

**MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE KESME KOŞULLARI VE  
KAPLAMA MALZEMESİNİN Ti6Al4V ALAŞIMININ  
İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS**

**Hüseyin Ender HOPA**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran, 2016**

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

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

**YÜKSEK LİSANS**

**MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE KESME KOŞULLARI VE**  
**KAPLAMA MALZEMESİNİN Ti6Al4V ALAŞIMININ**  
**İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Hüseyin Ender HOPA**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran, 2016**

## TEZ ONAY SAYFASI

Hüseyin Ender HOPA tarafından hazırlanan “Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Koşulları ve Kaplama Malzemesinin Ti6Al4V Alaşımının İşlenebilirliği Üzerine Etkilerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 15.06.2016 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. Adem ÇİÇEK

**Üye** : Prof Dr. Kubilay ASLANTAŞ

**Üye** : Doç. Dr. İsmail UCUN

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

.....  
Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR  
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 yararlanması 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.**

15/06/2016

Hüseyin Ender HOPA

**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE KESME KOŞULLARI VE  
KAPLAMA MALZEMESİNİN Ti6Al4V ALAŞIMININ İŞLENEBİLİRLİĞİ  
ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hüseyin Ender HOPA  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Bu çalışmada, mikro frezeleme işleminde kaplama malzemesinin, kesme parametrelerinin ve farklı soğutma/yağlama koşullarının çapak boyutu, yüzey kalitesi, takım aşınması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla özellikle havacılık ve biyomedikal sektöründe sıklıkla kullanılan Ti6Al4V malzemesi iş parçası olarak seçilmiştir. Çalışmada üç farklı kaplama malzemesi (TiN, AlCrN, NCD) kullanılmış olup, mikro frezeleme sonucu meydana gelen kanallarındaki çapak oluşumları 3D profilometre cihazı ile tespit edilmiştir. Ayrıca kaplamalı takımların slot yüzey kalitesi üzerindeki etkisi ve takımda meydana gelen hasar tipleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; mikro frezeleme işleminde kullanılan TiN, AlCrN, NCD kaplamalı takımların, meydana gelen çapak oluşumunu azalttığı söylenebilir. Bununla birlikte, kullanılan kaplamalı takımların, takım aşınması üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Özellikle TiN ve AlCrN kaplı takımlarla yapılan frezeleme işlemlerinde takım aşınmasına bağlı takım çapı küçülmesi minimum seviyede, fakat NCD ve kaplamasız takımlarla yapılan frezeleme işlemlerinde takımda meydana gelen çap küçülmesinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında MQL in kullanılması hem takım ömrü hem de çapak oluşumu açısından önemli avantajlar sağladığı tespit edilmiştir.

**2016, x + 76 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Mikro frezeleme 1, Ti6Al4V 2, Kaplamalı takım 3, Kriyojenik soğutma 4, Kesme kuvvetleri 5

**ABSTRACT**  
M.Sc Thesis

INVESTIGATION OF EFFECTS OF COATING MATERIAL AND CUTTING  
CONDITIONS ON MACHINABILITY OF Ti6Al4V ALLOY IN MICRO-MILLING  
PROCESS

Hüseyin Ender HOPA

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Kubilay ASLANTAŞ

In this study in micro-milling; the effects of coating material, cutting parameters and different cooling/lubrication conditions on burr diameter, surface quality and tool wear were investigated. For this purpose, Ti6Al4V which has a wide application in aviation and biomedical applications was chosen as workpiece. In this work, three different coating materials (TiN, AlCrN, NCD) were used and burr formation in ducts that were formed after micro-milling was determined by using 3D profilometer. The effects of coated tools on slot surface quality and types of damages on tools were also determined. According to the results; it can be concluded that, the tools coated with TiN, AlCrN, NCD decrease burr formation. At the same time, it was observed that coated tools used in this study have a big effect on tool wear. Especially in micro-milling experiments that were done by using tools coated with TiN and AlCrN, the decrease in tool diameter due to tool wear was at minimum level. However, in experiments that were done by using NCD coated and uncoated tools, decrease in tool diameter was at higher levels. Besides, it was observed that; the use of MQL brings important advantages about tool lifetime and burr formation.

**2016, x + 76 pages**

**Keywords:** Micro milling 1, Ti6Al4V 2, Coating tools 3, Cryogenic cooling 4, Cutting force 5

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması esnasında fikir, bilgi ve tecrübelerinden fazlasıyla istifade ettiğim, kişiliğiyle bana rehberlik eden, kıymetli danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ' a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bu aőamaya gelmemde ve yetişmemde emeklerini hiçbir Şekilde ödeyemeyeceğim aileme ve eőime, Őükranlarımı sunarım.

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

Hüseyin Ender HOPA  
AFYONKARAHİSAR, 2016

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	4
2.1 Minyatür Ürün İmalatı ve Üretim Yöntemleri.....	4
2.2 Mikro Frezeleme .....	7
2.2.1 Kullanılan tezgahlar .....	9
2.2.2 Mikro frezelemedeki kesici takımlar .....	10
2.2.3 Mikro takım kaplamaları.....	14
2.2.4 Çapak oluşumu .....	15
2.2.5 Yüzey pürüzlülüğü.....	16
2.2.6 Takım aşınmasının etkileri.....	19
2.2.7 Mikro frezelemede soğutma/yağlama yöntemleri .....	21
2.3 Ti6Al4V Alaşımı ve işlenebilirliği.....	25
2.4 Mikro frezelemede talaş oluşumu mekanizması .....	28
2.4.1 Boyut etkisi .....	30
2.4.2 Mikro frezelemede iş parçası mikro yapısının etkisi .....	31
3. MATERYAL ve METOT .....	33
3.1 İş parçası ve kesici takım .....	33
3.2 Deney düzeneği ve kesme parametreleri.....	35
3.3 Dinamometre ve data alma sistemi .....	38
3.4 Soğutma sistemlerinin tasarımı .....	39
3.5 İş parçası yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi .....	42
3.6 Çapak oluşumunun ölçülmesi .....	43
3.6 Takım aşınmasının ölçülmesi.....	43
4. BULGULAR .....	45
4.1 Kesme kuvveti değişimi .....	45



4.2 Takım Aşınması .....	48
4.3 Yüzey Pürüzlülüğü .....	56
4.4 Çapak Oluşumu .....	60
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	66
6. KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	77

## 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
A	Alfa
B	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

---

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
CNC	Computer Numerical Controlled (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
MQL	Minimum Quantity Lubrication (Minimal Miktar Yağlama)
SDÜ	Süleyman Demirel Üniversitesi
N	Newton
KN	Kilonewton
µm	Mikrometre
m	Metre
mm	Milimetre
dev	Devir
Hv	Vickers sertliği
MPa	Mega paskal
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
ml	Mililitre
H	Saat
F <sub>x</sub>	X ekseninde oluşan kesme kuvvet
F <sub>y</sub>	Y ekseninde oluşan kesme kuvvet
F <sub>z</sub>	Z ekseninde oluşan kesme kuvvet

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1. 1 Mikro-sistemlerin kullanıldığı alanlar ve pazar payları. ....	1
Şekil 2. 1 Minyatür parça örnekleri. ....	5
Şekil 2. 2 Geleneksel işleme ile mikro işleme arasındaki fark. ....	7
Şekil 2. 3 Mikro frezeleme işleminde kullanılan örnek bir kesici takım. ....	8
Şekil 2. 4 Mikro frezeleme için üretilmiş özel tezgâh. ....	10
Şekil 2. 5 İki ağızlı mikro freze takım geometrisi (Heaney <i>et al.</i> 2008). ....	11
Şekil 2. 6 Takım malzemelerinin sıcaklığa bağlı sertliklerinin değişimi. ....	12
Şekil 2. 7 Mikro frezeleme işleminde kullanılan mikro freze takımları. ....	13
Şekil 2. 8 Mikro kanaldaki çapak oluşumu (Lee <i>et al.</i> 2005). ....	15
Şekil 2. 9 Çapak bölgeleri (Lee <i>et al.</i> 2005). ....	16
Şekil 2. 10 Kanalın yüzey pürüzlülük değerlerinin. ....	18
Şekil 2. 11 Kaplama türlerinin performanslarının karşılaştırılması . ....	18
Şekil 2. 12 Mikro kesici takımda meydana gelen aşınmanın türüne göre değişimi. ....	20
Şekil 2. 13 Soğutma tipinin takım ömrüne etkisi (Hong <i>et al.</i> 2001). ....	20
Şekil 2. 14 Yağlamanın kesme kuvveti üzerine etkisi (Suresh <i>et al.</i> 2006). ....	22
Şekil 2. 15 Mikro frezeleme işleminde MQL uygulaması. ....	24
Şekil 2. 16 Kesme işleminde ortaya çıkan ısının takıma ve talaşa dağılım oranı. ....	26
Şekil 2. 17 Jet motorlarında titanyum alaşımının kullanım yerleri. ....	28
Şekil 2. 18 Mikro frezelemede minimum talaş derinliği (Park and Freiheit, 2006). ....	29
Şekil 2. 19 Kesici uç yarıçapının minimum talaş derinliğine etkisi (Özel 2007). ....	29

Şekil 3. 1 Mikro freze takımların geometrik özellikleri.....	34
Şekil 3. 2 Takımların Sem resimleri.....	35
Şekil 3. 3 Mikro kesme işleminin gerçekleştirildiği deney düzeneği. ....	36
Şekil 3. 4 Mikro frezeleme işleminin şematik gösterimi.....	36
Şekil 3. 5 Deney düzeneği.....	38
Şekil 3. 6 Kesme deneylerinde kullanılan MQL sistemi.....	40
Şekil 3. 7 Çalışmada kullanılan Hibrit soğutma/yağlama sistemi.....	41
Şekil 3. 8 -30°C' de kesme işlemi. ....	41
Şekil 3. 9 Slotların üç boyutlu yüzey analizi.....	42
Şekil 3. 10 Yapılan ölçüm sonrasında elde edilen, 3 boyutlu yüzey şekli. ....	42
Şekil 3. 11 Çapak genişliği ölçme yöntemi.....	43
Şekil 3. 12 Deney öncesi çap ölçümleri. ....	44
Şekil 3. 13 Takım ucu aşınma miktarının optik mikroskop ile tespit edilmesi. ....	44
Şekil 4. 1 Kesme kuvvet bileşkesinin diş başı ilerleme ile değişimi.....	46
Şekil 4. 2 Kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna bağlı değişimi.....	47
Şekil 4. 3 Kesme mesafesine bağlı olarak takım çapındaki değişim.....	49
Şekil 4. 4 Kesme mesafesine bağlı olarak kesici kenarında meydana gelen aşınma. ....	50
Şekil 4. 5 Kesici takımlara ait SEM görüntüleri. ....	51
Şekil 4. 6 Kaplanmış takımların EDX analiz sonuçları .....	53
Şekil 4. 7 Sem görüntüleri.....	54
Şekil 4. 8 Kesme işlemi sonrasında takım çaplarındaki değişim. ....	56

Şekil 4. 9 Kesme mesafesine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değişimi. 57	57
Şekil 4. 10 Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme ile değişimi. .... 58	58
Şekil 4. 11 Diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak Ra değerlerinin değişimi. 59	59
Şekil 4. 12 Kesme mesafesine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi. 60	60
Şekil 4. 13 Kanal sonlarında meydana gelen çapak oluşumunun SEM görüntüleri. .... 61	61
Şekil 4. 14 Maksimum çapak genişliğinin kesme mesafesiyle değişimi ..... 62	62
Şekil 4. 15 Çapak oluşumuna ait görüntüler verilmektedir..... 63	63
Şekil 4. 16 Çapak genişliğinin kesme mesafesi ile değişimi..... 64	64

## ÇİZELGELER DİZİNİ

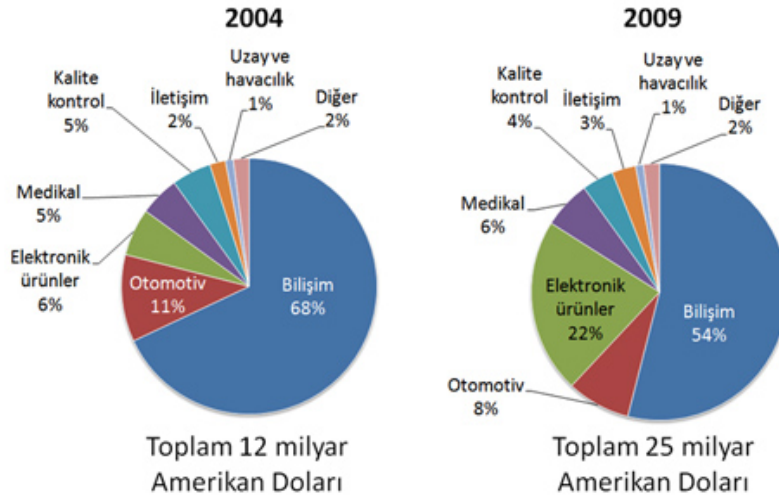
**Sayfa**

Çizelge 3. 1 Ti-6Al-4V kimyasal bileşimi (Smolarczyk et al. 2013).....	33
Çizelge 3. 2 Kaplamalı ve kaplamasız takımlara ait karakteristikler .....	33
Çizelge 3. 3 Deneylerde kullanılan kesme parametreleri.....	37

## 1. GİRİŞ

Birçok alanda mikro parçalara olan ilgi ve gereksinim her geçen gün artmaktadır. Medikal, biyomekanik, havacılık ve uzay uygulamaları, enerji dönüşüm/depolama cihazları bu alanlardan bazılarıdır. Bu alanlarda minyatür parça gerektiren uygulamalar medikal protezler, ilaç uygulama aygıtları, minyatür pompalar, minyatür yakıt pilleri, minyatür lensler, minyatür kalıplar, minyatür uzay uyduları ve taşınabilir elektronik tüketim cihazları olarak örneklendirilebilir. Mikro elektronik parçaların tüketiciye sunulması ile birlikte bugün bilgisayarlar ve iletişim cihazları daha gelişmiş sistemlerle donatılmış ve daha küçük boyutlara indirilmiş, otomobiller sensörle daha da güvenli hale getirilmiştir. Elektronik mühendisliği uygulamalarında mikro imalatın avantajları belirgin bir şekilde hissedilmektedir. Diğer mühendislik uygulamalarında da mikro imalatın uygulamak adına araştırmacılar mikro imalat yöntemleri üzerinde yoğun olarak çalışmaktadırlar (Ehmann *et al.* 2005).

