukhpal Singh Chatha vd.(2016) , alüminyum 6063 malzemesine delik delme işleminde MQL yöntemini kullanmıştır. Sergio Luiz vd.(2017) üç farklı kesme yağını karşılaştırdıkları çalışmalarında, alüminyum malzemeye MQL yöntemi ile diş açmıştır[72]. M.S. Najihaa vd.(2017) , alüminyum alaşımının işlenmesinde, su bazlı TiO₂ nano katkılı MQL yöntemini farklı nano katkı oranlarında kullanmış, MQL debisini yükselttikçe takım ömrünün arttığını belirtmiştir[73]. Alüminyum süper alaşımlar vs gibi malzemelerin aksine sıvı soğutma yerine MQL sistemine geçilebilmesi için, işlemesi nispeten daha kolay, uygun bir malzemedir. Bu çalışmada alüminyum 6061 malzemesi kuru, MQL ve nano MoS₂ katkılı yöntemlerle işlenerek, nano katkısının takım aşınmasının yanında, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine olan etkilerinin öğrenilmesi amaçlanmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, MQL 'in amacının kullanılan yağ miktarının azaltılması olduğu göz önünde bulundurularak, sadece MQL aerosol debisini arttırarak değil, debiyi tek nozül yerine iki nozüle paylaştırarak, takım-talaş ve takım-iş parçası ara yüzeylerine daha etkin bir biçimde ulaştırıp, yağ tüketimi arttırılmadan işleme performansının geliştirilip, geliştirilemeyeceği araştırılmıştır.

1.3 Hipotez

Literatürdeki birçok çalışma MQL yönteminde, yağa nano katkısı eklemenin talaş kaldırma performansını attırdığına dair sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada da yağın yağlama özelliğini, diğer nano katkı çeşitlerinden daha fazla arttıran nano MoS₂ katkısının kesme kuvvetlerini düşürmesi ve takım aşınmasını azaltması beklenmektedir. MQL sisteminde aynı debinin tek nozül yerine çift nozülünden gönderilmesi vasıtasıyla ısı transferinin artması ve çok yönlü yağlama sayesinde nano katkıların takım-talaş ve takım-iş parçası ara yüzeylerine daha etkin penetrasyonu sonucu yüzey pürüzlülük değerleri ve kesme kuvvetlerinin düşmesi ve takım ömrünün uzaması beklenmektedir

2.1 Alüminyum

2.1.1 Alüminyumun Tarihçesi ve Genel Özellikleri

Dünyada silisyum ve oksijenden sonra en fazla bulunan element, alüminyumdur. Alüminyum, elektroliz yönteminin 1886 yılında kullanılmaya başlaması ile endüstriyel anlamda üretilmeye başlamıştır. [74]. Eşit hacimlerde, $2,71 \text{ g/cm}^3$ olan yoğunluğu ile alüminyumun çelikten ($7,8 \text{ g/cm}^3$) yaklaşık üç kat düşük ağırlığa sahiptir. Bazı alüminyum alaşımlarının akma sınırı 500 MPa 'nın üzerinde bir değere sahiptir ki bu değer birçok çelikten daha yüksektir[75]. Çelikten sonra mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan metal alüminyumdur. Sıcak ve soğuk şekil verilebilmesi, gerek talaşlı gerekse talaşsız işlenebilmesi ve hafifliği ile beraber en önemli özellikleri olan korozyona dayanımı, alüminyumu ön plana çıkarmaktadır. Elektrik cihazları ve iletiminde, sağlık alanında, havacılık, uzay, otomotiv ile inşaat sanayinde alüminyumun gittikçe artan kullanımı, öneminin de gün geçtikçe artmasına neden olmaktadır.

İlk kez 1807 yılında Humphry Davy alüminada oksijene bağlı bir metalin varlığından bahsetmiştir. Birbirlerinden habersiz olarak 1866 yılında, Fransız Paul Héroult ve Amerikalı Charles Hall, alüminyum oksitin elektrolitik olarak ayrıştırılması için süreç geliştirmişlerdir ki bu gelişmeler alüminyumun endüstriyel anlamda üretimi için başlangıç olmuştur. $980-1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de çözünmüş alüminyum oksit içeren erimiş kriyolitten elektrik akımı geçtiğinde erimiş alüminyumun katotta biriktiğini ve karbondioksitin karbon anodundan ayrıldığını keşfetmişlerdir[76]. Günümüzde de hala bu iki araştırmacının aldığı patentle cevherden alüminyum üretimi yapılmaktadır[77]. K.J.Bayer, 1892

yılında kendi ismi ile adlandırılan boksitten alümina üretimini sağlayan Bayer Prosesi 'nin de patentini almıştır. Boksit cevherlerinden alüminyum üretiminin gelişmesiyle, endüstride alüminyum artarak kullanılmaya başlamıştır [77,76]. Şekil 2.1'de otomotiv sanayinde kullanılan alüminyum turboşarj salyangozu görülebilir.



Şekil 2.1 Otomotiv sanayinde kullanılan alüminyum turboşarj salyangozu [90]

Isı ve elektrik iletimi bakımından bakır, alüminyumdan daha iyidir, ancak yoğunluk göz önünde bulundurularak özgül değerler karşılaştırılırsa alüminyumun iyi olduğu görülür. Bu özelliği sebebiyle alüminyum endüstrideki ısı değiştirgeçlerinde sıkça kullanılmaktadır[75,77].Alüminyumun fiyatı da bakıra göre daha düşüktür.

Yüzeyinde doğal olarak oluşan oksit tabakası sayesinde, alüminyum alaşımları birçok atmosferik ve kimyasal ortamda korozyona karşı olağanüstü direnç gösterir[78].

Korozyona karşı bu dirençlerinden dolayı kimya, gıda sanayi, inşaat sanayi, otomotiv sanayi ve ev eşyaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Mekanik dayanımı düşürdüğü için pek tercih edilmese de Al alaşımlarında bulunan diğer elementler korozyon dayanımını azalttığı için korozif ortamlarda daha saf alüminyum tercih edilir. Ayrıca bazı alkaliler, korozyonu önleyen bu oksit tabakasını tahrip etme özelliğine sahiptirler, bu durumlarda da boya veya yalıtkan bant uygulamaları yapılmaktadır[75,77].

Alüminyum iyi derecede soğuk ve sıcak şekillendirilebilme kabiliyetine sahiptir; çok çeşitli ve karmaşık yapıdaki profilleri ekstrüzyon yöntemi ile elde edilebilmektedir.

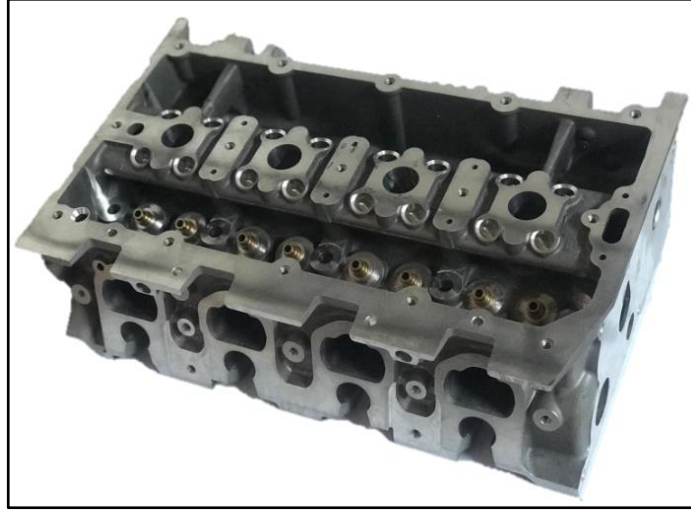
Alüminyum folyolar haddeleme işlemi ile imal edilerek paketlemede kullanılmaktadır, yüksek saflıktaki bu folyolar yoğunlukla gıda sanayinde kullanılır. Mutfak eşyaları ve gıda sanayinde, alüminyum zehirsiz olması sebebiyle geniş kullanıma sahiptir[75,77].Şekil 2.2 'de gıda sanayinde kullanılan alüminyum kutular görülebilir. Ayrıca ilaç muhafazasında da alüminyum folyo kullanılmaktadır[79].



Şekil 2.2 Gıda sanayinde kullanılan alüminyum kutu [78]

Alüminyum ayrıca kolayca dökülebilir ve talaşlı imalat yöntemleriyle şekillendirilebilirler. Gaz metal ark kaynağı ya da tungsten asal gaz ark kaynağı gibi gelişmiş kaynak teknikleri ile kaynak edilebilmektedir[78].

Eloksal adı verilen elektrolitik yöntemle oksitlendirerek alüminyumun farklı renklerde üretimi de söz konusudur; bu yöntemle hem farklı renklerde dekoratif ürünler üretilebilirken aynı zamanda da korozyon dayanımı arttırılmakta, mimari uygulamalarda kullanılmaktadır. Bazı durumlarda mukavemet özelliklerini korumak ve korozyon dayanımını arttırmak adına, düşük saflıkta alüminyum alaşımının üzeri yüksek saflıkta alüminyum ile kaplanabilmektedir. Fırçalama, kumlama ve parlatma işlemleri koruyucu kaplamaya ihtiyaç duyulmayan durumlarda uygulanabilir[75, 77].



Şekil 2.3 Alüminyum otomobil motoru silindir kapağı [90]

Alüminyumun hafifliği ve mukavemeti havacılık otomotiv ve taşımacılık sanayinde sıkça kullanılmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.3'te otomobil motorlarında kullanılan alüminyum silindir kapağı görülmektedir. Alüminyumun motorda ve taşıtlarda kullanımıyla, hafifleyen araçlarda yakıt tasarrufu sağlamaktadır. İnşaat sektöründe alüminyumun tercih sebebi olması, atmosfer şartlarında korozyon dayanımı, zehirsiz olması ve göze hoş gelen görünümü sebebiyledir. Petro kimya sanayinde ise ısıl iletkenliği ve korozyon direnci sebebiyle tercih edilmektedir.

Alüminyum ve alaşımları kolayca geri dönüştürülebilen malzemeler arasındadır. Hoopes Cells gibi işlemlerden geçirilerek, yüksek saflıkta alüminyum elde edilmekte ve elektrolitik kapasitörler, mikroişlemciler, füze başlığı ve nükleer yapı elemanları gibi alanlarda kullanılmaktadırlar.

2.1.2 Alüminyum Alaşımları ve Sınıflandırılması

Silisyum, magnezyum, mangan, bakır ve çinko alüminyum alaşımlarında mikro yapıyı ve mekanik özellikleri geliştirmek için sıklıkla kullanılırlar; alüminyumun sınıflandırılması üretim yönteminin dövme veya döküm olmasına göre iki ana sınıfa ayrılır. Tablo 2.1'de AA'ya göre dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması görülmektedir. Bu iki gruptaki alaşımların büyük bir çoğunluğu

ısıtılma işlemi tabii tutulabilir. Dövmeye alaşımlarının içerisinde plastik şekil verme kabiliyetlerini arttıran alaşım elementleri bulunmaktadır [75].

Tablo 2.1 AA'ya göre dövmeye alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması[75]

1×××	Saf Alüminyum	5×××	Mg Alaşımları
2×××	Cu Alaşımları	6×××	Mg-Si Alaşımları
3×××	Mn Alaşımları	7×××	Zn Alaşımları
4×××	Si Alaşımları	8×××	Li Alaşımları

1××× serisi saf alüminyum alaşımları minimum %99 oranında alüminyum içerir ve genellikle kimya ve elektrik endüstrisinde kullanılmaktadır. 1××× serisindeki son iki basamak alüminyum alaşımının %99 'dan sonraki oranını göstermektedir. Örneğin 1060 serisi alüminyum alaşımlarında %99,60 oranında alüminyum bulunmaktadır[78]. Diğer serilerde bu rakamlar sadece alaşımları birbirinden ayırt etmek için kullanılmaktadır.

2××× serisinin alaşım elementi bakırdır ve ısıtılma işlemi tabii tutulabilir. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. 3××× serisi mimari uygulamalar ve sıvı tanklarında kullanılır, ana alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır. 4××× grubu genellikle kaynak edilebilirliği iyi olduğu için kaynaklı yapılarda ve otomobil parçalarında tercih edilirler, farkı sağlayan element silisyumdur; korozyon ve aşınma dayanımları yüksektir. Magnezyum ise 5××× serisinin ana alaşım elementidir, alaşım içindeki miktarı arttıkça sertlik ve mukavemeti artırır [75]. 6××× serisinin esas alaşım elementi magnezyum ve silisyumdur ve şekillendirilebilme kabiliyetleri iyidir. Uçak parçalarında, kamera mercekle çerçevelerinde, kaplinlerde, denizcilik teçhizatlarında, elektrik donanım ve bağlantı elemanlarında, fren ve hidrolik pistonlarında, valf ve valf parçalarında, bisiklet iskeletlerinde kullanılmaktadır[81]. Bu grupların içinde en yüksek mukavemete sahip olan 7××× serisidir; havacılık sanayinde ve korozyon dayanımı ile beraber yüksek dayanımında gerekli görüldüğü yerlerde tercih edilir. 8××× grubu da iyi tokluk ve yorulma dayanımı nedeniyle havacılık ve uzay sanayinde tercih edilmektedir; lityum ana alaşım elementidir [75].

Tablo 2 ‘de AA’ya göre döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması görülmektedir. Döküm yapılacak alüminyum alaşımlarının, özel örnek kalıplarına alınarak akışkanlık ve hacimsel çekme gibi döküm özellikleri belirlenebilir; özellikle döküm kalıbı imal edilirken %8,5 ‘e varabilen hacimsel çekmelerin göz önünde bulundurulması tavsiye edilir[74].

Tablo 2.2 AA ‘ya göre alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması[74]

1××.×	Saf Alüminyum	6××.×	Bu seri kullanılmamaktadır.
2××.×	Cu Alaşımları	7××.×	Zn Alaşımları
3××.×	Mg-Si Alaşımları	8××.×	Sn Alaşımları
4××.×	Si Alaşımları	9××.×	Diğer Elementler ile
5××.×	Mg Alaşımları		

2××.×, 3××.×, 4××.×ve 7××.× serileri ısıtılabilir tabi tutulabilirler. Sanayide kullanılan döküm alaşımlarının % 90'nını 3××.× serisi oluşturur ve mukavemetleri 4××.×serisinden fazladır[75]. 2××.× serisi piston, silindir kafaları ve transmisyon kutuları gibi parçalarda kullanılır. 4××.× serisi içerisindeki silisyumdan dolayı en iyi dökülebilirlik özelliğine sahiptir. 5××.× serisi iyi korozyon dayanımına sahiptir ve denizcilik sanayinde kullanılır. 7××.× serisi iyi korozyon dayanımına ve iyi yüzey kalitesinde izlenebilirliğe sahiptirler ancak dökümü en zor olanıdır[6]

2.1.3 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

Alüminyum alaşımlarına uygulanan temper işlemleri, ısıtılabilir ve mekanik olabilir; dövme ve döküm olması fark etmeksizin dört rakamlı alaşım kodunun sonuna tire (-) işareti konulduktan sonra F, H, O, T ve W harfleri ile belirtilir[74].

Üzerinde herhangi bir temper işlemi uygulanmamış dövme ve döküm alaşımları için “F” harfi kullanılırken, düşük mukavemet ve yüksek sünmeye sahip, tavllanmış ve yeniden kristalleştirilmiş alaşımlar için “O” , soğuk işleme tabi tutularak pekleştirilmiş olanlar için ise “H” harfi kullanılır[74].

W harfi, çözeltiliye alma ısıtma işlemi görmüş, sadece bu ısıtma işleminden sonra kendiliğinden yaşanan alaşımlara uygulanır. Bu atama yalnızca doğal yaşlanma süresini, örneğin W 1/2hr değerini göstermek için W ile kombinasyon halinde kullanılır[78]. “F” , “H” ve “O” ile belirtilen temper işlemlerinden sonra kararlı temper elde etmek amacıyla yapılan işlemler “T” harfi ile belirtilir, 10’a kadar rakamlar kullanılarak bu işlemler birbirinden ayrılır;

T1: Sıcak şekillendirme ile şekillendirildikten sonra soğuma ve doğal yaşlanmaya alma işlemleri yapılmış alaşımları ifade eder.

T2: Sıcak şekillendirme işlemi görmüş malzemenin, soğuk şekillendirmeden geçip pekleşmesi sonrası doğal yaşlanmaya bırakılmış alaşımları ifade eden gruptur.

T3: Alaşımın belli bir sıcaklıkta belli bir süre tutulması sonucu homojen yapı elde edilir, daha sonra ise su verilir; çözeltiliye alma adı verilen işlem yapılmış olur, bu grup bu işlemi takiben soğuk şekil de verilmiş alaşımları ifade eder.

T4: T3 işleminden farklı çözeltiliye alma işleminden sonra soğuk şekillendirme yapılmamasıdır.

T5: Malzeme sıcak şekillendirmeden çıktıktan sonra soğutulmuş ve doğal yaşlandırmadan farklı olarak malzemeyi oda sıcaklığında değil belli bir sıcaklıkta tutarak yapay yaşlandırma işlemi yapılmış alaşım grubunu ifade eder.

T6: Daha önce bahsedilen çözeltiliye alma işlemi yapılarak homojen yapı elde edilmiş ve belirli bir sıcaklıkta yapay yaşlandırmaya tabi tutularak mukavemeti artırılmış grubu ifade eder; bu işlem çökelme sertleşmesi adını almaktadır.

T7: T6 grubundan farklı aşırı yaşlandırma işlemi yapılmasıdır.

T8: T6 grubundan farklı yaşlandırma öncesi pekleştirme de yapılmasıdır.

T9: T8 grubundan farklı soğuk şekillendirme ile pekleştirmenin yaşlandırma işlemi sonunda yapılmasıdır.

T10: Bu gruptaki alaşımlara, sıcak şekillendirme işlemi yapıldıktan sonra soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırma işlemi yapılmıştır[75].

Bahsedildiği gibi çözeltiye alma işlemi malzeme yaklaşık 500 °C, veya daha yüksekte olabilir, belirli bir süre bekletildikten sonra su, hava veya yağ verilerek soğutulmasıdır; ekstrüzyon benzeri sıcak şekil verme işleminde de malzemede belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre işlem gördüğü için, işlem sonrası ani soğutulması çözeltiye alma işlemi ile aynı sonuçlara sebep olur[74].

2.2 Talaşlı İmalat

2.2.1 Talaşlı İmalat Teknolojisinin Genel Tanımı ve Tarihçesi

Takım vasıtasıyla iş parçasından küçük parçacıklar kopartarak, (talaş) işlem sonrası verilmek istenilen nihai şeklin elde edilmesine talaşlı imalat denir. Talaş kaldırma, iş parçası ve iş parçasından talaş kaldıracak takım malzemesinin sertliklerinin birbirlerinden farklı olmasıyla gerçekleşir, takım iş parçasından daha serttir[83].

