

**MİKRO DELİK DELME İŞLEMİNDE  
Ti6Al4V ALAŞIMI İÇİN KESME  
ŞARTLARININ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS

Mustafa PERÇİN

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran, 2015

Bu tez çalışması 213M572 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS**

**MİKRO DELİK DELME İŞLEMİNDE Ti6Al4V ALAŞIMI İÇİN**  
**KESME ŞARTLARININ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Mustafa PERÇİN**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran, 2015**

## TEZ ONAY SAYFASI

Mustafa PERÇİN tarafından hazırlanan "Mikro delik delme işleminde Ti6Al4V alaşımı için kesme şartlarının etkisinin araştırılması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 16/06/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

**Başkan** : Prof.Dr. Kubilay ASLANTAŞ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi,

**Üye** : Doç.Dr. Adem ÇİÇEK  
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik ve  
Doğa Bilimleri Fakültesi,

**Üye** : Yrd.Doç.Dr. İsmail UCUN  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi,

İmza

İmza

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

10/06/2015

Mustafa PERÇİN

**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

MİKRO DELİK DELME İŞLEMİNDE Ti6Al4V ALAŞIMI İÇİN KESME  
ŞARTLARININ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa PERÇİN  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
**Danışman:** Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Bu çalışmada, farklı kesme ve soğutma koşullarında yapılan delik delme işleminde delik sonrasında meydana gelen çapak boyutu, delik yüzey kalitesi, delme işlemi boyunca oluşan kuvvet ve tork' un değişimi detaylı olarak araştırılmıştır. Bu amaçla özellikle havacılık ve biyomedikal sektöründe sıklıkla kullanılan Ti-6Al-4V malzemesi iş parçası olarak seçilmiştir. Çalışmada dört farklı soğutma yöntemi kullanılmış olup, delik giriş ve çıkışlarında meydana gelen çapak oluşumları 3D profilometre cihazı ile tespit edilmiştir. Ayrıca soğutma yönteminin delik yüzey kalitesi üzerindeki etkisi ve takımda meydana gelen hasar tipleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; mikro delik delme işleminde kullanılan soğutma yönteminin, çapağın azaltılmasında, önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Buna karşılık kriyojenik soğutmanın, meydana gelen çapak oluşumunu azalttığı söylenebilir. Bununla birlikte, kullanılan soğutma yönteminin takım aşınması üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Özellikle bor yağı ve MQL ile yapılan delik delme işlemlerinde takım aşınmasına bağlı takım çapı küçülmesi minimum seviyede, fakat kuru kesme ve kriyojenik delik delme işlemlerinde takımda meydana gelen çap küçülmesinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Aşınmaya bağlı olarak oluşan bu çap azalması abrasiv aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak gerçekleşmiştir.

**2015, xi + 65 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Mikro delik delme 1, Ti-6Al-4V 2, Minimal miktar yağlama 3, Kriyojenik soğutma 4, Kesme kuvvetleri 5

**ABSTRACT**  
M.Sc Thesis

MICRO DRILLING OPERATION FOR Ti6Al4V ALLOY TO INVESTIGATE THE  
EFFECTS OF CUTTING CONDITIONS

Mustafa PERÇİN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

In this study, the size of burrs occurring in the hole after drilling operations conducted in different conditions of cooling and cutting, hole surface roughness, cutting force and torque 's changes are investigated in detail. For this purpose, especially in the aerospace and biomedical sectors commonly used Ti-6Al-4V material is chosen as the workpiece. The four different cooling methods used in this study, the amount of burr holes occurring in the input and output were determined by 3D profilometer. Also the cooling process influence the surface quality of the hole and the tool damage occurring in the types have been identified. Obtained results; the cooling techniques used in the micro drilling operation, to reduce the burr, showed to have a significant not effect. But to say that the cryogenic cutting burrs less than the amount obtained as a result. The tool wear of the used cooling method would not be wrong to say that significant influence. Flooded, and in particular oil drilling holes with MQL significant change has occurred in the tool diameter. But dry cutting and wear occurring on the team in cryogenic drilling operation has been found to occur as a result of the more abrasive wear mechanism.

**2015, xi + 65 pages**

**Key Words:** Micro drilling 1, Ti-6Al-4V 2, MQL 3, Cryogenic cooling 4, Cutting force

5

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması esnasında fikir, bilgi ve tecrübelerinden fazlasıyla faydalandığım, kişiliğiyle bana rehberlik eden, kıymetli danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deneylein gerçekleştirilmesi, tez yazım aşaması gibi birçok konuda yardımını esirgemeyen Arő. Grv. Dr. İrfan UCUN' a teşekkür ederim.

Bu aşamaya gelmemde ve yetişmemde emeklerini hiçbir şekilde ödeyemeyeceğim aileme, Őükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu tezi 213M572 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK' a teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa PERÇİN  
AFYONKARAHİSAR, 2015

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	3
2.1 Minyatür Ürün İmalatı ve Üretim Yöntemleri .....	3
2.2 Mikro Delik Delme .....	6
2.2.1 Kesme parametrelerinin seçimi .....	7
2.2.2 Çapak oluşumu ve delik kalitesi.....	7
2.2.3 Yüzey bütünlüğü .....	9
2.2.4 Delik delme işleminde Takım aşınması.....	10
2.2.5 Soğutma yöntemleri.....	13
2.3 Mikro delme işleminde Kullanılan Kesici Takımlar ve Tezgahlar .....	18
2.4 Ti6Al4V Alaşımı ve işlenebilirliği .....	20
3. MATERYAL ve METOT .....	24
3.1 Deney düzeneği ve kesme parametreleri .....	24
3.2 Kesici takım ve iş parçası.....	26
3.3 Dinamometre ve data alma sistemi .....	28
3.4 Soğutma sistemlerinin tasarımı .....	29
3.5 Delik yüzey bütünlüğü ve mikrosertlik.....	31
3.6 İş parçası yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi .....	34
4. BULGULAR .....	36
4.1 Delme kuvveti ve torkun değişimi.....	36
4.2 Yüzey pürüzlülüğünün değişimi.....	40
4.3 Çapak oluşumu ve etkileyen parametrelerin analizi .....	42
4.4 Takım aşınması.....	44
4.5 Yüzey bütünlüğü ve mikro sertlik değişimi .....	50
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	54



6. KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	64

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

V	Vanadyum
V <sub>c</sub>	Kesme hızı
f <sub>z</sub>	Diş başına düşen ilerleme
f	İlerleme miktarı
LN <sub>2</sub>	Azot
WC	Tungsten karbür
Co	Kobalt
Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
α	Alfa
β	Beta
H <sub>2</sub> O	Su
H	Hidrojen
N	Devir
°C	Sıcaklık birimi (Santigrat derece)
TiAlN	Titanyum alüminyum nitrid
TiN	Titanyum nitrid
C	Karbon
Fe	Demir
O	Oksijen

### Kısaltmalar

---

TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
TUAM	Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi
CNC	Computer Numerical Controlled (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
MLQ	Minimum Quantity Lubrication (Minimal Miktar Yağlama)
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopu)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
SDÜ	Süleyman Demirel Üniversitesi
3D	Üç Boyutlu
N	Newton
kN	Kilonewton
Nm	Newton metre
µm	Mikronmetre
dk	Dakika
sn	Saniye
m	Metre
mm	Milimetre
dev	Devir

Hv	Vickers sertliği
Mpa	Mega paskal
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
vb	ve benzeri
vd	ve diğerleri
ml	Mili litre
h	Saat
kW	Kilowatt
kHz	Kilo hertz
Fx	X ekseninde oluşan kuvvet
Fy	Y ekseninde oluşan kuvvet
Fz	Z ekseninde oluşan kuvvet
Mx	X ekseninde oluşan moment
My	Y ekseninde oluşan moment
Mz	Z ekseninde oluşan moment
fn	Doğal frekans
B	Bor yağı
Cry	Kriyojenik
K	Kuru kesme
Ri	İlk ap
Rf	Son ap

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Minyatür parça örnekleri. ....	3
Şekil 2.2 Mikro süper plastik ekstrüzyon ile mikro dişli şaft üretim makinası.....	4
Şekil 2.3 Mikro ve makro delik delme işleminde kullanılan matkap uçları. ....	6
Şekil 2.4 Çapak çeşitleri.....	8
Şekil 2.5 Çapak oluşum mekanizması .....	9
Şekil 2.6 Aşınmış mikro takım görüntüleri.....	11
Şekil 2.7 Ortalama yüzey pürüzlülüğü .....	12
Şekil 2.8 Ortalama tork.....	15
Şekil 2.9 Maksimum ilerleme kuvveti.....	17
Şekil 2.10 Hibrit soğutmanın etkisi .....	18
Şekil 2.11 Mikro işleme tezgahı.....	19
Şekil 2.12 Titanyumdan yapılan mikro aksiyel kalp pompası .....	21
Şekil 2.13 Jet motorlarında titanyum alaşımının kullanım yerleri .....	22
Şekil 3. 1 Mikro delme işleminde kullanılan deney düzeneği .....	24
Şekil 3. 2 Bilgisayar kontrollü mikro işleme merkezi. ....	25
Şekil 3. 3 Ön deneylerle kesme parametrelerinin belirlenmesi. ....	26
Şekil 3. 4 İş parçası şematik gösterimi. ....	27
Şekil 3. 5 Kesici takım geometrik şekli. ....	27
Şekil 3. 6 Kesme kuvveti ve tork ölçümü için kullanılan dinamometre.....	28
Şekil 3. 7 Delme işleminde bor yağı uygulanması. ....	29

<b>Şekil 3. 8</b> MQL sistem için deney düzeneği.....	30
<b>Şekil 3. 9</b> Kriyojenik sistemin şematik gösterimi. ....	30
<b>Şekil 3. 10</b> Yüzey bütünlüğü ve mikro sertlik ölçümü için deney numuneleri ve ölçüm noktaları.....	31
<b>Şekil 3. 11</b> Numuneleri bakalit kalıba almak için kullanılan bakalitleme cihazı. ....	32
<b>Şekil 3. 12</b> Parlatma işleminde kullanılan cihaz.....	33
<b>Şekil 3. 13</b> Tarama elektron mikroskobu. ....	33
<b>Şekil 3. 14</b> Mikro sertlik ölçümü için kullanılan cihaz.....	34
<b>Şekil 3. 15</b> Delinen mikro deliklerin delik yüzeylerinin üç boyutlu yüzey analizi. ....	35
<b>Şekil 3. 16</b> Mikro deliklerin delik yüzeylerinin topoğrafyası. ....	35
<b>Şekil 3. 17</b> Delik çıkışındaki çapağın profilometre analizi. ....	35
<b>Şekil 4. 1</b> Delme esnasında oluşan kuvvet ve tork ölçümleri.....	36
<b>Şekil 4. 2</b> Takımın iş parçasını kavramaya başladığı anda oluşan tork değeri. ....	37
<b>Şekil 4. 3</b> Kuvvet ve tork grafikleri. ....	39
<b>Şekil 4. 4</b> Farklı soğutma koşulları için kesme hızı ve ilerleme değerine bağlı olarak ilerleme kuvvetinin değişimi. ....	40
<b>Şekil 4. 5</b> Farklı soğutma sistemlerinin delik yüzey kalitesi üzerindeki etkileri.....	41
<b>Şekil 4. 6</b> Delik çıkış yüzeyinde en çok karşılaşılan çapak türleri ve çapak oluşumunun şematik ifadesi .....	42
<b>Şekil 4. 7</b> Delik çıkış yüzeyindeki çapak yüksekliğinin soğutma sıvısıyla değişimi. ...	43
<b>Şekil 4. 8</b> Kesme hızı ve ilerlemenin değişimine bağlı çapak oluşumu .....	44
<b>Şekil 4. 9</b> Mikro matkap ta 60 adet delik sonrasında meydana gelen takım yuvarlanma çapı değişimi.....	46

<b>Şekil 4. 10</b> Mikro matkapta meydana gelen aşınma tipi ve mekanizmaları. ....	48
<b>Şekil 4. 11</b> Kesici takım üzerindeki EDX analizi.....	49
<b>Şekil 4. 12</b> Farklı soğutma koşullarındaki mikro sertlik değişimi.....	51
<b>Şekil 4. 13</b> Kesme hızının mikro sertlik değişimine etkisi. ....	52
<b>Şekil 4. 14</b> Kesme koşullarının mikro yapı üzerindeki etkileri.....	53

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 3. 1</b> Deneysel çalışmalar boyunca kullanılan kesme parametreleri. ....	25
<b>Çizelge 3. 2</b> Ti-6Al-4V kimyasal bileşimi .....	26
<b>Çizelge 3. 3</b> Titanyum alaşımının mekanik özellikleri .....	26
<b>Çizelge 3. 4</b> Kesici takımın geometrik ölçüleri. ....	27
<b>Çizelge 3. 5</b> Kistler 9119AA1 mini dinamometre teknik özellikleri.....	28

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişimin hızla ilerlediği çağımızda, endüstriden beklentiler artmaktadır. Bu gelişmeler özellikle biyomedikal, havacılık, uzay ve askeri alanda meyvelerini vermektedir. Bu endüstriyel alanların temel gereksinimleri hafif ve yüksek mukavemete sahip yapılarıdır. Titanyum ve alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek ısı ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı ihtiyaca cevap verebilecek niteliktedir. Titanyum alaşımlarının bu özelliklere sahip olması ve yüksek maliyetlerine rağmen oldukça tercih edilmektedir (Kıvak 2012).

Titanyum alaşımı endüstrinin pek çok alanından talep edilmesini sağlayan üstün özellikleri bu malzemelerin şekillendirilmesinde bir engel olarak ortaya çıkmaktadır. Pek çok imalat prosesinin uygulanabildiği Ti-6Al-4V alaşımı kullanılan kesici takım ile kimyasal etkileşime yatkınlığı, ısı iletiminin düşük olması, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruması gibi nedenlerden dolayı işlenmesi zor olan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu yüzden birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir (Ezugwu and Wang 1995, Sharif *et al.* 2012, Ulutan and Ozel 2011 ).

Delik delme operasyonları havacılık sanayinde sıklıkla kullanılan bir imalat prosesidir. Özellikle uçak gövdelerinin birleştirilmesi işlemlerinde perçinli birleştirmeler için delik delme gereksinimi bu sektörde delme operasyonlarının sık kullanılmasına neden olmaktadır. Uçak gövdelerine oldukça fazla miktarda uygulanan bu işlemin verimli bir şekilde yapılması önemlidir. Bu yüzden verimli bir delik delme işlemi optimum imalat koşullarının tespit edilmesi ve imalat işleminin iyi bir şekilde planlanmasına bağlıdır. Bu sebeple delik delme işlemi birçok akademik çalışmaya konu oluyor ve olmaya devam edecektir (Perçin *et al.* 2014).

Mikro mekanik imalatta kesici kenar radüsünün deforme olmamış talaş kalınlığına oranı oldukça büyüktür. Bu durum özellikle düşük ilerleme değerlerinde düzgün bir talaş oluşumuna imkan vermemektedir. Bu yüzden bazı problemlerle karşılaşılmaktadır. Bu problemler, hızlı bir takım aşınması ve çapak oluşumunun artması, yüksek kuvvet oluşumu olarak sıralanabilir. Takımın hızlı aşınması işlenen yüzeyin kalitesini olumsuz etkilerken çapak oluşumunu da arttırmaktadır. Mikro mekanik imalatta işlenen geometri



boyutu çok küçük olduğundan dolayı ikinci bir işlemle yüzey kalitesini arttırmak ve çapak temizlemek oldukça zordur ( Zhaojun *et al.* 1998, Kim *et al.* 2001, Bhandri 2014, Perçin *et al.* 2014 ).

Talaşlı imalatta soğutma sistemlerinin kullanılması takım ömrüne olumlu etki sağlamaktadır. Kullanılan soğutma sistemine bağlı olarak takımın ömrünün artmasıyla birlikte yüzey kalitesinin iyileşmesi de söz konusudur. Geleneksel delik delme operasyonlarında, soğutma sisteminin etkisinin araştırıldığı pek çok çalışma vardır (Yuan *et al.* 2011, Rahim and Sasahara 2011, Hong 2006 ). Xia (2014)'nın yaptığı bir çalışmada kriyojenik soğutmanın ilerleme kuvveti ve torkunu arttırdığı saptanmıştır. Buna karşın minimal miktar yağlama sisteminin (MQL) kullanılması ilerleme kuvveti ve torkunu azaltmıştır. Yağlama yönteminin delik kalitesini etkilediğini Bhowmicks (2010)' de saptamıştır.

Bu çalışmada ise endüstride sıkça kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının mikro şartlarda delinebilirliği incelenmiştir. Bunun için farklı kesme parametrelerinde ve değişik soğutma sistemleri kullanılarak delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Delme işleminde verimlilik kriteri olarak, delme kuvveti, tork oluşumu, takım aşınması ve çapak oluşumu dikkate alınmıştır. Bu çalışmayla birlikte işlenebilirliği oldukça zor olan Ti-6Al-4V malzemesinin mikro boyutta delinmesi işleminde uygun delme koşulları belirlenmiştir.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Minyatür Ürün İmalatı ve Üretim Yöntemleri

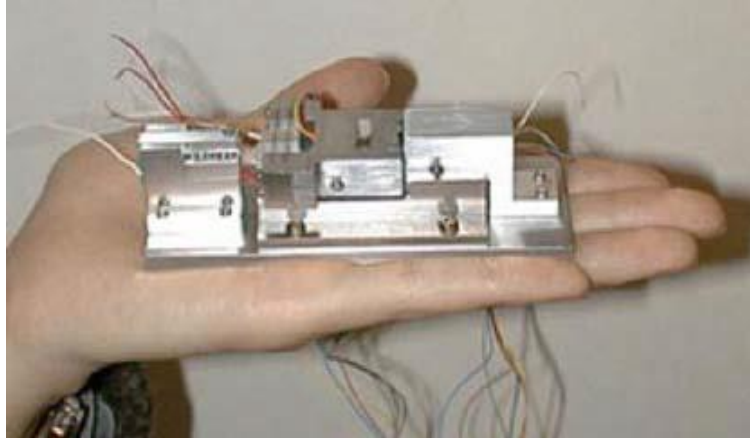
Minyatür boyuttaki ürünler teknolojinin hızla gelişmesiyle ortaya çıkmışlardır. Endüstriyel ürünlerin küçültülmesi öncelikle o sistemin tüm bileşenlerinin minyatürleşmesini gerektirir. Boyutları küçük, hafif ve dayanıklı kompakt ürünlerin ortaya çıkmasıyla birlikte minyatürleşme eğilimi başlamıştır. Bunların başında cep telefonları, bilgisayarlar, tıbbi ürünler gibi birçok sektörde bu minyatürleştirme adımı hızla ilerlemiştir. Bunun yanı sıra farklı endüstriyel ürünlerde bu durumunun etkisi görülebilir (bağlantı elemanları, pimler, mikro vidalar, mikro boyutta devreler için kurşun plakalar, prizler vs.) (Şekil 2.1) (Engel and Eckstein 2002).



Şekil 2.1 Minyatür Parça Örnekleri (Engel and Eckstein 2002).

Üretim sistemlerinin minyatürleştirilmesi kavramı kullanılan makro boyuttaki sistemlerin minyatür imalatına uygunlaştırılması ya da yeni teknolojilerle değiştirilmesini gerektirir (Şekil 2.2). Minyatürleşme süreciyle birlikte birçok problem ortaya çıkmaktadır. Mikro üretim sürecinde yüksek ürün kalitesi elde edebilmek için yüksek hassasiyette ekipmanlar kullanılması gerekmektedir. Cihazlardan istenen hassasiyet ve doğruluk seviyelerine ulaşmak için mekanik sistem ve üretim toleransları

büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte tasarımın tümü ve üretim süreçleri dikkatle değerlendirilmeli ve planlanmalıdır (Kunt *et al.* 2010).



**Şekil 2.2** Mikro süper plastik ekstrüzyon ile mikro dişli şaft üretim makinası (Saotome and Iwazaki 2000).

Minyatürleşmeyle birlikte çeşitli imalat sorunları da beraberinde gelmiştir. Malzemelerin işleme performansları mikro ölçekli işleme esnasında parça boyutlarından dolayı etkilenebilir. Mikro parçaların işlenmesinde kullanılan mikro takımların çaplarının küçük olması imalat sırasında ani bir şekilde kırılmalarına neden olabilmektedir. Bu durum imalatı gerçekleştirilen ürünün kalitesini olumsuz etkilemekte ve imalat sürecini uzatmaktadır. Bu nedenle mikro boyutlu parçalar tasarlanırken işleme performansını etkileyen, malzemenin mekanik özellikleri de dikkate alınmak suretiyle imalat işlemi planlanmalıdır (Vollertsen *et al.* 2006).

Minyatür ürün imalatı için temel sorunlar, yüksek hassasiyetli takımların gerekliliği uygun tezgâhların seçilmesi, yüksek mukavemetli takım malzemelerinin gerekliliği mikro işlemeyi zorlaştıran unsurlardır (Geiger *et al.* 2001).

Mikro makineler ve bileşenleri için temel gereksinim yüksek çalışma frekanslarında dinamik stabilitesinin korunuyor olmasıdır. Ayrıca eksen hareketlerinde yüksek hassasiyetin sağlanmasıdır. Takım tutma sistemleri mikro işlemeye uygun olmalıdır. Mikro ürün imalatında diğer bir sorun uygun ölçme teknolojilerinin sınırlı sayıda ve özel olarak imal ediliyor olmasıdır. Ayrıca uygun ölçme sistemleri için bir proses kontrolü gereklidir (Geiger *et al.* 2001).

Mikro frezeleme işlemini diğer makro işleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında üretim hızı ve maliyeti açısından bir takım avantajları söz konusudur. Bunun yanı sıra mikro frezeleme işlemine özgü özellikle işlemin boyutundan kaynaklanan bir takım engeller söz konusudur. Malzeme deformasyon mekanizmaları ve malzeme takım ara yüzey koşulları malzeme özelliği karakterizasyonu, ilgili boyut etkileri, süreç modelleme ve analiz, şekillendirme sınırları yeterliliği, süreç tasarım optimizasyonu çalışılması gereken güncel konulardır (Qin 2006, Uzun *et al.* 2014, Imran *et al.* 2014 ).

Minyatür imalatındaki en önemli problemlerden biri de takımlarda oluşan hasarlardır. Özellikle işlenebilirliği zor olan malzemelerde takım ömrünün kısa olması ya da takımın beklenmedik kırılmaları mikro işlemin önündeki en önemli sorunlardır. Kesici takımın oluşan hasarlar ürünün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Özellikle mikro işlemede kritik bir parametre olan takımın kesme sırasındaki elastik deformasyon ürünün boyutlarında ve geometrisinde hatalara sebep olmaktadır (Uzun *et al.* 2011).

## 2.2 Mikro Delik Delme

Mikro matkaplar, mikro boyutta deliklerin delinmesinde kullanılmaktadırlar (Yücel and Çiçek 2011). Mikro delikler biyomedikal, elektronik, uzay endüstrisi gibi çeşitli sektörlerde önemini giderek arttırmaktadır. Mikro matkaplar genellikle  $10\mu$  - 1mm aralığındaki delikleri üretebilen kesici takımlardır. Şekil 2.3' te makro ve mikro boyuttaki matkaplar görülmektedir. Mikro delme işlemi için kullanılan matkap uçlarının kesit alanı oldukça küçük olduğu için matkap mukavemeti düşük olmaktadır. Mukavemet düşüklüğü sonucunda matkap uçlarının kırıldığı görülmektedir (Kudla 2006). Pratik kesme koşullarının çoğunda mikro matkap ömrü 1-100 delik arasındadır (Tansel and Rodriguez 1992).



Şekil 2.3 Mikro ve makro delik delme işleminde kullanılan matkap uçları.