Mikro ekipmanların pazar payı gün geçtikçe büyümektedir. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi mikro sistemlere olan talebin beş yıl içerisinde ikiye katlanarak 2009 yılı sonunda 25 milyar Amerikan Dolarına erişmesi öngörülmektedir. Mikro imalatta gerçekleşen teknolojik gelişmelerle, elektronik ve medikal uygulamalarında mikro-sistem kullanım oranı artmaktadır (Nexus 2005).



Şekil 1. 1 Mikro-sistemlerin kullanıldığı alanlar ve pazar payları.

Mikro işleme metotlarından olan mikro frezeleme tekniği, genellikle tercih edilen bir yöntemdir. Çünkü, tormalama ve delik delme işlemlerine nazaran farklı geometrilere parçaları işleyebilme yeteneğine sahiptir. Aynı zamanda, imalat hızı ve maliyet konusunda da pek çok avantaj sağlamaktadır (Friedrich and Vasile 1996). Dolayısıyla bu tür ürünlerin imalatında gerek maliyet, gerekse de zaman açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

Mikro frezeleme işleminin yukarıda bahsedilen avantajlarının yanında bazı dezavantajları da söz konusudur. İş parçasının ve takımın küçük olmasından dolayı takımdaki aşınmalar kesme sürecini önemli ölçüde etkilemektedir (Patrick *et al.* 2007). Takımda meydana gelen hasar durumu elde edilen ürünün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Özellikle mikro imalatta kritik bir parametre olan kesici takımın kesme sırasındaki elastik deformasyonu, imalatı gerçekleştirilen ürünün boyutlarında ve geometrisinde hatalara sebebiyet vermektedir. Mikro işlemede takımın ve iş parçasının boyutlarından dolayı ikinci bir işlemle yüzey kalitesini arttırmak ve çapak temizlemek oldukça zordur (Zhaojun *et al.* 1998). Mikro işleme sırasında karşılaşılan bir diğer problem de talaş yapışmasıdır. Takıma talaşın yapışması hem işlenen yüzey kalitesini hem de takım ömrünü olumsuz etkilemektedir.

Titanyum alaşımlarından en yaygın kullanım alanına sahip olan Ti6Al4V, yüksek mukavemetinin yanı sıra nispeten düşük süneklığe sahip olmasından dolayı uzay ve havacılık sektörlerinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Yaygın kullanımına rağmen yüksek ısıl direnç ve mukavemete sahip olduğu için, geleneksel takımlarla bu malzemelerin talaşlı imalatı oldukça zordur. Düşük termal iletkenlik, yüksek kesme sıcaklıkları, takım ve iş parçası arasında güçlü adhezyona sebep olduğundan, kesici takımların ömürlerinin kısa sürede tamamlanmasına neden olmaktadır (Motorcu 2009). Düşük işlenebilirlikleri nedeniyle Ti6Al4V halen birçok araştırmaya konu olmaya devam etmektedir (Ezugwu *et al.* 1997).

Mikro elektronik ve mekanik sistem aygıtları imal etmek için kullanılan frezeleme veya delik delme takımları gibi mikro takımların takım ömürlerini uzatmak ve performansını iyileştirmek için koruyucu kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır (Jackson *et al.* 2007).



Geleneksel talaşlı imalatta en çok kullanılan kaplama türleri TiN, AlCrN, CrN, AlTiN ve AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'dır. Mikro frezeleme işleminde de yukarıda verilen kaplamalar kullanılmakta olup, bunlar içerisinde takım ömrü açısından en iyi performansın CrN'e ait olduğu ifade edilmiştir (Ucun *et al.* 2010).

Bu çalışmada ise özellikle uzay ve medikal sektörde çokça kullanılan titanyum (Ti6Al4V) esaslı alaşımının mikro şartlarda işlenebilirliği incelenmiştir. Çalışmanın amacı, mikro parçaların üretimi sonrasında ortaya çıkan çapakların minimize edilmesidir. Bu amaca ulaşabilmek için, mikro frezeleme işleminde çapak oluşumunu etkileyen; kesme parametreleri, kesme yöntemi, soğutma/yağlama şekli ve kaplama türü gibi unsurlar dikkate alınmıştır.

Bu amaçla hem zor işlenebilirlik karakteristiklerine sahip olan hem de imalat sanayinde kullanımı her geçen gün artan Ti6Al4V alaşımı, iş parçası malzemesi olarak seçilmiştir. Özellikle bu alaşımların seçilme nedeni ise; yüksek korozyon direnci ve ısı direnci nedeniyle, sahip olduklarından uçak ve uzay sanayinde ve medikal uygulamalarda sıklıkla kullanılıyor olmasıdır. Yukarıda verilen amaç doğrultusunda hibrit bir soğutma sistemi tasarlanacaktır. Projenin diğer bir hedefi ise, yeni nesil kaplama malzemesi olarak bilinen NCD kaplanmış takımlarla yapılacak olan kesme işlemlerinde, çapak oluşumunun kaplama malzemesi ile ne değişimi de belirlenmiş olacaktır.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Minyatür Ürün İmalatı ve Üretim Yöntemleri

Mikro mekanik sistemlerin karakteristik ebadı çoğunlukla birkaç mikrometreden birkaç santimetreye kadar değişebilir. Bir mekanik sistemi mikro ölçekli olarak küçültmenin birçok faydası vardır. Böyle bir sistemde, hacimle ilgili kuvvetler önemini yitirir. Bunun sonucunda, çok hızlı mekanik sistemlerin mikro ölçekli dünyada gerçekleştirilebileceğidir. Hızlı hareket ettirilip durdurulabilen mekanizmalardan; büyük ivmeli hareketlere dayanabilecek sensörlere kadar, birçok sistemi mikro ölçekli dünyada hayata geçirmek mümkün olur. Ayrıca mikro mekanik sistemler büyük ölçekli makine sistemlerine göre daha az yer kaplayıp, daha az güç harcarlar. Teknik olarak çok sayıda mikro-üretim tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler kullanılarak, boyutları birkaç mikrometreden birkaç milimetreye kadar değişen türlü amaçlı mikro cihazlar üretilmektedir (Kaplan *et al.* 2003).

Günümüzde mikro ekipman üretiminde yaygın olarak tercih edilen mikro mekanik işleme, temel olarak geleneksel tornalama, frezeleme ve delik delme işlemlerinin mikro ölçekte yapılmasına imkan sağlayan bir talaşlı imalat sürecidir. Bu üretim tekniklerinin, gerek işleme hızı ve gerekse de maliyet açısından sağladığı avantajlar nedeniyle uygulanabilirliği, diğer imalat tekniklerinden daha fazladır (Schaller *et al.* 1999). Mikro frezeleme işlemi, diğer makro işleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında üretim hızı ve maliyeti açısından bir takım avantajlara sahiptir. 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).

Son zamanlarda çeşitli mühendislik malzemelerinin mikro şartlarda işlenebilirliğine yönelik çalışmalara sıkça rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda bakır (Ucun *et al.* 2014), Inconel 718 (Bissacco *et al.* 2008) sert çelikler (Thepsonthi *et al.* 2014) ve alüminyum (Sreejith *et al.* 2008) malzemeleri çoğunlukla kullanılmıştır. Bu çalışmalarda nümerik,

analitik ve deneysel yaklaşımların kullanıldığı görülmektedir. Mikro frezeleme işleminde Ti6Al4V malzemesinin kullanımına yönelik ise, oldukça kısıtlı çalışma vardır.

Mikro elektronik, sağlık, biyomedikal, saat yapımı, uzay mühendisliği, elektronik, iletişim ve otomotiv (Şekil 2.1) gibi pek çok endüstri kolunda, yüksek hassasiyetli minyatür bileşenlere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. (Corbett *et al.* 2000, Lang *et al.* 1999). Mikro sistemler, düşük üretkenlik ve az miktarlardaki üretimin uygun maliyetlerde yapılamaması nedeniyle ticari olarak yaygınlaşmamaktadır.

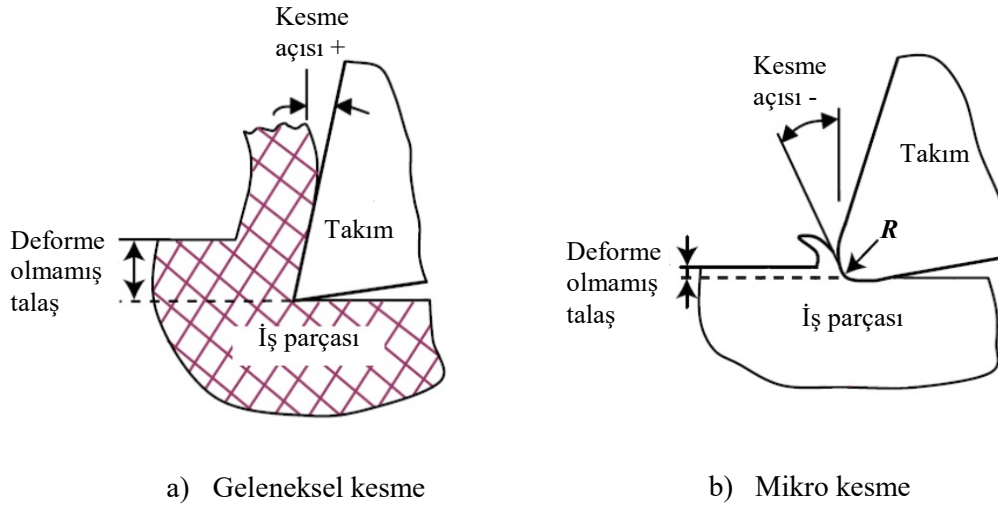


Şekil 2. 1 Minyatür parça örnekleri.

Mikro frezeleme işlemi, temel olarak geleneksel frezeleme işlemine oldukça benzemektedir. Bir anlamda geleneksel frezelemenin minyatürleştirilmiş hali de denebilir (Heamawatanachai *et al.* 2009). Mikro işleme beraberinde bazı problemler de getirmektedir. Mikro imalat prosesinde yüksek ürün kalitesi elde edebilmek için daha hassas ekipmanlar kullanılması gerekmektedir. Cihazlardan istenilen bu hassasiyet seviyelerine ulaşmak için, mekanik sistem ve üretim toleransları büyük önem taşımaktadır. (Kunt *et al.* 2010). Minyatür ürün imalatı için temel sorunlardan olan, yüksek hassasiyetli takımların gerekliliği, uygun tezgâhların seçilmesi, yüksek mukavemetli takım malzemelerinin gerekliliği mikro işlemeyi zorlaştıran unsurlardır (Geiger *et al.* 2001).

Minyatürleşmeyle birlikte, boyuttan ötürü geleneksel işleme ile arasında bazı farklar oluşmaktadır. İş parçasının ve takımın küçük olmasından dolayı takımdaki aşınmalar kesme sürecini önemli ölçüde etkiler (Patrick *et al.* 2007). Geleneksel imalatta ihmal edilen sürtünme, kazıma ve takımdaki küçük aşınmalar, mikro işlemede önem kazanmakta ve bu oluşumlar iş parçasının yüzey pürüzlülüğünü ve çapak oluşumunu etkilemektedir.