İş parçası üzerinde delik delme, yüzey ve profil düzeltme, kanal ve diş açma, istenilen şekil, ölçü ve toleranslarda şekillendirme talaşlı imalat yöntemi ile talaş kaldırarak yapılabilir. Talaşlı imalat , “takım” adı verilen sert malzemelerden üretilmiş gereçlerle iş parçası üzerinden talaş kaldırılarak şekillendirme yapılır. “Takım tezgâhı”, talaşlı imalatta kullanılan, işlem sırasında gerekli hareket ve gücü sağlayan makinelere denir. İş parçası ile takımın hareket tiplerine göre takım tezgâhları farklı isimlerle adlandırılırlar [83].

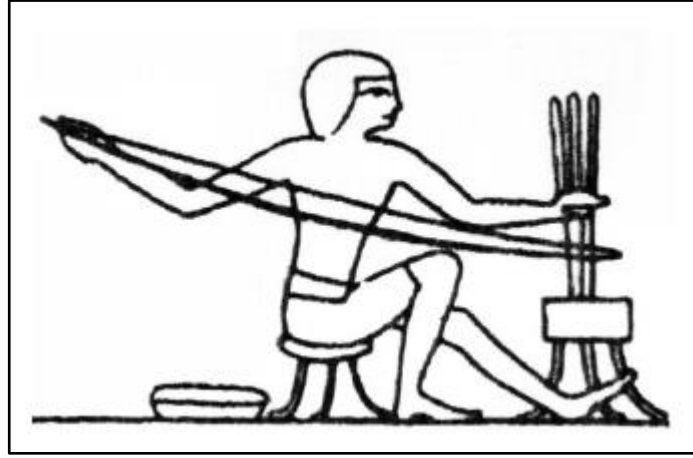
Talaşlı imalat en eski imalat yöntemlerinden birisidir. Dünya üzerinde üretilen tüm mekanik bileşenlerin yüzde 15'nin bu yöntemle elde edildiği tahmin edilmektedir[84]. İmalat yöntemleri arasında, en fazla çeşitlilikte şekil verebilme yeteneğine sahip olan imalat yöntemidir. Yumuşak, sert, kırılğan, sünek, döküm, dövme, yüksek ya da düşük ergime sıcaklığına sahip neredeyse tüm metal ve alaşımları bu yöntemle işlenebilmektedir. Üretilen parçaların boyutu da saat parçasından, uçak kanadına kadar büyük bir aralıkta çeşitlilik göstermektedir[85].

Diğer imal usullerine göre talaş kaldırarak şekillendirme, daha hassas ve çok yönlüdür, çünkü bu yöntem çok farklı geometri ve malzemelerde, iş parçasını

şekillendirme kabiliyetine sahiptir. İş parçasına verilebilecek şekillerin çeşitliliği, geometrik toleransların tekrarlanabilirliği, doğruluğu, kesinliği ve seri üretime uygunluğu açısından imal usulleri arasından öne çıkan bir yöntemdir.

Talaşlı imalat çoğunlukla; dövme, döküm, enjeksiyon ve çubuk çekme benzeri imal usulleri ile iş parçasının kaba şekli oluşturulduktan sonra, iş parçasına nihai şeklini, geometrik ölçü toleransları ile yüzey kalitesini ve diş açma gibi diğer imalat yöntemleriyle verilemeyen şekilleri vermek maksadıyla kullanılır.

Talaşlı imalat yöntemlerinden taşlama ve delik delme işlemleri tarih öncesi köklere sahiptirler. Tarih öncesi halklar değirmen taşı ve balta gibi taştan parçaları daha sert taşlarla şekillendirmişlerdir. Neolitik dönemde taşa delik delme işlemi aşındırıcı bir çubuk ve ucunda kum kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha önce ilkel olarak tornalandığı tespit edilen tahta ve taş parçalar bulunmuş olsa da bilinen anlamdaki tornaya benzeyen ilk ilkel torna tezgâhı Mısır'da Ptolemaios Krallığına ait mezarlıklarda bulunmuştur[86]

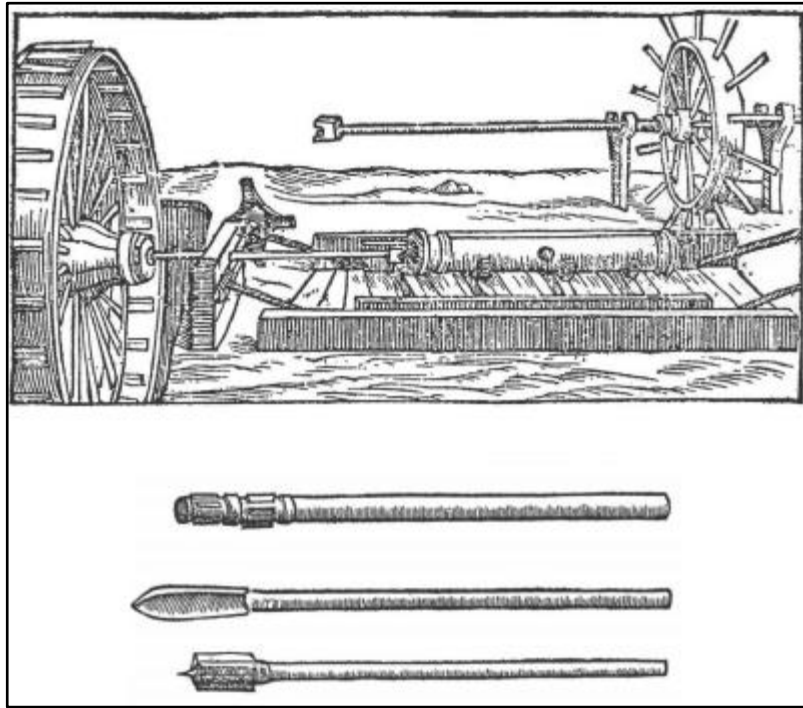


Şekil 2.4 Antik Mısır'da yay ile tahrik edilen matkaplarla aynı anda üç delik delme işleminin yapılması [86]

Modern zamanlara geçmeden önce, daha sonraki uygulamalarla benzerlik gösteren dört antik ve ortaçağ üretim yöntemini belirtmek ilginç olabilir. Bunlardan ilki, Antik Mısırlıların mezar süslemeleri için bakır uçlu matkaplarla, birden fazla kesici matkap ile taşa delikler açmalarındır, bu işlemlerine dair kanıtlar Theban mezarlarında bulunmuştur, şekil 2.4'te delik delme işlemine ait resim görebilir. İbranice kaynaklardan elde edilen bir diğer örnekte, takım

bileme dükkânlarına örnektir. Filistinliler Yahudilerin pulluk ve balta gibi parçalarını kendilerinin sivriltmesini yasaklamış, bu işlemi yapan Filistinli zanaatkâr dükkânları açılmıştır. Leonardo Da Vinci 'de talaşlı imalata ait birçok tezgâh tasarlamıştır. Defterinde torna, matkap, taşlama tezgâhı gibi tezgâhlara ait çizimler bulunmuştur. Bu makinelerin hiçbiri o zaman yapılmamıştır ancak, daha sonra yapılan tezgâhlara örnek teşkil etmiştir. Ortaçağda saat üreticileri de saat milleri, dişlileri ve diğer parçalarının üretimi için elle çalışan takımlar yapmışlardır. Mekanizmaların kendileri çok az benzerlik gösterse de, dişli üretimi ve vida ağzı açmak için kullandıkları kinematik yöntemler sonraki üretilen tezgâhlara model olmuştur[86].

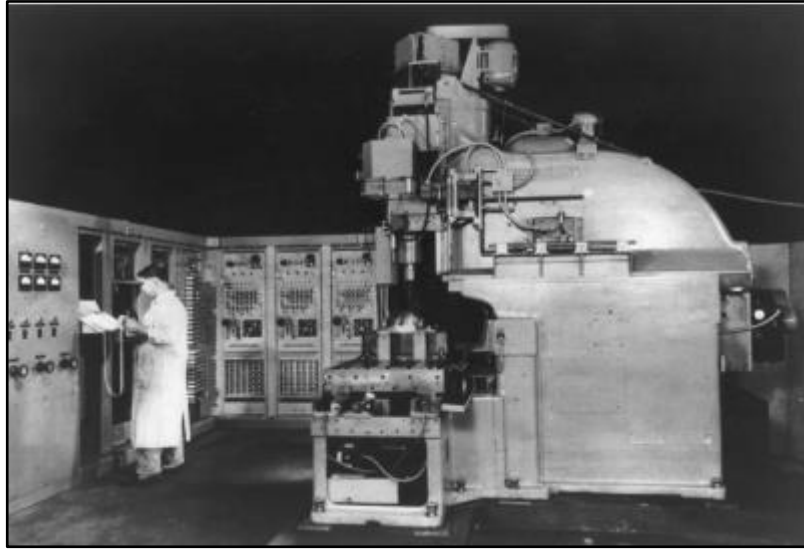
İlk dıştan bir güçle tahriklendirilen metal işleme tezgâhı Avrupa'da top namlularını delmek için üretilmiştir. Almanya ve İtalya da atların tahrik sistemini oluşturduğu tezgâhlar topların hassasiyetini ve menzilini arttırmak için topların namlularını delmek için kullanılmıştır. 1373 Ortaçağ Alman şehir kayıtlarında topların namlularını delmek için kullanılan tezgâhlardan bahsedilmektedir[86]. Şekil 2.5'te orta çağda topların delinmesi ve kullanılan takımlara ait resim görülebilir.



Şekil 2.5 Ortaçağda topların delinmesi ve delik delme takımları[86]

18.yy'da endüstri devriminin gerçekleşmesiyle beraber buharlı motorlarda ve tekstil üretiminde kullanılan otomatik makinelerin üretiminde gelişmeler olmuştur. Ayrıca bu devrim, makinelerin üretimi için gerekli birçok takımında gelişmesine sebep oldu. Buhar makinesinin icadı tezgâhların gelişimine ayrı bir önem katmış, bu sayede tezgâhlar su gücünden bağımsız hale gelmiş ve herhangi bir yere kurulabilir olmuşlardır[86].

İkinci Dünya Savaşından sonra, havacılık sanayi takım tezgâhları için önemli bir pazar ve gelişme fırsatı oldu. Karmaşık uçak parçaları için özel ve daha gelişmiş tezgâhlara ihtiyaç duyuldu. Bu alandaki en önemli gelişme ise nümerik kontrollü tezgâhların üretimi oldu. Havacılık sanayi için üreten tezgâhların sayısı 1956'da 100 âdete ulaşmıştır. Şekil 2.6 'da MIT tarafından 1952'de geliştirilen nümerik kontrollü takım tezgahına ait fotoğraf görülebilir.

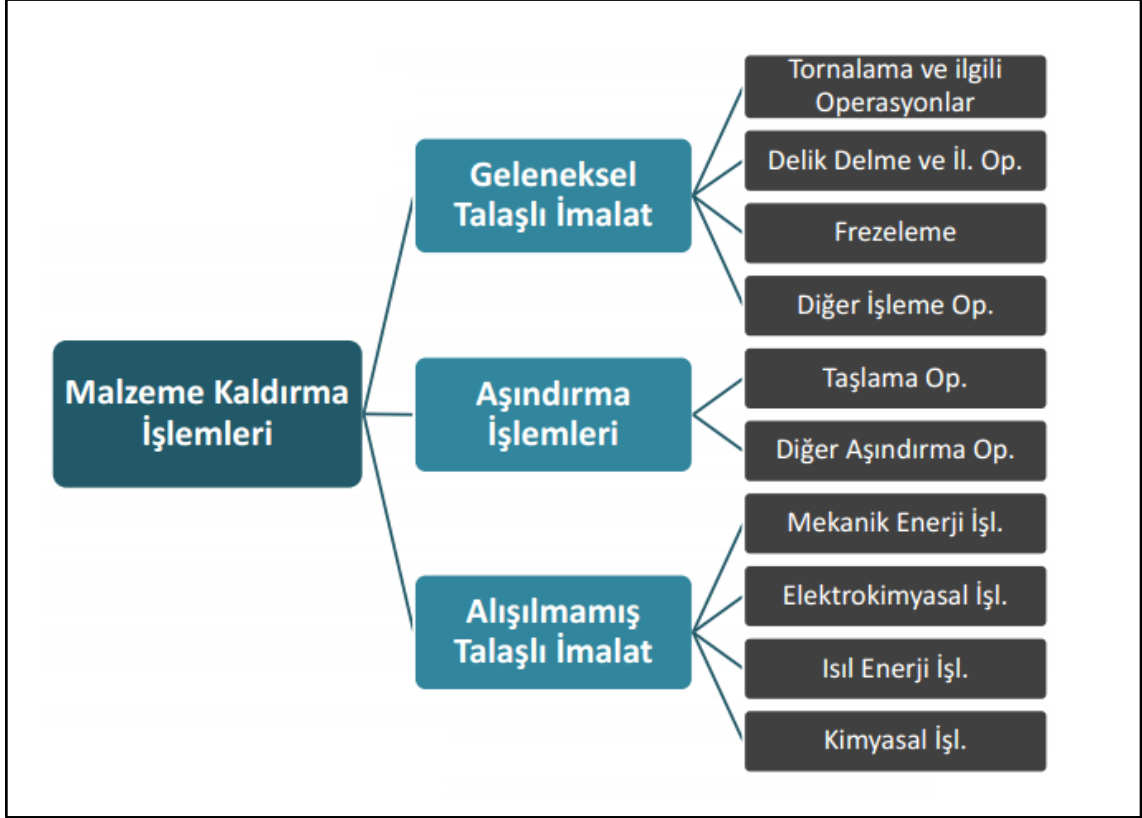


Şekil 2.6 MIT tarafından 1952'de geliştirilen nümerik kontrollü freze tezgâhı[86]

2.2.2 Talaşlı İmalatta Talaş Oluşumu ve Malzeme Kaldırma İşlemleri

İş parçasının işlem sonrası gerekli görülen geometriye sahip olması için, ham parçadan malzeme kopartılarak şekillendirme yapılması, malzeme uzaklaştırma yöntemlerinin genel özelliğidir. Talaş kaldırma işleminde sivri bir kesici takım malzemeye dalar ve iş parçasından malzeme uzaklaştırılır; tornalama, frezeleme, delik delme, kılavuz çekme bu işlemlere örnek olarak gösterilebilir. Aşındırma yöntemleri, sert aşındırıcı parçacıklar ile malzeme uzaklaştırma yöntemidir,

taşılama ve lebleme gibi operasyonlar örnek olarak verilebilir. Geleneksel olmayan imalat yöntemleri ise, kesici takım ile mekanik olarak malzemeyi uzaklaştırmak yerine değişik enerji formlarının kullanılmasıyla malzemeye şekil verme işlemidir; elektrokimyasal işleme, lazer ile işleme, su jeti, ultrasonik işleme, dalma erozyon gibi yöntemler örnek olarak sayılabilir.



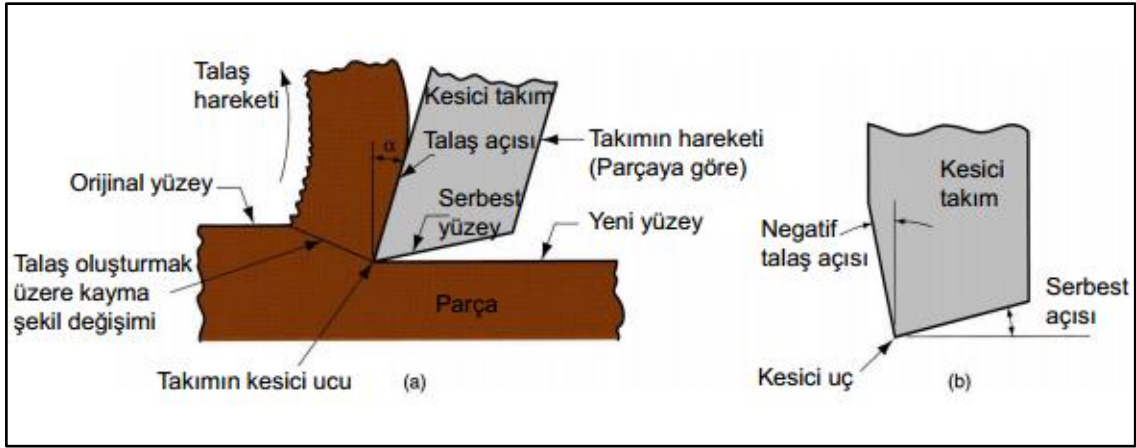
Şekil 2.7 Malzeme kaldırma işlemlerinin sınıflandırılması [87]

Talaş kaldırma yöntemlerinde istenilen parça geometrisi iki farklı etken ile meydana gelir; birincisi, kesici takım ile iş parçası arasındaki bağıl hareket vasıtasıyla meydana gelen üretilimdir, kesici takımın iş parçasına göre izlediği yol ile iş parçası nihai şeklini alır, ikincisi, takımın iş parçasına temas eden kısmının şekli ile gerçekleşen şekillendirmedir; burada da parça geometrisi kesici takımın şekli tarafından belirlenir.

Bu izafi hareket, birincil hareket diye adlandırılan kesme hızı ve ikincil hareket olarak adlandırılan ilerleme sayesinde gerçekleşir. İlerleme hızı (f) , kesme hızına (v) göre düşük bir hızdır. Kesici takımın şekli ve takımın parça içerisine

bu izafi hareketlerle dalması sonucu, istenilen şekil ve yüzeyde parçalar elde edilir [87] .