Geleneksel delme işlemine göre mikro delme işlemi daha karmaşık ve daha zordur. Mikro delmenin zorlukları, hızlı takım aşınması, yüksek en boy oranı, yüksek sıcaklık, titreşimlerdir (Cheong *et al.* 1999). Mikro matkapların çaplarının küçük olması nedeniyle takım aşınmasını tespit etmek zor olduğu için işleme esnasında ani kırılmalar görülebilir (Yongchen *et al.* 2006, Okasha *et al.* 2010). Mikro takımların maliyeti düşüktür fakat takımın kırılması durumunda üretimi gerçekleştirilen ürüne ciddi zararlar verebilir (Guo 2004). İşleme esnasında oluşan talaşların da etkisiyle takım ucunda yüksek bir yanıl kuvvet oluşur. Yanıl kuvvet sonucu oluşan eğilme matkabın ucunun yanıl hareket etmesine neden olabilir. Bu hareket; delme pozisyonundan sapma, delik şeklinde ve boyutlarında bozulmalar ve kuvvetin artmasıyla birlikte takım kırılmasına sebep olan unsurlardan biridir (Okasha *et al.* 2010, Yang *et al.* 2002, Guo 2004).

### **2.2.1 Kesme parametrelerinin seçimi**

Kesme parametreleri tezgâh kapasitesine bağlı olarak, iş parçası ve takım performanslarını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Parametreler belirlenirken kullanılacak malzemenin ve kesici takımın özelliklerine en uygun olanlar belirlenmelidir. Özellikle titanyum alaşımı gibi işlenmesi zor olan malzemeler için kesme parametrelerinin seçimi çok önemlidir. Yanlış seçilen parametreler daha kesici takımın iş parçasına temas ettiği ilk anda bile takım hasarına neden olabilmektedir. Bu da beraberinde takım ve malzeme kaybına bağlı olarak yüksek maliyet getirebilir. Kesme parametrelerinin seçiminde işlenecek parçanın hassasiyeti de önemli bir faktördür. Yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu ve yüzey bütünlüğü kesme parametrelerinden etkilenen en önemli unsurlardır.

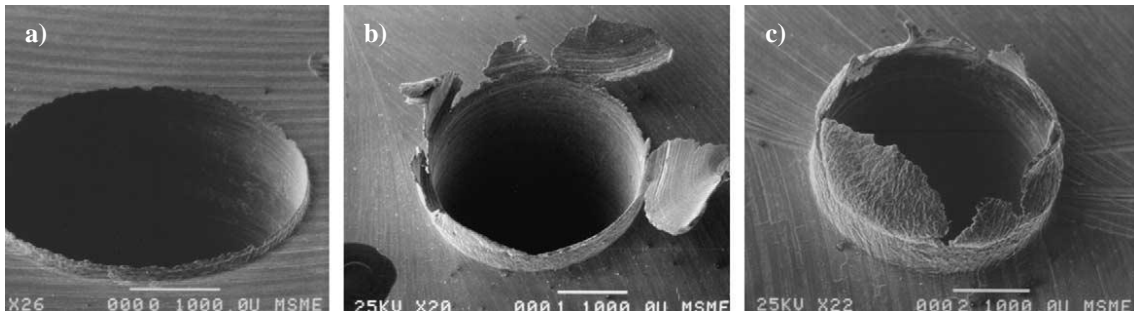
İlerleme hızı ve kesme derinliğinin hem takım ömrüne hem de kesme kuvvetine önemli bir etkisi bulunmaktadır. Yüksek ilerleme hızı kesme esnasında oluşan kuvvet ve torkları da artırabilir (Sharif *et al.*). Kesme kuvveti ve takım aşınması arasında doğrudan bir ilişki vardır. Yüksek takım aşınması kesme kuvvetinin artmasına neden olur (Yasir *et al.*). Kuvvetin artmasıyla da takım daha çabuk kırılabilir. Bu da iş parçası kaybına ve verimliliğin düşmesine neden olur. Bu sorunu azaltmak için delme işleminde, uygun stratejinin belirlenmesi gerekmektedir. Gagalama delme takımındaki ani kırılmaların önüne geçmek için tavsiye edilen bir stratejidir. Fakat gagalama delik delme, işleme süresini arttırır ve verimlilik azalır (Cheong 1999). İlerleme hızının bir diğer etkisi yüzey pürüzlülüğüdür. İlerlemenin artması yüzey pürüzlülüğünü arttırır fakat kesme hızı yüzey pürüzlülüğünü çok az etkiler. Yüksek kesme hızlarında kesme bölgesinde yüksek sıcaklık oluşur, bu sıcaklık kesme kuvvetlerinin düşmesine neden olurken takımın aşınmasına olumsuz etki gösterebilir (Kurt *et al.* 2012). Yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızlarında minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilir (Sharif and Rahim 2007).

### **2.2.2 Çapak oluşumu ve delik kalitesi**

Delme işlemlerinde delik kalitesi ve çapak oluşumu ürün kalitesini belirleyen önemli unsurlardandır. Çapak oluşumu çeşitli sorunlara neden olabilir. Çapaklar parçaların

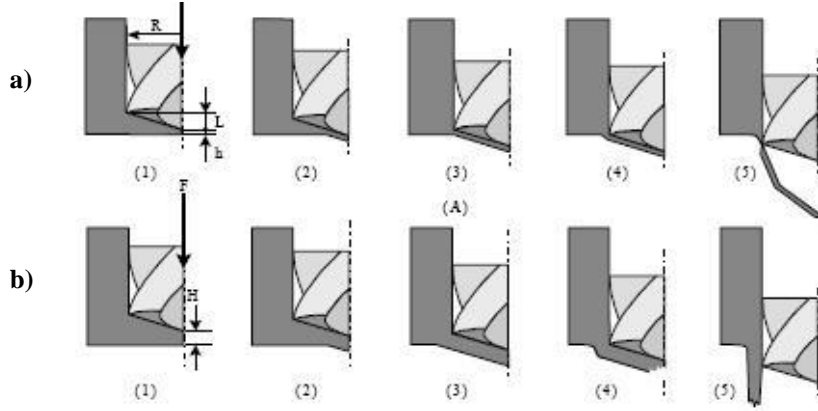
montajını zorlaştırabilir veya sıkışmalara neden olabilir. Sert bir yapıya sahip çapaklar kırılmalıdır ve iş parçasından koptuğu noktada mikro çatlaklar oluşturabilirler. Bu durum iş parçasının yorulma ömrünü olumsuz etkiler. Çapaklar birbiri üzerinde çalışan hareketli parçalarda ciddi hasarlara neden olabilir. İş parçası bir elektronik devre kartı ise oluşan çapak kısa devrelere neden olabilir. Bu nedenlerle çapakların temizlenmesi önemlidir. Çapakların temizlenmesi için ek bir işlem gerekebilir, bu da maliyeti artırır. Kesme parametreleri veya koşulları değiştirilerek oluşan çapağın şekli ve boyutu azaltılabilir. Zaman ve maliyet gerektiren çapak alma işlemlerine karşın daha küçük çapaklar tercih sebebidir (Kim *et al.* 2001 ).

Delik giriş ve çıkışlarında nispeten küçük, düzgün veya değişken çapak yükseklikleri oluşabilir. Matkap çıkış yüzeyine yaklaştığında kesici kenarın altında kalan malzeme deforme olmaya başlar. Delme esnasında plastik deformasyonun başladığı nokta ilerleme kuvvetine bağlıdır. Matkap ilerledikçe plastik deformasyon bölgesi merkezi matkabın kenarına doğru genişler (Şekil 2.5). Son olarak çapaktaki ilk patlama kesici kenarın ucunda ortaya çıkar. Yüksek ilerlemeye bağlı olarak yüksek ilerleme kuvveti oluşur, bu da süreksiz çapak oluşturur (Şekil 2.4). Matkap çıkış yüzeyinde çapak oluşmaması neredeyse imkânsızdır (Bhandari 2014).



Şekil 2.4 Çapak Çeşitleri a) Üniform b) Süreksiz c) Taç çapak (Kim *et al.* 2001).

Düşük devir ve düşük ilerleme hızında minimum çapak elde edilmektedir. Matkap uç açısının artırılması çapak boyutunu düşürmekte fakat 130 ° üzerindeki uç açılarında çapak boyutu tekrar artmaktadır. İlerleme hızının ve devirin düşük olduğu durumlarda (Şekil 2.5 a) genellikle üniform çapak oluşurken ilerleme hızı ve devirin artmasıyla (Şekil 2.5 b) taç tipi çapak oluşur (Bahçe *et al.* 2010).



Şekil 2.5 Çapak oluşum mekanizması (Astakhov 2007).

Talaş akışının rahat olduğu ve talaşın kesme bölgesinden kolaylıkla uzaklaştırılabildiği durumlarda, talaş ve iş parçası arasında sürtünme azalacağından delik yüzey kalitesine önemli bir katkı sağlar (Cheong *et al.* 1999). Tüm kesme hızlarında delik alt yüzeyinin aşırı plastik deformasyona uğrayacağı söylenebilir (Rahim *et al.* 2005). İlerlemenin artmasıyla, daha kısa sürede daha fazla talaş hacminin kaldırılması takım talaş ara yüzündeki sürtünmeyi de arttırarak, yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz bir etki yapar. Delik yüzeylerinin kalitesi kesme hızının arttırılması ile geliştirilebilir (Kurt *et al.* 2012, Rahim *et al.* 2005).

### 2.2.3 Yüzey bütünlüğü

Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak ürünlerden beklenen hassasiyet de gün geçtikçe artmaktadır. Hassasiyeti arttırmak için yüksek hassasiyetli imalat sistemlerinin geliştirilmesi işleme maliyetlerinin düşürülmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Delme işlemi ile oluşturulan deliklerden beklentiler kullanım alanlarına göre değişmektedir. Delik kalitesini belirleyen çeşitli kriterler söz konusudur. Bu kriterler;

- Delik çapı
- Dairesellikten sapma
- Çapak oluşumu
- Yüzey pürüzlülüğü

şeklinde sıralanabilir.

Bunların yanı sıra deliğin kalitesini belirleyen unsurlar arasında, kesici takım, iş parçası malzemesi, kesme parametreleri ve işleme şartları olmak üzere birçok parametre de mevcuttur (Kıvak 2012).



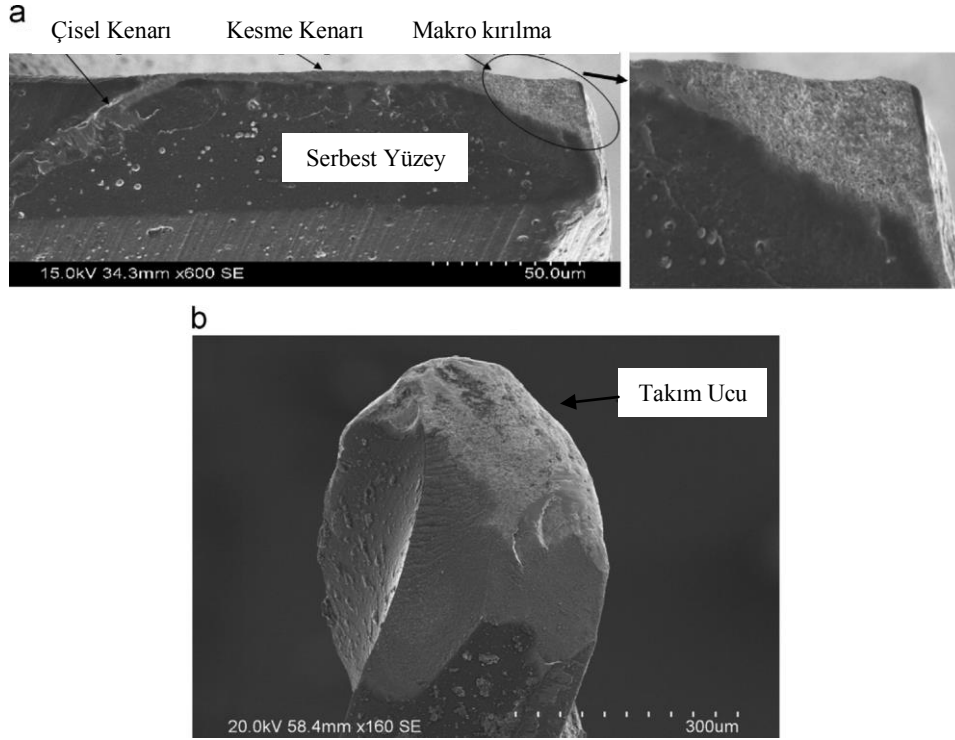
Mevcut çalışmalarda, matkabın deliğe ilk girişteki dinamik kararsızlıktan dolayı delik giriş çapı ve dairesellikten sapma miktarının delik çıkışına göre daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Delik giriş ve çıkışları boyunca ortaya çıkan bu karışık durum, delme işlemi esnasında delik duvarlarının deliğin çıkışına kadar kılavuzluk etmesinden kaynaklandığı söylenmektedir ( Mohammed 2001, Mohan and Shan 2006).

Delik geometrisinin bozulması genellikle sehim, titreşim, yetersiz yağlama, aşınma gibi nedenlerle ortaya çıkar. Takım önemli ölçüde aşınıp kırılma noktasına yaklaştığında yüzeyde boyutsal ve geometrik hatalar oluşur ( Cantero *et al.* 2005, Kıvak 2012).

İlerleme hızının ve delik uzunluğunun artmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri çok fazla değişim gösterir. Buna karşın kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğünü çok fazla etkilememektedir. Delik kenarında oluşan artık gerilmeler üzerinde kesme hızı ve ilerleme oldukça fazla etkilidir. Titanyum alaşımının delinmesinde delik yüzeylerinde yüzeye yakın bölgelerde çok küçük miktarda deforme olmuş beta fazı oluşur ancak faz dönüşümü gerçekleşmez. İşlenmiş yüzeylerin mikro sertlikleri delik yüzeyinde diğer bölgelere nazaran %70-90 oranında yükselmektedir ( Sun and Guo 2009, Kurt *et al.* 2012, Rahim *et al.* 2005).

#### **2.2.4 Delik delme işleminde Takım aşınması**

Titanyum alaşımlarının delinmesi sırasında takımın çeşitli aşınma türleri oluşabilir. Yapışma, yanak aşınması, çatlama ve takım kırılması başlıca hasar tipleridir (Sharif and Rahim 2007). Aşınma kesici kenarlar veya yan yüzeyler boyunca oluşur (Şekil 2.6). Kesme hızının artması serbest yüzey aşınmasını arttırmaktadır. Serbest yüzey aşınmasının artması iş parçası malzemesinin takıma yapışmasını hızlandırabilir ve sonuçta takımın kırılmasına neden olabilir (Zhaojun *et al.* 1998).

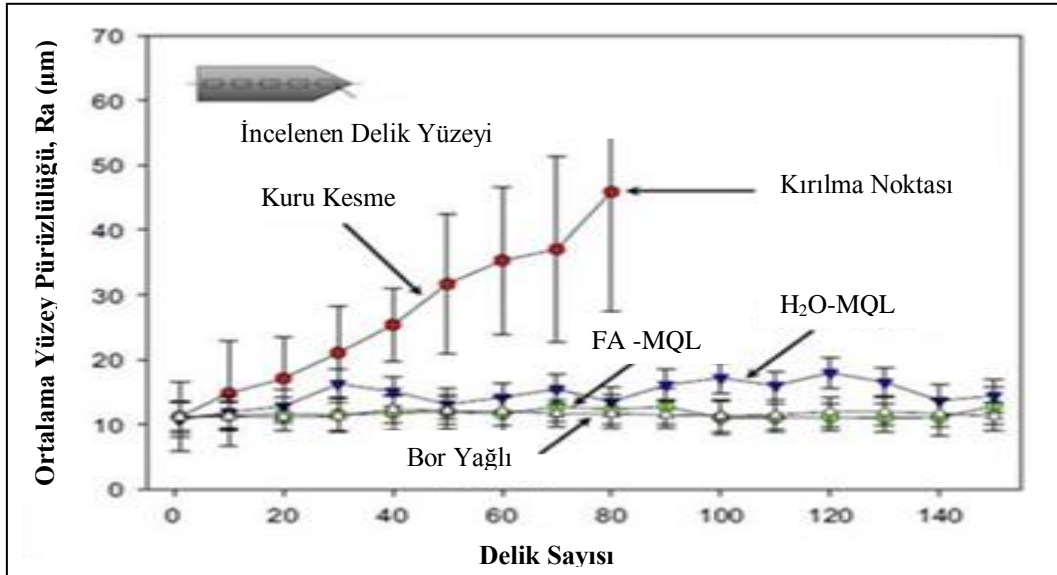


**Şekil 2.6** Aşınmış mikro takım görüntüleri; a) Kesme kenarı, b) aşınmış matkabın önden görünümü ( Imran *et al.* 2014).

Mikro boyuttaki matkapların çok küçük ebatlara sahip olmasından dolayı delme sırasında oluşan aşınmayı tespit etmek oldukça zordur. Bu yüzden delme işlemi sırasında kolaylıkla kırılabilir. Kırılma ömrünü biraz da olsa arttırabilmek için titreşimlerin minimuma indirilmesi veya iş mili takım sıkma sistemlerinin geliştirilmesi gerekir. Böylece dinamik gerilmeler azaltılabilir (Zhaojun *et al.* 2002, Yücel and Çiçek 2011).

Titanyum alaşımları sahip oldukları düşük termal iletkenliklerinden dolayı, yüksek kesme hızlarında işlendiğinde kesme bölgesinde yüksek kesme sıcaklığı oluşur. Bu durum oluşan talaşların takıma kolayca yapışmasını sağlar. Böylece çok kısa bir takım ömrü söz konusu olur (Hong and Ding 2001). Yüksek sıcaklık, yapışma ve difüzyon aşınmasını elverişli hale getirir. Kırılmaların çoğu aşınmaya bağlı oluşan aşırı kesme kuvveti nedeniyle oluşur (Guo 2004, Su *et al.* 2006). Sıcaklığı düşürmek için kesme hızını düşürmek bir alternatiftir (Hong and Ding 2001).

Titanyum alaşımlarını yüksek hızlı işlemede takım ömrünü uzatmak için soğutma yağlama tekniklerinden faydalanılabilir (Su *et al.* 2006, Zhaojun *et al.* 1998). Kesme kenarında oluşan sıcaklığın kontrol edilmesiyle iş parçası yüzeyinin bütünlüğünü ve takım aşınmasını kontrol edebiliriz. Kesme kenarında oluşan sıcaklığı azaltmak için ekolojik soğutucu olan LN2 (*sıvı azot*) kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır (Cantero *et al.* 2005). Titanyum alaşımlarının işlenmesinde karşılaşılan hızlı takım aşınması aşılması gereken bir sorundur. Soğutucu olarak sıvı nitrojen ile kriyojenik işleme kesme sıcaklığını azaltmak için ve takım ömrünü uzatmak için araştırmacılar tarafından çalışılan bir konudur. Sıvı azot jetleri tarafından kriyojenik soğutma kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürerek takım aşınmasını, talaş yapışmasını ve difüzyonu azaltarak takım ömrünü önemli oranda artırır ( Venugopal *et al.* 2007).



**Şekil 2.7** Ortalama yüzey pürüzlülüğü, (hata çubukları her bir delik için Ra verilerinin standart sapmalarını gösterir) (Bhowmick *et al.* 2010).

Takım ömrünü uzatmak için MQL (*Minimal miktar yağlama*) sistemi de kullanılabilir (Heinemann *et al.* 2006). MQL işlemede kuru işlemeye göre takım ömrünü arttırdığı rapor edilmiştir. Bhowmick vd. (2010)'nin yaptıkları bir çalışmada, soğutma yağlama işlemi uygulanan çalışmalarda hem takım ömrünün arttığı hem de yüzey pürüzlülüğünün azaldığı bildirilmektedir (Şekil 2.7). Geleneksel kesme sıvısına kıyasla MQL'in daha az soğuttuğu fakat daha iyi bir yağlama yaptığı için takım ömrü üzerinde daha iyi bir katkısı vardır (Tasdelen *et al.* 2008).

### 2.2.5 Soğutma yöntemleri

Kesme sıvısının toplam maliyeti üretim maliyetlerinin yaklaşık %17' sidir. Kesici takımın ise %4' tür. Üretim maliyeti üzerinde daha fazla etkili olduğunu gösterir. Kesme sıvısı kullanımı ile yüksek kesme hızlarına ulaşılabilmesi ürün maliyetlerinde %30 iyileşme sağlamaktadır. Ancak kesme yağının negatif etkisi ekonomiklik ve çevre sağlığına etkisidir (Yasir *et al.*).

Talaşlı imalatta kullanılan soğutma sıvılarının iyi bir yağlama ve iyi bir soğutma özelliğine sahip olması istenmektedir. Yağlama özelliği ile takım talaş ara yüzünde ince bir yağ filmi oluşturarak sürtünmeyi azaltmak, soğutma özelliği ile de kesme bölgesindeki sıcaklıkların düşürülmesi amaçlanmaktadır (Cantero *et al.* 2005).

Yağlama özelliğinin sürtünmeyi azaltması kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Ancak araştırmacılar (Carrilero *et al.* 2002) titanyum alaşımının delinmesinde ıslak kesmenin kesme kuvvetlerini bir miktar arttırdığını bildirmektedir. Bu durum titanyum alaşımının ısı iletkenliğinin düşük olmasına bağlanmıştır. Düşük ısı iletkenliğe sahip olan bu alaşımın işlenmesi esnasında kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Kesme bölgesinde oluşan bu sıcaklıklar ise malzemenin akma mukavemetini düşürerek talaş oluşumunu kolaylaştırmakta bu da kesme kuvvetlerinde düşüşe sebep olmaktadır. Fakat kesme bölgesine tatbik edilen soğutma sıvısı oluşan yüksek sıcaklıkları düşürerek malzemenin akma mukavemetinin azalmasını engellemektedir. Bunun sonucu olarak da kesme kuvvetlerinde bir miktar artış meydana getirmektedir. Dolayısıyla titanyum alaşımı işlenmesinde kesme kuvvetleri üzerinde, kullanılan soğutma sıvısının yağlama özelliğinden ziyade soğutma özelliği ön plana çıkmıştır (Cantero *et al.* 2005).

Mikro delme işlemini etkileyen önemli faktörlerden biri de kesme sıvıdır. Mikro matkaplarda yüksek dönme hızından dolayı deliklerden uzaklaşamayıp sıkışan talaşı kolaylıkla tahliye edebilmek için mineral yağlar ve kimyasal yağlayıcılar kullanılmaktadır (Yücel and Çiçek 2011).

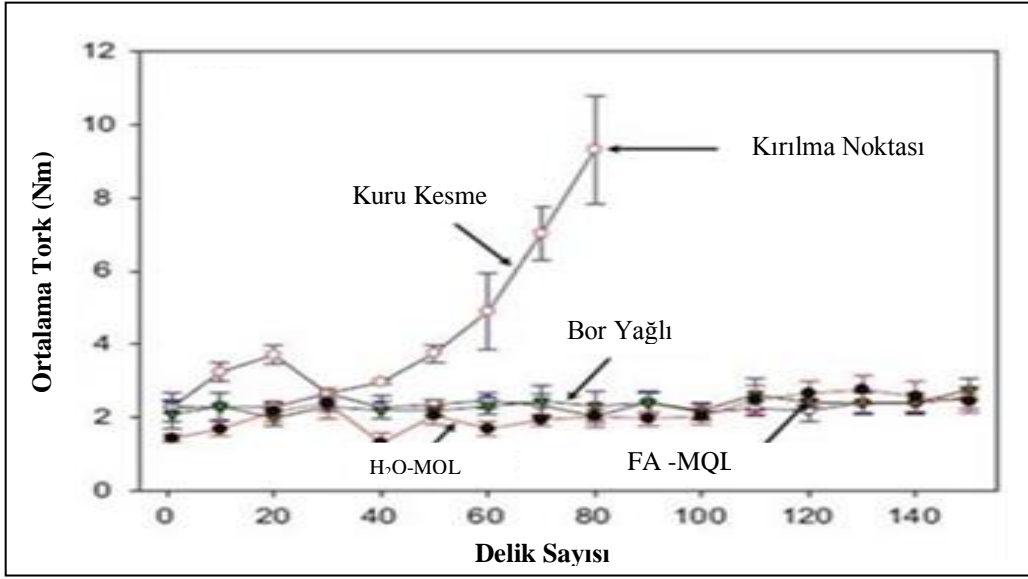
### Bor yağı

Titanyum alaşımlarını yüksek hızda işlemek için kesme sıvısı ihtiyacının araştırılması gerekir. Geleneksel kesme sıvısı uygulamasının yüksek kesme hızında işlemede başarısız olduğu ve takım talaş ara yüzüne nüfuzun zor olduğu bilinmektedir. Mikro delme işleminde bor yağı kullanımı oldukça zordur yüksek kesme hızından dolayı basınçlı gönderilen yağ talaşın çıkışını engellemektedir. Düşük basınçlarda ise takımın yüksek devirde dönmesi kesme bölgesine soğutma yağının ulaşmasını engellemekte bir anlamda kuru kesme işlemi yapılmış olmaktadır. Bor yağının insan ve çevreye verdiği zarar göz önüne alındığında daha ekolojik yağlama sistemlerine doğru yönelmesi gerektiği ortadadır (Yasir *et al.*).