Mikro frezelemede, kesme derinliği veya diş başına düşen ilerleme miktarının kesici takım kenar radüsüne oranı genellikle büyüktür. Böyle bir durumda kesici takım kenarı, negatif bir talaş açısı karakteri sergilemekte, hatta talaş kaldırmak için yeterli derinliğe ulaşamamaktadır.



Şekil 2. 2 Geleneksel işleme ile mikro işleme arasındaki fark.

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

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

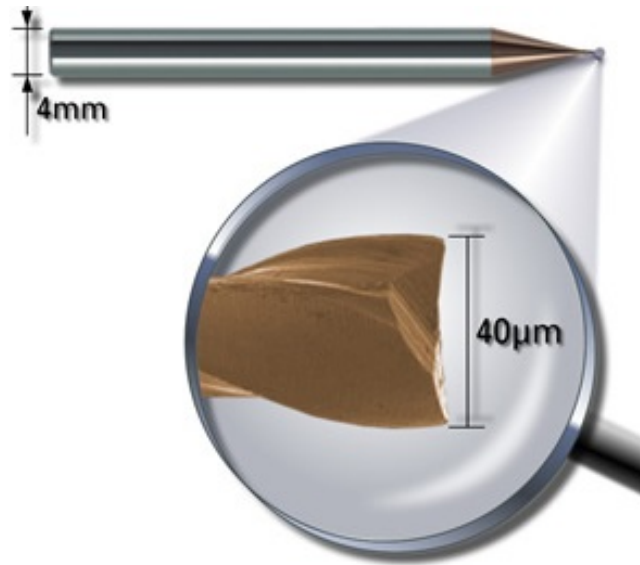
## 2.2 Mikro Frezeleme

Biyomedikal, havacılık, optik cihazlar ve elektronik ambalaj sanayisinde gün geçtikçe mikro frezelemeye daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Geniş malzeme yelpazesi ve üç boyutlu işleme kabiliyeti nedeni ile tercih sırasında üst sıralarda yer almaktadır 0,1  $\mu\text{m}$ –

100  $\mu\text{m}$  arası mikro ölçek olarak tanımlanmaktadır. Mikro frezeleme bu ölçekler arasında bulunan parçaların işlendiği alanı kapsamaktadır. Mikro kesme işlemi geleneksel kesme işlemi ile büyük benzerlik göstermektedir. Mikro frezelemeyi anlamak için öncelikli olarak geleneksel frezeleme ile arasındaki farkları ortaya koymak gerekmektedir (Dhanorker *et al.* 2006).

Yüksek geometrik karmaşıklığı, işlenebilir malzeme yelpazesi, serbest form ve yüksek boy oranları ile üç boyutlu mikro yapıların üretilmesinde yüksek tolerans aralığı sunması; mikro frezelemeyi diğer mikro işleme teknikleri yanında avantajlı bir konuma getirmektedir (Zhu *et al.* 2009).

Şekil 2.3’ te mikro boyuttaki freze takımları görülmektedir. Çok ince bir kesite sahip kesici takıma, çok daha fazla yükün gelmesi, hem takım ömrünü olumsuz etkiler hem de kesici takıma ait köşe radüsünün artmasına neden olur. Bunun sonucu olarak da mikro frezelemenin temel sorunlarından olan kesici takımda ani kırılmalar meydana gelmekte ya da işlenen makine ekipmanında ölçüsel ve geometrik hatalar oluşmaktadır. Bunun dışında kesme sırasında yeterli rijitliğin sağlanamaması ve takımda meydana gelen aşınma da elastik deformasyonu artıran bir diğer etkendir (Lopez *et al.* 2004).



**Şekil 2. 3** Mikro frezeleme işleminde kullanılan örnek bir kesici takım.

### 2.2.1 Kullanılan tezgahlar

İmalat sanayide iş parçası boyutlarının küçülerek minyatürleşmeye doğru bir eğilim sergilediği görülmektedir. Dolayısı ile mikro kesicilerin kullanımı da yaygın hale gelmektedir. Ancak düşük maliyetli ve verimli bir ekipman kullanımı için standart işleme uygulamalarının dışına çıkmak gerekmektedir. Mevcut konvansiyonel CNC ekipmanları ile küçük çaplı mikro freze uçlarının gerek duyduğu parametreleri sağlayamamaktadır. Mikro frezeleme için bu sınırların ötesine geçmek gerekmektedir. Geleneksel tezgâhlardan daha fazla olacak şekilde mikro frezelemeyi oluşturan parçalar arasında sıkı kalite ilişkisi olmak zorundadır. Konvansiyonel frezeye benzemesine rağmen, ebatlardaki önemli küçülme (yaklaşık olarak 1/40) hiç karşılaşılmamış durumların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu derecede bir küçülme mikro frezenin bazı parametrelerinde de keskin değişikliklere neden olmuştur. Örnek olarak diş başına 10 µm' den daha az ilerleme, 1–20 µm arası kesme derinliği, 30.000 dev/dak' dan fazla iş mili devri ve 0,25 mm' den daha küçük takım çapı gösterilebilir. Bu yüzden mikro frezelerin kendisi, bu uygulamalar için yüksek hassasiyet gereksinimleri (0,1 µm civarında) göz önüne alınarak tasarlanmalıdır (Lacalle *et al.* 2009).

Mikro mekanik işleme yaklaşık 60 milyar dolar işlem hacmine sahip, dünya genelinde hızla büyüyen bir endüstridir. Özellikle yüksek devir sayılarında ve hassasiyette çalışan tezgâhların (Şekil 2.4) imalat maliyeti geleneksel tezgâhların maliyetini geçebilmektedir. Bu nedenle mikro frezeleme konusu üzerindeki çalışmaların da maliyeti oldukça yüksek olmaktadır. Bu konudaki yüksek olan maliyetleri aşağıya çekebilmek adına belirli fonksiyonları yerine getirebilen laboratuvar ölçekli minyatür tezgahlar da yapılmaktadır. Mikro işlemede kullanılan takım tezgahlarında temel olarak aranan özellik tezgahın dinamik ve statik olarak kararlı bir yapıya sahip olması, yüksek dönme hızına sahip spindle olması ve oldukça hassas bir kontrol sisteminin bulunmasıdır (Chae *et al.* 2006).



Şekil 2. 4 Mikro frezeleme için üretilmiş özel tezgâh.

Mikro işleme yapan tezgahlarda önemli olan bir diğer ekipman ise, yüksek dönme hızına sahip spindle motorlarının olmasıdır. Spindle motorunun dönme hızı, aynı zamanda işlemin boyutu üzerinde de etkiye sahiptir. İmal edilecek malzemenin boyutu ufaldıkça kullanılacak olan kesici takım çapı da küçülmektedir. Bu yüzden, küçük çaplı takımlardan maksimum verimin alınabilmesi için, yüksek devirli motorlara ihtiyaç duyulmaktadır (Chae *et al.* 2006) Bununla birlikte, spindle motorlarda yüksek devirlerin elde edilmesi için, bazı ihtiyaçları da gözönünde bulundurulmalıdır. Motor milinin yataklanması spindle seçimi için önemli bir kriterdir (Chae *et al.* 2006).

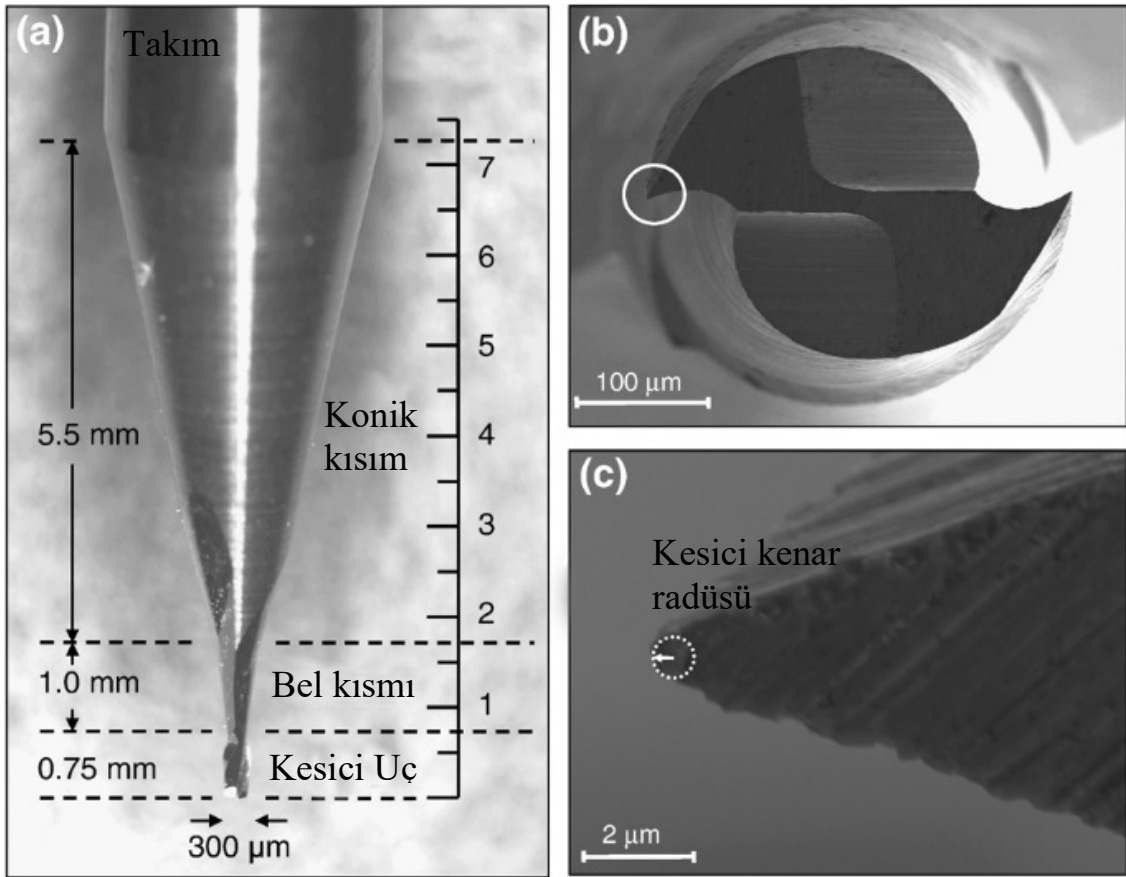
### 2.2.2 Mikro frezelemedeki kesici takımlar

Mikro frezelemede kullanılan kesici takımların boyutları, mikro parçalardan talaş kaldırma hacmini ve hassasiyetlerinin sınırlarını belirler. Daha küçük takımlar, boyutlarına göre daha az ısıl genişlemeye maruz kaldıkları için birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Takımlar kısa olması nedeniyle daha yüksek statik rijitliğe, daha yüksek dinamik kararlılığa ve üretimde daha az miktarda malzeme ile kullanıldığı için daha düşük maliyete sahiptirler (Cox *et al.* 2004).