Kesici takımın iş parçasının orijinal yüzeyinden içeri daldığı mesafeye de kesme derinliği (d) denilmektedir. Talaşlı imalatta ana işlem parametreleri kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinden meydana gelir. Bazı operasyonlarda bu üç değerın çarpımı, malzeme kaldırma oranı (R_{MR}) , talaş kaldırma hızının bir göstergesi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.8 Talaş kaldırma işleminin kesit görüntüsü [87]

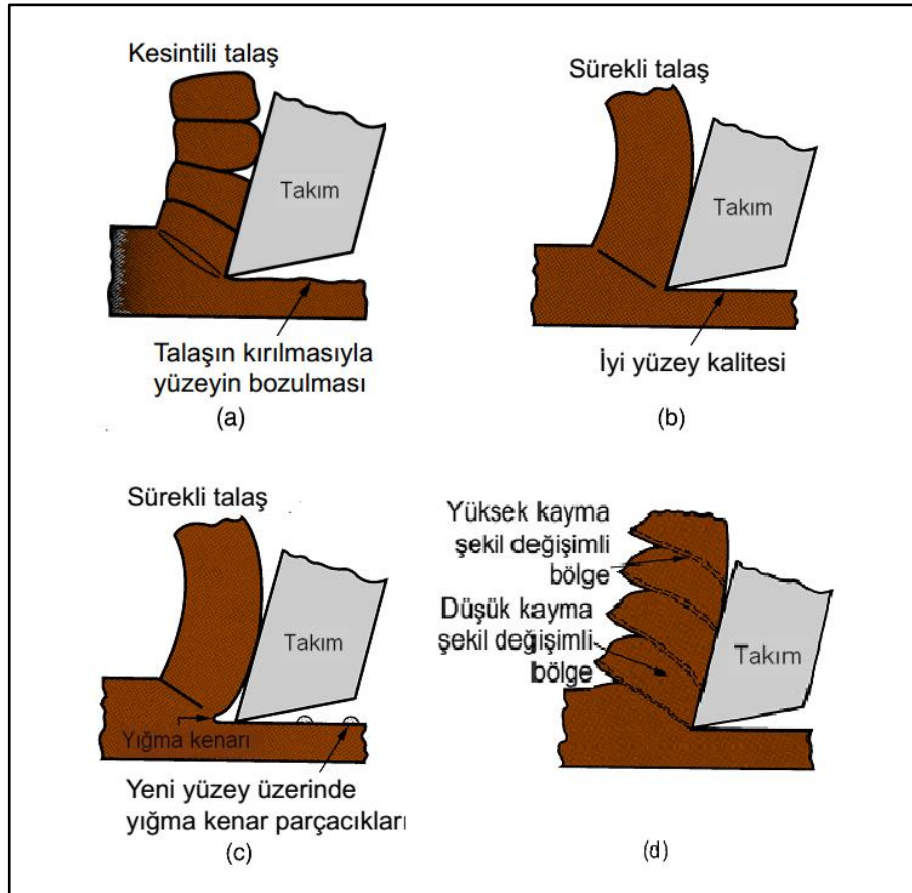
En çok kullanılan talaşlı imalat yöntemleri tornalama, delik delme ve frezelemedir. Broşlama, raybalama, diş açma, planyalama gibi birçok özel operasyon da sıkça kullanılmaktadır. Tüm bu operasyonlar takım geometrileri ve çalışma şekilleri farklı olsa da aynı mekanik prensip ile talaş kaldırılmaktadır.

Neredeyse tüm talaşlı imalat yöntemlerinde talaş kaldırma üç boyutlu olmasına rağmen genel talaş kaldırma mekaniğinin temeli iki boyutlu ortogonal kesme ile daha basit olarak açıklanabilmektedir. Ortogonal kesmede, kesme yüzeyinden ayrılan malzeme(talaş) , iş parçası ve takım arasındaki izafi hareketin yönüne dik olarak oluşur. Ortogonal kesmede, kesmenin kesici kenar boyunca üniform olduğu kabul edilir. Üç boyutlu daha karmaşık oblik kesmenin mekanik hesapları, geometrik ve kinematik dönüşüm modellerinin ortogonal kesmeye uygulanması ile elde edilmektedir[88].

Ortogonal kesmede talaş açısı ve serbest açı olmak üzere iki açı bulunur. Talaş açısı, parçadan ayrılan talaşın yönünü belirtir. Şekil 8 'de α ile gösterilmiştir. Serbest açı ise takım serbest yüzeyi ile yeni oluşan yüzey arasındaki açıdır[87].

İmalatta, parçalara çoğunlukla birden fazla kaba paso ve ardından bir veya iki finiş pasosu uygulanır. Kaba paso alınan işlemde, finiş pasosuna az miktarda işleme bırakılarak, iş parçasından büyük miktarda malzeme kaldırılır. Finiş pasosunda, iş parçası istenilen son şeklini alır; nihai ölçüler, toleranslar ve yüzey kalitesi verilir.

Talaş kaldırma işlemlerinde 4 temel talaş formu oluşmaktadır; kesintili talaş, yarı kesintili talaş, yığma kenarlı sürekli talaş ve sürekli talaş. Şekil 2.9 'da talaş tipleri gösterilmiştir.



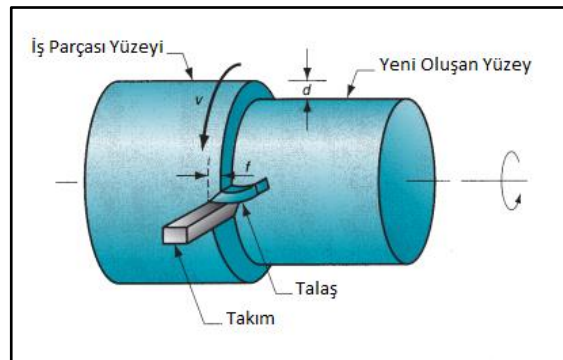
Şekil 2.9 Talaş tipleri : (a) Kesintili talaş , (b) Sürekli talaş ,(c) Yığma kenarlı sürekli talaş , (d) Yarı kesintili talaş [87]

Kesintili talaş, nispeten daha gevrek olan dökme demir gibi malzemelerin, düşük kesme hızları, yüksek paso ve ilerleme ile işlenmesi sırasında oluşurlar. Takım iş parçası arasındaki sürtünme yüksektir. Nispeten sünek malzemelerin düşük paso, ilerleme ile yüksek kesme hızlarında işlenmesi sonucu sürekli talaş formu oluşur. Bu talaş formunda oluşan malzeme yüzeyinin kalitesi iyidir. Takımdaki keskin kesici uç ve düşük sürtünme bu talaş formunun oluşmasını sağlar. Sürekli talaş oluşumu talaşın uzaklaştırılması problemini ortaya çıkarmaktadır, bu sebeple genellikle kesici uçların üzerinde talaş kırıcı form bulunmaktadır[87].

Sünek yapıdaki malzemelerin, orta ve düşük kesme hızları kullanılarak işlenmesi sırasında takım talaş arasındaki sürtünme sebebiyle talaşın kesici takıma yapışması sonucu yığma kenarlı talaş formu oluşur. İşleme sonrası oluşan yüzeyde de parçacıklar görülür. Bu yığma kenarı daha sonra artarak takım ömrünü azaltır ve takıma hasar verir. Talaş kaldırmanın zor olduğu sert ve tokluğu yüksek metallerin yüksek kesme hızlarında işlenmesinde genellikle yarı kesintili talaş oluşur[87].

2.2.2.1 Tornalama

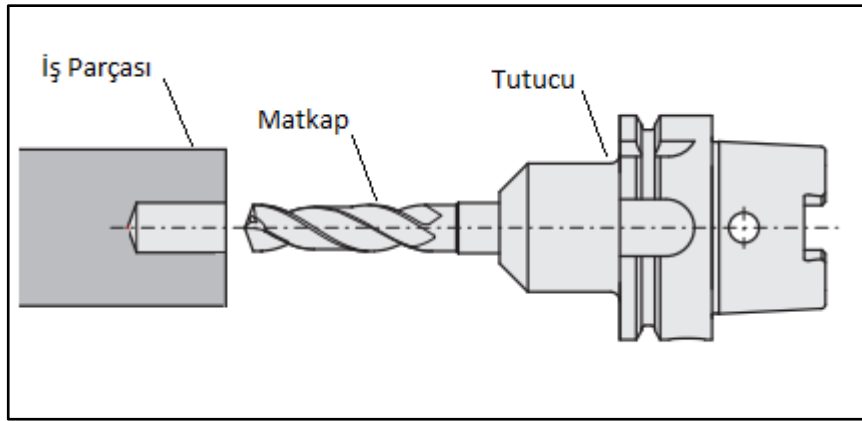
Dönen bir parçadan kesici takım hareketiyle talaş kaldırılması işlemidir. Torna olarak adlandırılan tezgâhta bu işlem gerçekleştirilir. Geleneksel torna tezgâhlarında, iç ve dış çapa pah kırma, çap, şekil ve alın tornalama, kılavuz çekme gibi talaş kaldırma işlemleri yapılabildiği gibi, c eksenli torna tezgâhlarında dönme eksenine dik talaş kaldırma işlemleri de yapılabilmektedir. Ayna vasıtasıyla döndürülen iş parçası, taret üzerindeki kesici takımlar vasıtasıyla işlenmektedir. Şekil 2.10 'da tornalama işlemi gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Tornalama işlemi [87]

2.2.2.2 Delik Delme

Delik delme işleminde iş parçasında yuvarlak bir delik oluşturulur. Delik matkap tezgâhlarında veya matkap uçları ile freze veya torna tezgâhlarında delinebilir. Matkap tezgâhlarında kesici takım dönerken, iş parçası sabit tutulur. Bu tezgâhlarda raybalama, kılavuz çekme, silindirik, konik havşa açma, puntalama ya da yüzey kalitesini arttırmak için mikroler çekme gibi işlemler yapılabilir. Şekil 2.11’de delik delme işlemi gösterilmiştir.



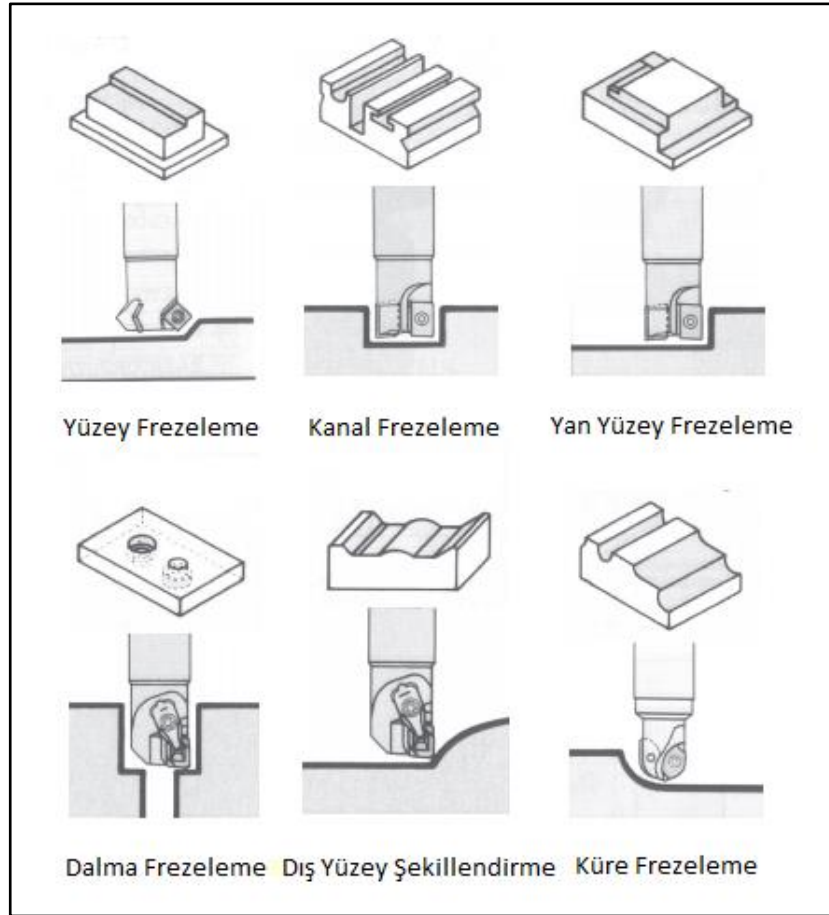
Şekil 2.11 Delik delme işlemi [91]

2.2.2.3 Frezeleme

Geleneksel frezeleme işleminde tabladaki aparata bağlanan iş parçası yatay eksenlerde hareket ettirilerek; bir veya daha fazla kesici uca sahip olabilen kesici takım ise dikey ekseninde hareket ettirilerek iş parçasına şekil verilir. Takımın eksenlerinin yönleri iş milinin tezgâhta yatay veya dikey konumlanmasına göre değişebilir. İşlemin yapıldığı tezgâha freze tezgâhı adı verilir. Kesme işlemini yapan takım freze çakısı olarak adlandırılır. Kanallar ve düz yüzeyler frezeleme ile oluşturulur. İş parçası üzerinde farklı işlemler, çakının şekli ya da kesme yolu değiştirilerek gerçekleştirilebilir. Çok geniş sayıda frezeleme çakısı çeşidi ve frezeleme operasyonu vardır. Tek kesici uçlu (dişli) freze çakıları olsa da genellikle birden fazla kesici uç bulunduran takımlar kullanılmaktadır.

Çeşitli frezeleme operasyonları Şekil 2.12 ‘de gösterilmiştir. İşlenecek yüzeye göre freze takımı değişmektedir. Tornalamanın aksine frezelemede oluşan talaş kalınlığı homojen değildir.

Günümüzde CNC işleme merkezleri frezeleme işlemleri için kullanılmaktadır. Bilgisayar destekli programlama yapılabilen bu tezgâhların magazinlerine birden fazla kesici takım bağlanak, birçok frezeleme işlemi parça tezgâhtan sökölmeden otomatik takım değışimiyle yapılmaktadır. Bu tezgâhlar parçayı otomatik olarak konumlandırmaktadır. Üniversal freze tezgâhlarına göre seri üretime daha uygun ve verimli tezgâhlardır. Genellikle üzerlerinde talaşı otomatik olarak çalışma alanından uzaklaştıran talaş konveyörleri ve takım boyu ölçümü için opsiyonel olarak proplar bulunur. Bilgisayar kontrollü üretimin imalatda da getirdiğı bazı avantajlar vardır. Örneğın tezgâhlara takım aşınma telafi kodu ya da radyüs telafi kodları girilerek hassasiyeti ve doğruluk oranı daha yüksek parçalar imal edilebilmektedir.



Şekil 2.12 Çeşitli frezeleme işlemleri [87]

Geleneksel frezeleme ya da yukarı frezeleme olarak adlandırılan işlemde çakı ilerlemeye zıt yönde döner. Her bir kesici dişın oluşturduğu talaş ince olarak başlar ve giderek kalınlaşır. Bu tip işlemede talaşın boyu nispeten uzundur ve

takım ömrü daha kısadır. İş parçasını bağlamak için de daha fazla kuvvet gereklidir. Diğer frezeleme yöntemi olan aşağı frezelemede ise, çakının dönüş yönü frezeleme ile aynıdır. Bu işlemde de oluşan talaş kalın başlar, ince biter. Talaşın boyu nispeten daha kısadır. Takım ömrü de daha uzundur. Parçayı aparata tutturmak için daha az kuvvet gerekir.

2.2.3 Kesici Takımlar

Takım seçimi ve tasarımı işleme performansına önemli derecede etki etmektedir. Uygun şekilde seçilmiş ve tasarlanmış bir takım, işlenen parçanın kalitesinin tutarlı olmasına, takımın uzun ömürlü ve ömrünün tahmin edilebilir olmasına imkân tanımaktadır. İşleme uygun olarak seçilmeyen takım, kısa sürede deforme olabilir, ürünün kalitesini düşürebilir ve maliyetleri arttırabilir. Takımlandırma işlemi prosesin ekonomikliği ve verimliliği açısından büyük bir öneme sahiptir. İşlenecek parçanın malzemesine, şekline ve istenilen tolerans ve yüzey kalitelerine göre takım seçimi yapmak, kesici takımların devir ve ilerleme değerlerini doğru seçmek gerekmektedir.

Seri üretimlerde kesici uç maliyetinin toplam işleme maliyetinin %3 'ü olduğu kabul edilmektedir. Takım ömründe yapılacak % 50'lik bir gelişme toplam maliyetlerin %1-2 arasında düşmesi anlamına gelmektedir. Bazı uygulamalarda malzeme kaldırma oranı yüksek olan takımlar kullanılarak, takımın nispeten erken kırılması dahi ekonomik gözüktür. [86].

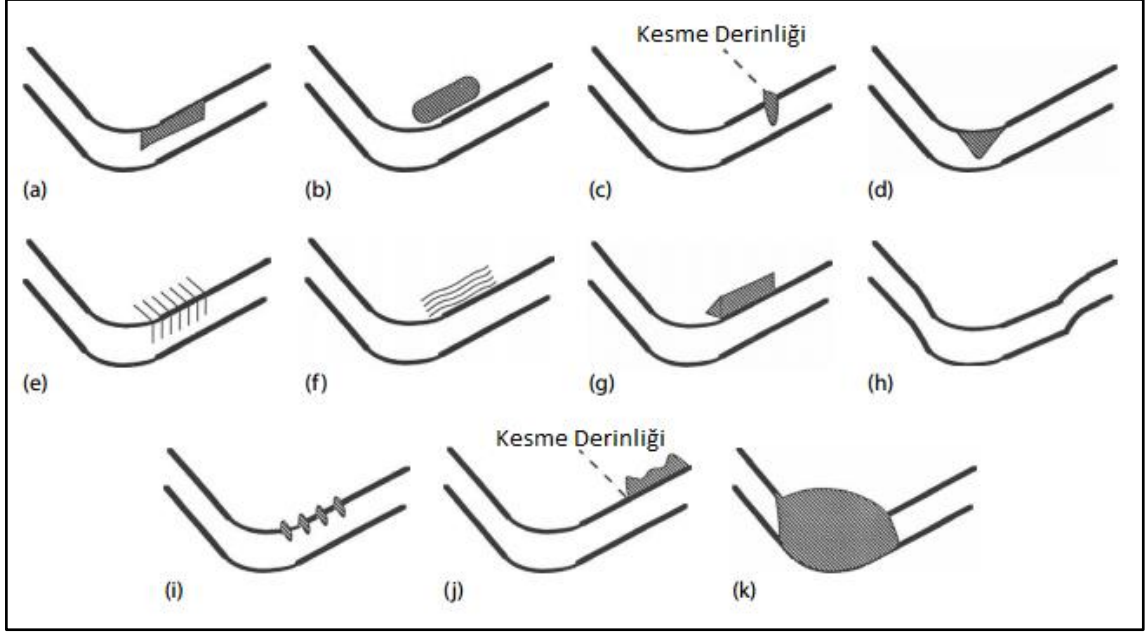
Kesici takımlar tek aktif kesme uçlu veya birden fazla kesme uçlu takımlar olarak sınıflandırılabilir. Tek kesme uçlu takımlar genellikle tornalama işlemlerinde kullanılırken, çok kesme uçlu takımlar genellikle frezeleme, delik delme ya da diğer özel işlemlerde kullanılmaktadır.

Kesici takımlar malzemelerine göre sınıflandıracak olursa; seramik takımlar, elmaslar, yüksek hız çelikleri ve sert metaller olarak sınıflandırılabilir.