### MQL

Yüksek yağlama maliyetleri, geleneksel soğutmadan vazgeçilip kuru işleme veya MQL teknolojileri kullanımına teşvik etmektedir. Üretim sürecinin iyileştirilmesinin yanı sıra bu tür teknoloji değişimi çevrenin korunmasına katkı sağlar (Weinert *et al.* 2004).

Yüksek ilerleme hızı ve yüksek kesme derinliği kesme kuvvetlerini arttırır. Kuvvet artışı beraberinde takım aşınmasını getirir. Takım ucu köreldiğinde takım talaş ara yüzündeki temas alanı artar. Bu sonuç daha yüksek sürtünmeyi oluşturur ve kesme kuvveti artar. Bu aşamada MQL in etkilerinin daha önemli olduğu görülmektedir. MQL uygulandığında düşük kesme kuvveti elde edilirken kuru kesmede daha büyük kesme kuvveti oluşur (Şekil 2.8). MQL akış oranı takım ömründe etkili bir parametredir (Weinert *et al.* 2004). Az olursa yeterli yağlama sağlanmayacak çok olursa dönen takımın oluşturduğu merkezkaç kuvveti yağın kesme bölgesine ulaşmasını engelleyecektir. MQL uygulaması her zaman takım ömrünü etkilemeyebilir. MQL belirli bir kesme koşulunda etkili olduğu görülmektedir (Yasir *et al.*).



**Şekil 2.8** Ortalama tork, (hata çubukları her bir delik için tork verilerinin standart sapmalarını gösterir.) (Bhowmick et al. 2010).

Takım ömrünü arttırmak için çeşitli yöntemler deneyen araştırmacılar MQL sistemde palmiye yağı ve sentetik ester gibi farklı yağlar kullanarak kesme deneyleri yapmışlardır. Sentetik ester ve palmiye yağı geleneksel soğutmayla karşılaştırılabilecek düzeyde performans sergilemiştir. Ayrıca palmiye yağı MQL sistemde sentetik ester'e alternatif olabilecek bir performans göstermiştir. Sürtünme azalmış ve dolayısıyla kuvvet ve tork küçülmüştür (Şekil 2.8) (Rahim and Sasahara 2011).

### Azot

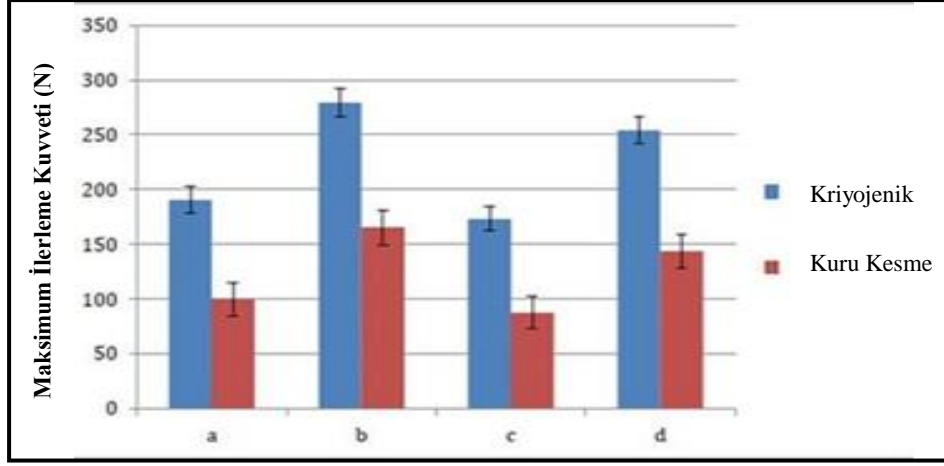
Kriyojenik gazlar özellikle soğutma amaçlı sağlık, elektronik, imalat, otomotiv ve havacılık sanayi uygulamalarında geniş kullanım alanı bulmuştur ( Yıldız and Nalbant 2008). Sıvı havanın damıtılmasıyla üretilen azot LN<sub>2</sub> ile anılır. Azot -210 ° de erir, -198 ° de kaynar. Renksiz, kokusuz, tatsız, güvenli, ucuz, temiz ve toksik madde içermeyen bir gazdır (Hong and Zhao 1999).

Kriyojenik soğutma kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı kontrol ederek takım aşınması, yapışma(talaş yapışması), difüzyon aşınmalarını azaltarak takım ömrüne önemli bir katkı sağlar (Venugopal *et al.*2007). Kriyojenik soğutucu kullanımı ile takım kenarında çok az bir aşınma oluşur ( Khan and Ahmed 2008, Bermingham *et al.* 2011, Hong *et al.* 2001). Mükemmel soğutma yetenekleri olan çevre dostu kriyojenik soğutma Ti

alaşımının işlenmesinde kesme sıcaklığını kontrol etmek için kullanılır (Venugopal *et al.* 2007, Hong and Ding 2001).

Geleneksel soğutma işlemlerinde yüksek kesme hızlarında talaş ara yüzünde etkili bir soğutma sağlanamaz, fakat kriyojenik soğutma uygulaması daha yüksek kesme hızlarında da etkili olmaktadır. Yüksek ilerleme hızı talaş kalınlığını da yükseltir. Kesme bölgesinde daha fazla ısı oluşur(hızlı deformasyondan dolayı) bu nedenle kriyojenik soğutma diğerlerine göre daha çok etkilidir. Kriyojenik soğutma kesme bölgesindeki sıcaklığın düşmesinden dolayı talaşın gevrekleşmesini sağla bu da talaşın kolaylıkla kırılmasına neden olur. Talaşın kopması beraberinde takım talaş temas uzunluğunu düşürerek sürtünmeyi azaltır. Oluşan ısı kopan talaşla birlikte kolayca kesme bölgesinden uzaklaşır (Birmingham *et al.* 2011). Kriyojenik soğutma ile işlemede takım ömrü geleneksel soğutmaya göre beş kat artmış ve diğer işleme yaklaşımlarına göre üstünlük sağladığını göstermiştir (Hong 2006, Khan and Ahmed 2008, Yıldız and Nalbant 2008).

Kriyojenik işleme geleneksel işlemeye göre çevre açısından daha güvenli bir alternatif olarak kabul edilebilir. LN2 oluşan düşük sıcaklık nedeniyle etkili bir soğutucu olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, kriyojenik soğutmanın yağlama etkisi pek bilinmemektedir. Fakat takım aşınması yönünden değerlendirildiğinde yağlama etkisinin de olabileceği düşünülebilir (Hong 2006). Yağlama maddeleri yüksek bir viskoziteye sahiptir. Takım talaş ara yüzünde yağ film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltır. Yağdan farklı olarak azot düşük viskozitelidir. Havayla temas etmesi durumunda hemen buharlaşma eğilimindedir. Ancak uygun kullanıldığında LN2' nin de iyi bir yağlayıcı olabileceği araştırmacılar tarafından dile getirilmektedir. Kriyojenik işleme iş parçasını düşük sıcaklıkta daha sert ve daha mukavim hale getirir. Kesme kuvvetlerinin artışı da bu bilgiyi desteklemektedir (Şekil 2.9)(Xia 2014 ). Bununla birlikte daha düşük sıcaklık kesme işlemi sırasında sürtünme kuvvetini azaltır. Talaş takıma daha az yapışır (Hong *et al.* 2001).



**Şekil 2.9** Maksimum ilerleme kuvveti: a)  $f:0.025\text{mm/dev}$ ,  $V:40\text{m/dk}$ ; b)  $f:0.05\text{mm/dev}$ ,  $V:40\text{m/dk}$ ; c)  $f:0.025\text{mm/dev}$ ,  $V:60\text{m/dk}$ ; d)  $f:0.05\text{mm/dev}$ ,  $V:60\text{m/dk}$ ; (Xia 2014).

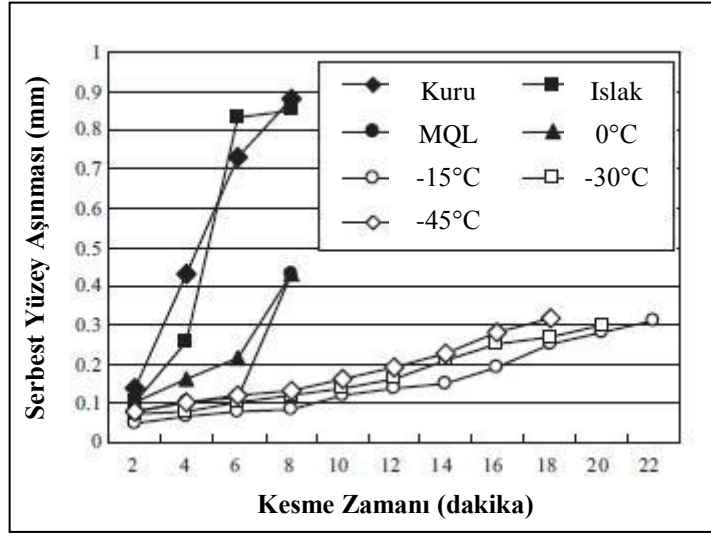
Kuru işlemeyle kıyasla kriyojenik soğutma ile kesme kuvveti yükselir. Kesme sıcaklığı düşer kayma bandı açısı artar. Kriyojenik soğutma yüksek kesme hızlarında daha etkilidir. Kriyojenik soğutma daha yüksek bir ilerleme hızından ziyade belirli bir derinliğe kadar verimlidir (Khan and Ahmed 2008). Kuru işlemeyle karşılaştırıldığında kriyojenik işlemede aşağıdaki değişiklikler oluşur;

- Yaklaşık %9 oranında talaş kalınlığında azalma olur (kesme hızı 50 m/dk).
- Yaklaşık %6 oranında kesme kuvvetlerinde bir artış olur.
- Talaş oluşumu düzenli veya düzensiz olabilir.
- Kesme sıcaklığı azalır.
- Takım ömrü artar (Sun *et al.* 2010).

### Hibrit

Titanyum alaşımlarını yüksek hızda işlemede takım ömrünü iyileştirmek için soğutma yağlama uygulaması gerekmektedir. Kesme bölgesi sıcaklığını düşürmek için çalışan araştırmacılar genellikle geleneksel soğutma ve MQL kullanmaktadır. Fakat bu sistemlerin yetersiz olduğunu düşünen bazı araştırmacılar (Yuan *et al.* 2011) sıvı azot kullanımı ve azotla havayı belirli miktarda soğutup MQL sisteme entegre ederek yeni bir çalışma alanı ortaya çıkarmışlardır (Su *et al.* 2006).





Şekil 2.10 Hibrit soğutmanın etkisi (Yuan et al. 2011).

MQL soğutma ile önemli ölçüde kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü azalır (Şekil 2.10). MQL sisteme gönderilen hava sıcaklığı sabitlenmiş ve 0, -15, -30, -45°C olmak üzere 4 farklı değerde kullanılmıştır. -15°C derecede soğutucu hava ile MQL yağlama, diğer 3 sıcaklığa göre daha olumlu etkiler sağladığı ifade edilmektedir. Sıfır derecenin aksine -15, -30, -45°C derecelerdeki MQL ile kesmede takım aşınmasında belirgin bir azalma sağlamıştır (Yuan *et al.* 2011).

### 2.3 Mikro delme işleminde Kullanılan Kesici Takımlar ve Tezgahlar

Son yıllarda hassas minyatür makine parçalarına özellikle, havacılık ve uzay sanayi, biyomedikal, elektronik, ve iletişim sektörlerinde gün geçtikçe artan bir ihtiyaç vardır. Mikro boyuttaki minyatür parçaların imalatında alışılmamış imalat yöntemleri (lazer işleme, ultrasonik, elektro erezyon, elektro kimyasal vb. ) kullanılmaktadır. Alışılmamış imalat yöntemlerinin bir çoğunun işleme zamanı uzun ve karmaşık olan küçük boyutlu parçaların işlenmesinde yeterli değildir. Diğer taraftan mikro mekanik işleme 10 mikron ile birkaç milimetre boyutlarındaki parçaların üretilmesinde sıklıkla kullanılan bir işleme metodudur. Mikro işleme yöntemi geleneksel talaş kaldırma yöntemlerine benzer olsa da her iki yöntem arasında önemli farklılıklar vardır. Bu fark takım uç radüsü ile deforme olmamış talaş kalınlığından kaynaklanmaktadır (Ucun *et al.* 2010, Chae *et al.* 2006).



**Şekil 2.11** Mikro işleme tezgâhı (İnt. Kyn. 1).

Mikro elektromekanik ürünlerin gelişmesiyle bu sistemlerin montajı için çapları en fazla 1mm ye kadar olan mikro deliklerin delinmesi ihtiyaç haline gelmiştir. Dolayısıyla bu işlemi gerçekleştirecek tezgâhlara önemli oranda ihtiyaç vardır. Mikro delikleri delmek için lazer işleme ve kıvılcım deşarj (elektro erezyon) gibi birçok yöntem vardır. Pratik olarak en hızlı ve yararlı olan yöntem ise mekanik olarak yani matkaplarla delik delmektir. Cihazların minyatürleşmesi ile birlikte, devre kartlarının delinmesinde, çapı küçük olan uzun deliklerin delinmesinde mikro matkaplar kullanılmaktadır (Yücel and Çiçek 2011, Zhaojun *et al.* 1998)

Mikro delik delmede kullanılan matkapların ömürleri oldukça kısadır. Çünkü mukavemetleri boyutlarından dolayı zayıftır, bu nedenle delme esnasında kolayca kırılabilirler. Mikro matkapların ömürlerini tahmin etmek çok zordur. İşleme esnasında sıkışıp kırılan matkapların delikten çıkartılması zor olduğu gibi iş parçasına da kalıcı zararlar verebilir. Kırılan uçlar genellikle delikten çıkarılamaz ve malzeme israfına neden olur (Zhaojun *et al.* 1998). Mikro takımların ömrünü belirleyen bir diğer unsur da kesme esnasında oluşan titreşimlerdir. Delme işleminde kullanılan tezgâhlar olabildiğince titreşimden söndürülmelidir (Yücel and Çiçek 2011).

Mikro delme işlemlerinde genellikle yüksek hız çeliği ve WC matkaplar

kullanılmaktadır. Bileşiminde kobalt bağlayıcıli sementit bulunan tungsten karbür matkaplar kesme hızının yüksek olduğu durumlarda kısa takım ömrüne sahiptirler. Tungsten karbür takımlar geniş bir sıcaklık aralığında mikro mekanik kesme işlemi için kullanılır ( Chae *et al.* 2006). Mikro delme işleminde en fazla 1mm çapa sahip takımların mukavemeti yetersiz olabilir. Bunun sonucunda sık sık takım kırılması meydana gelir. Mikro takımların ömürlerini arttırmak ve performanslarını iyileştirmek için sıklıkla kaplama işlemi uygulanmaktadır (Kudla 2006).

Takımlara yapılan kaplamalar ile ömürleri her zaman artmayabilir. Ti alaşımı işlenmesinde TiAlN kaplama yüksek performans sergilerken (sıcak sertlik özelliğinden dolayı) TiN kaplı matkaplar sıcak sertlik özelliğinin yetersiz olmasından dolayı tatmin edici olmayan bir takım ömrü sergilemektedir (Heinemann *et al.* 2006).

#### **2.4 Ti6Al4V Alaşımı ve işlenebilirliği**

Titanyum alaşımları, mükemmel korozyon direnci sağlayan hafif, yüksek sıcaklıklarda bile yüksek mukavemetini koruyan bir süper alaşımdır. Ti-6Al-4V  $\alpha+\beta$  alaşımları havacılık endüstrisinde en yaygın kullanılan alaşımdır. Bu alaşım toplam titanyum üretiminin %50' sini oluşturur (Sharif *et al.*2012). Dövme, çubuk döküm, dahil olmak üzere tüm ürün formları verilebilir. Folyo, plaka, ekstrüzyon boru ve bağlantı elemanları yapılabilir. Havacılık sektöründe, kritik öneme sahip parçaların imalatı titanyum alaşımlarından yapılmaktadır (Boyer 1996).

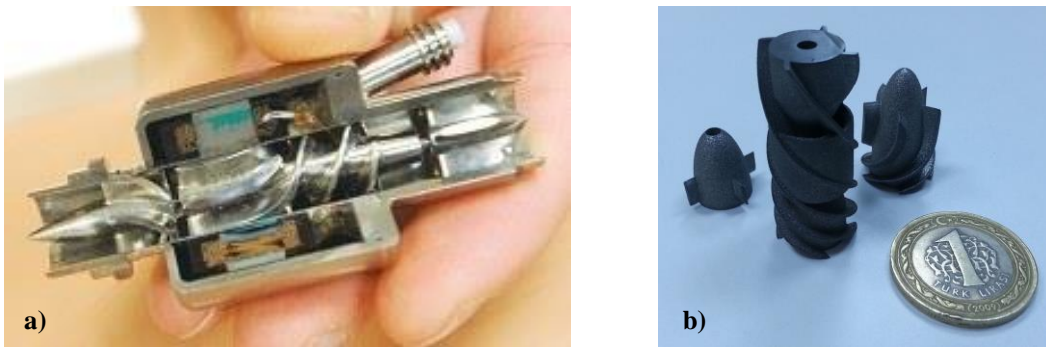
Titanyum ve alaşımları zor işlenen malzemeler olarak sınıflandırılır. İşlemedeki temel sorun yüksek kesme sıcaklıkları ve hızlı takım aşınmasıdır (Ezugwu and Wang 1997). Titanyum alaşımlarının düşük termal iletkenliklerinden dolayı kesme esnasında üretilen ısı hızlı bir şekilde ortamdaki uzaklaştırılmaz ısı kesme kenarı ve takım yüzeyinde birikir(Hong and Ding 2001). İşleme esnasında oluşan sıcaklıklardan dolayı takım malzemesiyle yüksek kimyasal etkileşime sahiptir. Talaş yapışması takımın hızlı aşınmasına ve bununla birlikte kesici takım hasarı ile sonuçlanır (Venugopal *et al.* 2007). İşleme esnasında oluşan talaş termal plastik kararsızlık gösterir. Talaş kayma gerilmesi tekdüze değildir bu nedenle oluşan talaşlar testere tipindedir. Talaş ve takım arasındaki temas uzunluğu (aynı ilerleme hızı ve kesme derinliğinde çeliğin temas

uzunluğunun 1/3 ) son derece kısadır (Hong *et al.* 2001). Titanyum parçaların, işleme hızı ve verimliliğinin artırılması ile işleme maliyetleri (kalite ve takım maliyetlerinden ödün vermeden) azaltılabilir (Birmingham *et al.* 2011).

### Kullanım alanları

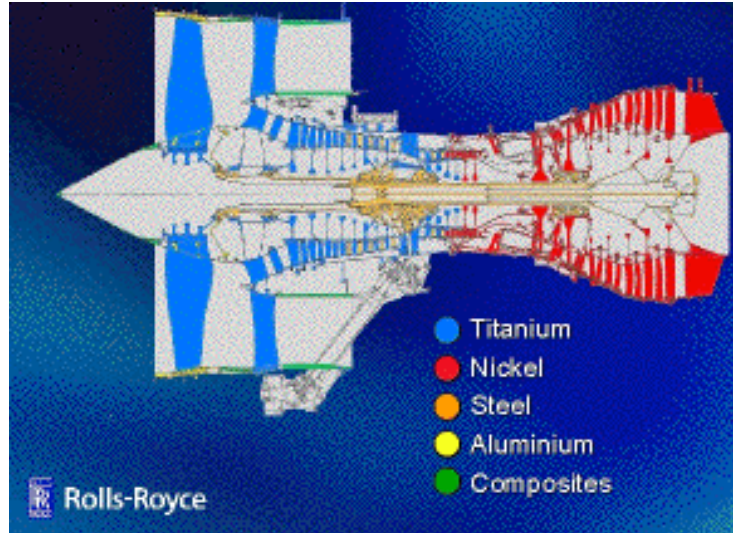
Güç ağırlık oranı korozyon direnci ve diğer üstün özellikleri nedeniyle titanyum alaşımları tıp, havacılık, otomobil, kimya, petro kimya, ve elektronik sanayinde sıkça uygulama alanı bulmuştur (Novakov 2010, Machado and Wallbank 1990). Tipik uygulamalar jet türbinleri, kompresör diskleri, uçak yapı elemanları, deniz araçlarının bileşenleri ve cerrahi implantlardır (Sharif *et al.*2012, Özel *et al.* 2011). Ti alaşımı ile ilgili çalışmalar, tıbbi cihazlar, biyo teknoloji, elektronik, optik gibi disiplinlere konu olur. Mikro işlemeyle, havacılık, çevre bilimleri, iletişim, otomotiv, kalıpcılık gibi sektörlerin sorunlarına katkı sağlayacağı aşikârdır (Yuan *et al.* 2011, Arrazola *et al.* 2009).

Titanyum bazlı alaşımlar çeliğe kıyasla, yüksek dayanım iyi korozyon direnci ve biyo uyumluluk özelliklerinden dolayı tıbbi uygulamalar ve mikro ürünler için de ideal bir malzemedir (Yalçın 2007, Özel *et al.* 2011). Hücresel düzeyde çalışan tıbbi parçalara ihtiyaç giderek arttığı için titanyum alaşımları sık sık mikro işleme çalışmalarına konu olmaktadır. Biyomedikal alanında en yaygın kullanılan titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) toplam titanyum alaşımı üretiminin %50' sini oluşturur. Titanyum alaşımlarının tıp uygulamaları, kemik, eklem ve dental uygulamalar, kardiyovasküler implantlar, kemik kırığı implantları, yapay sert dokular, yapay kalp pompası(Şekil 2.12) üretiminde sıklıkla kullanılır (Novakov 2010).



**Şekil 2.12** Titanyumdan yapılan mikro aksiyel kalp pompası, a) ABD de üretilen dünyanın en küçük kalp pompası(İnt. Kyn. 3) b)SDÜ de 3D yazıcı ile titanyum tozlarından üretilen kalp pompası rotoru(İnt. Kyn. 4).

Titanyum ve alaşımları düşük yoğunluk ve mükemmel korozyon direnci yüksek mukavemet nedeniyle havacılık uygulamaları için mükemmel bir malzemedir. Alüminyum ve çeliklere göre işleme maliyeti daha yüksektir. Bu nedenle titanyum kullanımında avantajlar ve dezavantajlar dengeli olmalıdır. Titanyum kullanımının iyi örnekleri Boeing 747 ve 757 uçaklarının iniş takımlarıdır. İniş takımı kırımları dövme yoluyla elde edilmektedir. Böylece maliyeti çok daha düşük olmaktadır. Bu gibi uygulamalar için tercih edilebilen bir malzeme de 7075 Alüminyum alaşımıdır. Ancak gerekli yükleri taşımak için alüminyum alaşımının düşük dayanımı bir dezavantajdır. Bunun yanı sıra çelik malzemelerde yüksek yoğunlukları nedeniyle ağırlık üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Boyer 1996). Uçak motorlarında kullanılan titanyum alaşımının genel özelliklerinden dolayı, motorların maruz olduğu çok yüksek sıcaklıklarda gerilme değerinde emniyetle kullanılmasını sağlamaktadır (Şekil 2.13). Titanyum düşük yoğunluğu, yüksek sıcaklıkta bile iyi dayanımı gibi özellikleri uçak motorlarında yıllarca güvenle kullanılabilceğini göstermektedir (Erdem and Aydın 2006).