Mikro frezeleme ilk kullanılmaya başlanıldığı zamanlarda ve sonrasında çeşitli mikro takımlar üretilmiştir. Bunların bazıları araştırma için, bazıları ise ticari anlamda kullanıma sunulmuştur. Günümüzde mikro frezeleme uygulamalarında iki ağızlı ve



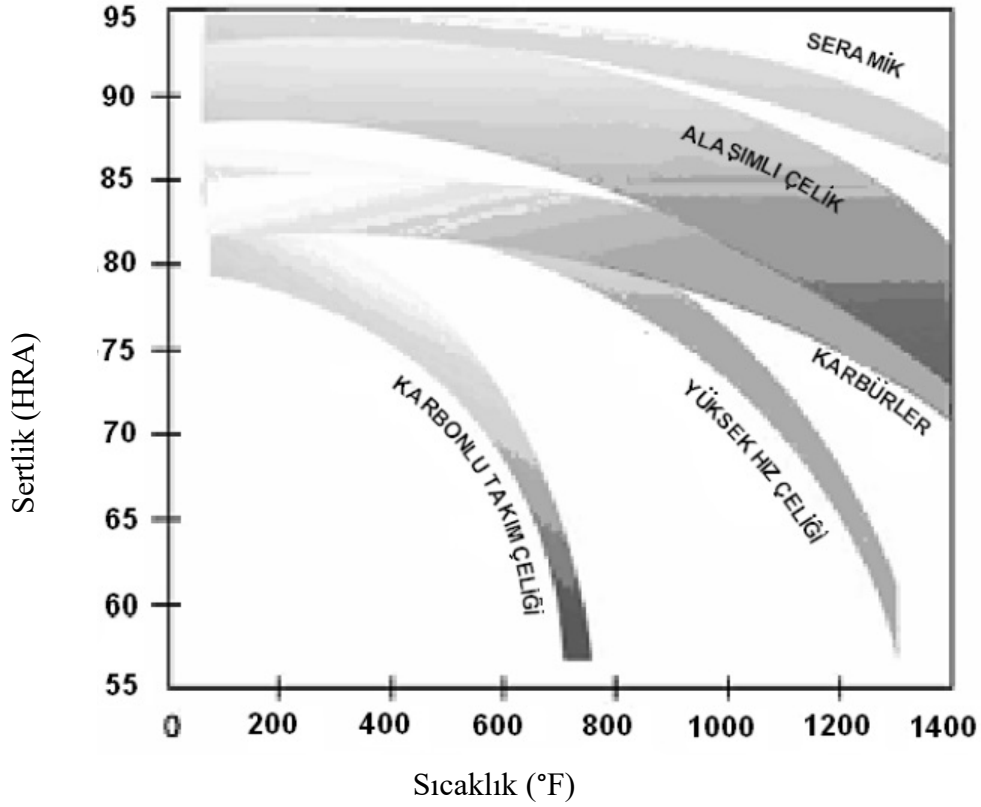
helis kanallı WC freze uçları (Şekil 2.5) kullanılmaktadır. Ancak Schaller (1999) kesici takım çapının  $50\mu\text{m}$ ' dan daha küçük olması durumunda, rijitliklerini korumaları ve üretim tekniği sınırlarını azaltmak için, takımların sıfır helis açısına sahip olması gerektiğini söylemiştir (Park and Freiheit 2006). Heaney (2008) araştırmalarında  $0,3\text{ mm}$  çaplı elmas kaplı WC freze ucu kullanmışlardır. SEM aracılığı ile çekilen fotoğraflarda kesici takıma ait geometri detayları verilmiştir (Şekil 2.5). Kesici uç radüsüne üretimde çok kontrol edilememesine rağmen kesmeye etkileri araştırılmak üzere fotoğraflarda yaklaşık olarak ölçüldüğü görülmektedir (Heaney *et al.* 2008).



Şekil 2. 5 İki ağızlı mikro freze takım geometrisi (Heaney *et al.* 2008).

Yüksek hassasiyetli makinelerde genellikle iki tip malzemeden üretilen kesici takımlar kullanılır. Bunlardan birisi elmas kesicilerdir. Ancak, demir içeren malzemeleri işlemede elmas kesicilerin yetenekleri sınırlıdır. Demir ve elmas arasındaki yüksek kimyasal ilgi yüksek aşınma sebebidir. Kullanım alanı demir olmayan elementleri

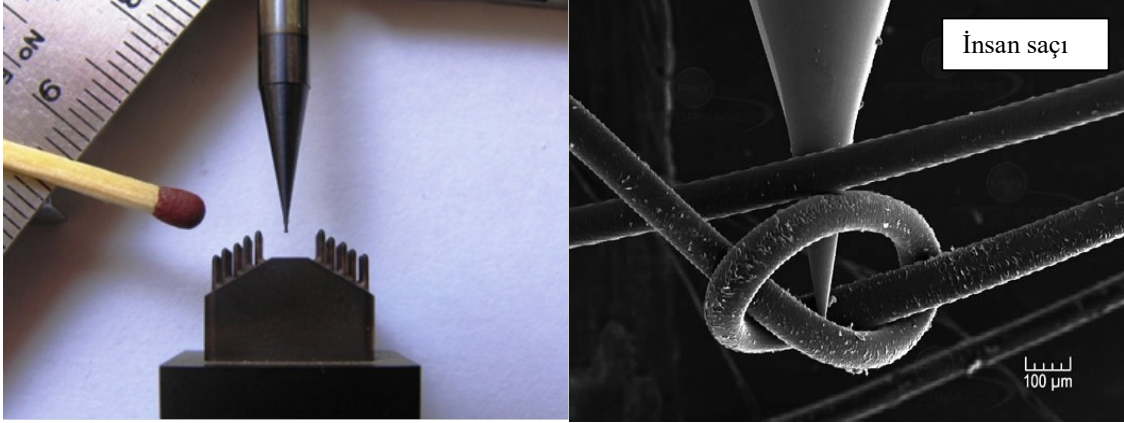
işleme ile sınırlı olmasında dolayı mikro kesici uçlar genel olarak WC' den imal edilir ki bu takımlar sert ve sağlam oldukları için yüksek sıcaklıklarda (Şekil 2.6) çalışabilme özelliğine sahiptir (Kalpakjian *et al.* 2002).



Şekil 2. 6 Takım malzemelerinin sıcaklığa bağlı sertliklerinin değişimi (Chae *et al.* 2006).

Mikro parmak frezelemede takımın diş başına ilerleme hızı konvansiyonel parmak frezeleme ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Bundan dolayı kesme şartlarının nasıl oluşturulacağı çok önemlidir. Diğer bütün işleme operasyonlarında olduğu gibi devir, ilerleme hızı, kesme derinliği, soğutma uygulamaları ve talaş tahliyesi dikkat edilmesi gereken konulardır. 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. Bunun için mikro parmak frezelemede, bu parametrelerin seçimi kesme kuvveti analizi, takım aşınması ve yüzey dokusu, kesme planlarının oluşturulması ve kesme şartlarının belirlenmesi gibi kesme işlemi karakteristiklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Özel *et al.* 2007.) Bununla birlikte, kullanılacak takımlar, imalatı gerçekleştirilecek ürünün kalitesini ve üretim maliyetini birinci dereceden

etkilemektedir (Chae *et al.* 2006). Bu yüzden, kesici takımın seçimi kritik bir süreçtir. Mikro frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar, çıkan ürünün hassasiyetini belirleyen en önemli unsurdur. Şekil 2.7’ de mikro boyuttaki freze takımları görülmektedir.



Şekil 2. 7 Mikro frezeleme işleminde kullanılan mikro freze takımları.

Elmas takımlar, genellikle hassas işlemlerin yapıldığı imalat işlemlerinde tercih edilen bir kesici takım olmuştur. Bu takımlar, sertliklerinden dolayı keskin kenarlara kolaylıkla bir form verebilmektedir. Bu durum elmas takımların tercih edilme nedenleri arasındadır. Ayrıca, elmas takım malzemesinin demir içeren malzemelerle kimyasal reaksiyona yatkınlığı, bu takımların kullanımına en büyük engeldir. Bu özelliği, kesici takımların kolaylıkla aşınmasına neden olmaktadır (Kalpakjian *et al.* 2002). Bu sebeple, WC kesici takımlar mikro frezeleme işleminde oldukça sık kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda göstermiş oldukları mekanik özellikler bu takımların tercih edilmelerini sağlamaktadır (Zhaojun *et al.* 1998). Mikro frezelemede kesici takım geometrisi, yüzey pürüzlülüğünü, çapak miktarını ve oluşan kuvvetleri önemli derecede etkilemektedir. Köşe radüsü artmış şekle sahip kesici takımların kullanılması, daha iyi yüzey pürüzlülüğünü elde etme bakımından uygun bulunmuştur (Aramcharoen *et al.* 2009).

### 2.2.3 Mikro takım kaplamaları

İlk mikro freze takımları Masuzawa and Fujino (1990) tarafından tel erozyon yöntemi ile imal edilmiştir. Yapılan bu ilk takımlar tungsten karbürden, 50µm çapında imal edilmiş ve akrilik işlemede kullanılmıştır (Craig *et al.* 1996).

Kaplanan takımların ömründeki artış, kesici takımların tipine, işlenen malzemenin cinsine, kullanılan tezgâhın cinsine, kullanılan kesme sıvısına ve işlem kalitesine göre farklılık gösterir. Talaşlı imalat işlemlerinde ortak problem genellikle takım aşınmasıdır. Mikro elektronik ve mekanik ürünler imal etmek için kullanılan mikro frezeleme takımlarının, ömürlerini uzatmak ve performansını iyileştirmek için, koruyucu kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır (Yücel *et al.* 2011). Mikro frezeleme işleminde sert malzemelerin işlenmesi, takım ömrünün daha da kısılmasına neden olmaktadır. Bu sorunun çözümüne yönelik, kesme koşullarında çeşitli değişiklikler yapılarak takım ömrü artırılmaya çalışılmaktadır (Bao *et al.* 2000)

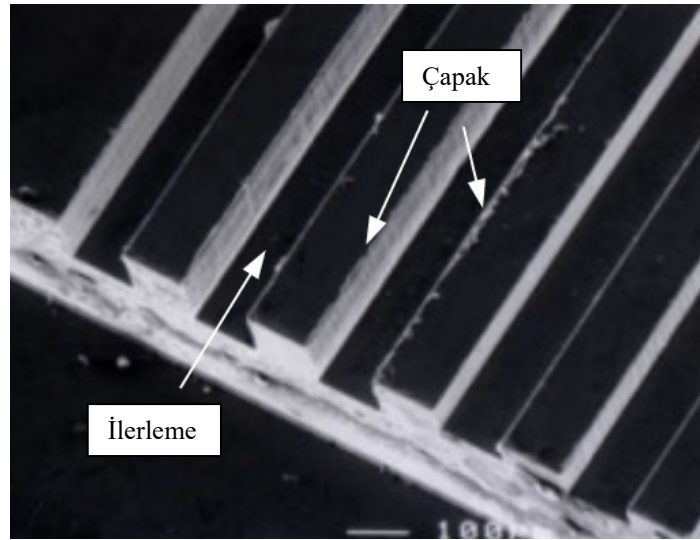
Talaşlı imalatta kullanılan takımlar üzerine elmas kaplamak için kullanılan en popüler yüzey işleme teknolojilerinden biri kimyasal buhar biriktirmedir (CVD – Chemical Vapor Deposition). CVD elmas kaplamalar, yüksek imalat alanında yaygın olarak işlenen aşındırıcı demir esaslı olmayan metalik alaşımlar, borosilikat cam, porselen veya akrilik diş, doğal insan dişi ve seramik malzemeleri işlemek için uygulandığında, mikro kesici takımların ömrünü dikkate değer bir şekilde arttırmaktadır.

Gu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kaplamanın takım ömrünü arttırdığını belirtmişler ve deneye tabi tuttıkları takımların ömrünü kaplama türüyle ilişkilendirmişlerdir (Gu *et al.* 1999).

Yapılan çalışmalarda, özellikle yüksek aşınma direncinden dolayı TiAlN kaplamanın ve aynı zamanda elmas (Diamond) kaplamanın mikro frezeleme işleminde tercih edildiği görülmektedir (Sein 2004, Baharudin *et al.* 2004, Uhlmann and Schauer 2005, Uriarte *et al.* 2006, Zaman *et al.* 2006). Son yıllarda elmas benzeri karbon (DLC-Diamond Like Carbon) kaplamaların düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncini içeren mükemmel tribolojik özelliklere sahip olması sebebiyle her geçen gün kullanımı artmaktadır.

#### 2.2.4 Çapak oluşumu

İster geleneksel frezeleme olsun ister mikro frezeleme olsun her ikisinde de çapak istenmeyen bir sonuçtur. Geleneksel parça imalatında, bu problemin ilave çapak alma prosesi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabilir olması, bu sorunun göz ardı edilmesini sağlamıştır. Ancak mikro işlemede, minyatür parça üzerinde oluşan çapakların temizlenmesi oldukça zor ve maliyeti yüksektir. Bu yüzden, mikro frezeleme işleminde çapak oluşumu mümkün oldukça engellenmeli ya da minimum düzeye indirilmelidir (Lee *et al.* 2005). Şekil 2.8 de işleme sonrası oluşan çapaklar gösterilmiştir.



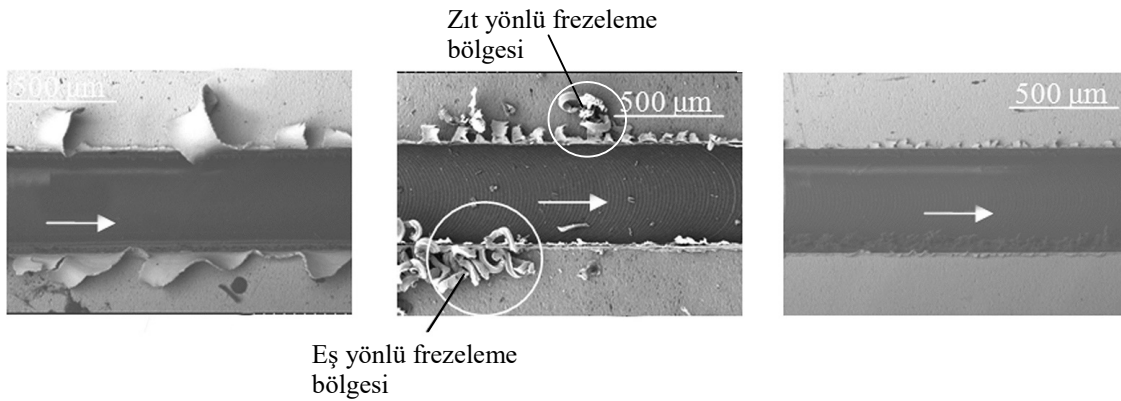
Şekil 2. 8 Mikro kanaldaki çapak oluşumu (Lee *et al.* 2005).