2.2.4 Takım Hasar Mekanizmaları

Kesici takımın zayıflayıp, deforme olmasına sebep olan nedenleri bilmek, takımın ömrü hakkında tahmin edilebilir bir öngörüye sahip olmamızı sağlar; sürtünme

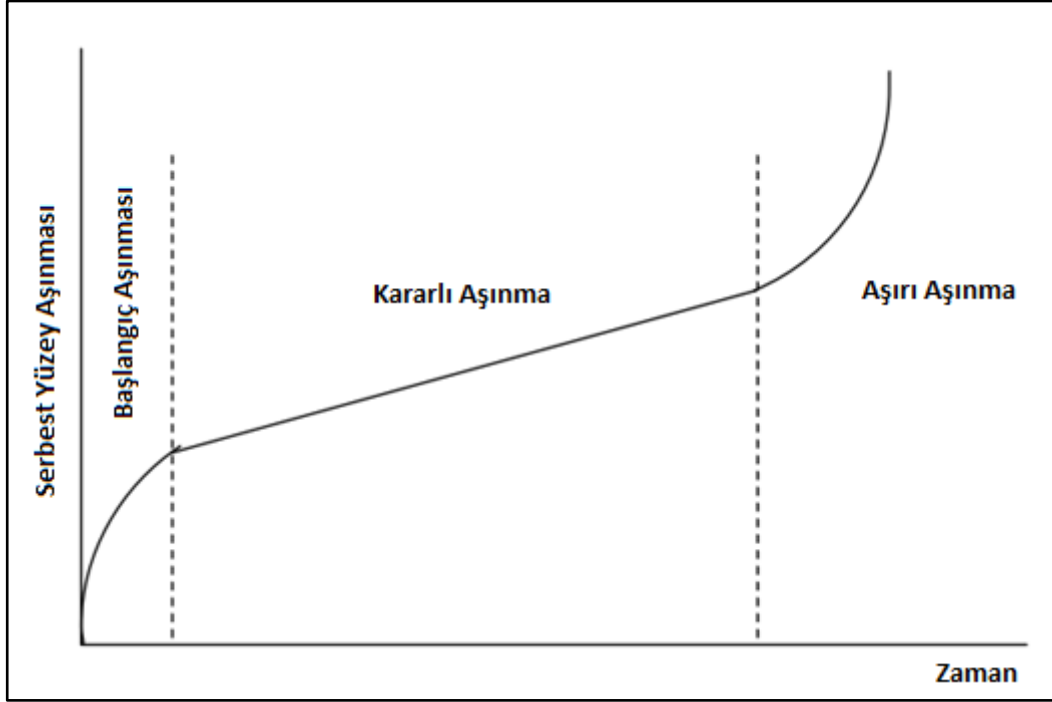
ve sıcaklık sebebiyle meydana gelen plastik deformasyon, kırılma ve aşınma takım hasarlarına neden olur. Kesici takım aşınma çeşitleri takımda hasarın meydana geldiği bölge ya da aşınmaya sebep olan fiziksel olay ile adlandırılır. Kesici takımlar işleme anında meydana gelen kuvvetlere dayanamadıkları zaman kırılır ya da plastik deformasyona uğrar [89].



Şekil 2.13 Kesici uç deformasyon çeşitleri [86]

Kesici uçta meydana gelen deformasyon örnekleri Şekil 2.13 'te gösterilmiştir. Serbest yüzey aşınması (Şekil 2.13-a) adından da anlaşıldığı üzere kesici ucun serbest yüzeyinde meydana gelen aşınmadır; genellikle kesme kenarlarında meydana gelen abrazyon ile oluşur. Şekil 2.14'te serbest yüzey aşınmasının zamana göre değişimi gösterilmektedir. Aşınan bölgelerin işlenmiş yüzeylere sürtmesi sonucu yüzey kalitesinde düşme ve geometrik toleranslarda sapma meydana gelebilir. İş parçasından kaldırılan talaşın kesici takım üzerinden aktığı yüzeye talaş yüzeyi adı verilir; krater aşınması (Şekil 2.13-b) bu yüzeyde meydana gelen bir aşınmadır. Aşınmanın ilerlemesi durumunda artan hasar, kesici kenarların da zayıflamasıyla, takım kırılmasıyla sonuçlanabilir. Çentik aşınması (Şekil 2.13-c) ise özellikle kaba yüzeylerin işlenmesi sırasında takım ile iş parçası hizasında çentik oluşmasıdır. Çentik, işlenen parçanın kendisinin veya yüzeyinin çok sert olması dolayısıyla oluşan abrazif talaş sebebiyle oluşur. Çentik, kullanılan soğutucuyla iş parçasının bir kimyasal reaksiyona girmesi ya da

koroziona uğraması sebebi ile de meydana gelebilir. Kesintili talaş formunun oluştuğu, kesme kuvvetlerinin değişken ve yüksek olduğu operasyonlarda; takım ve talaşta oluşan yüksek sıcaklıklar nedeniyle kesici uçta mekanik ve ısıl çatlaklar (Şekil 2.13 –e-f) oluşabilir. [89].



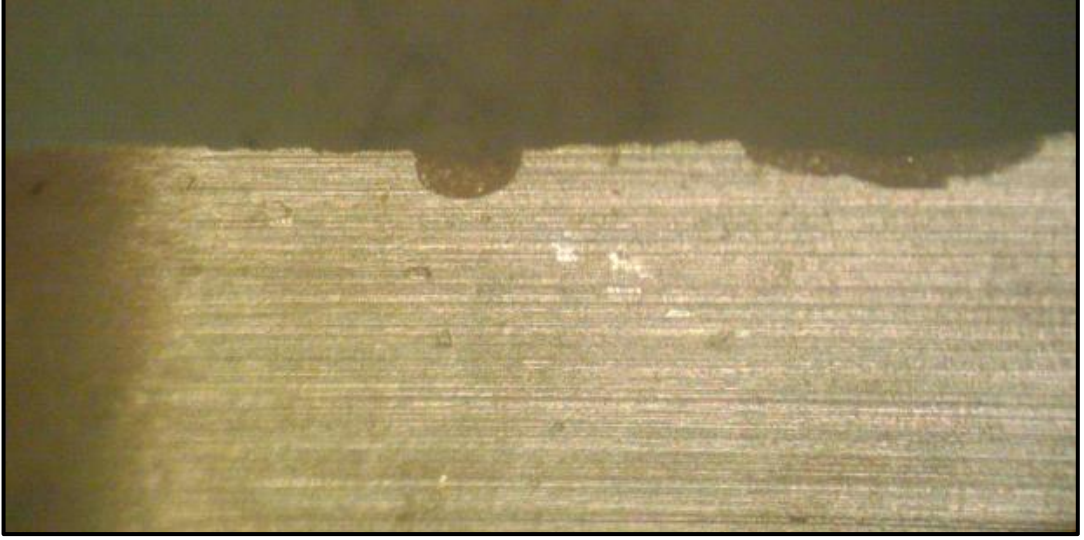
Şekil 2.14 Serbest yüzey aşınmasının zamana göre değişimi [89]

Kenar birikimi (Şekil 2.13-g) oluşumu (Build-Up Edge) genellikle düşük hızlarda, alüminyum gibi yumuşak malzemelerin işlenmesi sırasında oluşur. Kesme operasyonu sırasında kesici ucun kenarlarına malzemenin yapışması ve burada toplanmasıyla meydana gelir, bu hasar soğutmayı daha etkin bir biçimde kullanarak ya da kesme hızlarını yükselterek önlenabilir. Yüksek kesme kuvvetlerinin oluştuğu işleme parametreleri altında çalışırken veya yüksek kesme hızlarında oluşan sıcaklık sebebiyle düşen takım mukavemetiyle, kesme kuvvetleri takım tarafından karşılanamaz; kesici ucun kenarlarında plastik deformasyon (Şekil 2.13-h) meydana gelir[89].

Özellikle seramik, sermet, elmas gibi çok sert takımlarla işleme yapılırken, iş parçasından gelen aşındırıcı bir parça ya da işleme sırasında oluşan anlık bir titreşim sebebiyle kesici uç kenarında parçalanma (Şekil 2.13-i) meydana gelebilir. Talaş vurması (Şekil 2.13-j), işleme sırasında oluşan talaşın kıvrılıp,

kesici uç yüzeyine çarpa çarpa çukurcuklar oluşturmaları ve bu darbelerin artarak takımda hasara sebep olmasıdır[89].

Bir diğer deformasyon çeşidi ise takımın kırılmasıdır(Şekil 2.13-k). Bu şekilde oluşan bir hasarı önlemek için kesme kuvvetlerini azaltmak, iş parçasının aparata sağlam bağlandığından emin olmak ve tokluğu yüksek takımlar kullanmak gerekmektedir. Şekil 2.15’ de iş parçasının aparata sağlam bağlanmaması sonucu deneyler sırasında kırılan bir kesici uç gösterilmektedir.



Şekil 2.15 Tez MQL deneyleri sırasında kırılmış kesici uç

Bu bölümde deney sırasında kullanılan malzeme ve ekipmanların tanıtımı ile deneylerin nasıl yapıldığı anlatılacaktır.

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Takımlar

Deneysel çalışmalarda alüminyum 6061-T651 malzemesine, takma uçlu freze ile kanallar açılmıştır. 6061 serisi havacılık ve denizcilik sektörlerinde birçok parçada, valf ve valf parçalarında, hidrolik pistonlarda kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan 6061-T651 malzemesinin kimyasal bileşenleri Tablo 3.1’de görülebilir. Tablo 3.2 ‘de malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1 Alüminyum 6061 malzemesinin kimyasal bileşenleri

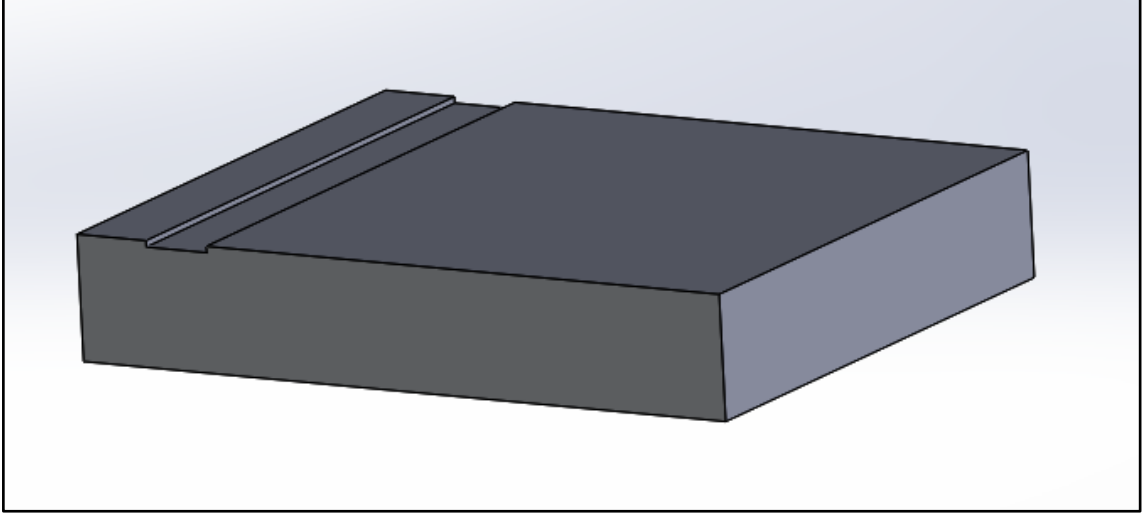
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
%	0,76	0,63	0,3	0,15	0,99	0,17
	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
%	0,014	0,14	0,023	0,01	0,02	Kalan

Tablo 3.2 Alüminyum 6061 malzemesinin mekanik özellikleri

Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Sertlik	Kopma Uzaması
MPa	MPa	Rockwell B	%
310	276	60	17

İş parçası 140 mm x 170 mm x 30 mm ölçülerinde alüminyum parçalar şeklinde hazırlanmıştır. İş parçasına 140 mm uzunluğundaki kenardan 16 mm

genişliğinde ve 1,5 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Şekil 3.1 'de iş parçasının katı modeli ve temsilen deneylerdeki gibi açılan bir adet kanal görülebilir.



Şekil 3.1 İş parçasının katı modeli

Frezeleme işlemleri iki adet kesici uç takılan 16 mm çapındaki takma uçlu freze kullanılarak yapılmıştır. APHT 100308FR-27P kaplamasız karbür uçlar kullanılmıştır. Şekil 3.2 'de deneylerde kullanılan takma uçlu freze takımı fotoğrafı, Şekil 3.2 'de ise kullanılan kesici uçların fotoğrafları gösterilmiştir. APKT ve APHT serisi kesici uçlar sanayide parmak freze işlemleri için sıkça kullanılan takımlar olduğu için deneylerde de bu tip bir takım kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 3.2 Ø 16 mm takma uçlu freze



Şekil 3.3 APHT kesici uçlar

Deneylerde kesme sıvısı olarak özellikleri Tablo 3.3’de verilen Eraoil KT/2000 ticari bitkisel kesme sıvısı kullanılmıştır.

Tablo 3.3 Eraoil KT/2000 ticari bitkisel kesme sıvısı özellikleri

Fiziksel durum ve görünüş	Sıvı (Kırmızı)
Yoğunluk	0,85 g/cm ³ (20°C)
Viskozite	11 cst (20°C)
Parlama sıcaklığı	154°C
Kaynama sıcaklığı	215°C
Ergime sıcaklığı	- 39°C

Literatür özetlerinde de bahsedildiği üzere nano parçacıklar MQL yönteminin işleme performansını arttıran etkiler göstermektedirler. Deneysel çalışmalarda da nano MoS₂ parçacıkları ticari bitkisel kesme sıvısının performansının arttırılması amacıyla kullanılmıştır.

Kullanılan nano MoS₂, %99,9 saflıkta ve 0,98 g/cm³ yoğunluktadır. Nano MoS₂ parçacıkların boyutları 10-20 nm arasında değişmekte, yüzey alanı yaklaşık 120 m²/g ve ısıl iletkenlik katsayısı yaklaşık 35 W/mK’dir.

3.2 Deneylerde Kullanılan Tezgâh, Makine ve Ekipmanlar

Deneysel çalışmalarda gerçekleştirilen frezeleme işlemleri için FIRST marka CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. Tezgâh, Fanuc kontrol sistemine, otomatik takım değiştirme özelliğine sahiptir. Maksimum iş mili devri 8000 dev/dak 'dır. Tutucu olarak BT40 tutucular kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan CNC dik işleme merkezi

MQL sisteminde yağ ile havayı birbirine karıştırıp, kesme bölgesine göndermek için Werte marka Mikro DKN model mikro yağlama sistemi kullanılmıştır. Yağlama sisteminin yağ basma ve duraklama süreleri dijital ekran üzerinden ayarlanabilmektedir. Yağlama ve duraklama süresi birer saniye olarak ayarlanmıştır.

Yağlama sistemi tezgâhın sağ tarafına monte edilmiştir. Şekil 3.5'te deneylerde kullanılan mikro yağlama sistemi görülebilir. Tablo 3.4 'te ise mikro yağlama sisteminin özellikleri belirtilmiştir.



Şekil 3.5 Mikro yağlama sistemi

MQL mikro yağlama sistemi rezervuarında filtre ve şamandıraya sahiptir. İki ayrı nozül için iki ayrı debide çıkış verebilmektedir.

Tablo 3.4 Mikro yağlama sisteminin özellikleri

Kontrol paneli	LCD dokunmatik
Çalışma voltajı	24 V AC/DC
Enerji tüketimi	5 W
Çalışma basıncı	4-6 bar
Rezervuar	2,5 lt
Yağlama aralığı	0,1 sn – 60 saat
Yağlama miktarı ayarı	24 kademe
Yağlama süresi	0,1 sn – 60 sn
Yağ miktarı (min)	0,0012 ml
Yağ miktarı (maks)	0,028 ml
Çalışma sıcaklığı	10-80°C
Viskozite aralığı	2 – 30 cst

MQL sisteminde iç içe geçmiş hortumlarda hava ve yağ kesme bölgesine taşınmakta ve nozül yardımıyla kesme bölgesine gönderilmektedir. Şekil 3.6'da hortumların resmi görülebilir.



Şekil 3.6 MQL sisteminde kullanılan eş merkezli yağ / hava hortumu

Takım aşınmalarının ölçümünde SOIF marka monoküler atölye mikroskobu kullanılmıştır. Ölçümler $1\mu\text{m}$ hassasiyete sahip oküler mikrometre kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan mikroskobun fotoğrafı Şekil 3.7'da görülebilir. Takım aşınmalarında maksimum serbest yüzey aşınması değeri ölçülmüştür.



Şekil 3.7 Monoküler mikroskop

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mitutoyo SurfTest SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı ile yapılmıştır. Ölçüm uzunluğu 0,8 mm olarak ayarlanmış ve ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri karşılaştırılmıştır. Cihazın ölçüm hassasiyeti $0,002\mu\text{m}$ 'dır. Kanal üzerinde yapılan on adet ölçümün ortalaması alınarak sonuçlar

karşılaştırılmıştır. Ölçümlerde kullanılan yüzey pürüzlülük cihazının fotoğrafı Şekil 3.8’de görülebilir.



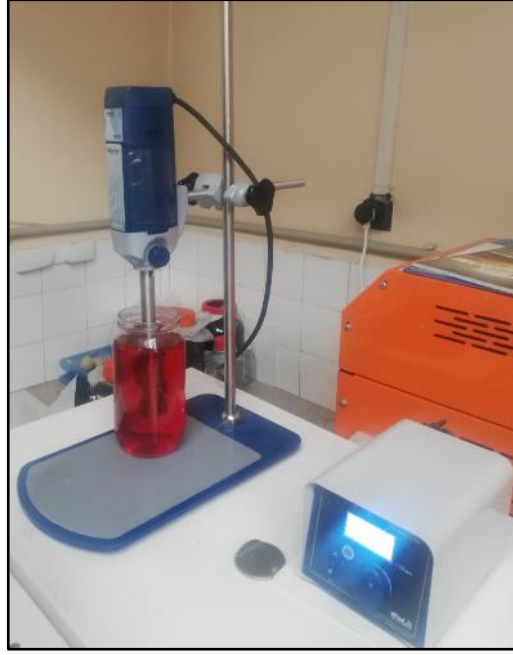
Şekil 3.8 Mitutoyo Surftest SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı

Kesme ve ilerleme kuvvetleri iş parçası altına yerleştirilen Kistler 92578A dinamometre ile ölçülmüştür. Şekil 3.9 ‘de kuvvet ölçümleri sırasında kullanılan dinamometrenin fotoğrafı görülebilir.

Dinamometre üç eksen de kuvvet ölçümü yapabilmektedir. 5N-5KN arasında ölçüm yapabilmekte ve 0-70 °C sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Kesme kuvvetleri maksimum değerden başlayarak, on değer ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.9 Kuvvet ölçümlerinde kullanılan dinamometre



Şekil 3.10 Dijital homojenizatör

Nano parçacıkların ve lesitinin tartılmasında Şekil 3.11’de görülen maksimum 510 g kapasiteli, 128x128 mm boyutlarında ve 1 mg hassasiyetli Radwag marka PS 510.R1 model hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Hassas terazi

Nano MoS₂ parçacıklar; 55 litre kapasiteli, 0,1°C ayarlama hassasiyetine sahip , $\pm 1^\circ\text{C}$ doğrulukta ve $\pm 2^\circ\text{C}$ kararlılıkta çalışabilen Şekil 3.12’de fotoğrafı verilen Termal marka G11420SD model etüv kullanılarak kurutulmuşlardır.