**Şekil 2.133** Jet motorlarında titanyum alaşımının kullanım yerleri (Ali et al. 2011).

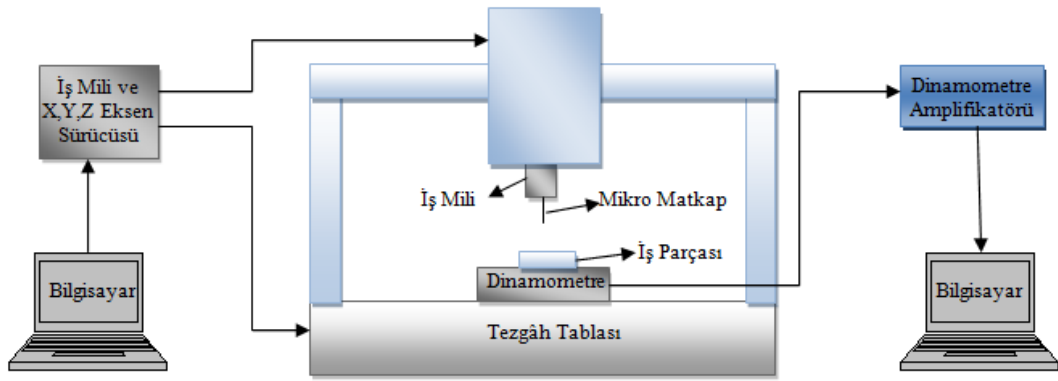
Titanyum alaşımı yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik mukavemeti vardır. Takım talaş temas alanı küçük olduğu için takım üzerinde yüksek sıcaklık ve gerilmeler oluşur. Yüksek sıcaklıklar adezyon, difüzyon aşınması gibi çeşitli aşınmalar nedeniyle kötü bir takım ömrü sergiler. Titanyum alaşımı 500°C den daha yüksek kesme sıcaklığında

birçok takım malzemesi ile kimyasal etkileşime girer. Kimyasal etkileşim sonucunda erken takım hasarı, genellikle kırılma veya talaş yapışması oluşur (Hong and Ding 2001). Bazı makine bileşenlerinde korozyon direnci çok önemli bir sorun olabilir. Titanyum alaşımının yüksek korozyon direnci nedeniyle, titanyum alaşımlarından üretilen parçalarda aşınma koruyucu kaplamalar veya boya kullanımı zorunlu değildir (Boyer 1996).

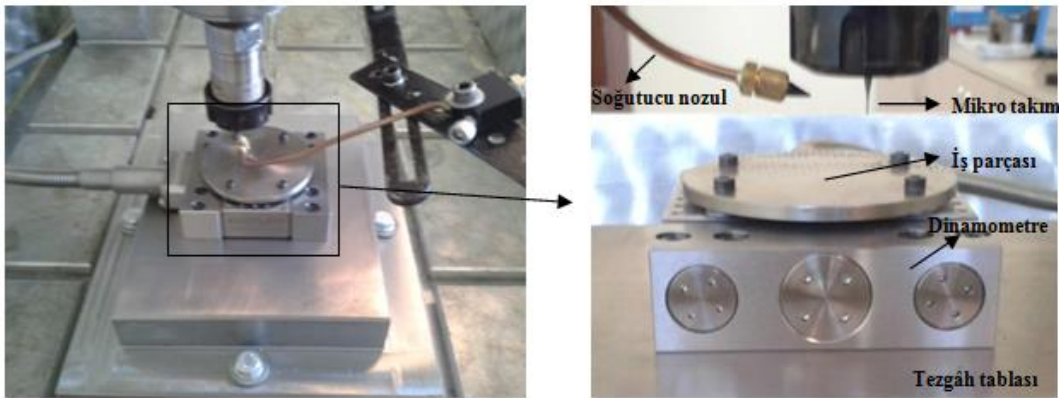
### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 Deney düzeneği ve kesme parametreleri

Bu çalışmada sahip olduğu mekanik ve termal özelliklerinden dolayı endüstrinin pek çok alanında kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı iş parçası olarak seçilmiştir. Deneyler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki üç eksenli CNC (Computer Numeric Control) dik işleme tezgâhı ile gerçekleştirildi. CNC tezgah, 2.2 kW motor gücünde 24000 dev/dk dönme kapasitesine sahiptir (Şekil 3.2). Şekil 3.1’ de deney düzeneği ayrıntılı olarak verilmiştir. Ayrıca kullanılan kesme parametreleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir. İşleme koşullarının etkisini ortaya koymak adına, değişken kesme hızları, değişken diş başına ilerleme ( $\mu\text{m}/\text{dev}$ ) hızı ve değişken ilerleme ( $\text{mm}/\text{dk}$ ) hızlarında deneyler gerçekleştirilmiştir.



a)

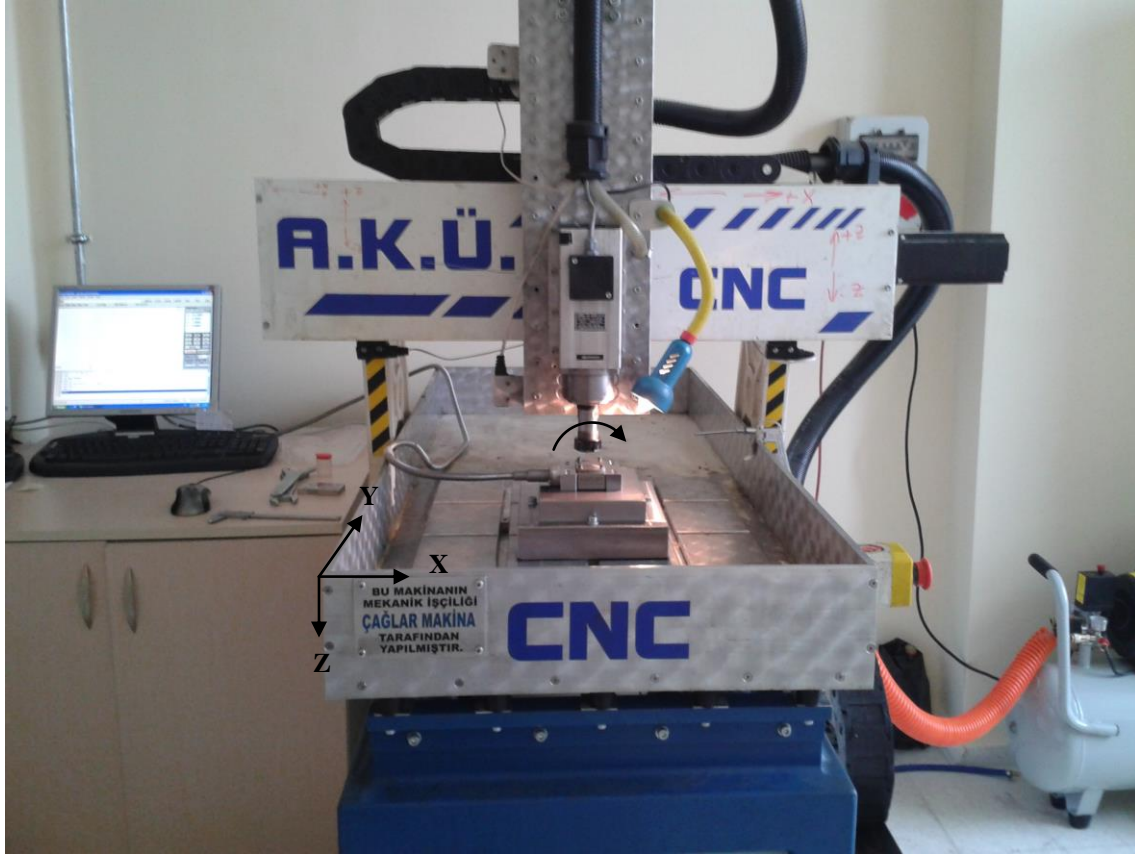


b)

Şekil 3. 1 Mikro delme işleminde kullanılan deney düzeneği; a) Şematik gösterim, b) İş parçasının dinamometreye bağlanmış şekli.

**Çizelge 3. 1** Deneysel çalışmalar boyunca kullanılan kesme parametreleri.

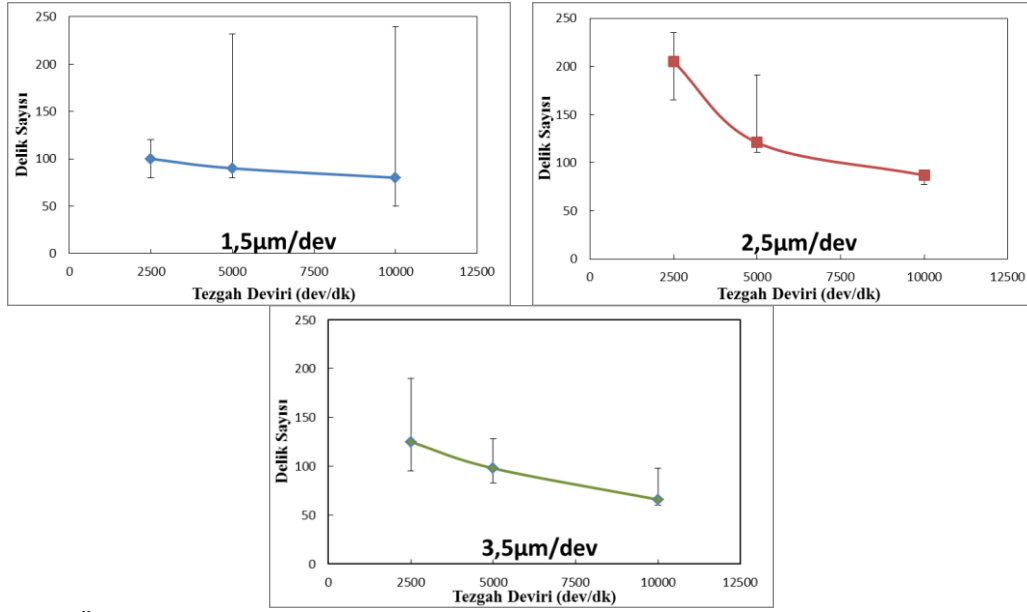
Devir, N (dev/dk)	Kesici Ağıza Düşen İlerleme, $f_z$ ( $\mu\text{m}/\text{dev}$ )	İlerleme Hızı, f (mm/dk)	Kesme derinliği (mm)
1000	1,5	5	
2500	1,5	5	
5000	1,5	5	
7500	1,5	5-15-30-70-100	3,6
9000	1,5		
10000	0,5-1,5-2,5-3,5	5	
15000		5	



**Şekil 3. 2** Bilgisayar kontrollü mikro işleme merkezi.

Ti-6Al-4V alaşımının mikro delinmesi çalışmasında kesme koşullarının (kuru kesme, bor yağlı, MQL, kriyojenik) optimum seviyesini yakalamak için ön deneyler yapılmıştır. Ön deneylerde (Şekil 3.3) her bir kesme koşulunda matkabin kırılmadan delebildiği delik sayısı 60 olarak tespit edilmiş sonraki deneylerde tüm kesme parametrelerinde 60 ar tane delik delinmiştir.





Şekil 3. 3 Ön deneylerle kesme parametrelerinin belirlenmesi.

### 3.2 Kesici takım ve iş parçası

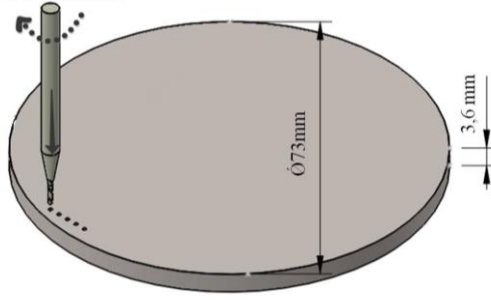
Bu araştırmada, uzay ve biyomedikal sanayinde üstün mukavemet özellikleri sebebiyle çokça tercih edilen hem geleneksel hem de geleneksel olmayan yöntemlerle işlenmesi zor olan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı deney malzemesi olarak seçilmiştir. Alaşımın kimyasal bileşimi Çizelge 3.2’ de, mekanik özellikleri Çizelge 3.3’ de verilmektedir. Deney numuneleri Şekil 3.4’ te ki ölçülerde hazırlanmıştır.

Çizelge 3. 2 Ti-6Al-4V kimyasal bileşimi (Smolarczyk et al. 2013).

Alaşım bileşenleri	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
%	6	4	0,03	0,1	0,15	0,01	0,003	88,717

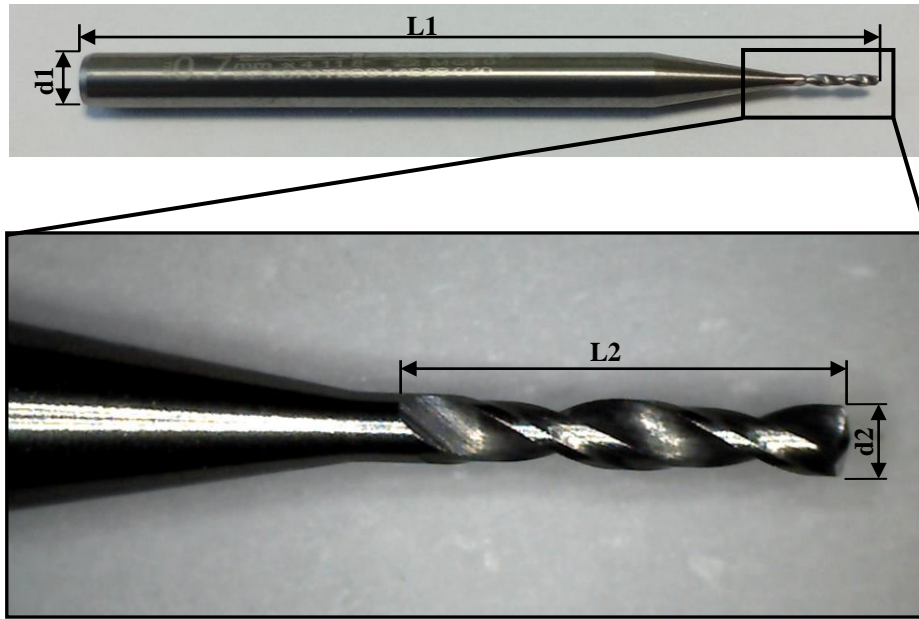
Çizelge 3. 3 Titanyum alaşımının mekanik özellikleri (Niinomi 1998).

Ti-6Al-4V	Çekme gerilmesi (Mpa)	Akma gerilmesi (Mpa)	Uzama (%)	Sertlik (Hv)
Döküm	976	847	5.1	-
Plastik şekillendirme	954	729	10	346



Şekil 3. 4 İş parçası şematik gösterimi.

Deneysel çalışmalar boyunca 0,7mm çapında helisel matkap uçları kullanılmıştır (Şekil 3.5). Matkap uçları Toolex firmasından tedarik edilmiştir. Kesici takımlar %90 WC ve %10 Co bileşiminden oluşmakla birlikte kaplamasızdır. Tungsten karbür (WC) kesici takımın geometrik özellikleri Çizelge 3.4’ de ki gibidir.



Şekil 3. 5 Kesici takım geometrik şekli.

Çizelge 3. 4 Kesici takımın geometrik ölçüleri.

d1	d2	L1	L2	Uç açısı	Helis açısı	Kesici ağız sayısı
3mm	700µm	40mm	4mm	150°	30°	2

### 3.3 Dinamometre ve data alma sistemi

Talaşlı imalat işlemlerinde meydana gelen kuvvetler yapılan işlemin verimliliği hakkında önemli bilgiler vermektedir. Özellikle mikro imalatta kullanılan çok küçük boyutlu takımlardaki hasarları anlık olarak tespit edebilmek için kesme kuvveti sinyallerinden büyük ölçüde faydalanılmaktadır. Bu çalışma boyunca meydana gelen kuvvet ve torklar Kistler 9119AA1 mini dinamometre ile ölçülmüştür (Şekil 3.6). Kullanılan dinamometreye ait teknik özellikleri Çizelge 3.5’ te verilmiştir.



Şekil 3. 6 Kesme kuvveti ve tork ölçümü için kullanılan dinamometre ( İnt kyn.2).

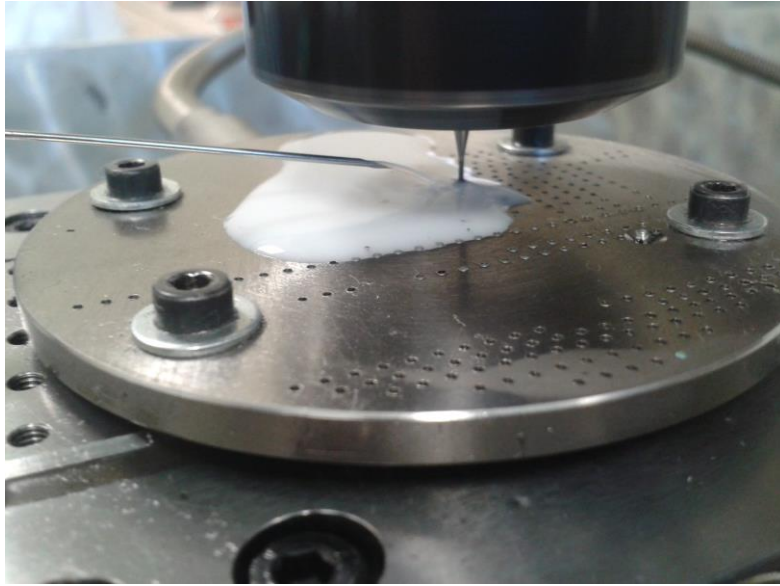
Çizelge 3. 5 Kistler 9119AA1 mini dinamometre teknik özellikleri (İnt kyn. 2).

<b>Ölçme aralığı</b>	Fx, Fy, Fz	kN	-4 ... 4
	Mx, My,	N-m	-125 ... 125
	Mz	N-m	-250 ... 250
<b>Kalibre edilmiş ölçme aralığı</b>			
<b>100 %</b>	Fx, Fy, Fz	N	0 ... 4000
<b>10%</b>	Fx, Fy, Fz	N	0 ... 400
<b>1%</b>	Fx, Fy, Fz	N	0 ... 40
<b>Doğal Frekans</b>	fn(x)	kHz	≈6,0
	fn(y)	kHz	≈6,4
	fn(z)	kHz	≈6,3
<b>Hassaslık</b>	Fx,Fz	pC/N	≈-26
	Fy	pC/N	≈-13
<b>Çalışma Sıcaklığı</b>		°C	-20...70

### 3.4 Soğutma sistemlerinin tasarımı

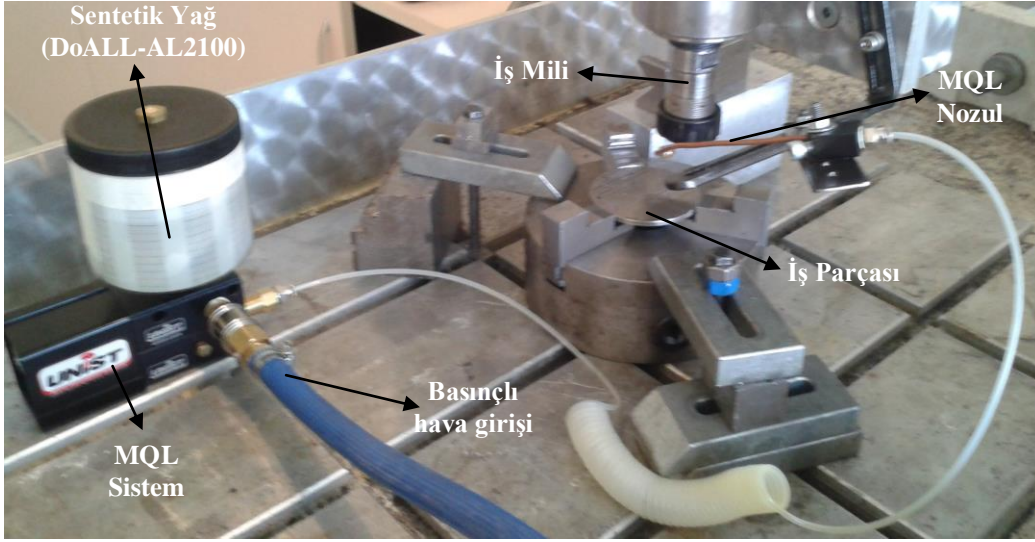
Titanyum alaşımının mikro delinmesi işleminde 4 farklı soğutma sistemi kullanılmış olup kriyojenik işleme için sistem tasarımı yapılmıştır. Geleneksel kesme yağı ( bor yağı), Minimal miktar yağlama, sıfır altı soğutma olarak bilinen sıvı azot kullanımı yani kriyojenik işleme ve kuru kesme koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel kesme sıvısı olan bor yağı, yaklaşık 1 bar basınç ile kesme bölgesine gönderilmiştir. Düşük basınçla soğutucu akışının sağlanması kesici takım helis kanallarından talaşın kolaylıkla çıkmasını engellemek için yapılmıştır. Geleneksel kesme sıvısının içindeki bor yağı-su oranı 1/50 oranında kullanılmıştır. Bor yağının kesme işlemine uygulanışı Şekil 3.7' de gösterilmektedir.



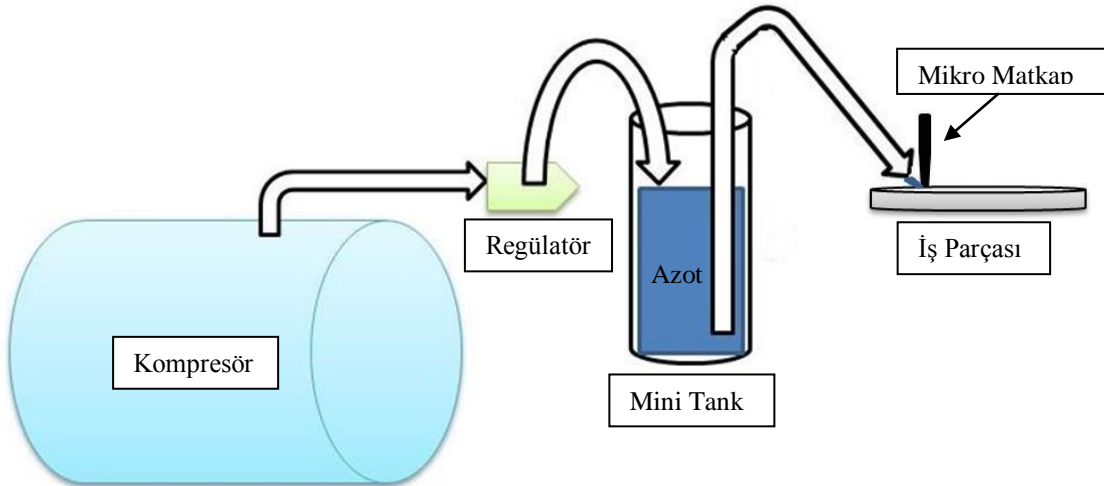
Şekil 3. 7 Delme işleminde bor yağı uygulanması.

MQL yağlama için DoALL ALL2100 sentetik yağ, 12 ml/h akış hızında UNİST sistemi ile yapılmıştır. MQL sistem, bitkisel yağ kullanılması ve soğutucu akışkan maliyetlerinin az olması nedeniyle son yıllarda birçok araştırmada sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanılan sistem Şekil 3.8' deki gibidir. Geleneksel kesme işlemlerinde yaklaşık 6 bar kullanılmasına rağmen mikro delme işleminde 6 bar basınç takımın kırılmasına neden olmaktadır. Bu yüzden ön deneylerde MQL için 3 barlık bir basınç tercih edilmiş ve tüm deneylerde 3 bar kullanılmıştır.



Şekil 3. 8 MQL sistem için deney düzeneği.