Mikro işleme esnasında oluşan çapak, bu işleme yönteminin en büyük problemlerinden birisidir. Çapak oluşumu kesme parametrelerinden oldukça etkilenmektedir. Bajpai, ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının mikro işlenmesinde çapak oluşumunun deneysel karakterizasyonu yapılmıştır. Buna göre kesme derinliği arttıkça maksimum çapak boyunun arttığı deneysel çalışmalar sonucunda gözlenmiştir (Bajpai *et al.* 2013). Lee ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda ise çapak boyutunun takım aşınması ile ilgili olduğu tespit edilmiştir (Lee *et al.* 2002).

(Schaller *et al.* 2007) yaptıkları çalışmada, kesici takımın talaş kaldırmaya başladığı ilk noktada zıt yönlü frezeleme bölgesinde meydana gelen çapak miktarının, talaşın iş

parçasından uzaklaştığı diğer noktada meydana gelen çapak yoğunluğundan eş yönlü frezeleme bölgesinde daha az olduğu tespit edilmiştir. Talaş oluşumu zıt yönlü frezeleme bölgesinde başlamaktadır. Daha sonra oluşan talaş, eş yönlü frezeleme modunda dışarı doğru atılmaktadır. Burada dışarı atılmaya çalışılan talaşın bir kısmı yırtılarak kanal kenarlarına yığılmaktadır. Bu sayede çapak oluşumu gerçekleşmektedir. Bu mekanizmanın oluşmasında kesici kenarın keskinliğinin de büyük bir payı vardır. Nitekim aşınmış kesici uçlarla yapılan kesme işlemlerinde çapak miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Literatürde yapılan bir çalışmada da benzer bir durumla karşılaşılmış ve meydana gelen bu durum, talaşın eş yönlü frezeleme modunda yırtılmasıyla açıklanmıştır.

(Aramcharoen *et al.* 2007). Bununla birlikte, yine yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde, işlenen kanalların eş yönlü frezeleme kenarında çapak yoğunluğunun nispeten daha fazla olduğu ifade edilmektedir (Şekil 2.9) (Lee and Dornfeld 2005, Horsch *et al.* 2002, Schmidt and Tritschler 2004).



Şekil 2.9 Çapak bölgeleri (Lee *et al.* 2005).

### 2.2.5 Yüzey pürüzlülüğü

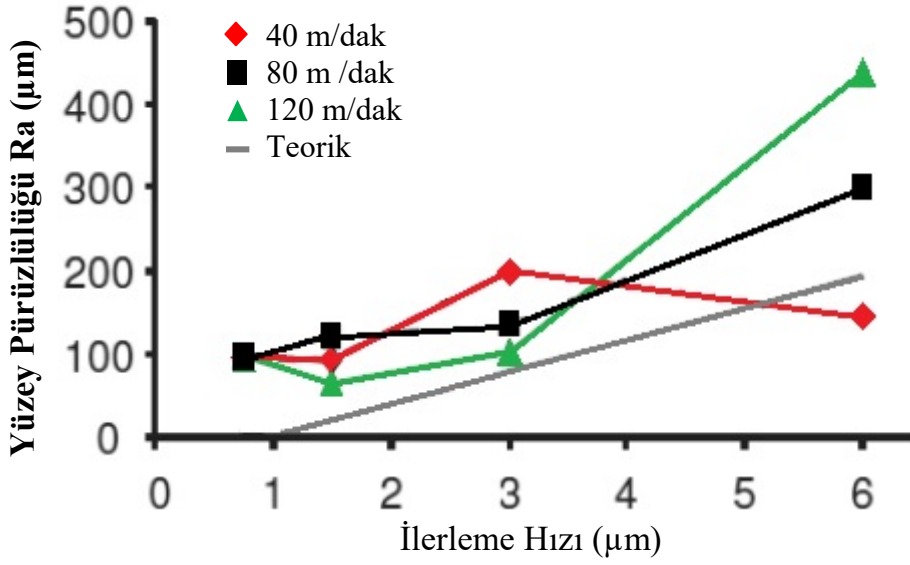
Mikro frezeleme işlemi sonunda, oluşan yüzey pürüzlülüğü ve kalitesi, ürün kalitesini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Konvansiyonel imalat sürecinde, imalat sonrası ilave işlemlerle, üretilen parçanın yüzey kalitesi artırılabilir. Fakat mikro frezelemede bu durum biraz farklıdır. Çünkü çok küçük bir geometrik yapıya sahip olan minyatür ürünler, ilave bir yüzey düzeltme işlemi için uygun olmayabilir. Bu yüzden

mikro frezelemede, yüzey kalitesi ve yüzey kalitesini etkileyen parametrelerin tanımlanması önemlidir.

Chen (2005) ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, deforme olmamış talaş kalınlığı ile takım kenar radüsünün aynı büyüklükte seçilmesi durumunda en iyi yüzey pürüzlülüğünün elde edildiğini göstermişlerdir. Aralarındaki oranın artması ile çapak miktarının azaldığı gözlenmiştir.

Pham (2008) mikro frezleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler üzerine deneysel ve istatistiksel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deneylerde farklı tane büyüklüğüne sahip Al 508 malzeme, sabit kesme (10  $\mu\text{m}$ ) derinliğinde işlenmiştir. Sonuçta mikro yapısı daha homojen olan malzemelerde yüzey pürüzlülüğünün daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde Al 508 malzemenin, ince taneli ve kaba taneli olmak üzere iki çeşidi incelenmiştir. Deneylerde kesme derinliği sabit 10 mikron alınarak üç farklı kesme hızı ve sekiz farklı ilerleme kullanılmıştır. Sonuçta, kesme hızından ziyade diş başına ilerlemenin yüzey pürüzlülüğünü daha çok etkilediği görülmüştür. Ayrıca kaba dokulu malzemede yüzey pürüzlülüğünün %30~50 daha düşük çıktığı saptanmıştır.

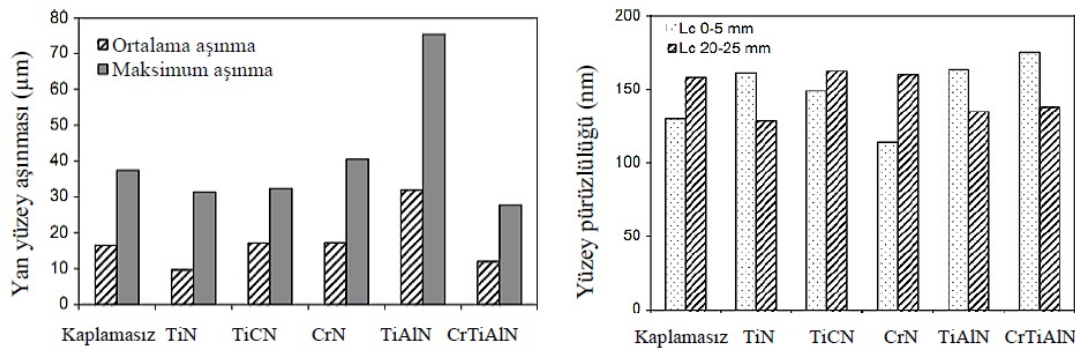
Özdoğanlar ve Filiz (2006), iletkenliği yüksek Bakır 101 [Oxygen Free High Conductive Copper (OFHC)], malzemesini mikro frezeleme yöntemi ile işlemede oluşan kesme kuvvetlerini, yüzey pürüzlülüğünü, aşınmayı ve çapak oluşumunu incelemek üzere deneysel bir çalışma yapmışlardır. WC freze takımı, SEM yöntemi kullanılarak fotoğraflanmış ve ortalama tane büyüklüğü 0,4  $\mu\text{m}$  ve 0,7  $\mu\text{m}$  arasında tespit edilmiştir. Mikro yapıda arada kalan küçük kobalt tanelerinin sünek kırılmaya neden olduğu söylenmiştir. Yapılan deney 254  $\mu\text{m}$  çaplı kesici takım ile farklı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin teorik hesaplara göre fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek kesme hızı ve düşük ilerlemede en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2. 10 Bakır 101 malzemesi üzerine açılan kanalın yüzey pürüzlülük değerlerinin ilerlemeye bağlı değişimi ( Ozdoğanlar ve Filiz, 2006).

İmalat sırasında yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu gibi işleme kalitesini etkileyen birçok faktör vardır; iş parçası malzemesi, kesici takım geometrisi, kesme parametreleri, kesme sıvısı bunlardan başlıcalarıdır. Bu etkenlerin herhangi birinin değişmesi yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir.

Mikro frezelemede kesici takım kaplama malzemesi, yüzey pürüzlülüğünü ve çapak miktarını önemli derecede etkilemektedir (Şekil 2.11). Yuvarlatılmış veya pahlandırılmış geometriler daha iyi yüzey pürüzlülüğünü elde etme bakımından daha uygun bulunmuştur (Aramcharoen *et al.* 2008).



Şekil 2. 11 Kaplama türlerinin performanslarının karşılaştırılması (Aramcharoen *et al.* 2008).



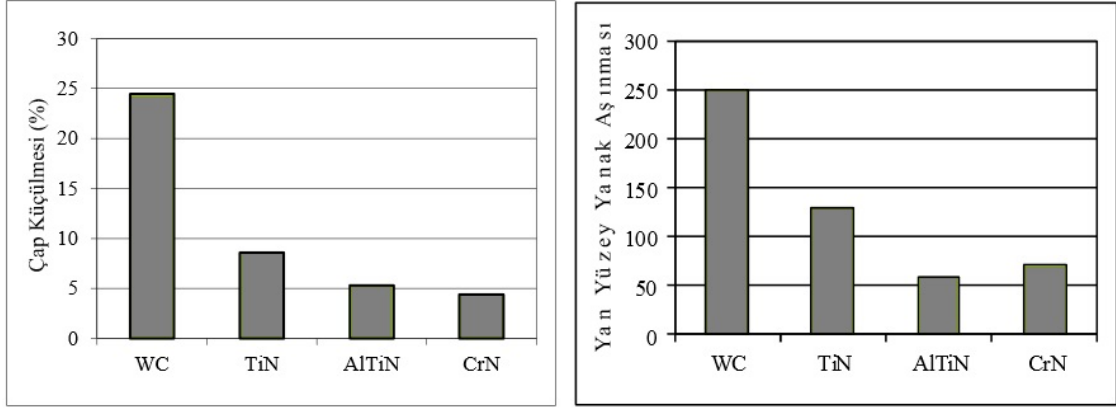
## 2.2.6 Takım aşınmasının etkileri

Talaşlı imalatın en önemli aktörü hiç şüphesiz kesme işlemini gerçekleştiren kesici takımlardır. Kullanılan kesici takımlar, imalatı gerçekleştirilen ürünün kalitesini ve üretim maliyetini birinci dereceden etkilemektedir (Chae *et al.* 2006) Bu sebeple, üretimi yapılacak ürünün imalatına uygun kesici takım seçimi kritik bir süreçtir.

Takım aşınması, takımın etkilendiği bölge veya aşınmayı meydana getiren fiziksel mekanizmaya göre sınıflandırılırlar. Takımlar; talaş oluşumu sırasında meydana gelen yükleri karşılayamadıklarında, plastik deformasyona uğrarlar. Mikro işlemede kullanılan takımların boyutlarının çok küçük ebatlara sahip olması ve kesme sırasında takımın maruz kaldığı yüksek gerilme sonucunda, takımda elastik ve plastik şekil değişimleri meydana gelmektedir. Talaş kaldırma sırasında takımda meydana gelen bu şekil değişimleri ve aşınma, talaş kaldırma işlemini şüphesiz olumsuz yönde etkilemektedir.

Kesme derinliği ve ilerleme hızının takım ömrü üzerine önemli etkileri bulunmaktadır. Yüksek ilerleme hızı, kesme esnasında takım üzerine etkiyen kuvveti artırır. Takım üzerine gelen kesme kuvveti ile takım aşınması arasında direkt bir ilişki vardır. Yüksek ilerleme hızlarında takım üzerine etkiyen kuvvet artarak takımın daha fazla aşınmasına sebep olmaktadır.