Şekil 3.12 MoS₂ kurutulması sırasında kullanılan etüv

3.3 Nano MoS₂ Katkılı Akışkanın Hazırlanması

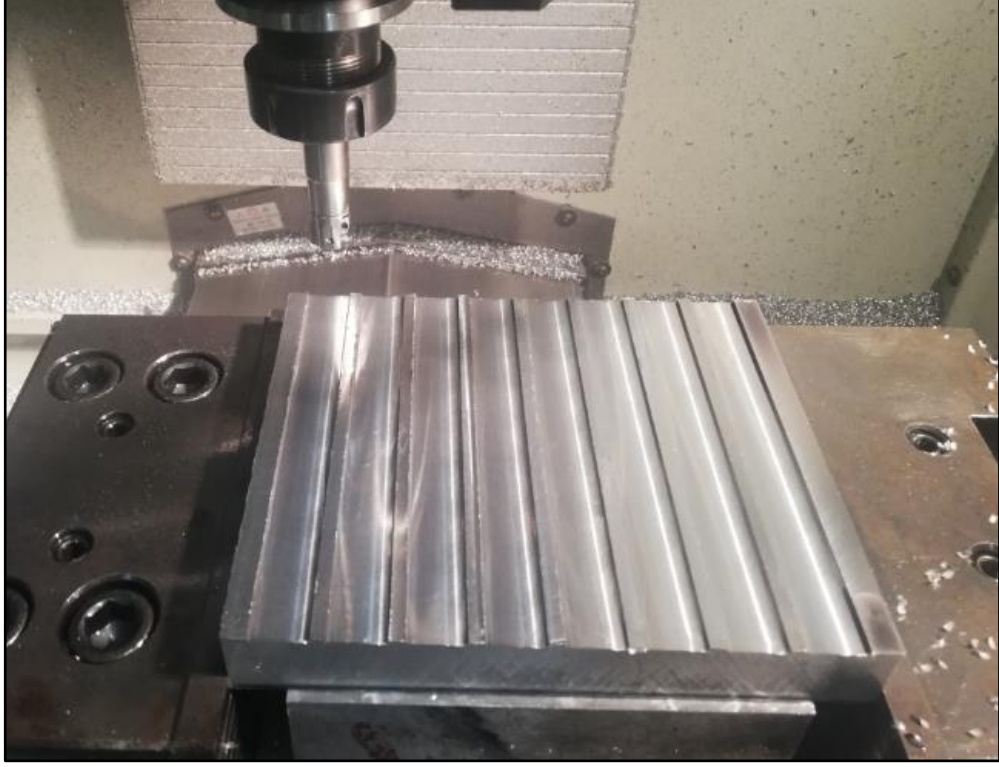
Nano MoS₂ katkıli yağlar hazırlanırken, MoS₂ önce sıcaklığa dayanıklı bir cam kaba serilmiş ve ardından içerisindeki nemden arındırılması için iki saat etüvde 120°C 'de bekletilmiştir. Hassas terazide tartılan ticari bitkisel kesme yağının ağırlıkça %1 'i oranında MoS₂ katılmıştır. Daha sonra nano parçacıkların yağ içerisinde homojen olarak dağılması için emülsifer olarak yağ ağırlığının %2'si oranında lesitin tartılarak yağ içerisine katılmıştır. MoS₂ 'ün çevreye ve insan sağlığına bir zararı bulunmamaktadır. MoS₂'ün ilginç bir şekilde deniz suyundan içilebilir su üretiminde filtre görevi gördüğünü ispatlanmıştır[92].

Oluşturulan karışım homojenizatör vasıtasıyla 5000 dev/dak 'da 2 saat süresince karıştırılmış ve homojen bir karışım elde edilmiştir. Elde edilen karışım MQL sisteminin daha önceden temizlenen yağ haznesine doldurularak nano katkıli MQL deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.4 Deneylerin Yapılışı

Deneyler sırasında sabit paso (1,5mm) , sabit ilerleme 0,1 mm /dev ile birlikte 200m/dak, 250m/dak ve 300 m/dak olmak üzere üç farklı kesme hızı

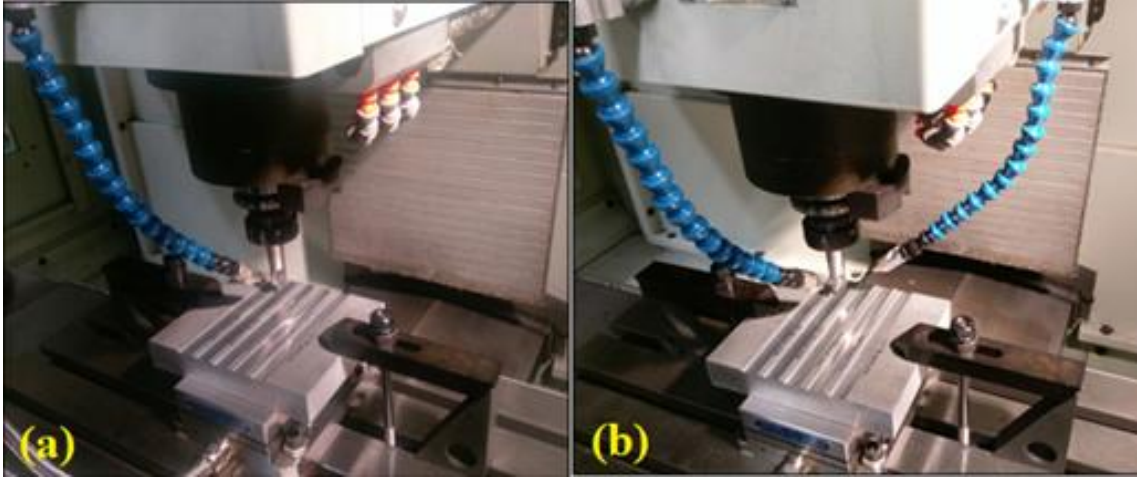
kullanılmıştır. Kesme hızları takım üreticisinin tavsiye ettiği değerler arasından seçilmiştir. Şekil 3.13 'de ki fotoğrafta da görüldüğü gibi iş parçasına 140 mm boyunca kanallar açılıp, kanallar arasına 4 mm genişliğinde işlenmemiş alan bırakılarak diğer kanalın açılmasına geçilmiştir.



Şekil 3.13 İş parçasına açılan kanallar

MQL akış debileri, literatürdeki çalışmalarda göz önüne alınarak 26 ml/h ve 52ml/h olarak seçilmiştir[80]. Aynı akış debisi, aynı işleme parametreleri altında hem tek nozülde, hem de çift nozülde kesme bölgesine gönderilmiş, debiyi dağıtarak kesme bölgesine göndermenin yüzey kalitesine ve kesme kuvvetlerine olan etkileri incelenmiştir.

Tek nozül uygulamasında akış takımın ilerleme doğrultusundan kesme bölgesine doğru yönlendirilirken, çift nozüllü uygulamada diğer nozül birinci nozüle 90° açı yapacak şekilde yan taraftan konumlandırılmıştır. Şekil 3.14'de tek ve çift nozül uygulamaları görülebilmektedir.



Şekil 3.14 MQL (a) tek ve (b) çift nozül uygulaması

Yüzey pürüzlülüğü ve serbest yüzey aşınmalarının ölçümünde, kesme hızları ve soğutma/yağlama şartları değiştirilerek toplam 27 farklı şartta frezeleme yapılmıştır. Kuru ortamda üç farklı kesme hızda, MQL 26ml/h debide tek nozül kullanılarak üç farklı kesme hızında, daha sonra 26 ml/h debi iki nozüle eşit derecede paylaştırılarak MQL 26 ml/h debide çift nozülle üç farklı kesme hızında işleme yapılmıştır. Daha sonra MQL sisteminde debi 52 ml/h'e çıkartılmış ve tek ve çift nozüllerde üç farklı kesme hızlarında frezeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan nano akışkan MQL sistemindeki yağa konulduktan sonra 26ml/h ve 52 ml/h aerosol debileri ile tek ve çift nozüllerde üç farklı kesme hızında toplam 12 işleme daha yapılmıştır. Her bir işleme şartında yüzey pürüzlülüğü değerleri ve kuvvet değerleri ölçülmüştür.

MQL sisteminde 6 bar hava basıncı kullanılmıştır. MQL yağ debileri MQL sistemi üzerinden ayarlanmıştır.

MQL yağ debileri tek nozül yerine, aynı debi çift nozülden kesme bölgesine gönderilerek, hangi yöntemde kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük çıkacağı öğrenilmek istenmiştir. Nozüller literatür çalışmaları da göz önünde bulundurularak, kesme bölgesine yaklaşık 30 mm mesafede ve 45° açı ile yerleştirilmişlerdir[70].

Yüzey pürüzlülüğü, kesme ve ilerleme kuvvetlerinin ölçüldüğü işlem parametreleri Tablo 3.5 'te belirtilmiştir.

Tablo 3.5 Yüzey kalitesi ve kuvvet ölçümlerinin yapıldığı işlem parametreleri

Soğutma/Yağlama Yöntemi	Nozül	Toplam MQL Debisi (ml/h)	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Kesme Derinliği (mm)
Kuru İşleme	-	-	200	0,1	1,5
Kuru İşleme	-	-	250	0,1	1,5
Kuru İşleme	-	-	300	0,1	1,5
MQL	Tek	26	200	0,1	1,5
MQL	Tek	26	250	0,1	1,5
MQL	Tek	26	300	0,1	1,5
MQL	Tek	52	200	0,1	1,5
MQL	Tek	52	250	0,1	1,5
MQL	Tek	52	300	0,1	1,5
MQL	Çift	26	200	0,1	1,5
MQL	Çift	26	250	0,1	1,5
MQL	Çift	26	300	0,1	1,5
MQL	Çift	52	200	0,1	1,5
MQL	Çift	52	250	0,1	1,5
MQL	Çift	52	300	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Tek	26	200	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Tek	26	250	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Tek	26	300	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Tek	52	200	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Tek	52	250	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Tek	52	300	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Çift	26	200	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Çift	26	250	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Çift	26	300	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Çift	52	200	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Çift	52	250	0,1	1,5
Nano Katkılı MQL	Çift	52	300	0,1	1,5

Yapılan ölçümler sonucunda optimum kesme hızının 250 m/dak olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple aşınma deneylerinde 250m/dak kesme hızı kullanılmıştır. Aşınma deneyleri kuru, MQL çift nozül 26ml/h, MQL çift nozül 52 ml/h ve Nano katkılı MQL çift nozül 52 ml/h aerosol debileri kullanılan soğutma yöntemleri altında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.6 Aşınma ölçümlerinin yapıldığı işleme şartları

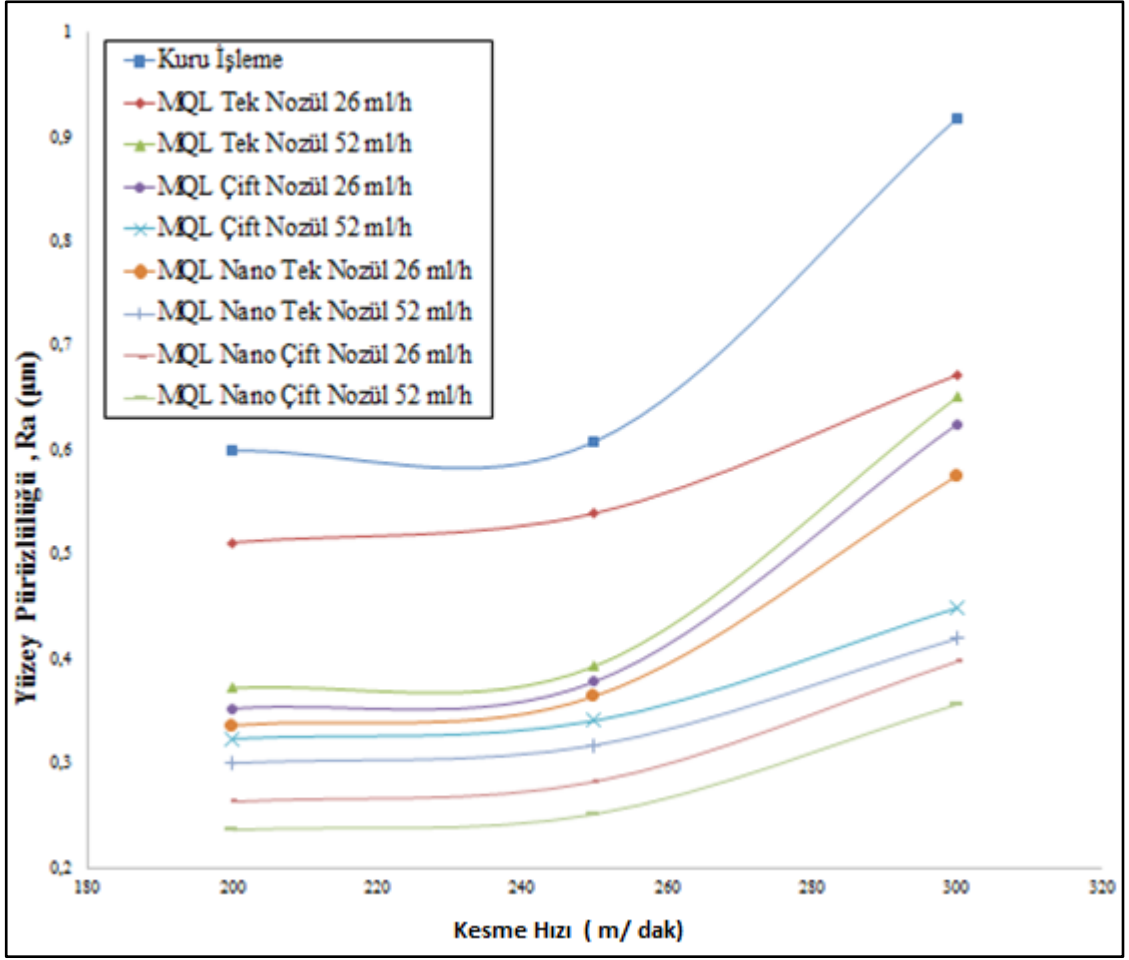
Soğutma/Yağlama Yöntemi	Nozül	Toplam MQL Debisi (ml/h)	Kesme Hızı (m/dak)
Kuru İşleme	-	-	250
MQL	Çift	26	250
MQL	Çift	52	250
Nano Katkılı MQL	Çift	52	250

4.1 Yüzey Pürüzlülükleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerine göre minimum yüzey pürüzlülük değeri nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde, 52 ml/h debi ve 200 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri ise kuru işlemede, kesme hızı 300 m/dak olduğu işlem şartlarında ölçülmüştür. MQL yönteminin kullanımı kuru işlemeye göre daha iyi yüzey kalitesi değerleri vermiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri tüm soğutma/yağlama şartları altında kesme hızı arttıkça artmıştır.

Şekil 4.1’de yüzey pürüzlülük değerlerinin kesme hızı ve soğutma / yağlama şartları ile değişimi görülmektedir. MQL yönteminde, aynı debiyi tek nozül yerine çift nozülden kesme bölgesine göndermek, yüzey pürüzlülüğünü etkilemiştir. Toplam debinin 26ml/h olduğu çift nozüllü nano katkısız MQL yönteminde yüzey pürüzlülük değerleri, aynı debinin tek nozülden gönderildiği MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %31 , %29,8 ve % 7 oranında düşmüştür. Bunu sebebi olarak aerosolün kesme bölgesine daha etkin bir şekilde ulaşması gösterilebilir.

Benzer şekilde toplam debinin 52 ml/h olduğu çift nozüllü nano katkısız MQL yönteminde yüzey pürüzlülük değerleri, aynı debinin tek nozülden gönderildiği MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %13 , %13,3 ve %31 oranında düşmüştür.



Şekil 4.1 Yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ve soğutma / yağlama şartları ile değişimi

Akışkan debisinin tek nozül yerine, çift nozüle dağıtılması nano katkılı MQL yöntemlerinin kullanıldığı frezeleme işlemlerinde de yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşmesi ile sonuçlanmıştır. Toplam debinin 26ml/h olduğu çift nozüllü nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde yüzey pürüzlülük değerleri, aynı debinin tek nozülden gönderildiği nano MoS₂ katkılı MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %21,7 , %22,5 ve %30,9 oranında düşmüştür. Toplam debinin 52ml/h olduğu çift nozüllü nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde ise yüzey pürüzlülüğü değerleri, aynı debinin tek nozülden gönderildiği nano MoS₂ katkılı MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %21,3 , %20,7 ve %15 oranında düşmüştür.

MQL yönteminde yağa nano katkısı yüzey pürüzlülüğü değerlerini etkilemiştir. Nano MoS₂ katkılı, tek nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, nano

katkısız yonteme g6re y6zey p6r6zl6l6k değerleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %34,2 , %32,4 ve %14,3 oranında d6şm6şt6r. Nano MoS₂ katkılı, tek noz6l kullanılan, 52 ml/h debili MQL yonteminde, nano katkısız yonteme g6re y6zey p6r6zl6l6ę6 değerleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %19,2 , %19,2 ve %35,5 oranında d6şm6şt6r.

Nano MoS₂ katkısının y6zey p6r6zl6l6ę6ne etkileri 6ift noz6ll6 uygulamalarda da g6r6lmektedir. Nano MoS₂ katkılı, 6ift noz6l kullanılan, 26ml/h debili MQL yonteminde, nano katkısız yonteme g6re y6zey p6r6zl6l6ę6 değerleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %25,2 , %25,3 ve %36,3 oranında d6şm6şt6r. Bir diğer nano MoS₂ katkılı, 6ift noz6l kullanılan, 52ml/h debili MQL yonteminde, nano katkısız yonteme g6re y6zey p6r6zl6l6ę6 değerleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %26,9 , %26,2 ve %20,6 oranında d6şm6şt6r. Bunlara ek olarak 6666m sonu6larına g6re, kullanılan aerosol debisinin de y6zey p6r6zl6l6ę6ne etkisi bulunmaktadır. Nano katkısız, tek noz6l kullanılan, 26ml/h debili MQL yonteminde, debi 52 ml/h'e 6ıkartıldığında y6zey p6r6zl6l6ę6 değerleri, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %27,2 , %27,1 ve %3,2 oranında d6şm6şt6r. Nano katkısız, 6ift noz6l kullanılan, 26ml/h debili MQL yonteminde, debi 52 ml/h'e 6ıkartıldığında y6zey p6r6zl6l6ę6 değerleri, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %8,2 , %9,9 ve %28,1 oranında d6şm6şt6r. Aerosol debisinin artışıının y6zey p6r6zl6l6ę6ne etkisi nano katkılı MQL yontemlerinde de g6r6lm6şt6r. Nano MoS₂ katkılı, tek noz6l kullanılan, 26ml/h debili MQL yonteminde, debi 52 ml/h'e 6ıkartıldığında y6zey p6r6zl6l6ę6 değerleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %10,7 , %12,9ve %27 oranında d6şm6şt6r. Nano MoS₂ katkılı, 6ift noz6l kullanılan, 26ml/h debili MQL yonteminde ise, debi 52 ml/h'e 6ıkartıldığında y6zey p6r6zl6l6ę6 değerleri, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %10,2 , %10,9 ve %10,3 oranında d6şm6şt6r. 6666m sonu6larına g6re nano katkı ilavesi ve aerosol6 tek noz6l yerine 6ift noz6lden kesme b6lgesine g6ndermek y6zey kalitesini arttırmıştır.