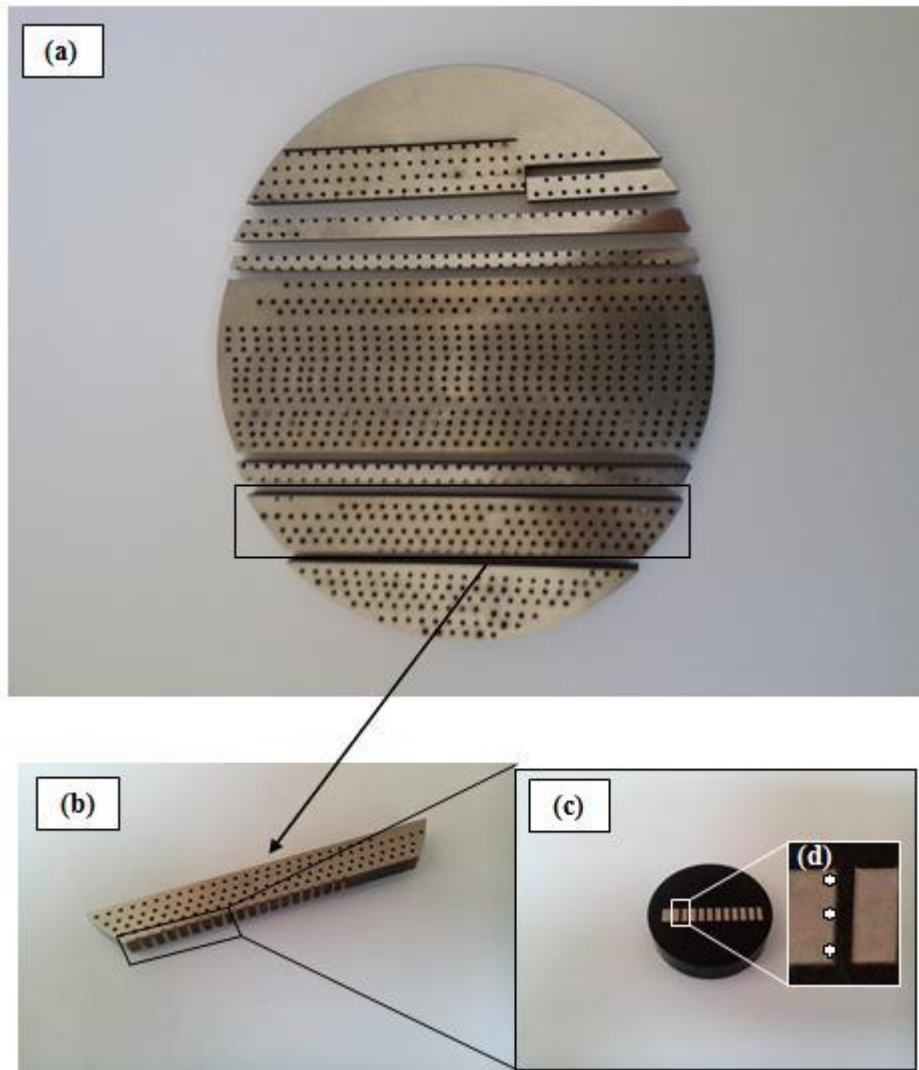
Kriyojenik sistemde soğutucu akışkan olarak sıvı azot kullanılmaktadır. Azotu kesme işleminde soğutucu olarak kullanabilmek için mini tanka yaklaşık 1 bar civarında basınç uygulamak suretiyle soğutucu nozuldan azotun sıvı halde çıkması sağlanmıştır. Sistemin şematığı Şekil 3.9’ da görülmektedir. Titanyum alaşımının düşük termal iletkenliğinden dolayı kesme esnasında oluşan yüksek sıcaklıkları minimize etmek adına kriyojenik ön soğutma yapılmıştır. Ön soğutma, kesici takımın talaş kaldıracağı, hemen önündeki işlenmemiş bölgeye uygulanmıştır



Şekil 3. 9 Kriyojenik sistemin şematik gösterimi.

### 3.5 Delik yüzey bütünlüğü ve mikrosertlik

Delme işlemi sonucunda iş parçası mikro yapısında oluşan değişimler ve delik duvarı etrafında oluşan mikro sertlik değerleri A.K.Ü. T.U.A.M' da sırasıyla tarama elektron mikroskobu ve mikro sertlik ölçme cihazıyla belirlenmiştir. Laboratuvar ölçümleri için iş parçası delik merkezlerinden tel erezyon tezgâhında Şekil 3.10 a-b' deki gibi kesilmiştir. Tel erezyon ile dilimlenen parçalar bakalit makinasına sığacak şekilde tekrar küçültülerek bakalitleme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.11). Bakalite alınan numuneler zımparalama parlatma cihazında (Şekil 3.12) parlatılıp, dağlandıktan sonra Şekil 3.10- d' de ki işaretlenen kısımlarından mikro sertlik ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.



**Şekil 3. 10** Yüzey bütünlüğü ve mikro sertlik ölçümü için deney numuneleri ve ölçüm noktaları.



Şekil 3. 11 Numuneleri bakalit kalıba almak için kullanılan bakalitleme cihazı.

Bakalit kalıplama makinesi pnömatrik sistemle çalışmaktadır. 185° C sıcaklıkta eriyen bakalit partikülleri pnömatrik sistemin uyguladığı basınçla iş parçasını kavramakta ve kalıplama işlemi gerçekleşmektedir. Kalıplama makinesinde soğutucu olarak su kullanılmaktadır. Kalıptan çıkarılan malzeme Şekil 3.10 c' deki şekle gelmektedir.

Kalıplanan iş parçası mikro yapı ve mikro sertlik ölçümleri için zımparalama ve parlatma makinesinde (Şekil 3.12) sırasıyla 800, 1000, 1200 mesh yoğunluğundaki zımparalar ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra içerisinde aşındırıcı toz partiküller (alümina) bulunan sıvı ile parlatma işlemi yapılmıştır. Mikro yapı incelemesi yapmadan önce numuneler titanyum dağlayıcısı kroll ile 40 sn dağlanmıştır.



Şekil 3. 12 Parlatma işleminde kullanılan cihaz.



Şekil 3. 13 Tarama elektron mikroskobu.



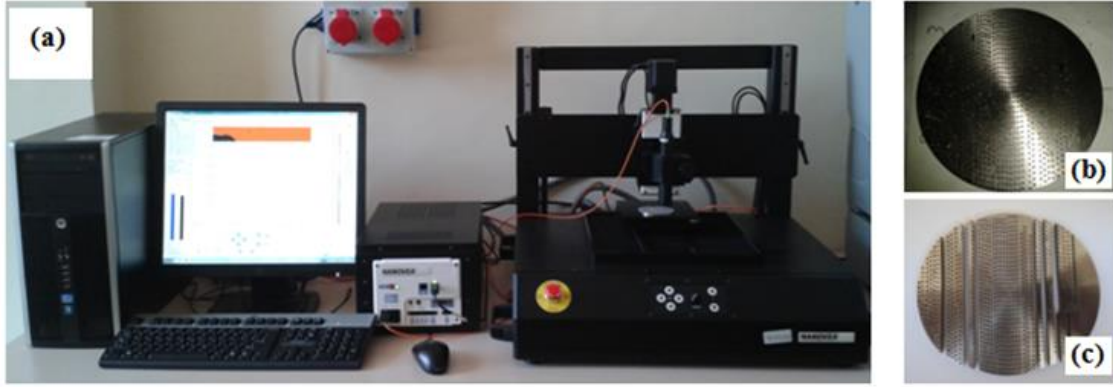


Şekil 3. 14 Mikro sertlik ölçümü için kullanılan cihaz.

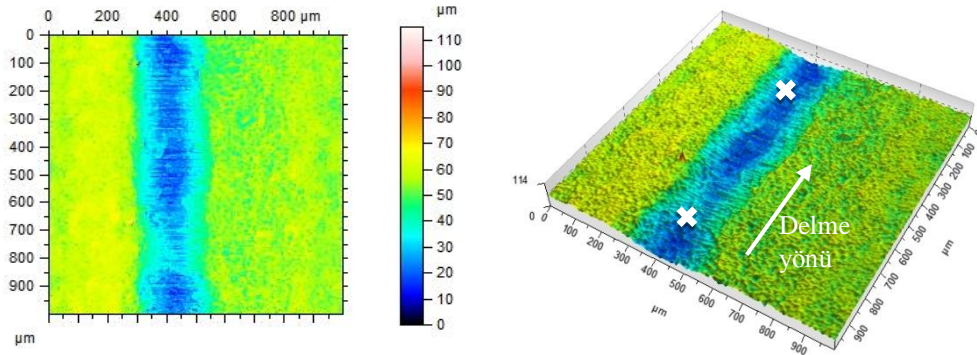
Mikro sertlik ölçümleri delik kenarından 40 mikron mesafeden başlanılarak, ölçüm işlemleri 4,9 N ön yükü 15 saniyede gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14). Delik giriş ve çıkış bölgelerinden yaklaşık 400 mikron mesafeye kadar 70' er mikron aralıklarla 5' er adet ölçüm alınmıştır. Orta bölgeden ise 70' er mikron aralıklarla 670 mikron mesafeye kadar 10 adet ölçüm alınmıştır.

### 3.6 İş parçası yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi

Soğutma yönteminin ve kesme parametrelerinin, delik yüzey kalitesine olan etkilerini belirlemek için, üç boyutlu yüzey taraması gerçekleştirilmiş ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve çapak yükseklikleri elde edilmiştir. Delikler 0,2mm çapındaki bakır tel ile tel erezyon tezgâhında iki parçaya ayrıldıktan sonra delik iç yüzeylerinden pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.15). Çapak oluşumu ve yüzey pürüzlülük değerleri NANOVEA 3D profilometre ile ölçülmüştür. Kullanılan profilometre temassız ölçüm yapabilmekte ve nanometre hassasiyetindedir.

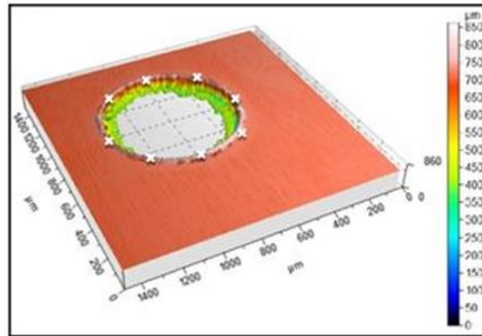


Şekil 3. 15 Delinen mikro deliklerin delik yüzeylerinin üç boyutlu yüzey analizi.



Şekil 3. 16 Mikro deliklerin delik yüzeylerinin topoğrafyası.

Matkabın hem giriş noktasındaki hem de çıkış noktasındaki (Şekil 3.16 de işaretlenen noktalar) yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Her bir soğutma yöntemi için birinci ve altmışıncı deliklerden ölçümler alınmıştır. Ayrıca üç boyutlu profilometre kullanılarak delik çıkış yüzeyi taranarak oluşan çapaklar görüntülenmiştir (Şekil 3.17). Delik çevresinden  $45^\circ$  aralıklarla 8 adet çapak yüksekliği alınarak her bir kesme parametresi için ortalama çapak yüksekliği elde edilmiştir. Şekil 3.17' deki noktalar ölçüm yerlerini temsil etmektedir.

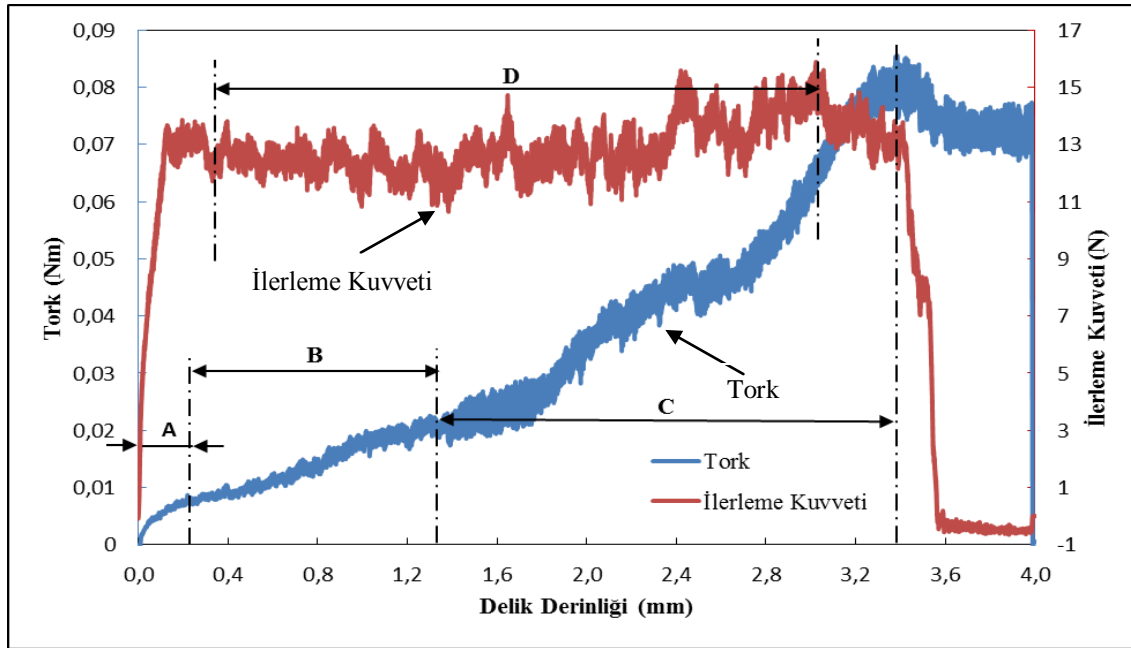


Şekil 3. 17 Delik çıkışındaki çapağın profilometre analizi.

## 4. BULGULAR

### 4.1 Delme kuvveti ve torkun değişimi

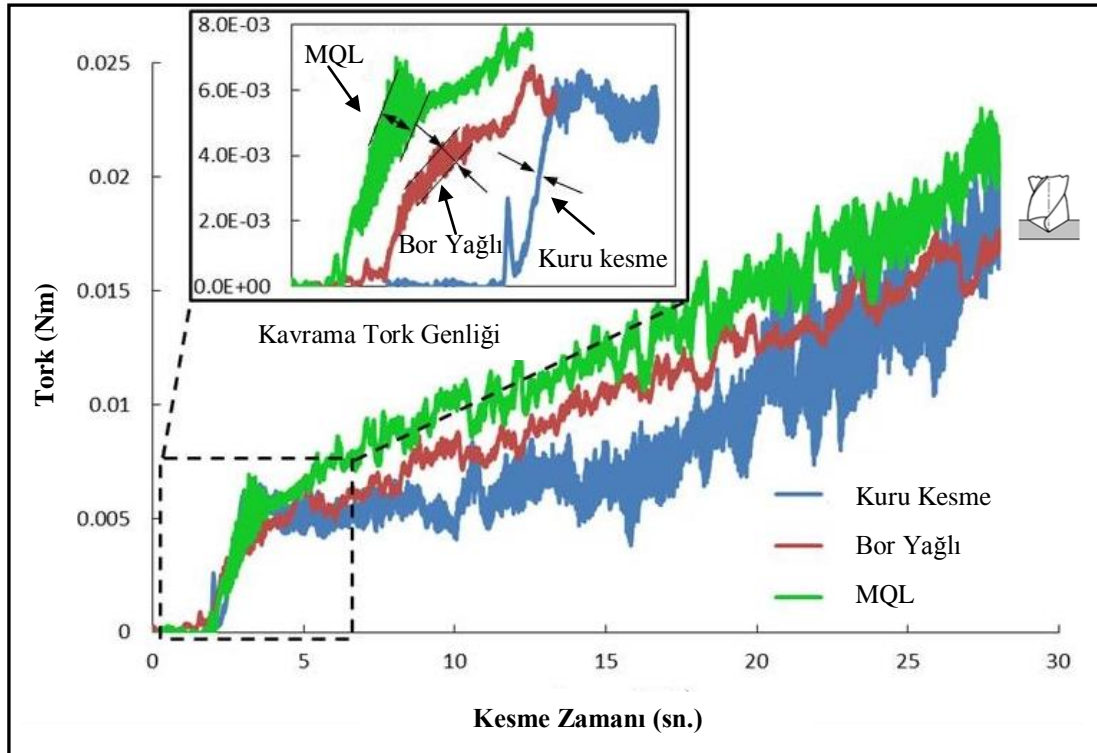
Delik delme işlemi sırasında oluşan tork değerleri delme işlemi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Buna istinaden bu çalışmada da delik delme esnasında meydana gelen torkun ilerleme ve kesme hızına bağlı olarak değişimi incelenmiştir (şekil 4.1). Matkabın parçayı tamamen kavradığı kısımdaki tork değeri şekil 4.1' deki A bölgesinden, ortalama tork değerleri B bölgesinden ve kesme kuvveti değerleri D bölgesindeki değerlerden alınmiştır. C bölgesi kesme bölgesinden uzaklaştırılan talaşlardan etkilenen bölgeyi ifade etmekte olup değerlendirmeye alınmamıştır. Kriyojenik kesme işleminde, dinamometre düşük sıcaklıklardan etkilendiği için tork ölçümleri yapılamamıştır.



şekil 4. 1 Delme esnasında oluşan kuvvet ve tork ölçümleri.

Kavrama anındaki tork değişimi şekil 4.2' de verilen iç grafikte görölmektedir. Bu grafikte kullanılan soğutma sıvısının, takım ile iş parçası arasındaki sürtünme koşullarını değiştirdiği için, kavrama tork değeri değişkenlik göstermektedir. Soğutma sıvısı takım ile iş parçası arasında kaygan bir tabaka oluşmasını sağlamıştır. Bu sayede takımın iş parçasına kolay bir şekilde kavraması engellenmiştir. Diğer bir ifadeyle matkabın iş

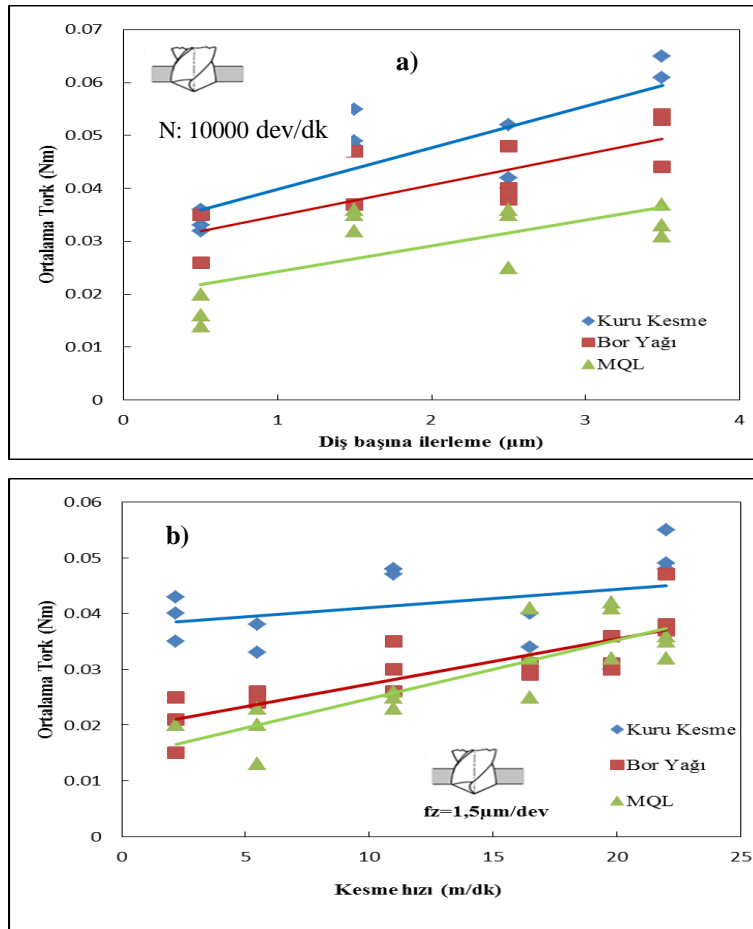
parçasını kavraması güçleşmektedir. MQL ile kesme işleminde kavrama tork değerinde genlik değeri daha büyüktür. Bor yağının kullanıldığı delme işleminde ise bu genlik değeri daha küçüktür. Kuru kesme işleminde ise bu genlik değeri minimum olarak gerçekleşmiştir. Kullanılan soğutma sıvısı içerisindeki yağ oranı arttıkça kavrama tork değeri de artmaktadır. Fakat tüm delik boyunca meydana gelen tork değerinin ortalaması alındığında, mikro delik delme işleminde MQL ile kesme işleminin daha verimli olduğu söylenebilir.



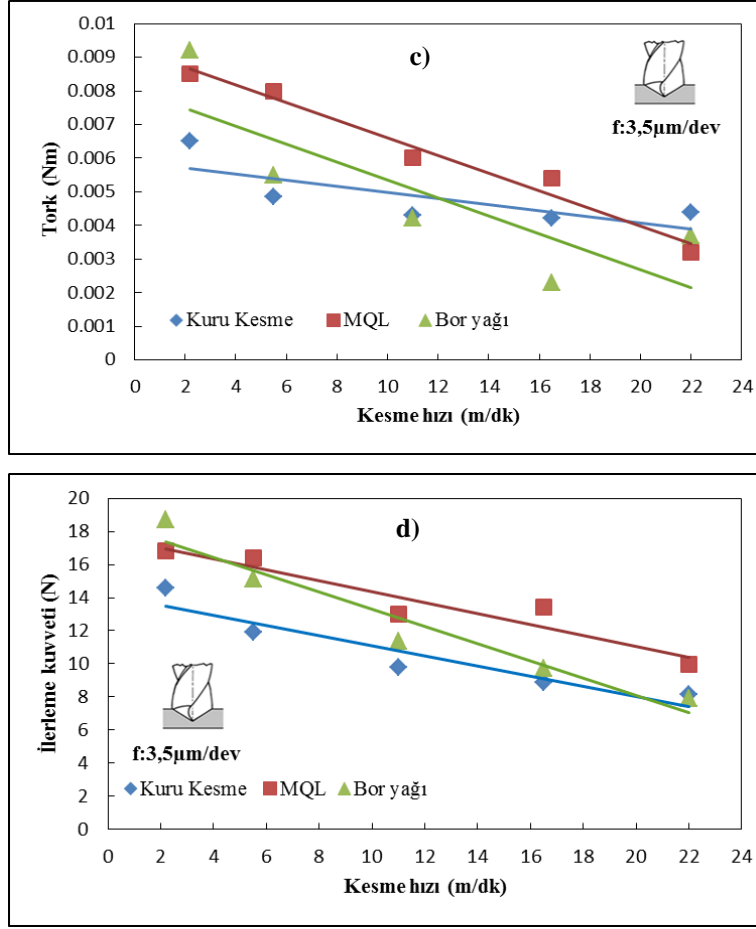
Şekil 4. 2 Takımın iş parçasını kavramaya başladığı anda oluşan tork değeri.

Şekil 4.3' de görüldüğü gibi kuru kesme koşullarında yapılan delme işlemlerinde tork değeri daha yüksektir. Herhangi bir soğutma yağlama sisteminin kullanılmadığı kuru kesme işleminde takım talaş ara yüzündeki sürtünmenin artması ve takıma yapışan talaş torkun artmasına etkili olduğu söylenebilir. Ayrıca ilerleme değerinin artmasıyla, torkun da arttığı görülmektedir (Şekil 4.3-a). Bununla birlikte mikro delme işleminde kesme hızının artmasıyla, ortalama tork değeri de artmaktadır. Konvansiyonel delik delme işleminde ise, artan kesme hızına bağlı olarak tork değerinin bir miktar düştüğü yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir (Kıvık 2012). Kesme işlemi sırasında kesme hızının artmasıyla birlikte kesme sıcaklığı da yükselmektedir. Artan kesme sıcaklığı ile birlikte

kesilen talaşın termal yumuşamasının da etkisiyle daha fazla deformasyona uğramaktadır. Kullanılan mikro matkap uçlarının sahip olduğu oldukça dar helis kanalları deforme olmuş talaşlarla tıkanmaktadır. Dolayısıyla takıma yapışan talaşlar helis kanallarını tıkamasıyla tork değerlerini arttırmaktadır. Takımın iş parçasını tam olarak kavradığı derinlik olan 0.21 mm kesme derinliğinde alınan tork değerlerinin ise literatürle eşleştiği Şekil 4.2-c' de görülmektedir. Şekil. 4.3' te dikkati çeken diğer bir unsur ise; soğutma sıvısının kullanılması tork değerini önemli oranda etkilemektedir. MQL ile kesme işleminde tork değerinin daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Kesme bölgesine basınçlı gönderilen yağ zerrecikleri takım talaş ara yüzündeki sürtünme kuvvetinin azalmasına, oluşan talaşın helis kanalından daha kolay tahliyesine, sürtünmenin azalmasından dolayı meydana gelen sıcaklığın da azalmasına katkı sağlamıştır. Çok belirgin bir fark olmasa da, benzer durum Şekil 4.3- b' de görülmektedir.