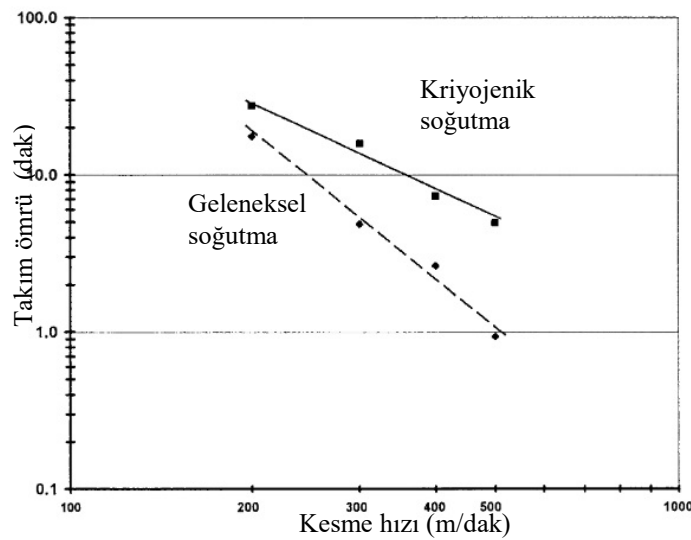
Lee (2005) tarafından yapılan çalışmada, yüksek ilerleme hızlarında çapak oluşumunun büyüdüğü ve ayrıca kesme hızına bağlı olarak artan takım aşınmasının çapak oluşumunu artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kesme derinliğinin artması da takım üzerine gelen kuvvetleri arttıracığından takım aşınmasını olumsuz bir şekilde etkileyecektir. Mikro işleme için kullanılan kesici takımlar, hem kullanım ömürlerini arttırmak hem de kesme performansını iyileştirmek için çeşitli kaplama malzemeleri ile kaplanırlar (Şekil 2.12) (Ucun *et al.* 2010).



**Şekil 2.12** Mikro kesici takımda meydana gelen aşınmanın türüne göre değişimi. (Ucun *et al.* 2010)

Titanyumda ısının, iş parçası boyunca hızlı bir şekilde uzaklaşmadığı için takım üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, düşük ısıl iletkenlik nedeniyle yüzeyin 20µm ile 70µm altında uzun süre sıkışıp kalan ısı, malzemenin bu kısmına ait sertliğin, aşırı yaşlanmaya bağlı olarak ortalama sertliğin bir hayli altına düşmesine sebep olur.

Titanyum alaşımlarının işlenmesi sırasında, kesme bölgesinde yüksek kesme sıcaklığı oluşur (Şekil 2.13). Bu durumda oluşan talaşlar takıma yapışır. Böylece çok kısa bir takım ömrü söz konusu olur (Hong *et al.* 2001). Çoğu takımın deforme olmasının sebebi aşınmaya bağlı oluşan kesme kuvvetidir (Su *et al.* 2006).



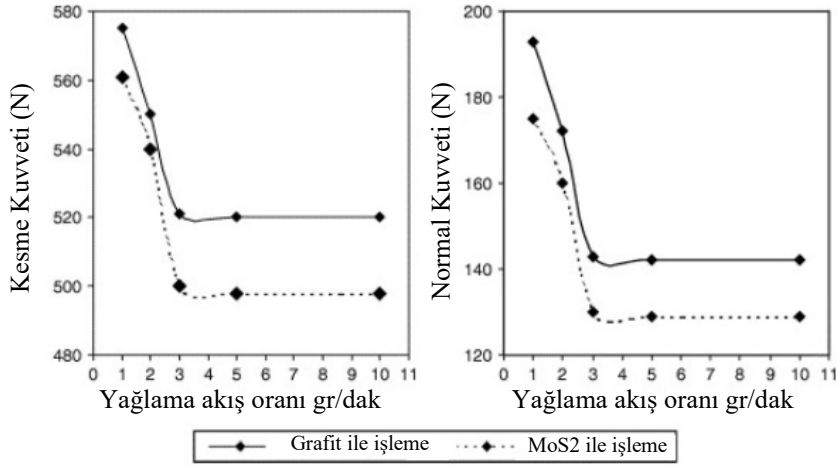
**Şekil 2.13** Soğutma tipinin takım ömrüne etkisi (Hong *et al.* 2001).

Mikro takımların ömrünü etkileyen hasarlar çoğunlukla abrasif aşınma, kesici kenarlarda görülen chipping, yorulma ve gerilmelerin neden olduğu kırılmalar şeklinde sınıflandırılabilir (Tansel *et al.* 1998). Bununla birlikte, mikro freze uçlarının kaplanması da takım ömrü üzerindeki mevcut problemlerin çözümüne büyük ölçüde yardımcı olmaktadır (Aramcharoen *et al.* 2008). Bununla birlikte kesme sırasında oluşan kesme kuvvetlerini ve ısı oluşumunu azaltmak için soğutma, yağlama tekniklerinden faydalanılabilir (Zhaojun *et al.* 1998)

Frezeleme işleminde, tormalama prosesinden farklı olarak kesme işlemi yapan kesici ağızların her biri aralıklı olarak talaş kaldırmaktadırlar. Bu durum kesici ağızların tekrarlı yüklere maruz kalmasına neden olmakta ve bunun sonucu olarak, özellikle dayanımın düşük olduğu, kesici kenarlarda ve uç bölgelerinde yorulmaya bağlı kırılmalar görülmektedir (Li *et al.* 1998).

### **2.2.7 Mikro frezelemede soğutma/yağlama yöntemleri**

Talaşlı kesme işleminde, takım ile talaş ara yüzeyinde sürtünmeler ve meydana gelen ısı nedeniyle, takım aşınması ve plastik deformasyon olur. Deformasyon ve sürtünme sonucu ortaya açığa çıkan enerjinin çoğu ısıya dönüşürken, bir kısmı talaşla taşınmasına rağmen kesme şartları, iş parçası ve takım çiftine bağlı olarak takımda yüksek sıcaklıklar oluşturur. Aynı zamanda oluşan ısı, işleme sırasında takım üzerinde oluşan kuvvetlerin artmasına, hatta takımın kırılmasına da neden olur (Şekil 2.14). Bu nedenle talaşlı imalat işleminde oluşan ısının hızlı bir şekilde kesme bölgesinden uzaklaştırılması esastır (Suresh *et al.* 2006).



Şekil 2. 14 Yağlamanın kesme kuvveti üzerine etkisi (Suresh *et al.* 2006).

Kesme sıvısı, soğutmanın yanı sıra, takım ile iş parçası arasındaki boşlukları temizleyerek kesicinin kesme kabiliyetini arttırmaktadır. Kesme sıvısı yüzey kalitesini iyileştirmesinin yanında, kesme sırasında oluşan toz, talaş gibi küçük parçacıkları alıp götürerek iş parçasının yüzeyini temizlemekte ve daha iyi bir çalışma ortamı oluşmasına katkı sağlamaktadır (Yui *et al.* 1996).

Kesme sıvısının toplam üretim maliyetinin yaklaşık %17' si olması üretim maliyetleri üzerinde ne kadar etkili olduğunu gösterir. Kesme sıvısı kullanımı ile yüksek kesme hızlarına ulaşılabilen ve ürün maliyetlerinde %30 iyileşme sağlamaktadır. Ancak kesme sıvısının çevre ve insan sağlığına olan etkileri ürün maliyetlerinin önüne geçmektedir (Arslan *et al.* 2011).

Talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarından istenen özellikler şöyle sıralanabilir: soğutma özelliğine sahip olması, yağlama özelliğine sahip olması, özelliklerini uzun süre koruyabilmesi, korozyona yol açmaması, makineye zarar vermemesi, iyi ısı transfer yeteneğine sahip olması, uçucu olmaması, köpürmemesi, ateşleme tehlikesi taşımaması, iş parçasının metalürjik özelliklerini koruması, kullanıldıktan sonra kolayca tahliyesi ve arıtılması, insan sağlığına zarar vermemesidir (Demir *et al.* 2009). İstenen bu özellikler içerisinde en büyük öneme sahip olan insan sağlığı, doğal olmayan kesme yağlarının kullanımıyla çeşitli cilt ve solunum rahatsızlıkları ile tehdit edilmektedir.

Bu noktada, çözüm için sürdürülebilirlik kavramı karşımıza çıkmaktadır. Eğer kullanılan yağ çevreye zarar vermeden yok edilebilirse ve insan sağlığına olumsuz etkisi bulunmazsa sürdürülebilir nitelik kazanacaktır. Bu açıdan bakıldığında hali hazırda bitkisel yağlar ön plana çıkmaktadır. Çalışmalarda, talaşlı imalat endüstrisinde kullanılan kesme sıvıları, insan sağlığına etkileri ve sürdürülebilirlik kavramı açısından değerlendirilmiştir (Yücel *et al.* 2011).

Bor yağı %60'dan daha fazla mineral yağ içerir. Geleneksel talaşlı imalatta sıkça kullanılmasına rağmen, yüksek kesme hızında işlemede başarısız olduğu ve takım talaş ara yüzüne nüfuzunun zor olduğu bilinmektedir. Mikro kesme işleminde bor yağı kullanımı oldukça zordur. Yüksek kesme hızından dolayı basınçlı gönderilen yağ, talaşın çıkışını engellemektedir. Talaşın uzaklaştırılmaması yüzey hassasiyetini ve takım aşınmasını olumsuz bir biçimde etkiler. 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.* 2007).

Geleneksel soğutma ve yağlama tekniklerinin kullanıldığı kesme işlemlerinde kullanılan sıvılar pahalıdır. Çünkü kullanılan yağın yüksek konsantrasyona sahip olması beklenmektedir. Bu yüzden minimum miktar yağlamanın büyük avantaj sağlaması beklenmektedir. (Heinemann *et al.* 2006). Bunun yanı sıra minimum yağlama, kesme işlemi prosesini iyileştirilmesinin yanı sıra çevrenin korunmasına da katkı sağlar (Weinert *et al.* 2004)

MQL sistemi çok az miktarda yağ bazlı yağlayıcı ile basınçlı havanın karışımın zerrecikler halinde kesme bölgesine yönlendirilmesi prensibi ile çalışır (Şekil 2.15).



**Şekil 2. 15** Mikro frezeleme işleminde MQL uygulaması.

MQL’ de yağlayıcı debisi tipik olarak 10-100 ml/saat’ dir. Bu miktar geleneksel ıslak kesmeye göre yirmi bin kat daha azdır (Autret *et al.* 2003). Böylece sulu kesmeye göre çok daha az miktarda kesme sıvısı kullanılmış olur. MQL sistemi ile kesme yapmanın bir diğer avantajı ise talaş ve iş parçasının neredeyse kuru bir şekilde kalmasıdır; bu durum talaşın geri dönüşüm maliyetlerini düşürür (Itoigawa *et al.* 2006).

Azot Nitrojen olarak da bilinir. Periyodik tablonun  $V_a$  grubunda yer alan a metal özelliğinde kimyasal element, yer atmosferinin beşte dördünü oluşturan ve bütün canlı maddelerin bileşiminde bulunan renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Azot 1722 yılında bulunmuştur (Itoigawa *et al.* 2006).

Kriyojenik gazlar özellikle soğutma amaçlı sağlık, uygulamalarında geniş kullanım alanı bulmuştur. Sıvı havanın damıtılmasıyla üretilen azot  $-198\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ de kaynar. Renksiz, kokusuz, tatsız, güvenli, ucuz, temiz ve toksik madde içermeyen bir gazdır (Hong *et al.* 2001).

Dhar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada talaş kırıcı ve kırıcısız iki tip takım kullanılmış ve sıvı azotun  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de takım yüzeyine püskürtülmesiyle elde ettiği

sonuçlarda ön ve yan kenar aşınmasının, operasyon sırasında parçalarda yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmüştür (Dhar *et al.* 2001).

Titanyum ve alaşımlarının yüksek devirde işleme sırasında takım aşınması fazla olacağı için soğutma yağlama uygulaması gerekmektedir. Kesme bölgesi sıcaklığını düşürmek için çalışan araştırmacılar 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).