Literatür kısımlarında da bahsedilen nano MoS₂ katkısının takım-iş parçası ara yüzüne penetrasyonu sonucu, nano MoS₂ lerin yuvarlanma ve parlatma etkisi yüzey kalitesinin artmasında rol oynamıştır. Tek nozül yerine çift nozül kullanılması ile elde edilen yüzey kalitesinin daha iyi olması, penetrasyonun daha etkin bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

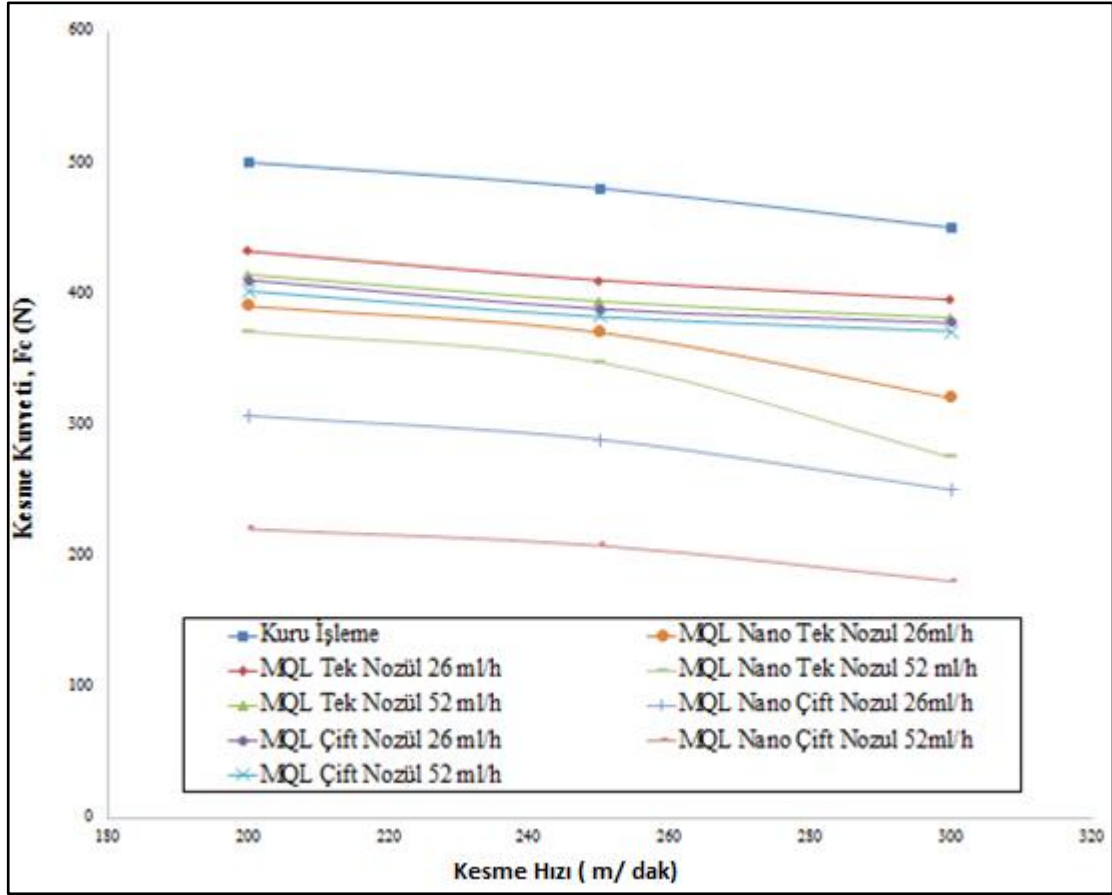
4.2 Kesme ve İlerleme Kuvvetleri

Kesme ve ilerleme kuvvetleri, tüm soğutma/yağlama koşulları altında artan kesme hızları ile düşmüştür. En düşük kesme kuvveti, nano MoS₂ katkılı çift nozüllü MQL yönteminde, toplam 52 ml/h debi ve 300 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. En yüksek kesme kuvveti ise kuru işleme ve 200 m/dak kesme hızının kullanıldığı işleme şartlarında ölçülmüştür. Şekil 4.2 'da kesme kuvvetlerinin, kesme hızları ve soğutma/yağlama şartlarına göre değişimini gösteren grafik görülebilir.

MQL yönteminde, aynı debiyi tek nozül yerine çift nozülden kesme bölgesine göndermek kesme kuvvetlerini etkilemiştir. Toplam debinin 26ml/h olduğu çift nozüllü nano katkısız MQL yönteminde kesme kuvveti değerleri, aynı debinin tek nozülden gönderildiği MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %5,1 , %5,2 ve %4,5 oranında düşmüştür. Toplam debinin 52 ml/h olduğu çift nozüllü nano katkısız MQL yönteminde ise kesme kuvveti değerleri, aynı debinin tek nozülden gönderildiği MQL yöntemine göre, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %3 , %2,9 ve %2,7 oranında düşmüştür.

Akışkan debisinin tek nozül yerine, çift nozülle dağıtılması nano katkılı MQL yöntemlerinin kullanıldığı frezeleme işlemlerinde de kesme kuvveti değerlerinin düşmesi ile sonuçlanmıştır. Toplam debinin 26ml/h olduğu çift nozüllü nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde kesme kuvveti değerleri, aynı debinin tek nozülden gönderildiği nano MoS₂ katkılı MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %21, %21 ve %22 oranında düşmüştür. Toplam debinin 52 ml/h olduğu çift nozüllü nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde ise kesme kuvveti değerleri, aynı debinin tek nozülden gönderildiği

nano MoS₂ katkılı MQL yöntemine göre, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %41, %40 ve %34 oranında düşmüştür.



Şekil 4.2 Kesme kuvvetlerinin kesme hızı ve soğutma / yağlama şartları ile değişimi

MQL yönteminde yağa nano katkısı kesme kuvvetlerini etkilemiştir. Nano MoS₂ katkılı, tek nozul kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, nano katkısız yöntemle göre kesme kuvveti değerleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %9,7 , %9,7 ve %19 oranında düşmüştür. Nano MoS₂ katkılı, tek nozul kullanılan, 52 ml/h debili MQL yönteminde ise, nano katkısız yöntemle göre kesme kuvveti değerleri, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %10,5 , %11,8 ve %27,9 oranında düşmüştür.

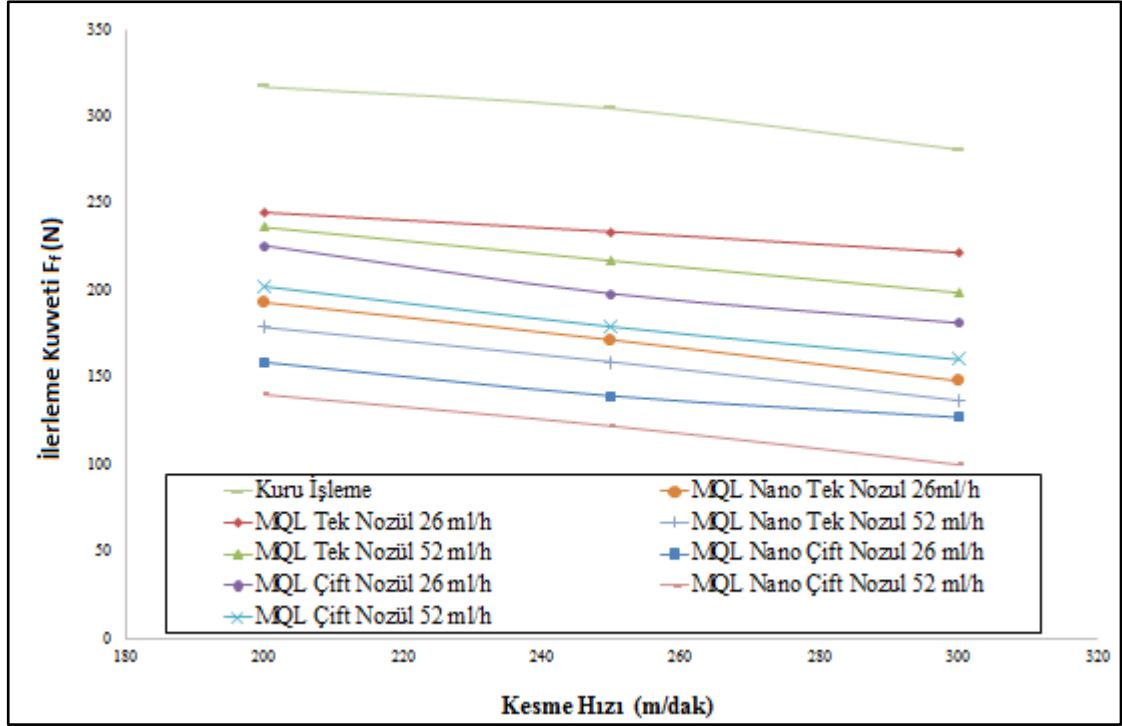
Nano MoS₂ katkısının kesme kuvvetlerine etkileri çift nozüllü uygulamalarda da görülmektedir. Nano MoS₂ katkılı, çift nozul kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, nano katkısız yöntemle göre kesme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %25,2 , %25,7 ve %33,8

oranında düşmüştür. Bir diğer nano MoS₂ katkılı, çift nozül kullanılan, 52ml/h debili MQL yönteminde ise, nano katkısız yöntemle göre kesme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %45,2 , %45,7 ve %51,4 oranında düşmüştür.

Yüzey pürüzlülüğü değerlerinde olduğu gibi kullanılan aerosol debisinin kesme kuvvetlerine de etkisi bulunmaktadır. Nano katkısız, tek nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, debi 52 ml/h'e çıkartıldığında kesme kuvvetleri, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %4,1 , %3,9 ve %3,5 oranlarında düşmüştür. Nano katkısız, çift nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde ise, debi 52 ml/h'e çıkartıldığında kesme kuvvetleri, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %2 , %0,15 ve %0,16 oranlarında düşmüştür.

Aerosol debisindeki artışın kesme kuvvetlerine etkisi, nano katkılı MQL yöntemlerinde de görülmüştür. Nano MoS₂ katkılı, tek nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, debi 52 ml/h'e çıkartıldığında kesme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %4,9 , %6,2 ve %14,1 oranında düşmüştür. Nano MoS₂ katkılı, çift nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde ise, debi 52 ml/h'e çıkartıldığında kesme kuvvetleri, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %28,3 , %28 ve %27,9 oranında düşmüştür.

Kesme kuvvetlerinde olduğu gibi ilerleme kuvvetlerinde de en düşük ilerleme kuvveti, çift nozüllü, 52 ml/h debi kullanılan nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde, 300 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. En yüksek ilerleme kuvveti ise 200 m/dak kesme hızında kuru işleme şartlarında ölçülmüştür. Şekil 4.3 'de ilerleme kuvvetlerinin, kesme hızları ve soğutma/yağlama şartlarına göre değişimini gösteren grafik görülebilir.



Şekil 4.3 İlerleme kuvvetlerinin kesme hızı ve soğutma / yağlama şartları ile değişimi

Kesme kuvvetlerinde olduğu gibi, MQL yönteminde aynı debiyi tek nozul yerine çift nozülde kesme bölgesine göndermek ilerleme kuvvetlerini etkilemiştir. Toplam debinin 26ml/h olduğu çift nozüllü nano katkısız MQL yönteminde ilerleme kuvveti değerleri, aynı debinin tek nozülde gönderildiği MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %7,8 , %15,2 ve %18,2 oranında düşmüştür. Toplam debinin 52 ml/h olduğu çift nozüllü nano katkısız MQL yönteminde ise ilerleme kuvveti değerleri, aynı debinin tek nozülde gönderildiği MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %14,4 , %17,5 ve %19,3 oranında düşmüştür.

Akışkan debisinin tek nozul yerine, çift nozülle dağıtılması nano katkılı MQL yöntemlerinin kullanıldığı frezeleme işlemlerinde de ilerleme kuvveti değerlerinin düşmesi ile sonuçlanmıştır. Toplam debinin 26ml/h olduğu çift nozüllü nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde ilerleme kuvveti değerleri, aynı debinin tek nozülde gönderildiği nano MoS₂ katkılı MQL yöntemine göre; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %17,8, %18,8 ve %14,1 oranında düşmüştür. Toplam debinin 52 ml/h olduğu çift nozüllü nano

MoS₂ katkılı MQL yönteminde ise ilerleme kuvveti değerleri, aynı debinin tek nozülünden gönderildiği nano MoS₂ katkılı MQL yöntemine göre, 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %21,6, %23,2 ve %26,9 oranında düşmüştür.

MQL yönteminde yağa nano katkısı ilerleme kuvvetlerini de etkilemiştir. Nano MoS₂ katkılı, tek nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, nano katkısız yönteme göre kesme kuvveti değerleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %21 , %26,5 ve %33,2 oranında düşmüştür. Nano MoS₂ katkılı, tek nozül kullanılan, 52 ml/h debili MQL yönteminde ise, nano katkısız yönteme göre ilerleme kuvveti değerleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %24,3 , %26,7 ve %31,1 oranında düşmüştür. Nano MoS₂ katkısının ilerleme kuvvetlerine etkileri çift nozüllü uygulamalarda da görülmektedir. Nano MoS₂ katkılı, çift nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, nano katkısız yönteme göre ilerleme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %29,6 , %29,6 ve %29,9 oranında düşmüştür. Bir diğer nano MoS₂ katkılı, çift nozül kullanılan, 52ml/h debili MQL yönteminde ise, nano katkısız yönteme göre ilerleme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %30,7 , %31,8 ve %37,6 oranında düşmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinde olduğu gibi kullanılan aerosol debisinin ilerleme kuvvetlerine de etkisi bulunmaktadır. Nano katkısız, tek nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, debi 52 ml/h'e çıkartıldığında ilerleme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %3,5 , %7,1 ve %10,4 oranında düşmüştür. Nano katkısız, çift nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde ise, debi 52 ml/h'e çıkartıldığında ilerleme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %10,4 , %9,6 ve %11,6 oranında düşmüştür. Aerosol debisindeki artışın ilerleme kuvvetlerine etkisi nano katkılı MQL yöntemlerinde de görülmüştür. Nano MoS₂ katkılı, tek nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde, debi 52 ml/h'e çıkartıldığında ilerleme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %7,4 , %7,4 ve %7,6 oranında düşmüştür. Nano MoS₂ katkılı, çift nozül kullanılan, 26ml/h debili MQL yönteminde ise, debi 52 ml/h'e çıkartıldığında

ilerleme kuvvetleri; 200 m/dak, 250 m/dak ve 300 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %11,7 , %12,4ve %21,4 oranında düşmüştür.

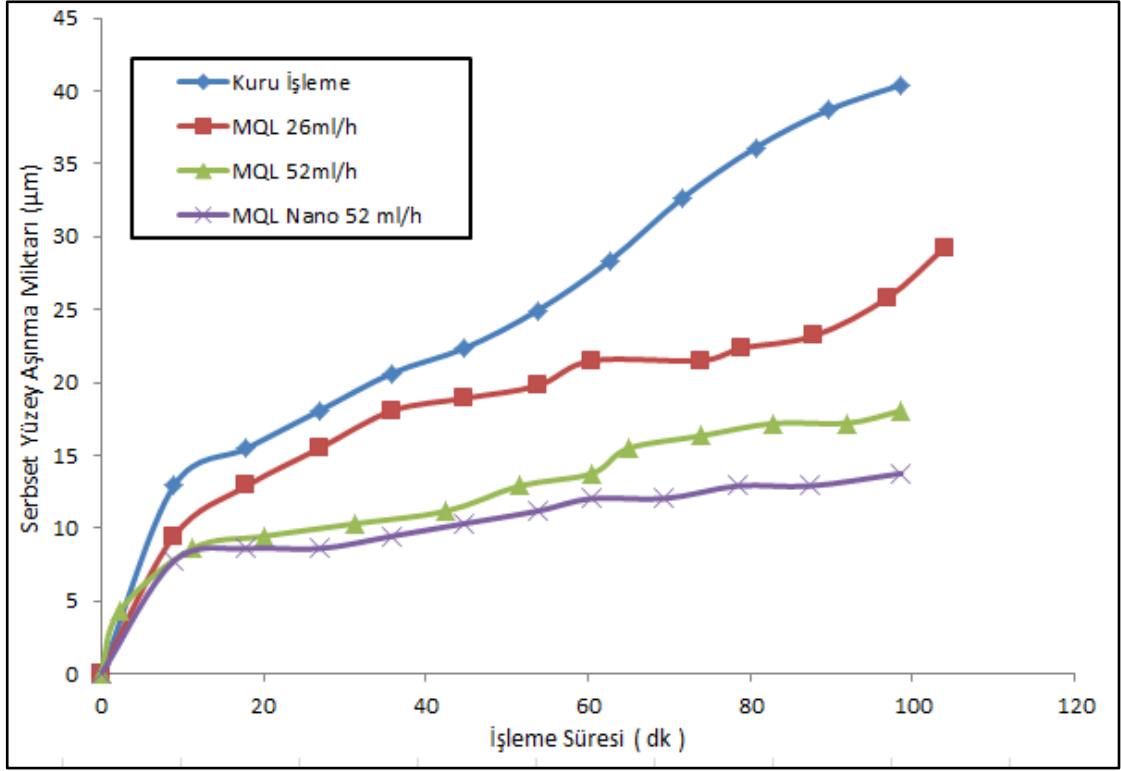
MQL yönteminde nano katkı olarak MoS₂ kullanımı; nano parçacıkların takım-iş parçası ve takım-talaş ara yüzeylerine penetrasyonu ile oluşan tabaka sayesinde, yağlama performansını arttırmış ve kesme kuvvetlerini düşürmüştür. Tek nozül yerine çift nozül kullanılması sonucu, nano katkılar ve aerosol daha iyi nüfuz ederek yağlama performansını arttırmıştır. Bu da kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olmuştur.

4.3 Takım Aşınmaları

Takım aşınma değerlerinin karşılaştırıldığı MQL deneylerinin hepsinde çift nozül kullanılmıştır. Kesici uçtaki en düşük serbest yüzey aşınması nano MoS₂ katkılı, 52 ml/h debi kullanılan MQL yönteminde elde edilmiştir. En yüksek aşınma kuru işleme sırasında elde edilmiştir. MQL’de kullanılan ticari bitkisel yağa nano MoS₂ katkısının takım ömrünü uzattığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde MQL ‘da kullanılan aerosol debisini de 26 ml/h ‘ten 52 ml/h ‘e çıkartılması takım aşınması azalmıştır. Şekil 4.4’de kesici uç serbest yüzey aşınmasının zamanla farklı soğutma/yağlama şartlarında değişimi görülebilir.