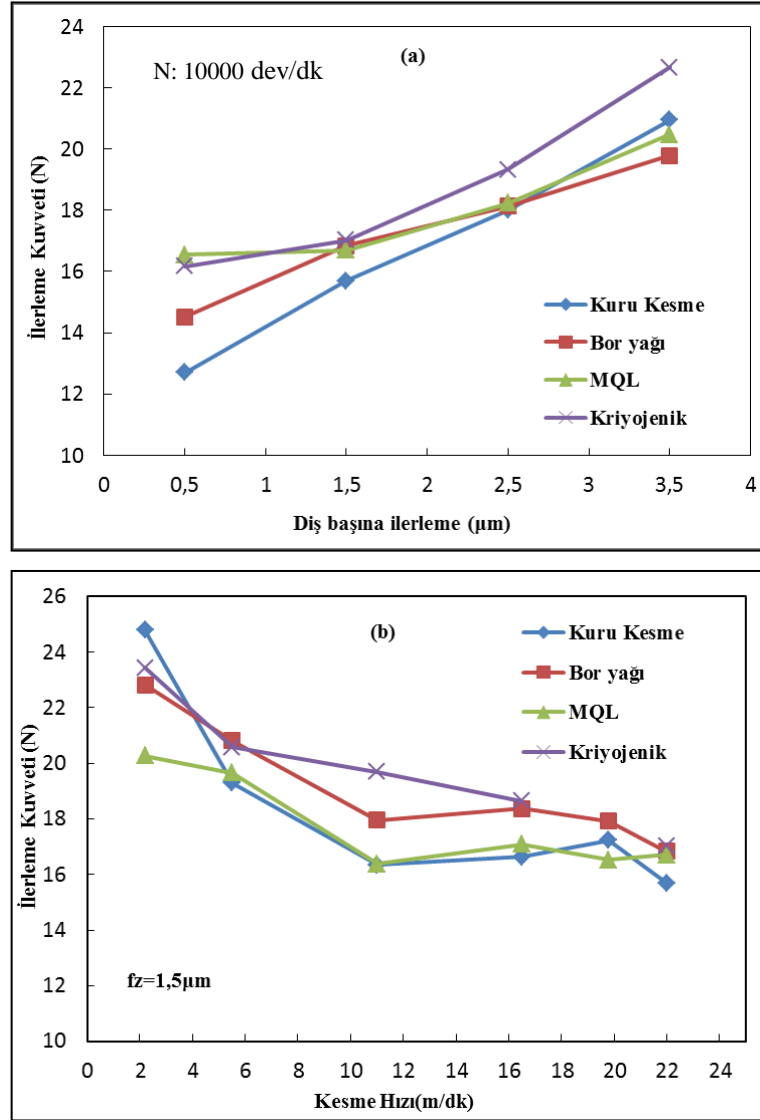
Şekil 4.3 Kuvvet ve tork grafikleri.



Şekil 4. 3 (Devam) Kuvvet ve tork grafikleri.

Diş başına düşen ilerleme miktarının ve kesme hızının mikro delik delme işlemlerinde ilerleme kuvveti üzerindeki etkisi Şekil 4.4' te verilmiştir. Şekilde ayrıca soğutma/yağlama sisteminin etkisi de görülmektedir. İlerleme değerinin artmasına bağlı olarak ilerleme kuvveti artmaktadır. Diş başına düşen ilerleme miktarının artması birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasına neden olur. Bu da kesici takıma gelen yükü arttırmaktadır. Şekil 4.4-a' da dikkat çeken başka bir unsur ise; kriyojenik soğutma işleminde oluşan ilerleme kuvvetlerinin daha büyük olmasıdır. Benzer durum Şekil 4.4-b' de de görülmektedir. Şekil 4.4-d' de dikkat çeken diğer bir nokta kesme hızının artmasıyla birlikte, kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasına ve iş parçasının yumuşamasına neden olur. İş parçasının yumuşaması kesmeyi kolaylaştırır ve kuvvetlerin azalmasına neden olur. MQL yağlama sisteminin kullanıldığı kesme işlemlerinde ilerleme kuvvetinin daha düşük çıktığını söyleyebiliriz. Ön soğutmalı kriyojenik kesme işleminde, sıvı azot kesme bölgesinin gevrekleşmesine ve kesme kuvvetlerinin artmasına sebep olmaktadır. Nitekim makro işlemede de benzer sonuçlar

elde edilmiştir (Hong *et al.* 2001). MQL yağlama sisteminde kullanılan yağ, takım iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltmakta ve dolayısıyla kesme işlemini kolaylaştırmaktadır.



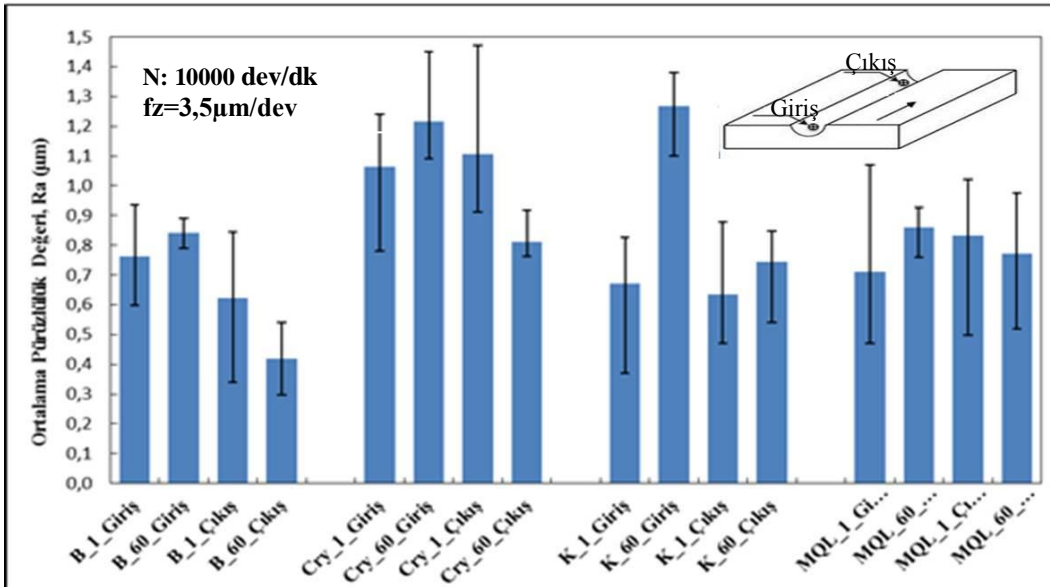
**Şekil 4. 4** Farklı soğutma koşulları için kesme hızı ve ilerleme değerine bağlı olarak ilerleme kuvvetinin değişimi.

#### 4.2 Yüzey pürüzlülüğünün değişimi

Soğutma yönteminin, delik yüzey kalitesine olan etkilerini elde etmek için delinen yüzeyler üzerinde, üç boyutlu yüzey taraması gerçekleştirilmiş ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.5). Delikler 0,2 mm çapındaki bakır tel ile tel erezyon tezgâhında iki parçaya ayrıldıktan sonra yüzey analizine uygun hale

getirilmiştir( Şekil 3.11). Matkabın hem giriş noktasındaki hem de çıkış noktasındaki yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Her bir soğutma yöntemi için birinci ve altmışıncı deliklerden ölçümler alınmıştır. Şekil 4.5’ te verilen B: bor yağını, Cry: kriyojenik işlemeyi, K: kuru kesmeyi, 1 ve 60 delik sayılarını, giriş ve çıkış ifadeleri ise delik üzerindeki ölçüm noktalarını ifade etmektedir.

Şekil 4.5’ teki grafik incelendiğinde, delik girişlerinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Söz konusu durum tüm kesme koşullarındaki altmışıncı delikler için geçerlidir. Delik girişlerindeki yüzey pürüzlülük değerleri delik sayısının artmasıyla artarken, delik çıkış noktasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri azalmaktadır. Bor yağı ile elde edilen deliklerin yüzey kalitelerinin daha iyi olduğu söylenebilir. Kriyojenik kesme işlemindeki yüzey pürüzlülük değerleri maksimum olarak ölçülmüştür. Kuru delme işleminde bile delik giriş ve çıkışlarındaki pürüzlülük değerleri kriyojenik kesme işleminden daha düşüktür. Ayrıca kuru kesme işleminde maksimum ile minimum arasındaki farkın büyük olduğunu da görmek mümkün. Bunun nedeni; takıma yapışan ve aralıklarla kopan talaş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca kuru kesme işlemindeki 60’ ıncı deliğin, giriş kısmından alınan ölçümlerin yüksek oluşmasında artan takım aşınmasının etkili olduğu, çıkış kısmında ise daha iyi yüzey kalitesinin oluşmasında kesici takıma deliğin klavuzluk yaptığı söylenebilir.

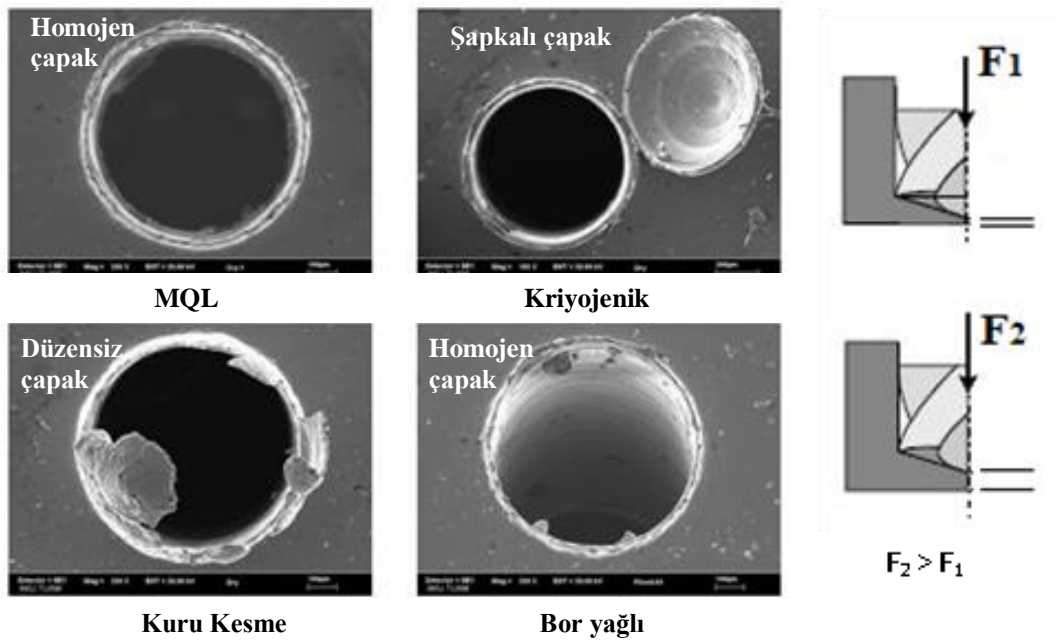


Şekil 4. 5 Farklı soğutma sistemlerinin delik yüzey kalitesi üzerindeki etkileri.



### 4.3 Çapak oluşumu ve etkileyen parametrelerin analizi

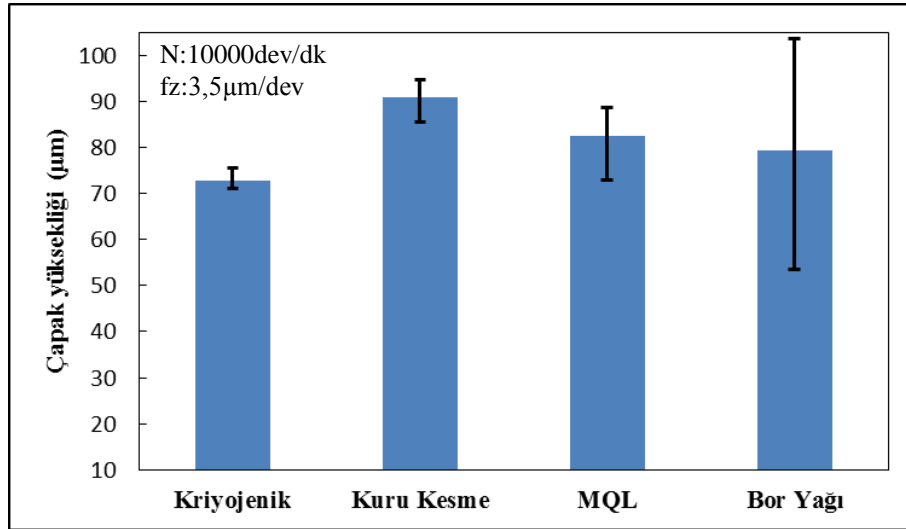
Delme işlemi sırasında deliğin çıkış noktasına yaklaşırken, matkap uç açısının etkisiyle malzeme de plastik deformasyon oluşmaya başlar. Deformasyonun başladığı nokta ile çıkış yüzeyi arasındaki mesafe, kesme esnasındaki ilerleme kuvvetinden etkilenmektedir. İlerleme kuvvetinin artmasıyla bu mesafede artacaktır (Şekil 4.6). Mesafenin artması çıkış noktasında çapağın artmasına sebep olmaktadır. İlerleme değerinin artmasına bağlı olarak delik çıkış yüzeyindeki çapağın arttığı literatürde ifade edilmiştir (Pilný *et al.* 2011). Titanyum alaşımının mikro boyutlarda delinmesi sonucunda delik çıkışında oluşan çapak şekilleri SEM analizleriyle görüntülenmiştir. Üç tip çapağın baskın olduğu gözlenmiştir. Bunlar; tüm delik kenarı boyunca homojen çapak oluşumu, düzensiz çapak oluşumu ve şapkalı çapak oluşumu şeklindedir (Şekil 4.6).



**Şekil 4. 6** Delik çıkış yüzeyinde en çok karşılaşılan çapak türleri ve çapak oluşumunun şematik ifadesi.

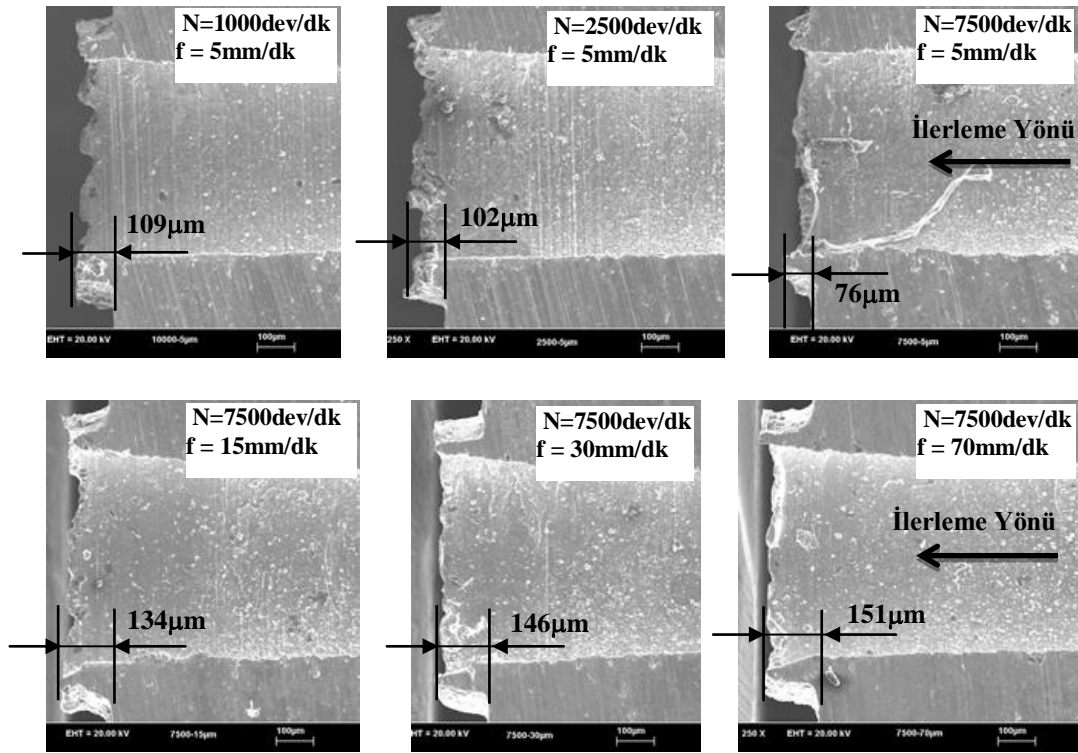
Şekil 4.7' de delme operasyonu sırasında kullanılan soğutma sisteminin çapak yüksekliğine etkisi verilmiştir. Üç boyutlu profilometre kullanılarak delik çıkış yüzeyi taranmıştır. Delik çevresinden 45° lik aralıklarla 8 adet çapak yüksekliği alınarak her bir kesme parametresi için ortalama çapak yüksekliği elde edilmiştir. Şekilden de

görüldüğü gibi, kullanılan soğutma sıvısı çapak oluşumunu engellemek adına çokta etkili değildir. Buna karşılık kriyojenik delme işleminde oluşan çapak yüksekliği daha küçüktür. Kesme bölgesine uygulanan sıvı azot, iş parçasının gevrekleşmesine neden olmaktadır. Ayrıca kesme bölgesindeki sıcaklığın da önemli oranda azalmasına katkı sağlamaktadır. İki unsurun da etkisiyle delik çıkışındaki çapak yüksekliği azalmıştır. Gevrekleşmeyle birlikte, matkap çıkış noktasına yaklaşırken iş parçası malzemesi daha az plastik deformasyona uğramakta ve kırılarak kesme bölgesinden uzaklaşmaktadır. Mikro frezeleme ile yapılan bir çalışmada da (Ucun *et al.* 2014) benzer bir durum gözlenmiştir. Kesme esnasında bor yağı veya MQL kullanımı çapak yüksekliğini olumlu yönde etkilememektedir. Ancak bor yağı ile yapılan delme işlemlerinde çapak boyutlarının çok fazla değişkenlik gösterdiği Şekil 4.7’ de dikkat çekmektedir.

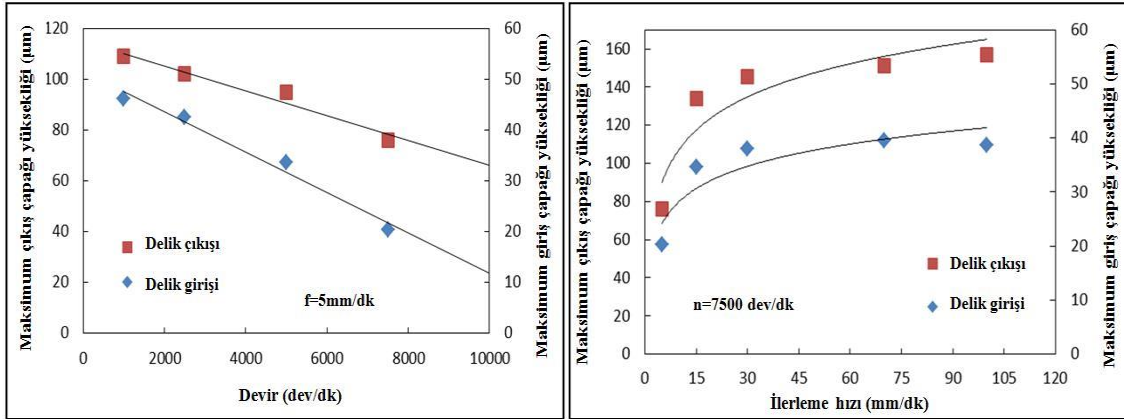


Şekil 4. 7 Delik çıkış yüzeyindeki çapak yüksekliğinin soğutma sıvısıyla değişimi.

Kesme hızının artmasına bağlı olarak delik çıkış noktasındaki çapak yüksekliğinin azaldığı, artan ilerleme miktarı ile arttığı Şekil 4.8’ de görülmektedir. Artan devir sayısı hem giriş hem de çıkış noktasındaki çapak yüksekliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu azalma lineer olarak gerçekleşmiştir. Artan ilerleme hızı ise hem giriş hem de çıkış yüzeyindeki çapak yüksekliğinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 4.8’ den hareketle,  $f \geq 30\text{mm/dk}$  için çapak yüksekliğinin sabit kaldığını söylemek mümkündür.



a)



b)

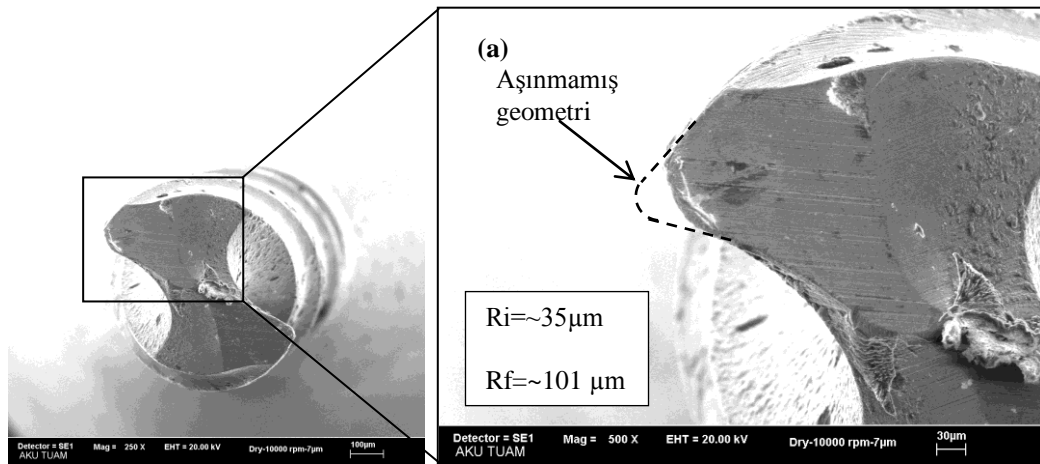
**Şekil 4. 8** Kesme hızı ve ilerlemenin değişimine bağlı çapak oluşumu, a) Çıkış çapaklarının Sem görüntüleri, b) Giriş ve çıkış çapaklarının değişimi.

#### 4.4 Takım aşınması

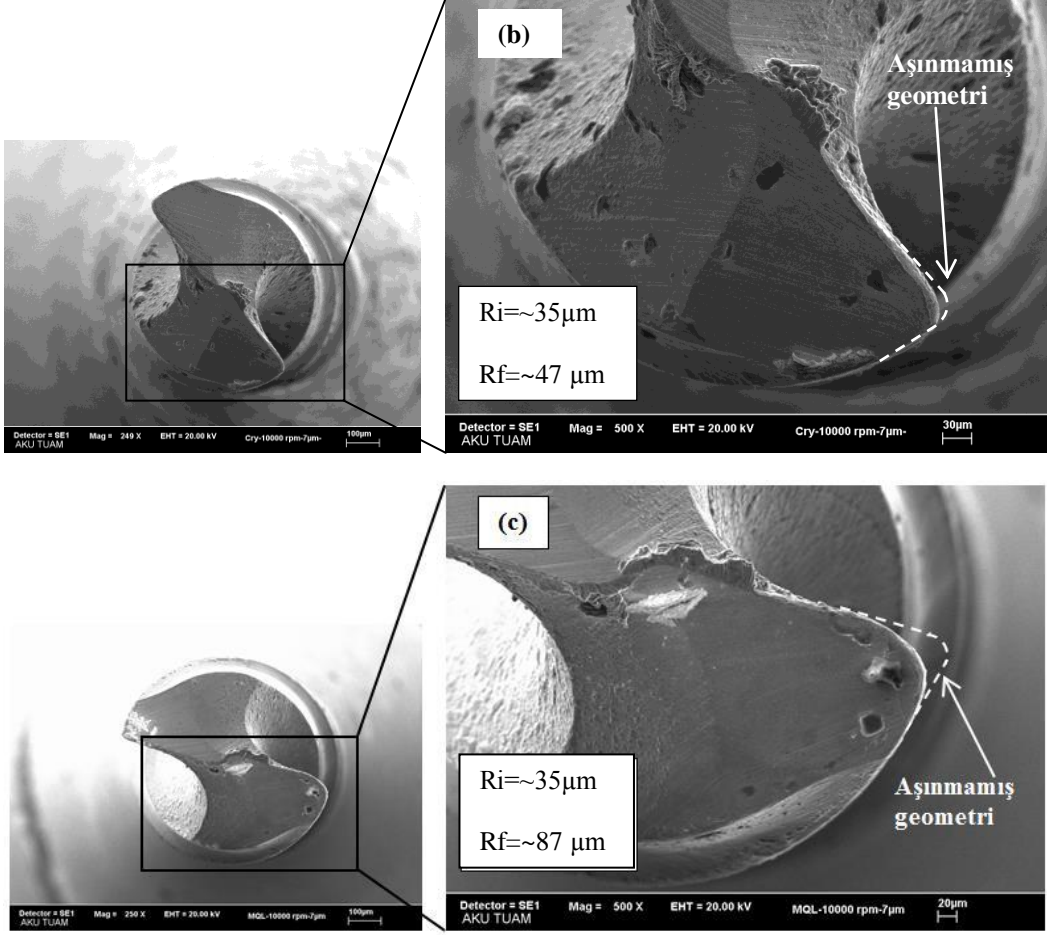
Malzemelerin işlenebilirliğinin araştırılmasında en önemli kriterlerden bir tanesi takım aşınmasıdır. Takım aşınmasında en önemli unsur iş parçası malzemesinin mekanik özellikleridir. Talaşlı imalat işlemlerinde takım ömrünün arttırılmasına yönelik pek çok

araştırma gerçekleştirilmektedir. Yapılan araştırmalarda takım üzerine uygulanan çeşitli kompozisyonlardaki kaplama malzemelerinin takım ömrünü önemli ölçüde arttırdığı ifade edilmiştir (Kudla 2006, Heinemann *et al.* 2006).