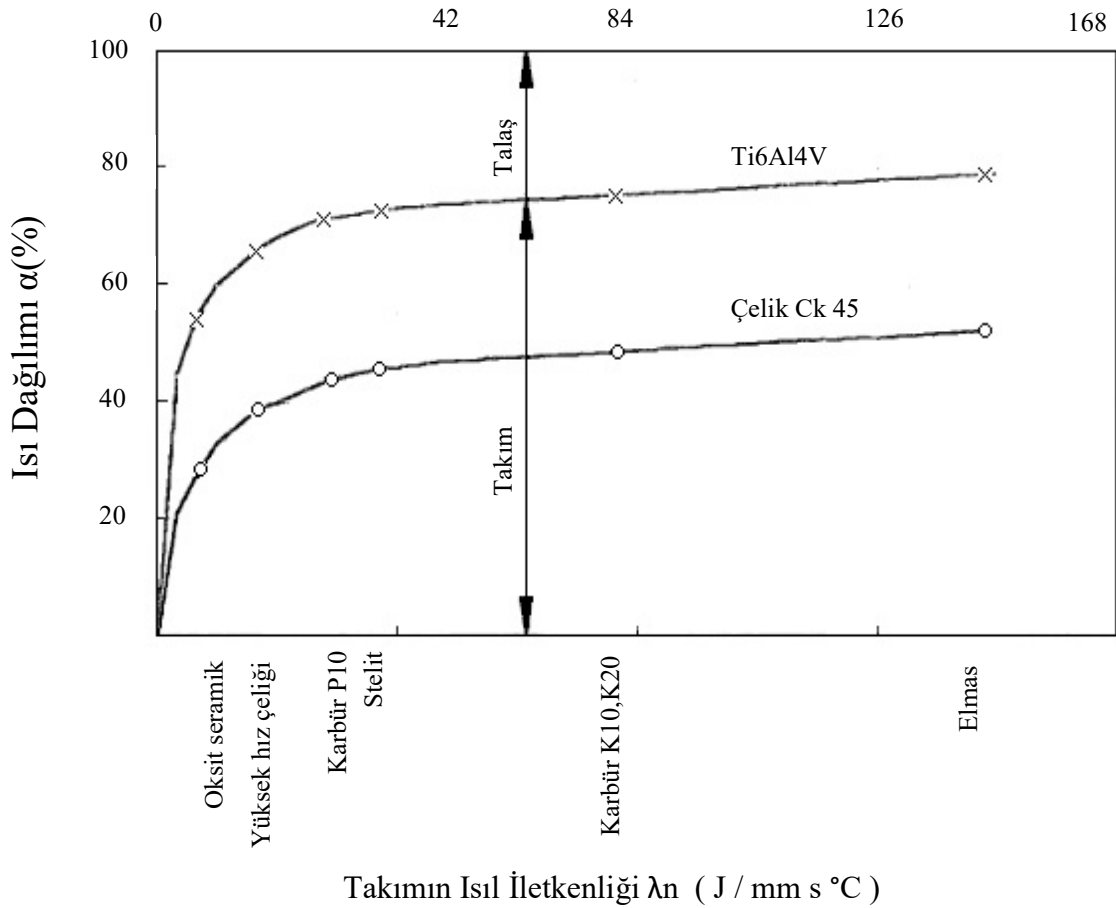
Talaşlı kesme işleminde, takım ile talaş ara yüzeyinde sürtünmeler ve meydana gelen ısı nedeniyle, takım aşınması ve plastik deformasyon olur. Kesme sıvısı, meydana gelen ısının düşürülmesinin yanı sıra, takım ile iş parçası arasındaki boşlukları temizleyerek takımın kesme kabiliyetini arttırmaktadır. Hibrit olarak isimlendirilen soğutma sistemi, minimum miktar yağlama (MQL-Minimal Quantity Lubrication) ve kriyojenik soğutma (-196 °C) sistemlerinin birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Kriyojenik soğutma tekniğinin doğrudan mikro kesme işleminde kullanılması kesici takımın daha da gevrekleşmesine neden olmaktadır. Bu da takımın küçük bir kesme yükünde kırılmasıyla sonuçlanmaktadır. Fakat kriyojenik soğutmanın uygun kullanımı özellikle mikro işlemede kullanılan yüksek kesme hızlarında kesme bölgesinde oluşan ve hızlı takım aşınmasına neden olan sıcaklığın bertaraf edilmesinde önemli bir etkisi vardır. MQL ise daha çok yağlamanın önemli olduğu ve yüzey kalitesinin yüksek olması istendiği kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu iki soğutma tekniğinin birleştirilmesi ile oluşturulan hibrit soğutma sistemi sayesinde soğutma ve yağlama aynı anda gerçekleştirilmiş olacaktır. Bunun şartları sağlandığında mikro frezeleme işleminde takım ömrünün artacağı ve çapak oluşumunu da azalacağı öngörülmektedir.

### **2.3 Ti6Al4V Alaşımı ve İşlenebilirliği**

Ti6Al4V alaşımı piyasada kullanılan titanyum alaşımları arasında en yaygın bulunanıdır. Bundan dolayı son yıllarda Ti6Al4V alaşımının yoğunluğunun ve özelliklerinin geliştirilmesi için çok fazla araştırma yapılmıştır (Eyens *et al.* 2003).

Vanadyum (V), Molibden (Mo), Niobiyum (Nb) gibi elementlerin titanyum ile karıştırılması ile elde edilen matriks titanyum alaşımı olarak bilinir. Titanyum vücuda uyumlu bir malzemedir. Titanyumun kapsamlı ve tercih edilmesini sağlayan güçlü özellikleri vardır. Bu özelliklerden bazıları: yoğunluğunun düşük olması ( $4,5 \text{ g/cm}^3$ ), spesifik dayanımının yüksek olması, kırılma tokluğu, yorulma dayanımı, çatlak yayılımına karşı direnç, düşük sıcaklıkta yüksek tokluk ve mükemmel korozyon direncidir. Titanyum alaşımlarının birçoğunun maksimum çalışma sıcaklığı yaklaşık  $550^\circ\text{C}$  ile  $700^\circ\text{C}$  arasındadır (Chunxiang *et al.* 2011).

Titanyumun ısı iletkenliği düşük olduğu için (örneğin çeliğin 1/6'sı kadar) oluşan ısının yaklaşık %80'i takım üzerinde kalmaktadır. Şekil 2.16 de görüldüğü üzere bu değer çelikte %45-50 arasında değişmektedir.



Şekil 2. 16 Kesme işleminde ortaya çıkan ısının takıma ve talaşa dağılım oranı.



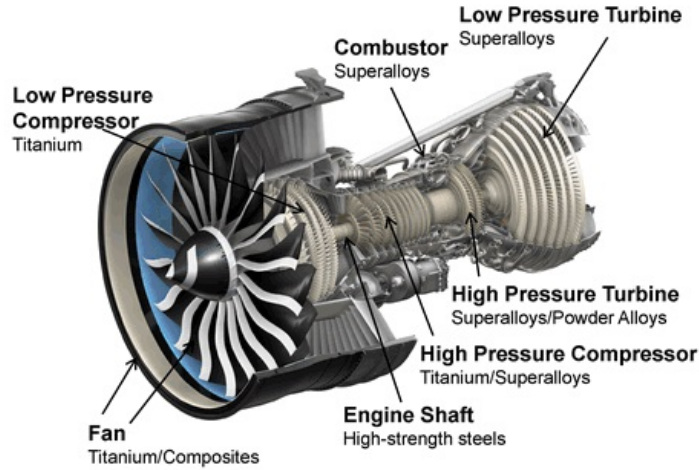
Son yıllarda, teknolojinin hızlı gelişmesi hem malzeme hem de bu malzemelerin kullanılabilir ürün haline getirilmesinde kullanılan yöntemlerden beklentileri arttırmaktadır (Kurt 2005). Özellikle elektronik, bilgisayar, havacılık ve uzay endüstrilerde mukavemetli ve hafif malzemelere olan ihtiyaçlar giderek artmaktadır. Titanyum ve alaşımları sahip oldukları, ısı ve korozyon direnci ve yüksek dayanımı gibi özelliklerinden dolayı, bu beklentilerin büyük bir kısmını karşılamaktadır (Ezugwu *et al.* 1997). Titanyum ve alaşımları içerisinde Ti6Al4V alaşımı, en fazla tercih edilen alaşımdır. Titanyum alaşımlarının kullanıldıkları yerler dikkate alındığında, işleme sonrasında oluşan yüzey kalitesinin oldukça yüksek olması gerekmektedir (Schueller *et al.* 2000). Bu alaşımlar, imalat sırasında, yüksek sıcaklıklarda dahi sahip oldukları özellikleri kaybetmemektedirler. Dolayısıyla, titanyum alaşımları genellikle “işlenmesi zor malzeme” grubunda yer almaktadır (Ensarioğlu *et al.* 2005.)

Pratikte kullanılan ilk titanyum alaşımı “Ti6Al4V” 1954 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde geliştirilmiştir. Isıl direnç, dayanım, esneklik, tokluk, işlenebilirlik, kaynak edilebilirlik, korozyon direnci ve biyouyumluluk özellikleri yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı tüm titanyum alaşımları içerisinde Ti6Al4V alaşımının tüketilme oranı % 75-85 dolaylarındadır. Diğer titanyum alaşımları Ti6Al4V alaşımının değiştirilmiş / geliştirilmiş şekli olarak görülmektedir. Bilim dünyasında yüzlerce çeşit titanyum alaşımı geliştirilmiştir. Ama bunlardan 20-30 tanesi (Ti6Al4V, Ti6Al7Nb, Ti5Al2,5Sn, Ti2Al2,5Zr, Ti32Mo, TiMoNi, TiPd gibi) çok bilinendir (Chunxiang *et al.* 2011).

Ti6Al4V alaşımı sıklıkla gaz türbin çarkları, biyomedikal materyaller ve uçak iniş takımları için tercih edilen malzeme olarak literatürde görülmektedir (Donachie *et al.* 2000.). Boeing uçak firmasının titanyum kullanımı 717 modelinde %1 (1963), 747 modelinde %3 (1969), 757 modelinde %5 (1983) ve 777 modelinde %9 (1994) oranlarında olmak üzere sürekli olarak bir artış içerisinde olmuştur. Son on yılda titanyum alaşımının geliştirilmesi üzerine çalışmalar uzay sanayinden endüstriyel uygulamalara kaymıştır (Allen *et al.* 1996.).

Titanyum alaşımları, hafif metal alaşımları, çelikler, nikel alaşımlar vb. malzeme türleri

ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanıma sahiptirler. Hatta bu avantajlarını yaklaşık 500 °C sıcaklıkta bile koruyabilmektedirler. Bundan dolayı bazı titanyum alaşımları gaz türbini ve jet motorlarının parçalarının üretimi için çok uygundur (Chunxiang *et al.* 2011) (Şekil 2.17).



Şekil 2. 17 Jet motorlarında titanyum alaşımının kullanım yerleri.

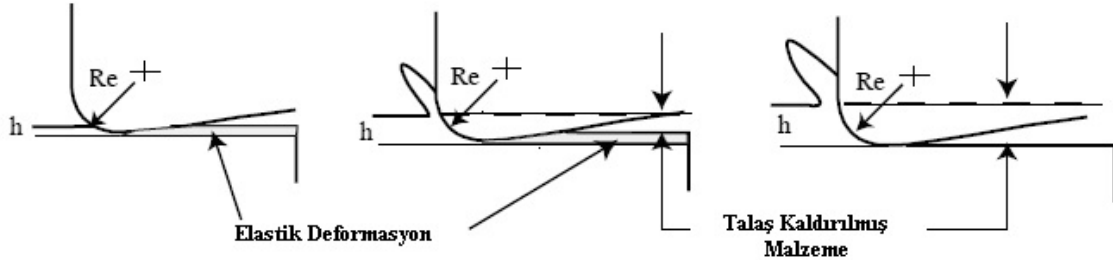
#### 2.4 Mikro frezelemede talaş oluşumu mekanizması

Mikro mekanik işleme, talaş kaldırma mekaniği açısından konvansiyonel talaş kaldırma işlemiyle benzerlik gösterse de her iki işleme metodu arasında önemli farklılıklar mevcuttur (Filiz *et al.* 2007). Aralarındaki fark genellikle takım kenar radüsü ile deforme olmamış talaş kalınlığı arasındaki ilişkiden kaynaklanmaktadır.

Talaş oluşumu genellikle doğrusal olmayan dinamik bir süreçtir. Mikro frezelemede geleneksel frezelemeden farklı olarak kesme derinliği kritik talaş oluşumunun altına indiğinde, kesme gerçekleşmeyebilir. Bunun yerine iş parçası elastik olarak deformasyona uğrar. (J. D. Kim and Kim 1995).