Şekil 4.4’te ki grafikte de görüldüğü üzere, kuru işleme, MQL (26ml/h) , MQL (52ml/h) ve nano katkılı MQL (52ml/h) koşullarının her birinde kesici uçlar ile en az 100 dak işleme yapılmıştır. 100 dak işleme sonucundan ki takım aşınma değerlerine göre, MQL (26ml/h) yönteminde takımın serbest yüzeyindeki aşınma, kuru işlemeye göre %36 oranında az ölçülmüştür.

Aerosol debisinin 26 ml/h ‘ten 52 ml/h’le çıkarıldığı durumda, serbest yüzeydeki aşınma miktarı, yaklaşık 100 dak işleme sonucundaki ölçümlere göre %30 oranında düşük ölçülmüştür. MQL yönteminde aerosol debisinin 52 ml/h olduğu durumda yağa nano katkısının ise, yaklaşık 100 dak işleme sonunda, serbest yüzey aşınmasında % 23,8 ‘lik bir düşüşe sebep olduğu tespit edilmiştir.

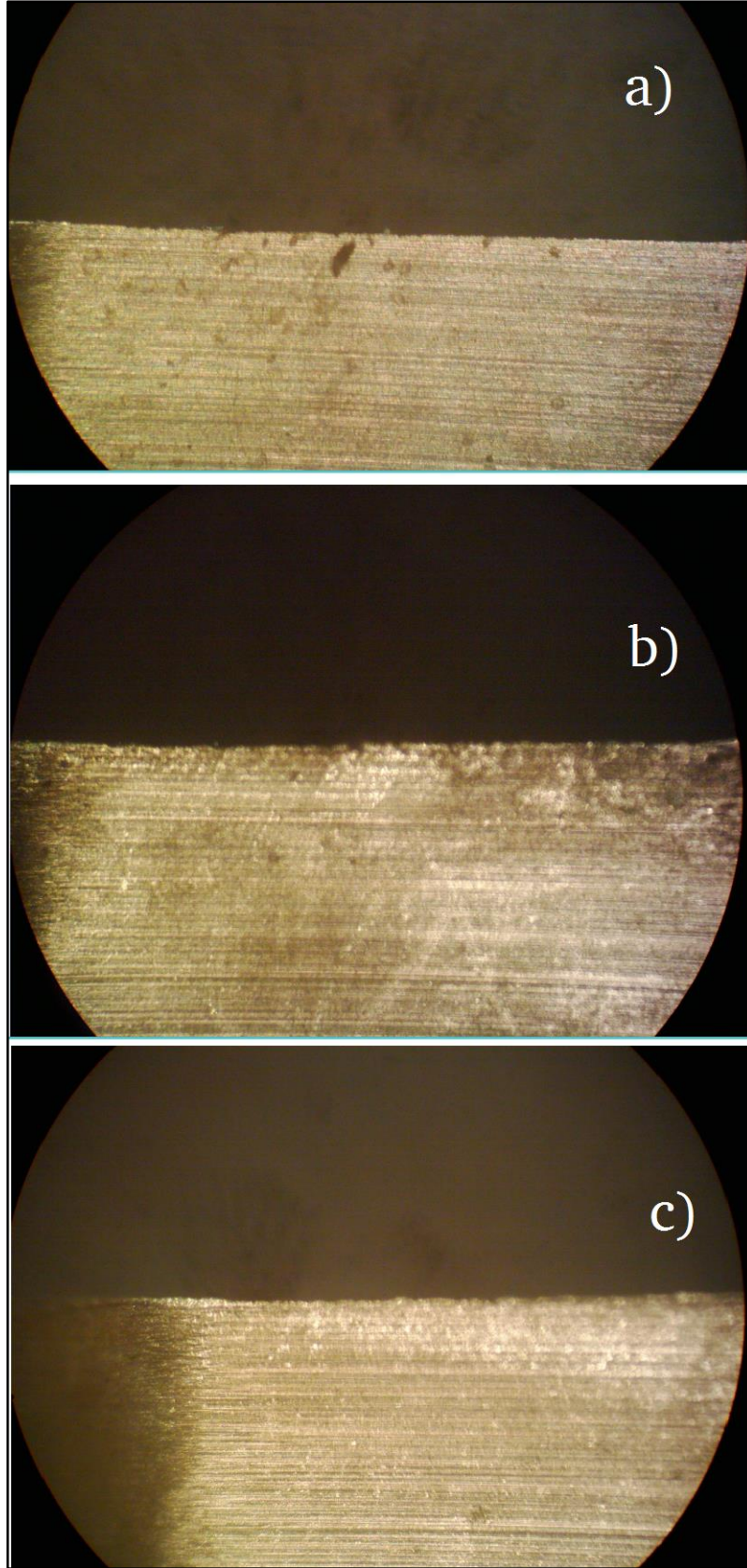


Şekil 4.4 Kesici uç serbest yüzey aşınmasının soğutma / yağlama yöntemleri ve zamanla değişimi

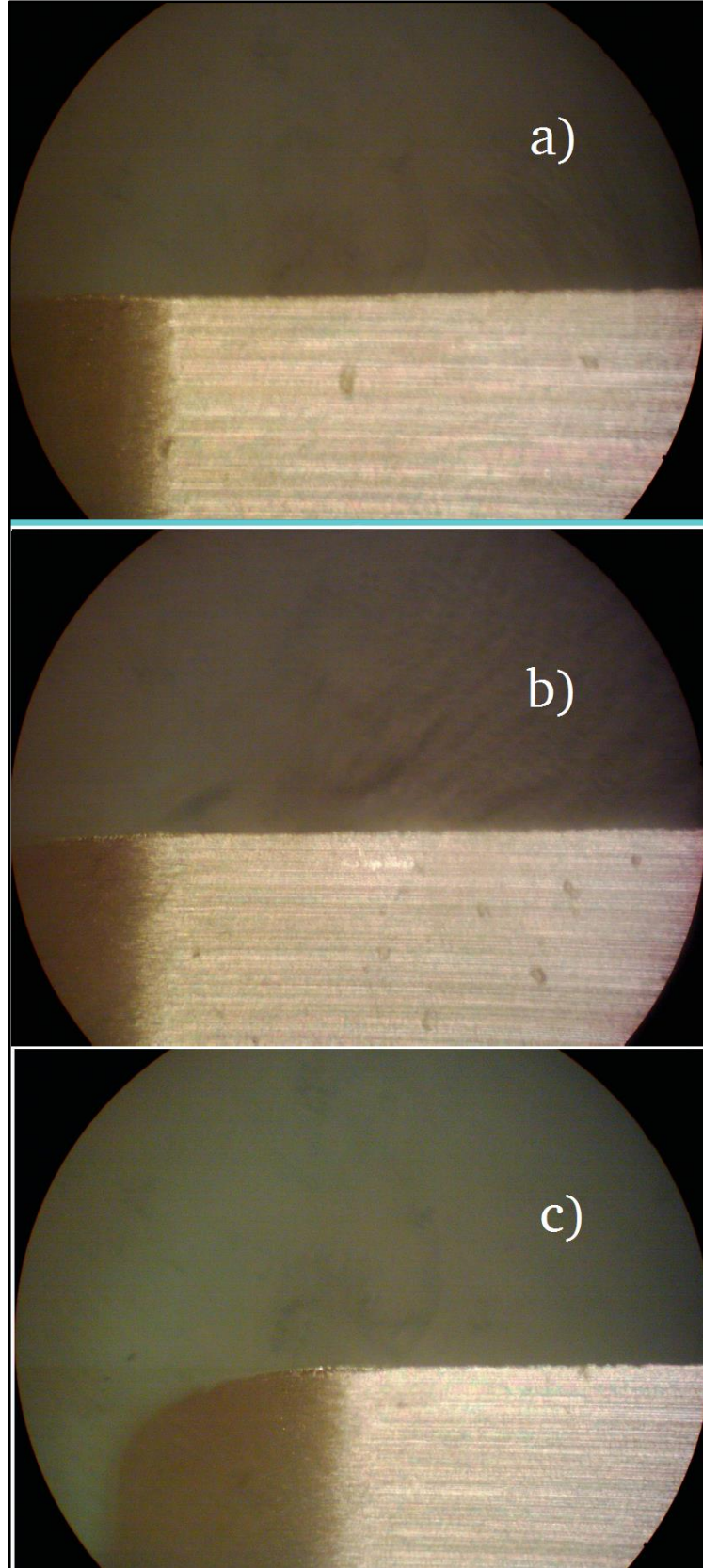
Şekil 4.5-4.6-4.7-4.8 'de ki fotoğraflarda farklı soğutma/yağlama yöntemleri altında belirli zaman aralıklarında kesici uç serbest yüzeyleri görülebilir.

Serbest yüzey aşınması dışında kesici takımda yığma ağzı oluşumu gözlenmemiştir.

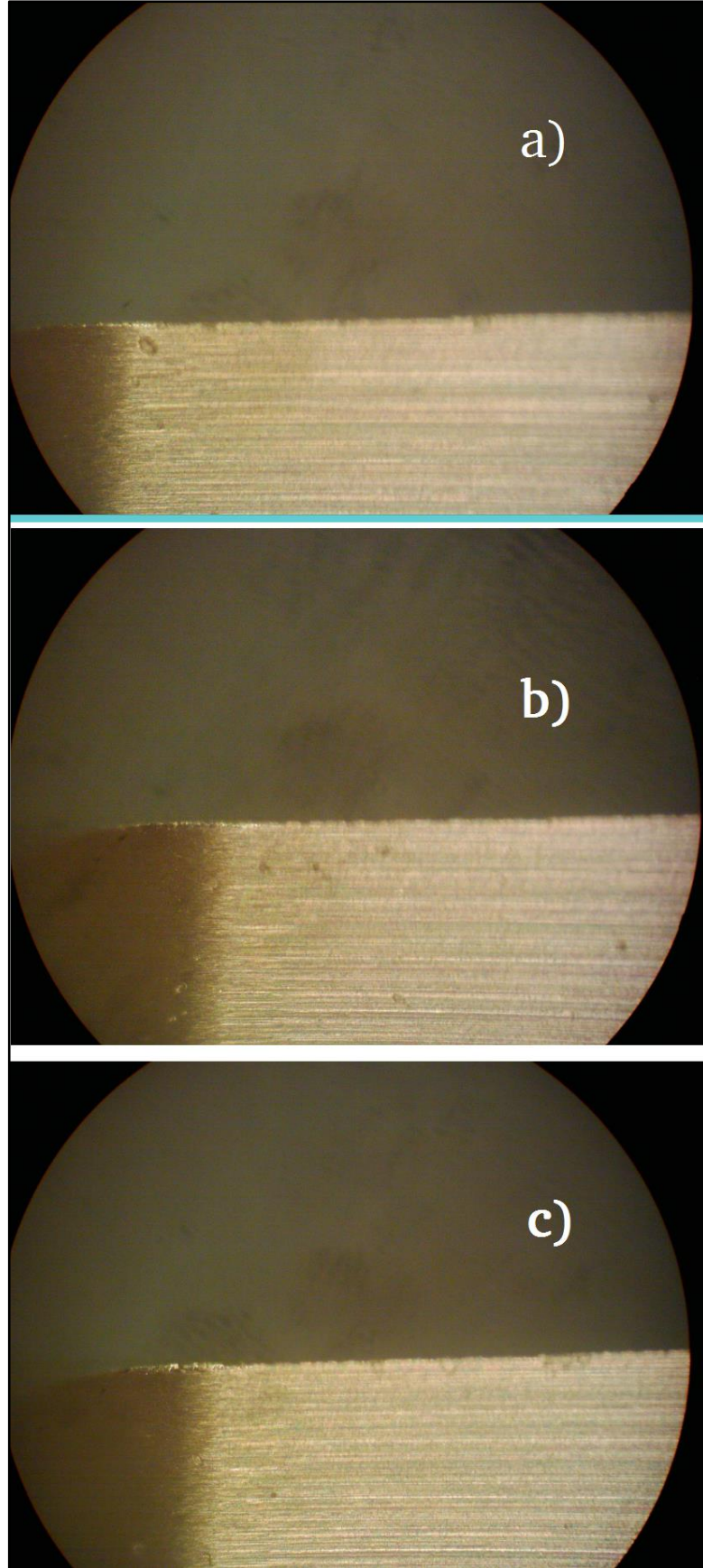
Literatürdeki çalışmalara benzer sonuçla; MQL yönteminde, yağa nano MoS_2 katkısı alüminyum malzemenin işlenmesinde takım aşınmasını düşürmüştür. Nano MoS_2 katkısı yağın yağlama özelliğini artırarak takım-iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltmış, sürtünme sonucu oluşan sıcaklık sebebiyle artan takım deformasyonu azalmıştır. MQL sisteminde tek nozül yerine çift nozül kullanılması sonucu daha düşük takım aşınmaları çıkması, aerosolün kesme bölgesine daha etkin bir biçimde gönderildiğini ve nano katkının takım-talaş ve takım-iş parçası yüzeyine daha iyi penetre olduğunu göstermektedir.



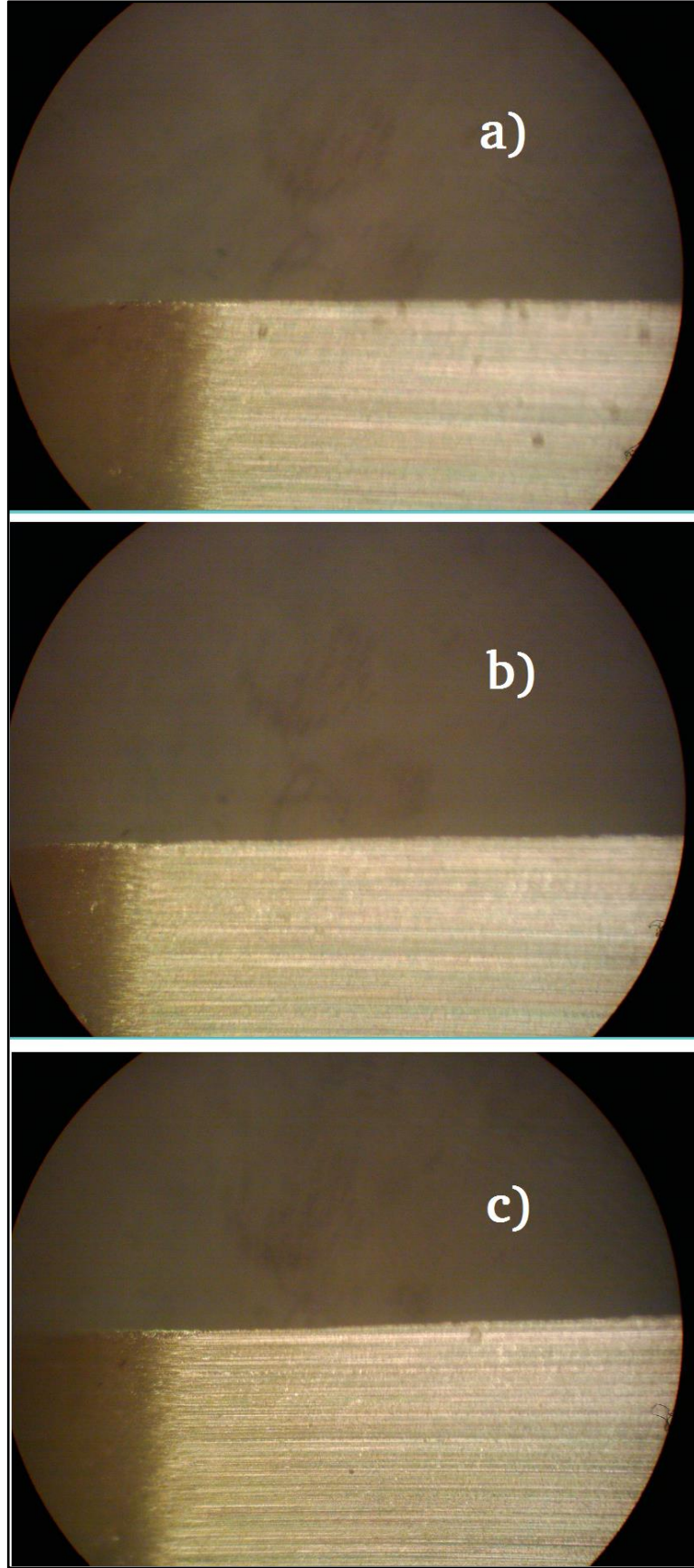
Şekil 4.5 Kuru işleme sırasında takım aşınmaları(a)1,96.dak b) 19,88.dak c) 98.dak)



Şekil 4.6 MQL (26 ml/h) işleme sırasında takım aşınmaları (a)4,48.dak b) 47,08.dak c)96,88.dak)



Şekil 4.7 MQL (52 ml/h) işleme sırasında takım aşınmaları (a)11,2.dak b) 60,48.dak c)91,84.dak)



Şekil 4.8 MQL (52 ml/h) işleme sırasında takım aşınmaları (a)17,92.dak
b)69,44.dak c)98,56.dak)

4.4 Genel Sonuçlar ve neriler

Bu deneysel çalışmada, alüminyum 6061 malzemesi, kuru işleme, MQL yöntemi ve MoS₂ katkılı MQL yöntemleri altında, üç farklı kesme hızı ile sabit kesme derinliği ve ilerleme şartları altında frezelenmiştir. İşlem parametrelerinin yüzey kalitesine, kesme kuvvetlerine ve kesici uç serbest yüzey aşınmasına olan etkileri incelenmiştir. Yapılan ölçümlere dayanarak sonuçlar řu şekilde özetlenebilir;

- MQL yöntemi ile frezelemede, kuru işlemeye göre yüzey kalitesi artmıştır. Bu yöntemde kuru işlemeye göre kesme ve ilerleme kuvvetleri düşmüş ve takım serbest yüzey aşınmaları azalmıştır.
- MQL yöntemi ile frezelemede aerosol debisinin arttırılması, nano katkılı veya nano katkısız her iki durumda da yüzey pürüzlülük değerlerini, kesme ve ilerleme kuvvetlerini düşürmüş, takım aşınmasını azaltmıştır.
- MQL yönteminde yağa nano MoS₂ katkısı işleme performansını arttırmıştır. Nano MoS₂ parçacıklarının yağlama özelliklerini arttırması ve takım-iş parçası sürtünme yüzeyine daha iyi penetrasyon sağlaması sayesinde yüzey kalitesi artmış, kesme ve ilerleme kuvvetleri düşmüş, takım aşınması azalmıştır.
- MQL yönteminde aynı aerosol debisinin kesme bölgesine tek nozül yerine iki nozüle eşit olarak dağıtılarak gönderilmesi, soğutma ve yağlama verimini arttırmıştır. Debinin dağıtılarak gönderilmesi sonucunda yüzey kalitesi artmış, kesme ve ilerleme kuvvetleri düşmüş ve takım aşınması azalmıştır.
- Geleneksel sıvı soğutma yöntemlerine göre yağ tüketimi çok daha az olan MQL yöntemlerinde, nano MoS₂ katkısı ve akışı farklı açılardan dağıtarak kesme bölgesine göndermek yağ tüketimini azaltıcı etki göstermiştir. Nano katkı ile MQL yönteminin performansının arttırılması ve aerosol debisinde artışa gitmeden önce kesme bölgesine aerosolün daha efektif bir biçimde iletilmesi nerilmektedir.