Şekil 4.9 da kuru kesme (Şekil 4.9 a), kriyojenik (Şekil 4.9 b) ve MQL (Şekil 4.9 c) şartlarda sabit 60 delik delme işlemi sonrasında matkap uçlarına ait SEM fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğrafları incelendiğinde takım üzerinde talaş yapışması ve abrasiv aşınma mekanizmasının hakim olduğu söylenebilir. Göze çarpan ilk unsur kuru delme işleminde aşınmanın maksimum, kriyojenik delme işleminde ise minimum olmasıdır. Başlangıçta  $35\mu\text{m}$  olan kesici kenar köşe radüsü kesme işlemi sonunda yaklaşık  $101\mu\text{m}$  seviyesine çıkmıştır. Yüksek aşınma, kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklığın sonucu olarak ortaya çıkmış olabileceği düşünülmektedir. Çünkü termal iletkenliği düşük olan Titanyum alaşımı kesme sırasında oluşan sıcaklığın kesme bölgesinde büyük ölçüde kalmasını sağlar. Dolayısıyla yüksek sıcaklığın oluşmasını sağlar. Yüksek sıcaklıklarda kesici takım kimyasal kararlılığını koruyamaz. Böylece takım üzerinden malzeme kayıpları başlamaktadır. Delme işleminde MQL yönteminin kullanılması, aşınmanın kuru delmeye nazaran daha küçük düzeyde gerçekleşmesine neden olmuştur. Kriyojenik delme işleminde aşınmanın az oluşması, kesme bölgesindeki sıcaklığın önemli oranda azalmasının sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Xia'nın yapmış olduğu çalışmada da benzer sonuçları görmek mümkündür (Xia 2014).

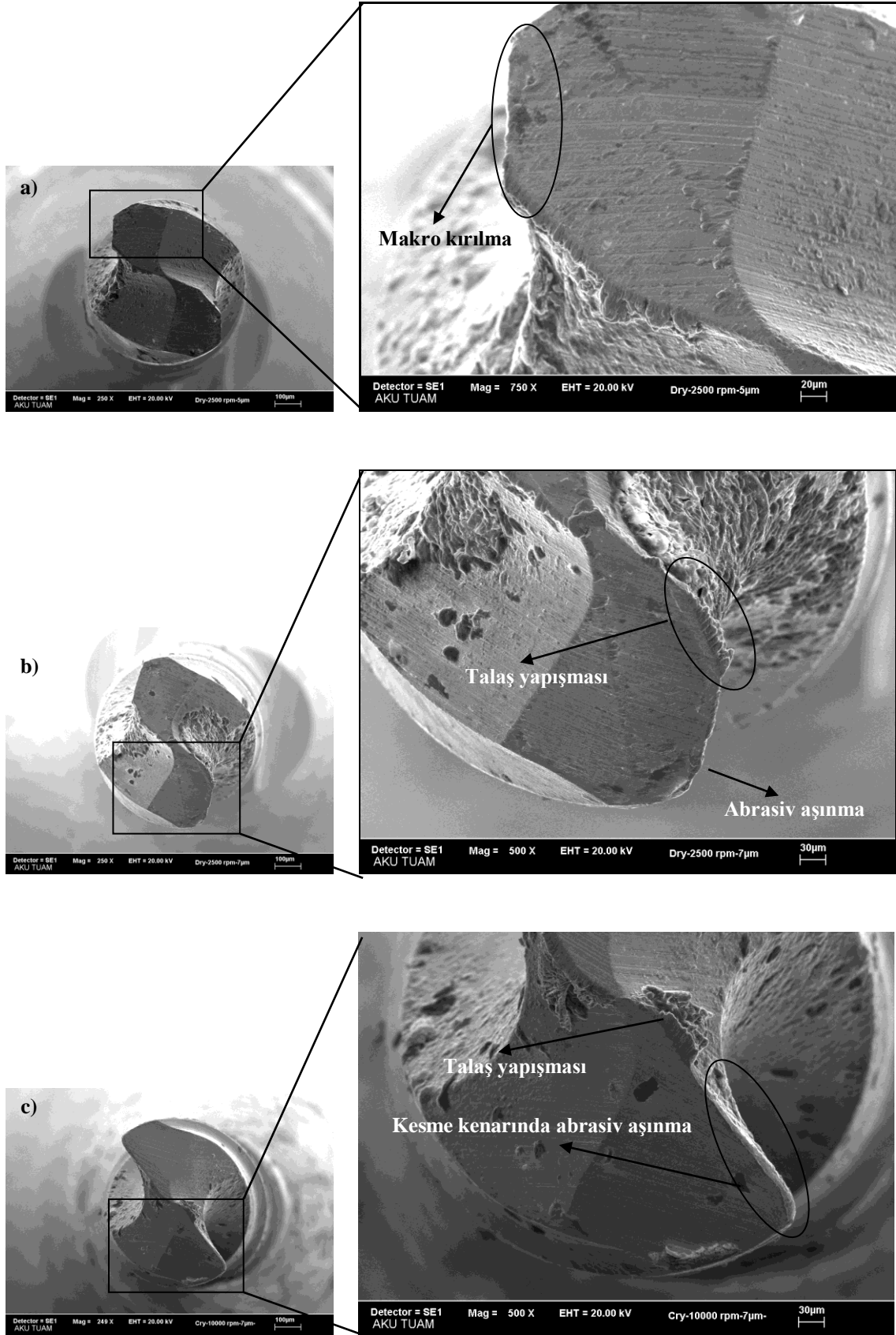


**Şekil 4.9** Mikro matkap ta 60 adet delik sonrasında meydana gelen takım yuvarlanma çapı değişimi ( $N: 10000 \text{ dev/dk}$ ,  $f_z=3,5\mu\text{m/dev}$ ).

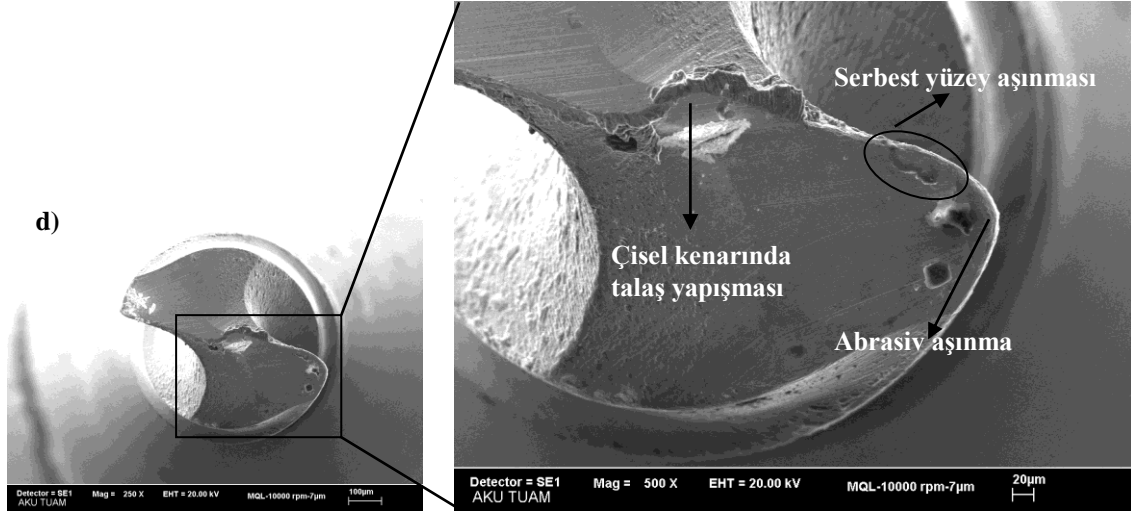


**Şekil 4. 9** (Devam) Mikro matkap ta 60 adet delik sonrasında meydana gelen takım yuvarlanma çapı değişimi (N: 10000 dev/dk, fz=3,5 μm/dev).

Mikro takım üzerinde oluşan aşınma tipi ve mekanizmaları Şekil 4.10' da verilmiştir. SEM fotoğraflarından hareketle tüm kesme koşullarında abrasiv aşınmanın ve talaş yapışmasının hakim olduğu söylenebilir. Bazı takımlarda bu iki baskın aşınmanın yanında; çisel kenarına talaş yapışması, serbest yüzey aşınması ve makro kırılmaların mevcut olduğu görülmektedir.



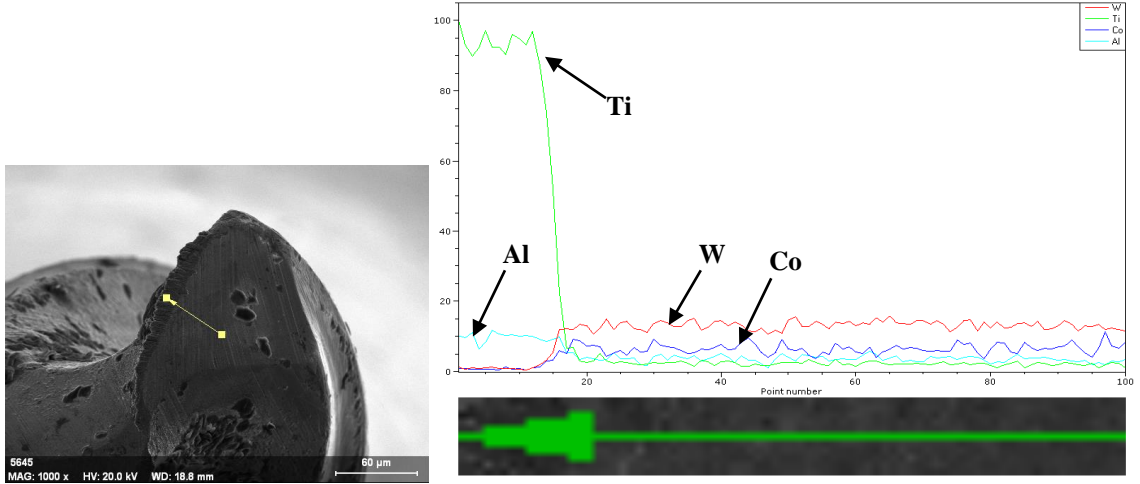
Şekil 4. 10 Mikro matkapta meydana gelen aşınma tipi ve mekanizmaları.



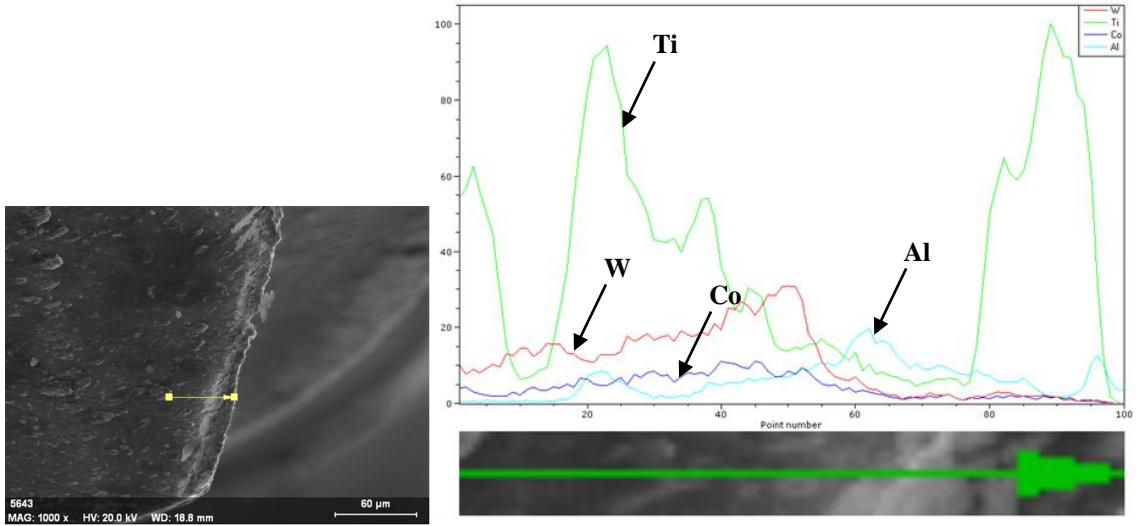
Şekil 4. 10 (Devam) Mikro matkapta meydana gelen aşınma tipi ve mekanizmaları.

Şekil 4.11 titanyum alaşımının mikro delinmesi sonucunda, meydana gelen talaş yapışmasının tespiti için elementel analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11’ de çizgisel olarak yapılan elementel analizin göre, mikro delik delme işleminde takım üzerine talaş yapışması açıkça görülmektedir. Ti-6Al-4V alaşımının takıma yapışma eğiliminde olduğu literatürden bilinmektedir (Venugopal *et al.* 2007). Takım serbest yüzeyinde takımın ana yapısını oluşturan tungsten ve kobalt ile iş parçasında bulunan alüminyum ve çok az miktarda titanyum elementi görülmektedir. Takımın kesme kenarında titanyum elementinin yoğun olduğu görülmektedir. Bu da titanyum alaşımının takıma yapıştığını göstermektedir. Yapışmayla birlikte takım ucunda aşınmanın da yoğun olduğu görülmektedir.

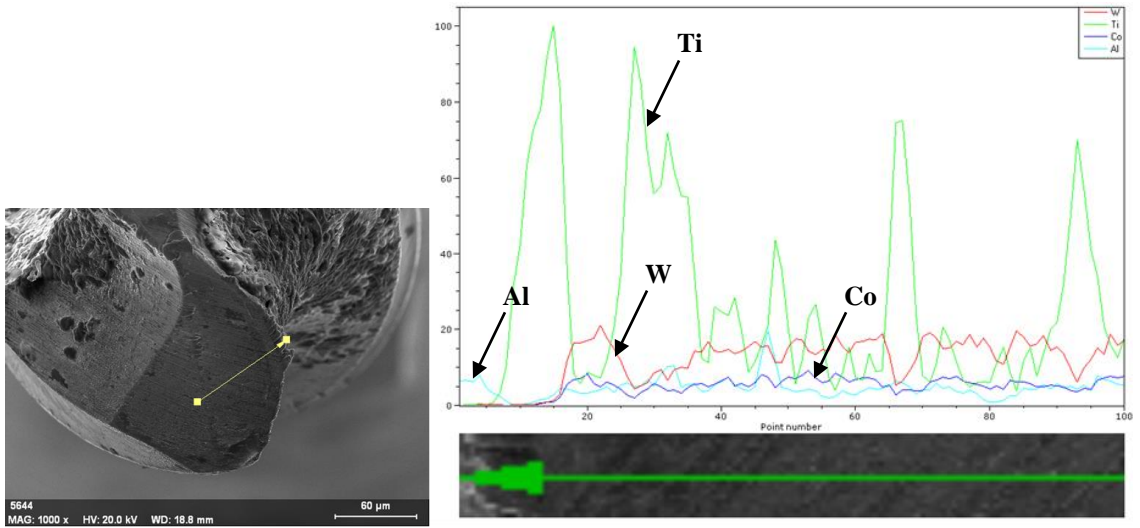
Şekil 4.11’ de dikkati çeken bir diğer unsur ise kriyojenik kesme işleminde talaş yapışması sadece aşınmış yüzeyde görülürken aşınmamış kısımda talaş yapışması oluşmamıştır. Kuru kesme işleminde ise aşınan kesme kenarında daha yoğun olmakla birlikte matkabın aşınmamış kısımlarında da belirgin miktarda talaş yapışması görülmektedir. Kriyojenik işlemede talaş yapışmasının sadece aşınmış kısımda oluşmasında, kullanılan soğutucunun etkili bir soğutma yaptığı ve talaş yapışmasını tetikleyen unsur olan kesme esnasında oluşan yüksek sıcaklıkları önlediği söylenebilir.



a)



b)



c)

Şekil 4. 11 Kesici takım üzerindeki EDX analizi, (a kriyojenik, b ve c kuru kesme), (N:10000dev/dk, fz=3,5μm/dev).

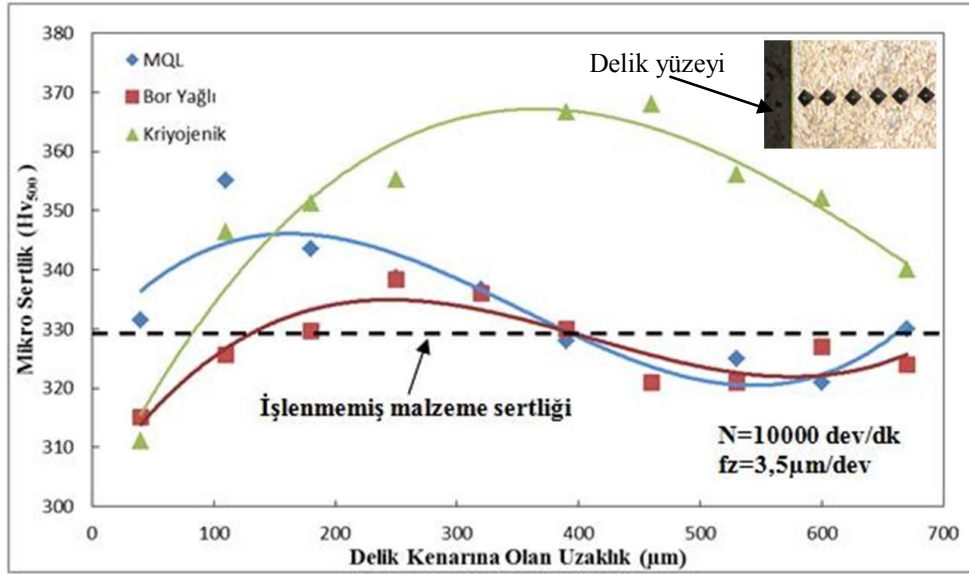


#### 4.5 Yüzey bütünlüğü ve mikro sertlik değişimi

İş parçası yüzeyleri genellikle, kaba işleme, yarı finish işleme ve finish işleme gibi ardışık işlemlerden geçer. Son işlenmiş yüzey tabakası üzerindeki oluşan değişiklikler bir sonraki işlemin performansını da etkiler. Bu titanyum alaşımları ve nikel alaşımları gibi yüksek işleme sertleşmesi sergileyen malzemeler için daha önemli bir hale gelir. Sertleşen yüzey tabakası sıralı işlemleri de zorlaştırabilmektedir. Termal yumuşamanın etkili olduğu derinliklerde kesme işlemi yapılması bir miktar da olsa işleme performansını arttırabilmektedir (Ulutan and Ozel 2011).

İşleme sonrası mikro sertlikte görülen değişiklikler termal, mekanik ve kimyasal etkilerle oluşabilir. Sertlik değerindeki bölgesel artışlar doğrudan pekleşme etkisiyle ilgilidir. Bu bir nebze kesme sıcaklığına da bağlıdır. Delme esnasında oluşan bölgesel sıcaklık farkları termal yumuşama veya yaşlandırma etkisi gösterir. Bununla birlikte yüksek kesme sıcaklığı ve yüksek basınç oluşması bölgesel yumuşamaya neden olabilir. İşleme sırasında oluşan yüksek sıcaklık delme işlemi esnasında alfa fazının beta fazına dönüşmesi nedeniyle yaşlandırma sertleşmesine neden olmaktadır (Sharif *et al.* 2012, Rahim and Sharif 2006). İş parçası üzerinde oluşan yüksek kesme sıcaklığı, kuru işleme sırasında ortaya çıkan yüksek kesme basıncı, termal sertleşme ve termal yumuşama etkisi iş parçası malzemesinin mekanik özelliklerini etkiler. Titanyum alaşımının düşük termal iletkenliği nedeniyle işleme yüzeyinin alt kısımlarında sıcaklığı muhafaza ederek yaşlandırma etkisi göstermektedir (Cantero *et al.* 2005). Bu da kesme kenarından iç kesimlere doğru farklı mikro sertlik değerlerine sebep olur (Ginting and Nouari 2009). En yüksek sertlik değerleri mikro yapının yüksek oranda deforme olduğu yüzeylerde oluşmaktadır (Che-Haron and Jawaid 2005).

Delme işleminde bor yağının kullanılmasıyla kesme kenarında termal yumuşama etkisi görülmektedir. Kesme yağının yağlama özelliğinin de düşük mikro sertliklerin oluşmasında etkili olduğu söylenebilir. Yaşlandırmanın etkisini az da olsa bor yağlı delme işleminde de görmek mümkündür.



Şekil 4. 12 Farklı soğutma koşullarındaki mikro sertlik değişimi.

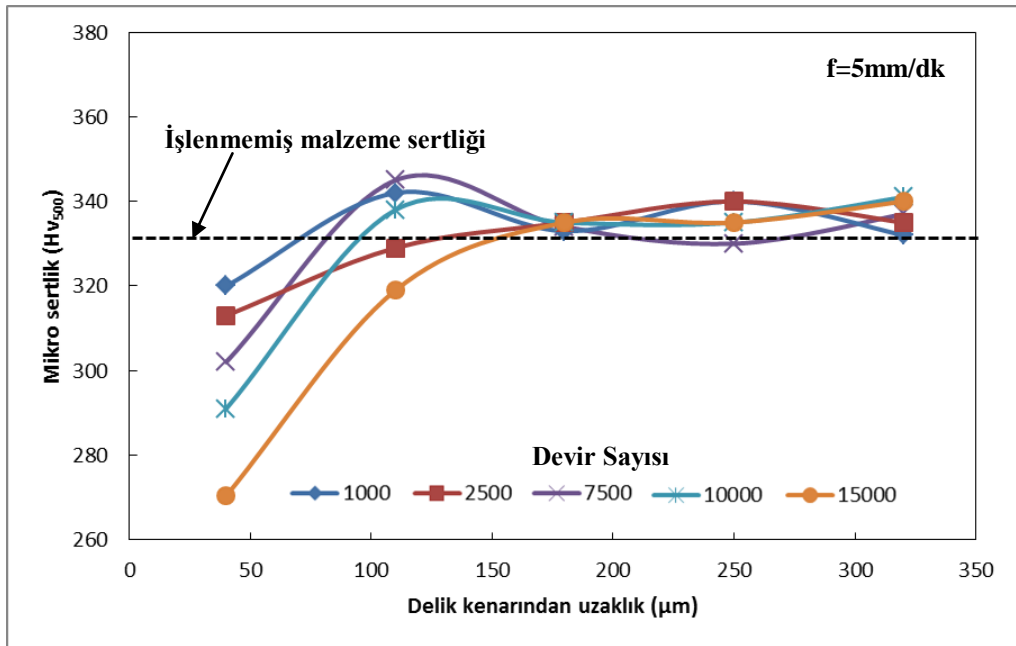
Kesme işleminde MQL kullanımı kesme kenarında termal yumuşama etkisi göstermiştir. Delme işlemi sırasında oluşan lokalize ısınmanın ve titanyum alaşımının düşük termal iletiminin olması nedeniyle yaşlanma eğilimi kesme kenarından bir miktar içeride oluşmuştur. Kesme işleminde yağlamanın etkisiyle oluşan düşük sürtünme katsayısı, mikro sertlik değerlerinin kesme kenarında ham malzeme sertliğine yakın ölçülmesine neden olmuştur. Nitekim Rahim ve Sasahara (2011)' da yaptığı bir çalışmada benzer sonuçlar elde etmiştir.

Kriyojenik delme işleminde kesme bölgesine uygulanan sıvı azot kesme sıcaklığını bölgesel olarak azaltmıştır. Sıcaklığın azalması kesme kenarında termal yumuşamaya neden olmuştur. Soğutma yağlama sistemleriyle delme işlemlerinde de görüldüğü gibi titanyum alaşımının düşük termal iletkenliğinin de etkisiyle yaşlandırmanın etkisini delik kenarından yaklaşık 600 mikron içeriye kadar görmek mümkündür.

MQL ile yapılan delme işleminde maksimum mikro sertliğin elde edildiği derinlik 100µm iken, bor yağı ile yapılan delme işleminde bu değer yaklaşık 250µm olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca MQL ile yapılan delme işleminde, delik kenarındaki mikro sertlik değeri ham malzeme değerine oldukça yakındır. Kriyojenik delme işleminde delik kenarında elde edilen mikro sertlik değeri ham malzemedan daha düşük iken, artan derinlikle beraber bu değer artmaktadır. Bu artış, delik kenarından 450µm

derinliğe kadar devam etmektedir. Bunun da nedeni; kullanılan sıvı azotun, Ti6Al4V malzemede bir gevrekleşmeye neden olmuş olmasıdır. Bu gevrekleşmenin bir diğer göstergesi de kriyojenik delik delme işleminde elde edilen ilerleme kuvveti değerlerinin de yüksek olmasıdır (Şekil 4. 4).

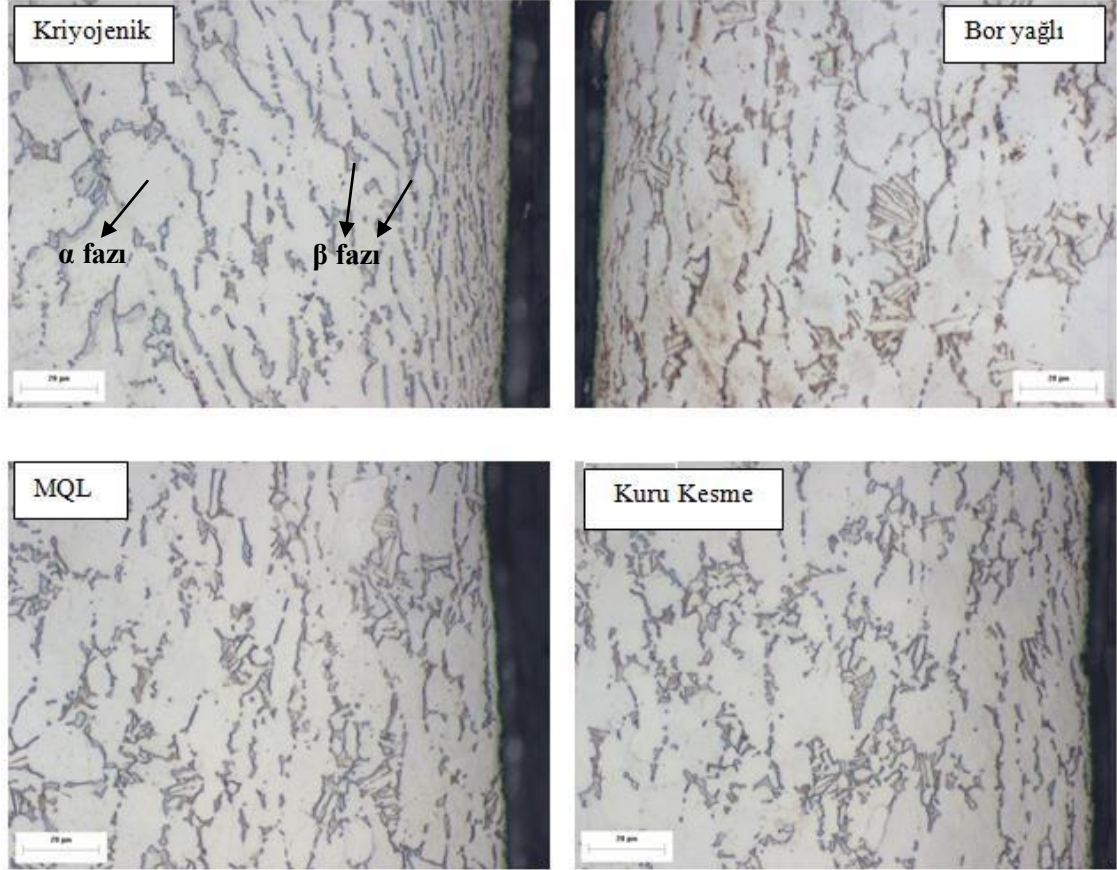
Şekil 4.13 kuru kesme koşullarında kesme hızının, delik kenarındaki mikro sertliği üzerindeki etkilerini göstermektedir. Delik kenarından yaklaşık 40 µm mesafeden alınan mikro sertlik değerlerinde tüm kesme hızlarında termal yumuşama görülmektedir. Mikro sertlik değeri kesme hızının artmasıyla orantılı olarak azalma eğilimi göstermektedir. Kesme hızının artması kesme bölgesindeki sıcaklığın da artmasına neden olmaktadır. Artan kesme sıcaklığıyla delik kenarındaki β fazının α fazına dönüşmesiyle termal yumuşama meydana gelmiş bu da sertlik değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Delik kenarından 180 µm mesafeden sonra tüm kesme hızlarında sertlik değişiminin işlenmemiş malzeme sertliğine yakın olduğu söylenebilir.



Şekil 4. 13 Kesme hızının mikro sertlik değişimine etkisi.

Farklı soğutma sıvılarının kullanıldığı delik delme işlemlerinde numunelerden alınan optik mikroskop fotoğrafları Şekil 4.14' te verilmiştir. Kuru kesme, bor yağlı işleme ve MQL işleme de tane yapısında belirgin bir değişme yoktur. Mikro sertlik grafikleri de, kriyojenik işleme dışında mikro yapıda önemli bir değişimin olmadığını göstermektedir.

Çünkü kriyojenik işleme dışında diğer kesme koşullarında mikro sertlik değerleri ham malzeme sertliğine çok yakındır. Kriyojenik işlemede mikro yapıda belirgin bir değişim görülmüştür. Mikro sertlik ölçümleri de bu bilgiyi desteklemektedir. Kriyojenik işleme de kullanılan sıvı azotun  $\alpha$  fazını  $\beta$  fazına çevirdiği söylenebilir. Delik kenarında yoğunlaşan  $\beta$  fazı mikro sertliği de arttırmıştır.



Şekil 4. 14 Kesme koşullarının mikro yapı üzerindeki etkileri.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Mikro delik delme işleminde ilerleme değerinin artmasıyla birim zamanda kaldırılacak talaş kesiti de artmaktadır. Talaş kesitinin artması ilerleme kuvvetlerinin artmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte kesme hızının artması ile kesme işlemi kolaylaşır, kesme bölgesinde sıcaklığın da artmasına sebep olan kesme hızı ilerleme kuvvetlerini de azaltmaktadır. Elde edilen iki sonuç da konvansiyonel işlemede genel kabul görmüş sonuçlarla örtüşmektedir. Bununla birlikte, elde edilen torklar kullanılan kesme parametrelerine ve soğutma sistemine bağlı olarak değişkenlik gösterir. İlerleme değerinin artması ortalama torkun da artmasına neden olurken, kesme hızının artması ortalama torkun sabit kalmasına ya da bir miktar artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Parça üst yüzeyinden kesici takımın konik kısmının yüksekliği kadar olan mesafeden alınan ölçümlerde ise farklı bir durum elde edilmiş olup ortalama tork değerlerinden farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Konik yüksekliği kadar mesafeden alınan tork ölçümleri konvansiyonel işlemeyle örtüşmektedir.

Kesme işleminde sıvı azot kullanımı yani kriyojenik koşullarda tork değişimi ölçülememiştir. Kesme işleminde kullanılan azot düzensiz genleşmeden dolayı dinamometreyi olumsuz etkilemiş ve elde edilen sonuçlar anlamsız olmuştur. MQL ve bor yağı kullanımı ilerleme kuvvetinin ve tork değerlerinin azalmasına katkı sağlamıştır. Delme işleminde bor yağının kullanılması yüzey kalitesi üzerinde olumlu etkileri olmuştur. MQL işleme için elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri bor yağından elde edilen değerlere yakın olduğu elde edilen bir diğer sonuçtur. Bor yağı kullanımının yağlama etkisinin yanı sıra soğutma etkisinin de olması bu sonucun elde edilmesini sağlamıştır. Kriyojenik delme işleminde ise azotun yağlayıcı etkisi olmadığından elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri kuru kesmeye yakın çıkmıştır.

Kullanılan soğutma yöntemleriyle çapak oluşumu bir miktar azalmış fakat çapağın tamamen ortadan kaldırılamadığı tespit edilmiştir. Çapak yüksekliği değerlendirildiğinde kriyojenik delme işleminde oluşan çapak boyutunun küçük olması kriyojenik işleme için olumlu bir sonuçtur. Buna ek olarak, kriyojenik delme işleminde çapak genişliğinin de minimum olduğu ve daha homojen çapak yüksekliği gözlenmiştir.

Takım aşınma tipi ve mekanizmalarını değerlendirdiğimizde; kesme bölgesinde oluşan sıcaklıktan dolayı abrasiv aşınma tipi baskın gelmiştir. İş parçasının takıma meyilli olması, takıma talaş yapışmış ve tüm parametrelerde bu gözlenmiştir. Abrasiv aşınmanın etkisiyle maksimum takım aşınması kuru kesme şartlarında gerçekleşmiştir. Kuru delme operasyonlarında kenar radüsünün iki katından daha fazla arttığı da gözlenen bir diğer sonuçtur. Buna karşın MQL sistemle yapılan deneylerde aşınma daha küçük düzeylerde oluşmuştur. Kullanılan yağın etkisiyle takım talaş ara yüzündeki sürtünmenin azalması bu sonucu doğurmuştur. Kriyojenik kesme işleminde kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın bertaraf edilmesi sebebiyle, abrasiv aşınma mekanizması kısmen de olsa bertaraf edilmiştir. Bu da takım uç radüsünde daha az aşınma oluşmasına katkı sağlamıştır.

Sonuç olarak, titanyum alaşımının mikro şartlarda ve farklı soğutma koşullarında delinmesi ve doğurduğu sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- İlerleme kuvveti ve tork değişimi açısından bakıldığında, bor yağı ve MQL' in yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.
- Takım aşınması açısından, kriyojenik delme işleminin daha avantajlı olduğu ve takım köşe radüsünün daha az büyüdüğü saptanmıştır.
- Delik yüzey kalitesi için bor yağı kullanımı tavsiye edilmektedir. Bununla birlikte MQL' in de yakın sonuçlar verdiği göz önünde bulundurulmalıdır.
- Kullanılan soğutma sistemlerinin hiç birinde çapak oluşumu sıfıra indirgenememiştir. Lakin kriyojenik delme işlemi çapak yüksekliğinin azalmasına katkı sağlamıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- Ali, M. H., Khidhir, B. A., Mohamed, B., Balasubramanian, R., Oshkour, A. A. (2011). Machining of titanium alloys: *A Review*.
- Anping Guo. (2004). Investigation of the static and dynamic characteristics of micro drilling. A dissertation submitted in partial fulfillment Of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. *University of Arkansas*.
- Arrazola, P. J., Garay, A., Iriarte, L. M., Armendia, M., Marya, S., Le Maitre, F. (2009). Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3). *Journal of Materials Processing Technology*, **209(5)**: 2223-2230.
- Astakhov, V. P. (2007). Exit drill burr and drill tool life, *Tool Research and Application Department, Production Services Managment*.
- Bahçe, E., Kılıçkap, E., Cihan, Ö. (2010). Al-5005'in delinmesinde delme parametrelerinin çapak oluşumuna etkisinin araştırılması. *2. Ulusal Tasarım malat ve Analiz Kongresi –Balıkesir*, 242-250.
- Bermingham, M. J., Kirsch, J., Sun, S., Palanisamy, S., Dargusch, M. S. (2011). New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **51(6)**: 500-511.
- Bhandari, B., Hong, Y. S., Yoon, H. S., Moon, J. S., Pham, M. Q., Lee, G. B., Ahn, S. H. (2014). Development of a micro-drilling burr-control chart for PCB drilling. *Precision Engineering*, **38(1)**: 221-229.
- Bhowmick, S., Lukitsch, M., Alpas, A. (2010). Dry and minimum quantity lubrication drilling of cast magnesium alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **50**: 444-457.
- Boyer, R. R. (1996). An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering, A*, **213(1)**: 103-114.
- Brunette, D. M., Tengval, P., Textor, M., Thomsen, P. (2001). Titanium in Medicine: Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications: *Springer-Verlag New York, LLC*.

- Cantero, J. L., Tardío, M. M., Canteli, J. A., Marcos, M., Miguélez, M. H. (2005). Dry drilling of alloy Ti–6Al–4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45(11)**: 1246-1255.
- Carrilero, M. S., Bienvenido, R., Sanchez, J. M., Alvarez, M., Gonzalez, A., Marcos, M. (2002). A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al–Cu alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42(2)**: 215-220.
- Chae, J., Park, S. S., Freiheit, T. (2006). Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46(3)**: 313-332.
- Cheharon, C. H., Jawaid, A. (2005). The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti–6% Al–4% V. *Journal of Materials Processing Technology*, **166(2)**: 188-192.
- Cheong, M. S., Cho, D. W., Ehmann, K. F. (1999). Identification and control for micro-drilling productivity enhancement. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **39(10)**: 1539-1561.
- Engel, U., Eckstein, R. (2002). Microforming—from basic research to its realization. *Journal of Materials Processing Technology*, **125**: 35-44.
- Erdem, S., Aydın, K. (2006). Gaz türbünlü uçak motorlarında titanyum alarımının kullanımı. *Mühendis ve Makine*, **47**: 44-53.
- Ezugwu, E. O., Wang, Z. M. (1997). Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of materials processing technology*, **68(3)**: 262-274.
- Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N., Engel, U. (2001). Microforming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **50(2)**: 445-462.
- Ginting, A., & Nouari, M. (2009). Surface integrity of dry machined titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **49(3)**: 325-332.
- Heinemann, R., Hinduja, S., Barrow, G., Petuelli, G. (2006). Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46(1)**: 1-6.



- Hong, S. Y., Zhao, Z. (1999). Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining. *Clean Products and Processes*, **1(2)**: 107-116.
- Hong, S. Y., Ding, Y. (2001). Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **41(10)**: 1417-1437.
- Hong, S. Y., Markus, I., Jeong, W. C. (2001). New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **41(15)**: 2245-2260.
- Hong, S.Y. (2006). Lubrication mechanisms of LN2 in ecological cryogenic machining. *Machining Science and Technology: An International Journal*, **10:1**, 133-155, DOI: 10.1080/10910340500534324.
- Imran, M., Mativenga, P. T., Gholinia, A., Withers, P. J. (2014). Comparison of tool wear mechanisms and surface integrity for dry and wet micro-drilling of nickel-base superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **76**: 49-60.
- Khan, A. A., Ahmed, M. I. (2008). Improving tool life using cryogenic cooling. *Journal of materials processing technology*, **196(1)**: 149-154.
- Kıvık, T. (2012). Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6Al-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması. *Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ANKARA*.
- Kim, J., Min, S., Dornfeld, D. A. (2001). Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **41(7)**: 923-936.
- Kudla, L. A. (2006). Deformations and Strength of Miniature Drills. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. **220-3**: 389-396. doi: 10.1243/095440505X69346
- Kunt, E. D., Khalil, I. S., Naskali, A. T., Fidan, K. C., Sabanovic, A. (2010). Yüksek hassasiyetli montaj işlemleri için minyatür delta robot tasarımı, en iyilemesi ve denetimi.

- Kurt, M., Bakır, B., Mutlu, B., Atakök, G., Girit, O. (2012). Invar36 Demir-Nikel Alaşımının Minimum Miktarda Yağlama (Mql) Tekniği İle Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, *3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 04-05 Ekim 2012, Ankara, Türkiye
- Machado, A. R., Wallbank, J. (1990). Machining of titanium and its alloys—a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **204(1)**: 53-60.
- Mohan, S., Shan, H.S. (2006). Analysis of Roundness Error and Surface Roughness in the Electro Jet Drilling Process. *Materials and Manufacturing Processes*, **21**: 1-9
- Mohammed, T.H. (2001). Hole quality in deep hole drilling. *Materials and Manufacturing Processes*, **16 (2)**: 147-164
- Niinomi, M. (1998). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering, A*, **243(1)**: 231-236.
- Novakov, T. (2010). Computational Analysis of Micromachining Ti6Al4V Titanium Alloy. Doctor of Philosophy, *PURDUE UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL*
- Okasha, M.M., Mativenga, P.T., Driver, N., Li, L. (2010). Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **59**: 199–202.
- Özel, T., Thepsonthi, T., Ulutan, D., Kaftanoğlu, B. (2011). Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti–6Al–4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **60(1)**: 85-88.
- Perçin, M., Aslantaş, K., Uçun, İ. Mikro-mekanik delik delme işlemi ve Tİ-6AL-4V için deneysel bir çalışma 2014. *5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu Bursa*, 367-380.
- Pilný, L., De Chiffre, L., Piška, M., Villumsen, M. F. (2012). Hole quality and burr reduction in drilling aluminium sheets. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **5(2)**: 102-107.
- Qin, Y. (2006). Micro-forming and miniature manufacturing systems development needs and perspectives. *Journal of Materials Processing Technology*, **177**: 8–18.

- Rahim, E. A., Sasahara, H. (2011). A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys. *Tribology International*, **44**: 309–317.
- Rahim, E. A., Sharif, S., Mohruni, A. S., Syed, I. A. (2005). Machinability Investigation when Drilling Titanium Alloys. *In International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century* (pp. 553-557). *The Japan Society of Mechanical Engineering (JSME)*.
- Rahim, E. A., Sharif, S. (2006). Investigation on tool life and surface integrity when drilling Ti-6Al-4V and Ti-5Al-4V-Mo/Fe. *JSME International Journal Series C*, **49(2)**: 340-345.
- Rahim, E. A., Sasahara, H. (2011). Investigation of tool wear and surface integrity on MQL machining of Ti-6AL-4V using biodegradable oil. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **225(9)**: 1505-1511.
- Saotome, Y., Iwazaki, H. (2000). Superplastic extrusion of microgear shaft of 10 µm in module. *Microsystem Technologies*, **6(4)**: 126-129.
- Sharif, S., Rahim, E. A. (2007). Performance of coated-and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy—Ti-6Al4V. *Journal of materials processing technology*, **185(1)**: 72-76.
- Sharif, S., Rahim, E. A., Sasahara, H. (2012). Machinability of Titanium Alloys in Drilling.
- Smolarczyk, P., Łukaszewicz, A., Szota, M., Nabiałek, M., Bukowska, A. (2013). Comparison of mechanical properties of Ti-6Al-4V titanium alloy produced by the conventional method and the injection.
- Su, Y., He, N., Li, L., Li, X. L. (2006). An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V. *Wear*, **261(7)**: 760-766.

- Sun, S., Brandt, M., Dargusch, M. S. (2010). Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **50(11)**: 933-942.
- Sun, J., Guo, Y.B. (2009). A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**: 4036-4042
- Tansel, I. N., Rodriguez, O. (1992). Automated monitoring of microdrilling operations. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, **20**: 205-210.
- Tasdelen, B., Wikblom, T., Ekered, S. (2008). Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling. *Journal of materials processing technology*, **200(1)**: 339-346.
- Ucun, İ., Aslantaş, K., Bedir, F. (2010). İncel 718 Süper Alaşımının İşlenmesinde Kaplanmış Mikro Takımların Aşınma Davranışları ve Performans Analizi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **7(4)**: 47-55.
- Ucun, İ., Aslantaş, K., Bedir, F. (2011). Kesici Takım Kaplama Malzemesinin Mikro Frezeleme İşleminde Takım Elastik Deformasyonu Üzerindeki Etkisi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey*.
- Ucun, İ., Aslantaş, K., Bedir, F. (2014). The effect of minimum quantity lubrication and cryogenic pre-cooling on cutting performance in the micro milling of Inconel 718. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **DOI**: 10.1177/0954405414546144.
- Ulutan, D., & Ozel, T. (2011). Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **51(3)**: 250-280.
- Venugopal, K. A., Paul, S., Chattopadhyay, A. B. (2007). Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy. *Cryogenics*, **47(1)**: 12-18.
- Vollertsen, F., Hu, Z., Niehoff, H. S., Theiler, C. (2004). State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, **151(1)**: 70-79.

- Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., Wakabayashi, T. (2004). Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **53(2)**: 511-537.
- Xia, T. (2014). Investigation of drilling performance in cryogenic drilling on CFRP composite laminates. *Master, Mechanical Engineering in the College of Engineering at the University of Kentucky*.
- Yalçın, B.(2007). Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı*.
- Yang, Z., Tan, Q., Wang, L. (2002). Principle of precision micro-drilling with axial vibration of low frequency. *International journal of production research*, **40(6)**: 1421-1427.
- Yasir, A., CH, C. H., Jaharah, A. G., Yanuar, B., Gusri, A. I., Nagui, H. E. Cutting Force Analysis and Performance of PVD coated tungsten carbide When Milling of Ti6Al4V under MQL.
- Yildiz, Y., Nalbant, M. (2008). A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48(9)**: 947-964.
- Yongchen, P., Qingchang, T., Zhaojun, Y. (2006). A study of dynamic stresses in micro-drills under high-speed machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46(14)**: 1892-1900.
- Yuan, S. M., Yan, L. T., Liu, W. D., Liu, Q. (2011). Effects of cooling air temperature on cryogenic machining of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, **211(3)**: 356-362.
- Yücel, E., Çiçek, A. (2011). İmalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri. *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, **15(1)**: 46-59.
- Zhaojun, Y., Wei, L., Yanhong, C., Lijiang, W. (1998). Study for increasing micro-drill reliability by vibrating drilling. *Reliability engineering & system safety*, **61(3)**: 229-233.

## İnternet Kaynakları

1. <http://mikrotools.com/hybriduedm/hybrid-%ce%bcedm-machine-images/>, (03.12.2014)
2. <http://www.kistler.com/tr/en/?type=669&fid=2493&cHash=cda5b6ccb16879d1894afa821a6b54dd>, (26.11.2014)
3. <http://www.hurriyet.com.tr/saglik/19671938.asp>, (16.03.2015)
4. <http://w3.sdu.edu.tr/haber/3270/turkiyenin-ilk-yerli-kalp-pompasi-sdude-uretiliyor>, (16.03.2015)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa PERÇİN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bozüyük- 20,07,1988  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : [mustafapercin88@hotmail.com](mailto:mustafapercin88@hotmail.com) / 05379770334

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise :Şehit Zafer İpek Lisesi (2002-2005)  
Ön Lisans :Selçuk Üniversitesi, Huğlu Meslek Yüksek Okulu,  
Makine (2007-2009)  
Lisans :Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknik Eğitim Fakültesi,  
Makine Eğitimi Bölümü, Talaşlı Üretim Öğretmenliği  
(2009-2012)  
Yüksek Lisans :Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Makine Mühendisliği (2012-2015)  
Yüksek Lisans 2 :Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
İş Güvenliği (Tezsiz) (2013-2014)  
Yüksek Lisans 3 :Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
İmalat Mühendisliği (2013-....)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

Gürmas Gürel Makine Sanayi A.Ş., Ar&Ge Ürün Geliştirme (Eylül 2013- Nisan 2014)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı., TÜBİTAK 213M572  
Projesi Asistanı 15,04,2014-.....

### Yayımları (SCI ve diğer) :

Perçin, M., Aslantaş, K., Uçun, İ., (2014). Mikro-Mekanik Delik Delme İşlemi Ve Ti-6al-4v İçin Deneysel Bir Çalışma, 5. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu-Bursa*: 367-380.

Perçin, M., Aslantaş, K., Uçun, İ., Çiçek, A., (2015). Mikro Frezeleme İşleminde Soğutma Koşullarının Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi, *Sekizinci Mühendislik Ve Teknoloji Sempozyumu, Çankaya Üniversitesi-Ankara*: 45-50.

M, Perçin., K, Aslantaş., İ, Uçun., Y, Kaynak., A, Çiçek., Micro drilling of Ti6Al4V alloy, *Journal of Precision Engineering*,(Hakem değerlendirmesinde).

Diğer konular