- [1] R. K. Suresh, G. Krishnaiah, and P. Venkataramaiah, "An experimental investigation with minimum quantity lubrication and its comparison with various vegetable oil based cutting fluids during turning," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 8758–8768, 2017.
- [2] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, and A. R. Dixit, "Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review," *J. Clean. Prod.*, vol. 127, pp. 1–18, 2016.
- [3] Z. Liu, Q. An, J. Xu, M. Chen, and S. Han, "Wear performance of (nc-ALTiN)/(a-Si₃N₄) coating and (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄) coating in high-speed machining of titanium alloys under dry and minimum quantity lubrication (MQL) conditions," *Wear*, vol. 305, no. 1–2, pp. 249–259, 2013.
- [4] R. W. Maruda, G. M. Krolczyk, E. Feldshtein, P. Nieslony, B. Tyliczszak, and F. Pusavec, "Tool wear characterizations in finish turning of AISI 1045 carbon steel for MQCL conditions," *Wear*, vol. 372–373, pp. 54–67, 2017.
- [5] O. Pereira, J. E. Martín-Alfonso, A. Rodríguez, A. Calleja, A. Fernández-Valdivielso, and L. N. López de Lacalle, "Sustainability analysis of lubricant oils for minimum quantity lubrication based on their tribo-rheological performance," *J. Clean. Prod.*, vol. 164, pp. 1419–1429, 2017.
- [6] E. Benedicto, D. Carou, and E. M. Rubio, "Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes," *Procedia Eng.*, vol. 184, pp. 99–116, 2017.
- [7] T. Walker, "Minimum quantity lubrication," *Fuels Lubes Int.*, vol. 10, no. 2, pp. 12–13, 2004.
- [8] Y. R. Ginting, B. Boswell, W. Biswas, and N. Islam, "Advancing environmentally conscious machining," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 391–396, 2015.
- [9] B. L. Tai, D. A. Stephenson, R. J. Furness, and A. J. Shih, "Minimum quantity lubrication (MQL) in automotive powertrain machining," *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 523–528, 2014.
- [10] S. Niketh and G. L. Samuel, "Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition," *J. Manuf. Process.*, vol. 32, pp. 254–268, 2018.

- [11] P. Sivaiah and D. Chakradhar, "CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel : A comparison with MQL , wet , dry machining," 2018.
- [12] V. Songmene, J. Kouam, and A. Bahloul, "Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on fine and ultrafine particle emission and distribution during polishing of granite," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 114, no. September 2017, pp. 398–408, 2018.
- [13] E. A. Rahim and H. Dorairaju, "Evaluation of mist flow characteristic and performance in Minimum Quantity Lubrication (MQL) machining," vol. 123, no. March, pp. 213–225, 2018.
- [14] W. Stachurski, J. Sawicki, R. Wójcik, and K. Nadolny, "Influence of application of hybrid MQL-CCA method of applying coolant during hob cutter sharpening on cutting blade surface condition," *J. Clean. Prod.*, vol. 171, pp. 892–910, 2018.
- [15] M. Mia, "Mathematical modeling and optimization of MQL assisted end milling characteristics based on RSM and Taguchi method," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 121, no. March, pp. 249–260, 2018.
- [16] R. Viswanathan, S. Ramesh, and V. Subburam, "Measurement and optimization of performance characteristics in turning of Mg alloy under dry and MQL conditions," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 120, no. November 2017, pp. 107–113, 2018.
- [17] P. B. Patole and V. V. Kulkarni, "Optimization of Process Parameters based on Surface Roughness and Cutting Force in MQL Turning of AISI 4340 using Nano Fluid," *Manuf. Rev.*, vol. 5, pp. 104–112, 2018.
- [18] S. M. Agrawal and N. G. Patil, "Experimental study of non edible vegetable oil as a cutting fluid in machining of M2 Steel using MQL," *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 207–212, 2018.
- [19] A. Marques, C. Guimarães, R. B. da Silva, M. da Penha Cindra Fonseca, W. F. Sales, and Á. R. Machado, "Surface Integrity Analysis of Inconel 718 after Turning with Different Solid Lubricants Dispersed in Neat Oil Delivered by MQL," *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 609–620, 2016.
- [20] L. T. Tunc, Y. Gu, and M. G. Burke, "Effects of Minimal Quantity Lubrication (MQL) on Surface Integrity in Robotic Milling of Austenitic Stainless Steel," *Procedia CIRP*, vol. 45, pp. 215–218, 2016.
- [21] M. Hadad and A. Sharbati, "Thermal Aspects of Environmentally Friendly-MQL Grinding Process," *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 509–515, 2016.
- [22] U. M. R. Paturi, Y. R. Maddu, R. R. Maruri, and S. K. R. Narala, "Measurement and Analysis of Surface Roughness in WS 2 Solid Lubricant Assisted Minimum Quantity Lubrication (MQL) Turning of Inconel 718," *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 138–143, 2016.
- [23] E. A. Rahim, M. R. Ibrahim, A. A. Rahim, S. Aziz, and Z. Mohid, "Experimental investigation of minimum quantity lubrication (MQL) as a

- sustainable cooling technique,” *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 351–354, 2015.
- [24] S. Ekinovic, H. Prcanovic, and E. Begovic, “Investigation of Influence of MQL Machining Parameters on Cutting Forces during MQL Turning of Carbon Steel St52-3,” *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 608–614, 2015.
 - [25] S. B. Kedare, D. R. Borse, and P. T. Shahane, “Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Surface Roughness of Mild Steel of 15HRC on Universal Milling Machine,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpc, pp. 150–153, 2014.
 - [26] O. Pereira *et al.*, “The Use of Hybrid CO₂ +MQL in Machining Operations,” *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 492–499, 2015.
 - [27] B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, and M. Yang, “Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 29, no. 4, pp. 1084–1095, 2016.
 - [28] L. Kirkhorn, O. Gutnichenko, S. Bihagen, and J. E. Ståhl, “Minimum quantity lubrication (MQL) with carbon nanostructured additives in sheet metal forming,” *Procedia Manuf.*, vol. 25, pp. 375–381, 2018.
 - [29] A. Santana, P. Afonso, A. Zanin, and R. Wernke, “An Experimental Investigations in Turning of Incoloy 800 in Dry , and Flood Cooling Conditions,” *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 350–357, 2018.
 - [30] N. Banerjee and A. Sharma, “A comprehensive assessment of minimum quantity lubrication machining from quality, production, and sustainability perspectives,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 17, 2018.
 - [31] K. Kishore Joshi, R. K. Behera, and Anurag, “Effect of minimum quantity lubrication with Al₂O₃ Nanofluid on Surface Roughness and its prediction using hybrid fuzzy controller in turning operation of Inconel 600,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 20660–20668, 2018.
 - [32] V. K. Pasam, R. Srikanth Revuru, and S. Gugulothu, “Comparing the performance & viability of nano and microfluids in minimum quantity lubrication for machining AISI1040 steel,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 8016–8024, 2018.
 - [33] A. Mehta *et al.*, “Influence of sustainable cutting environments on cutting forces, surface roughness and tool wear in turning of Inconel 718,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 6746–6754, 2018.
 - [34] G. De Paula Oliveira, M. C. Fonseca, and A. C. Araujo, “Residual stresses and cutting forces in cryogenic milling of Inconel 718,” *Procedia CIRP*, vol. 77, no. Hpc, pp. 211–214, 2018.
 - [35] O. Gutnichenko, V. Bushlya, S. Bihagen, and J. E. Ståhl, “Influence of graphite nanoadditives to vegetable-based oil on machining performance when MQCL assisted hard turning,” *Procedia CIRP*, vol. 77, pp. 437–440, 2018.

- [36] T. Lv, S. Huang, E. Liu, Y. Ma, and X. Xu, "Tribological and machining characteristics of an electrostatic minimum quantity lubrication (EMQL) technology using graphene nano-lubricants as cutting fluids," *J. Manuf. Process.*, vol. 34, no. February, pp. 225–237, 2018.
- [37] K. Aslantas and A. Çiçek, "The effects of cooling/lubrication techniques on cutting performance in micro-milling of Inconel 718 superalloy," *Procedia CIRP*, vol. 77, no. Hpc, pp. 70–73, 2018.
- [38] J. P. Ajithkumar and M. Anthony Xavier, "Influence of Nano Lubrication in Machining Operations-A Review," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 11185–11192, 2018.
- [39] S. Kieren-Ehse, M. Bohley, P. Arrabiyeh, B. Kirsch, and J. C. Aurich, "Influence of different metal working fluids when micro machining cp-titanium with 50 μm diameter micro end mills," *Procedia CIRP*, vol. 71, pp. 198–202, 2018.
- [40] A. K. Sharma, R. K. Singh, A. R. Dixit, and A. K. Tiwari, "Novel uses of alumina-MoS 2 hybrid nanoparticle enriched cutting fluid in hard turning of AISI 304 steel," *J. Manuf. Process.*, vol. 30, pp. 467–482, 2017.
- [41] A. S. Abdul Sani, E. A. Rahim, S. Sharif, and H. Sasahara, "Machining performance of vegetable oil with phosphonium- and ammonium-based ionic liquids via MQL technique," *J. Clean. Prod.*, vol. 209, pp. 947–964, 2019.
- [42] L. Samylingam *et al.*, "Thermal analysis of cellulose nanocrystal-ethylene glycol nanofluid coolant," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 127, pp. 173–181, 2018.
- [43] M. Venkata Ramana, "Optimization and Influence of Process Parameters on Surface Roughness in Turning of Titanium Alloy under Different Lubricant Conditions," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 8328–8335, 2017.
- [44] K. C. Sekhar, V. V. Rama Reddy, S. Srikanth, M. Daniel, and S. Kumar, "Investigating the Effect of Nano Crystalline MoS₂ Particles on the Surface Integrity of Turned Components," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 7527–7532, 2017.
- [45] S. Kumar, D. Singh, and N. S. Kalsi, "Analysis of Surface Roughness during Machining of Hardened AISI 4340 Steel using Minimum Quantity lubrication," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 3627–3635, 2017.
- [46] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, A. R. Dixit, and R. K. Singh, "Investigation into Performance of SiO₂ Nanoparticle Based Cutting Fluid in Machining Process," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 133–141, 2017.
- [47] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, R. K. Singh, and A. R. Dixit, "Tribological Investigation of TiO₂ Nanoparticle based Cutting Fluid in Machining under Minimum Quantity Lubrication (MQL)," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 6, pp. 2155–2162, 2016.

- [48] A. K. Sharma, R. K. Singh, A. R. Dixit, and A. K. Tiwari, "Characterization and experimental investigation of Al₂O₃ nanoparticle based cutting fluid in turning of AISI 1040 steel under minimum quantity lubrication (MQL)," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 6, pp. 1899–1906, 2016.
- [49] F. Berzosa, B. De Agustina, and E. M. Rubio, "Tool Selection in Drilling of Magnesium UNSM11917 Pieces under Dry and MQL Conditions Based on Surface Roughness," *Procedia Eng.*, vol. 184, pp. 117–127, 2017.
- [50] R. W. Maruda, G. M. Krolczyk, P. Nieslony, S. Wojciechowski, M. Michalski, and S. Legutko, "The influence of the cooling conditions on the cutting tool wear and the chip formation mechanism," *J. Manuf. Process.*, vol. 24, pp. 107–115, 2016.
- [51] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, "Minimum quantity lubrication for machining operations," no. Kasim, 2010.
- [52] A. Duchosal, R. Serra, R. Leroy, and C. Louste, "Numerical steady state prediction of spitting effect for different internal canalization geometries used in MQL machining strategy," *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 149–161, 2015.
- [53] R. K. Singh, A. K. Sharma, A. R. Dixit, A. K. Tiwari, A. Pramanik, and A. Mandal, "Performance evaluation of alumina-graphene hybrid nano-cutting fluid in hard turning," *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 830–845, 2017.
- [54] B. Li *et al.*, "Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids for Ni-based alloys using vegetable oil," *J. Clean. Prod.*, vol. 154, pp. 1–11, 2017.
- [55] Y. Wang *et al.*, "Experimental evaluation on tribological performance of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication grinding with different concentrations of Al₂O₃ nanofluids," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 3571–3583, 2017.
- [56] S. Guo *et al.*, "Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy," *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 1060–1076, 2017.
- [57] A. Iqbal, K. A. Al-Ghamdi, and G. Hussain, "Effects of tool life criterion on sustainability of milling," *J. Clean. Prod.*, vol. 139, pp. 1105–1117, 2016.
- [58] S. S. Chatha, A. Pal, and T. Singh, "Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 537–545, 2016.
- [59] W. T. Huang, W. S. Liu, and D. H. Wu, "Investigations into lubrication in grinding processes using MWCNTs nanofluids with ultrasonic-assisted dispersion," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1553–1559, 2016.
- [60] M. M. Molaie, J. Akbari, and M. R. Movahhedy, "Ultrasonic assisted grinding process with minimum quantity lubrication using oil-based nanofluids," *J. Clean. Prod.*, vol. 129, pp. 212–222, 2016.

- [61] K. Gupta, R. F. Laubscher, J. P. Davim, and N. K. Jain, "Recent developments in sustainable manufacturing of gears: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 3320–3330, 2016.
- [62] Chetan, S. Ghosh, and P. Venkateswara Rao, "Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 100, pp. 17–34, 2015.
- [63] Y. Zhang *et al.*, "Experimental study on the effect of nanoparticle concentration on the lubricating property of nanofluids for MQL grinding of Ni-based alloy," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 232, pp. 100–115, 2016.
- [64] Y. Zhang, C. Li, D. Jia, D. Zhang, and X. Zhang, "Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 99, pp. 19–33, 2015.
- [65] K. H. Park, J. Olortegui-Yume, M. C. Yoon, and P. Kwon, "A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL)," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 50, no. 9, pp. 824–833, 2010.
- [66] R. W. Maruda *et al.*, "A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL)," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 100, pp. 81–92, 2016.
- [67] D. Carou, E. M. Rubio, C. H. Lauro, and J. P. Davim, "The effect of minimum quantity lubrication in the intermittent turning of magnesium based on vibration signals," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 94, pp. 338–343, 2016.
- [68] M. H. S. Elmunafi, D. Kurniawan, and M. Y. Noordin, "Use of castor oil as cutting fluid in machining of hardened stainless steel with minimum quantity of lubricant," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 408–411, 2015.
- [69] X. Zhang *et al.*, "Lubricating property of MQL grinding of Al₂O₃/SiC mixed nanofluid with different particle sizes and microtopography analysis by cross-correlation," *Precis. Eng.*, vol. 47, pp. 532–545, 2017.
- [70] K. K. Gajrani, P. S. Suvin, S. V. Kailas, and M. R. Sankar, "Hard machining performance of indigenously developed green cutting fluid using flood cooling and minimum quantity cutting fluid," *J. Clean. Prod.*, vol. 206, pp. 108–123, 2019.
- [71] A. Kumar, S. Ghosh, and S. Aravindan, "Grinding performance improvement of silicon nitride ceramics by utilizing nanofluids," *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 16, pp. 13411–13421, 2017.
- [72] S. L. M. Ribeiro Filho, J. T. Vieira, J. A. de Oliveira, É. M. Arruda, and L. C. Brandão, "Comparison among different vegetable fluids used in minimum quantity lubrication systems in the tapping process of cast aluminum alloy," *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 1255–1262, 2017.
- [73] M. S. Najiha, M. M. Rahman, and K. Kadirgama, "Performance of water-based TiO₂ nanofluid during the minimum quantity lubrication

- machining of aluminium alloy, AA6061-T6”, *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 1623–1636, 2016.
- [74] M.Ak, “AA206 Alüminyum Döküm Alaşımında Empürite Demirin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kasım 2012.
- [75] A. A. Eker, “Al ve Alaşımları”, Ders Notları ,pp. 1–16,Kasım 2008.
- [76] G.E.Totten, D.S.Mackenzie,“Handbook of Aluminum”,volume 2, 2003.
- [77] M. G. Alper, “Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş 5052-5182 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetlerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi , Ekim 2003.
- [78] J. G. Kaufman and A. S. M. International, *Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys*, Ocak 2000.
- [79] R. Yılmaz, Z. Barlas, “Alüminyum & Alaşımları & Üretimi”,Ders Notları, Mayıs 2010
- [80] <http://www.world-aluminium.org/statistics/#histogram> ,2 Mayıs 2019.
- [81] <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx> ,2 Mayıs 2019.
- [82] TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Alüminyum Komisyonu, “Alüminyum Raporu” , pp. 1–43 , Mayıs 2019.
- [83] R. Ünal , “ İmalat Teknolojileri” , Ders Notları .pp. 1–23,Mayıs 2019.
- [84] V.P.Astakhov, “Tribology of Metal Cutting”, Academic Press Elsevier, pp. 271–291, Ocak 2006.
- [85] E. M. Trent, P. K. Wright , “ Metal Cutting” , vol. 7, no. 9. 1987.
- [86] D. A.Stephenson , J. S.Agapiou , “ Metal Cutting Theory and Practice” CRC Press ,third edition , 2016.
- [87] M. Groover, “Fundamentals of Modern Manufacturing Materials,Processes and Systems,” *John Wiley Sons*, p. 493, 4.th edition, 2010.
- [88] Y.Altıntaş , “ Manufacturing Automotion” , Cambridge University Press, vol. 73, second edition ,2012.
- [89] M. Özdemir, U. Erten, “Talasli İmalat Sirasinda Kesici Takimda Meydana Gelen Hasar Mekanizmalari Ve Takim Hasarini Azaltma Yöntemleri,” *Havacılık Ve Uzay Teknol. Derg. Cilt 1 Sayı 1*, no. Ocak, 2003.
- [90] <http://www.atakulmotor.com/urunler.htm?kid=216>, 1 Mayıs 2019.
- [91] <https://www.ceratizit.com/en/products/metal-cutting/>, 2 Mayıs 2019.
- [92] <https://inovatifkimyadergisi.com/molibden-disulfur>, 2 Mayıs 2019.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: congerdervis@gmail.com

Makaleler

1. D.B.Conger, U. Emiroglu, A. Uysal,E. Altan, “ An Experimental Study on Cutting Forces and Surface Roughness in MQL Milling of Aluminum 6061” , Proceedings of International Scientific Conference Machines, Technologies , Materials, pp:67-70 , Mart 2019.