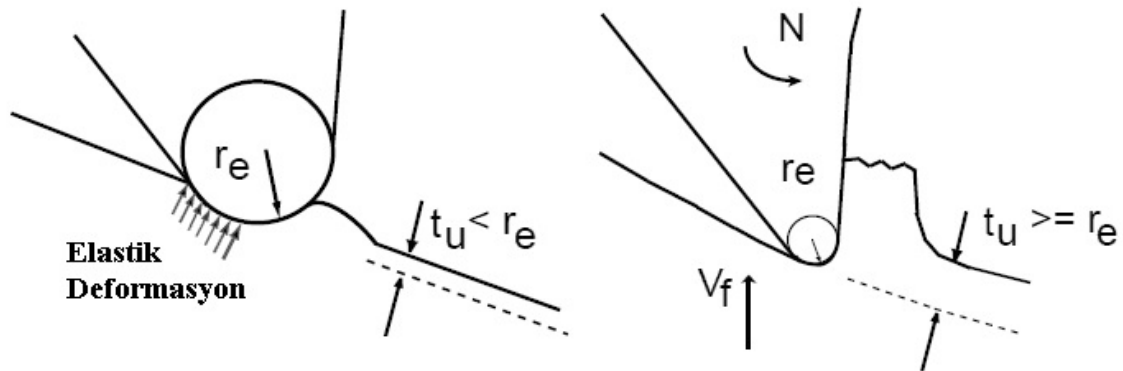
Minimum talaş derinliği kavramı şekil 2.18’de açıklanmıştır. Hm, minimum talaş derinliği, h gerçekte verilmek istenen talaş derinliği ve Re takım uç yarıçapı olarak tanımlanmıştır. “h” değeri kritik talaş kalınlığı geçmediği zamanlarda malzeme üzerinde elastik deformasyon gerçekleşir (Şekil 2.24). Talaş derinliği kritik seviyenin üstüne

çıktıkça talaş oluşumu artar. Ancak deformasyon azda olsa devam eder (Şekil 2.21). Talaş derinliği kritik seviyenin üstüne çıktıktan sonra en verimli talaş kaldırma gerçekleşir (Şekil 2.18), (Park and Freiheit 2006).



Şekil 2. 18 Mikro frezelemede minimum talaş derinliği (Park and Freiheit, 2006).

Özel (2007) yaptığı araştırmada sonlu elemanlar yöntemi ile talaş oluşumun incelemiştir. Minimum talaş derinliğinin direk olarak takım uç yarıçapı ile bağlantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 2.19’de talaşın oluşumu için talaş derinliği ile uç radüsü arasındaki bağıntı gösteriliyor. Şekilde “N” iş mili dönüş yolu, “Vf” kesme kuvveti, “re” kesici uç yarıçapı ve “tu” talaş derinliği olarak tanımlanmıştır. Talaş derinliği uç yarıçapında küçük olduğu zamanlarda malzeme üzerinde elastik deformasyon gerçekleşiyor. Bu durumda talaş oluşumu gerçekleşmiyor. Talaş derinliği uç yarıçapını geçtiği anda talaş oluşumu başlıyor. İşte bu nokta minimum talaş derinliği veya kritik talaş kalınlığı olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 2. 19 Kesici uç yarıçapının minimum talaş derinliğine etkisi (Özel 2007).

Konvansiyonel kesmede takım kenar radüsü bir kaç milimetre kesme derinliği ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan dikkate alınmamıştır. Ultra hassas kesmede takım kenarının sadece bir kısmı temas ettiğinden talaş açısı daima negatiftir. Bu da kesme derinliğine bağlı olarak kazıma ve kötü yüzeye veya bazen polisaj ve parlak yüzeye sebep olabilmektedir. Bundan dolayı araştırmacılar takım-iş parçasının sürtünmesi arasındaki ilişki ve daha yüksek kalitede işlenmiş parçalar üretme amaçlı kritik talaş kalınlığı üzerine odaklanmıştır. Ultra hassas elmas ile işlemede kritik talaş kalınlığı deneysel ve teorik olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Son *et al.* 2005.)

Konvansiyonel frezeleme işleminde, kesme derinliği genellikle kesici takımın kenar radüsünden çok büyük olduğu için (Vogler *et al.* 2004, Chae *et al.* 2006) kesme sırasında düzgün bir talaş oluşumu sağlanabilmektedir. Bu durum, mikro frezeleme için her zaman mümkün değildir. Çünkü mikro frezelemede, kesme derinliği veya diş başına düşen ilerleme miktarının kesici takım kenar radüsüne oranı genellikle büyüktür (Bao *et al.* 2000, Kang *et al.* 2007). Böyle bir durumda kesici takım kenar radüsü etkisiyle kesici takım kenarı, negatif bir talaş açısı karakteri sergilemekte, hatta talaş kaldırmak için yeterli derinliğe ulaşamamaktadır. Bu durum, kesme işleminde kararsızlıklara sebep olmaktadır (Shimada *et al.* 1993, Yuan *et al.* 1996, Kim *et al.* 2002, Chae *et al.* 2006, Sun and Cheng 2010). Bu yüzden, mikro frezeleme işleminde düzgün bir talaş oluşumunun meydana gelmesi için talaş derinliği ve ağız başına düşen ilerleme miktarının takım kenar radüsü ile arasında optimum bir oranın sağlanması gerekmektedir. Bu oran, minimum talaş kalınlığı ya da kritik talaş kalınlığı olarak tanımlanmaktadır (Ikawa *et al.* 1992, Shimada *et al.* 1993, Yuan *et al.* 1996, Spath *et al.* 1999, Chae *et al.* 2006).

#### **2.4.1 Boyut etkisi**

Minimum talaş kalınlığı, kesici takım kenar radüsü ile iş parçası malzemesi özelliklerine bağlıdır (Yuan *et al.* 1996). Bu durum göz önüne alınarak minimum talaş kalınlığının işlenen parçanın özellikleriyle olan ilişkisi (Liu *et al.* 2006), tarafından araştırılmıştır. AISI 1040 ve Al6082-T6 malzemeleri üzerinde yapılan deneysel ve analitik çalışmada, AISI 1040 çeliği için  $t_{min}/r_e = 0,2-0,4$  arasında, Al6082-T6 malzemesi için ise; 0,4 olan bir oran elde etmişlerdir. Bu elde edilen sonuçlar, aynı zamanda literatürde benzer malzemelerle

yapılan çalışmalardaki sonuçlarla da iyi bir uyum içinde olduğu vurgulanmıştır. Bir diğer çalışmada ise, alüminyum alaşımının mikro işlenmesinde minimum talaş kalınlığı değerini deneysel olarak tanımlamışlardır (Yuan *et al.* 1996). Yaptıkları çalışma neticesinde, minimum talaş derinliğinin kesici takım kenar radüsünün %20' si ile %40'ı arasında olduğunu tahmin etmişlerdir.

Minimum talaş kalınlığı üzerine yapılan bir diğer çalışmada da, bu parametrenin aynı zamanda kesici takım ve iş parçası arasındaki sürtünme koşullarından da etkilendiği ileri sürülmüştür. (Son *et al.* 2005) tek kristal yapılı elmas bir kesici takımla alüminyum, pirinç ve bakır malzemeleri üzerinde hem teorik, hem de deneysel bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, minimum talaş kalınlığının sırasıyla 0,09 0,1 ve 0,12 olduğu teorik sonuçlardan elde edilmiştir. Bu sonuçlar aynı zamanda deneysel verilerle de uyum içinde olduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte, minimum talaş kalınlığının sürtünme katsayısı ve kenar radüsü ile ilişkili olduğu ve minimum talaş kalınlığında, yüzey özelliklerinin de iyileştiği çalışmada belirtilmiştir

#### **2.4.2 Mikro frezelemede iş parçası mikro yapısının etkisi**

Mikro frezeleme işleminde, iş parçası malzemesinin mikro yapısı, önemli bir parametredir (Dornfeld *et al.* 2006). Çünkü imalat işleminin boyutundan dolayı malzeme içyapısındaki tane boyutu, bazen mikro frezeleme işleminde kesme derinliği ve ilerleme miktarından, hatta kullanılan kesici takımın kenar radüs değerinden daha büyük olabilmektedir (Dornfeld *et al.* 2006). Bu durum, malzemenin anizotropik ve homojen olmayan bir davranış sergilemesine neden olmaktadır. Bu nedenle, kesme işlemi boyunca, malzemenin tane yapısı, tane sınırı ve kristalografik yönelme gibi karakteristiklerin sürekli değişmesi, oluşan kesme kuvvetlerini, titreşimleri vs. talaş kaldırma sürecini etkileyen parametreleri etkilemektedir (Simoneau *et al.* 2006, Dornfeld *et al.* 2006).

Bu konu üzerine yapılan bir diğer çalışmada, homojen olmayan bir yapıya sahip malzemelerin imalat sırasında titreşimlere sebebiyet verdiği ileri sürülmüştür. Aynı çalışmada, ayrıca kristalografik yapının ve tane dizilişlerindeki değişimin talaş kaldırma işleminde kayma açısını değiştirdiğinden söz edilmiştir (Lee *et al.* 2002). Bunun yanı

sıra, iş parçası malzemesi ve sertliği ile ilişkili olarak kesme kuvvetindeki değişim Grum and Kisin (2003) tarafından ileri sürülmüştür. Alüminyum - silisyum alaşımlarını kullandıkları çalışmalarında, malzeme mikro yapısındaki değişimle birlikte kesme kuvvetinin de değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca kesici takım, iş parçasındaki metalürjik bir fazdan diğerine geçişinde, işleme hatalarına, titreşime ve hızlı bir takım aşınmasına neden olduğu bildirilmiştir. Bu tür durumların ortadan kaldırılması homojen bir malzeme yapısının elde edilmesiyle sağlanabilmektedir. Bunun için yapılan bir çalışmada (Weule *et al.* 2001) homojen olmayan AISI 1045 çeliğine 180 ile 600 °C arasında değişen sıcaklıklarda ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıtılma işlemi neticesinde, homojen bir yapının elde edildiği ileri sürülmüştür.

Wang (2007) çalışmasında malzeme tane yapısının mikro kesmeye olan etkilerini araştırmıştır. Sonuç olarak malzemenin tane yapısının talaşın oluşumunu doğrudan etkilediğini tespit etmiştir. Büyük ve kompleks tane yapılı malzemelerde kesmenin zorlaştığını belirtmişlerdir.

### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 İş parçası ve kesici takım

Bu çalışmada sahip olduğu mekanik ve termal özelliklerinden dolayı endüstrinin pek çok alanında kullanılan Ti-6Al-4V (Al-6.11%, Fe-0.127%, Sn-0.4%, V-3.63%, Ti-89.6%) alaşımı iş parçası olarak seçilmiştir (Çizelge 3.1).

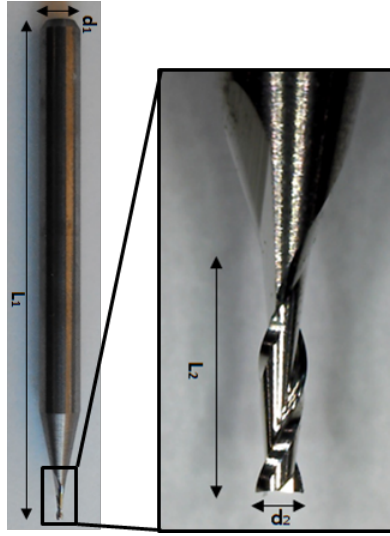
**Çizelge 3. 1** Ti-6Al-4V kimyasal bileşimi (Smolarczyk et al. 2013).

Ti-6Al-4V	Çekme	Akma	Uzama (%)	Sertlik (HV)
	gerilmesi (MPa)	gerilmesi (MPa)		
Plastik şekillendirme	954	729	10	346

Çalışmada, ticari amaçla kullanılan, 508 µm çapında, 2 kesici ağızlı (PMT part TS-2-0200-S) mikro takımlar kullanılmıştır. Kaplamasız mikro takımlar Performance Micro Tool (PMT) tarafından üretilmiştir, üç farklı kaplama (TiN, AlCrN, ve NCD) ile kaplanan takımların kaplama işlemi Orelikon blazers tarafından yapılmıştır. NCD kaplamalar kimyasal buhar biriktirme (HF-CVD) ile yapılmıştır. Çizelge 3.2 de takımlara ait karakteristikler verilmiştir.

**Çizelge 3. 2** Kaplamalı ve kaplamasız takımlara ait karakteristikler.

Kaplama tipi	Kimyasal Bileşimi	Sertlik (HV 0.05)	Sürtünme katsayısı	Kaplama kalınlığı (µm)	Kesici köşe yarıçapı (µm)	Kaplama sonrası kesici köşe yarıçapı (µm)
Kaplamasız		1680	0,4-0,6			1,45
AlCrN (PVD)		3200	0,35			1,92
TiN (PVD)	92%WC+8%Co	2300	0,4	1,5 - 2	1 - 1,5	1,61
NCD (HF-CVD)		8500	0,1			1,62

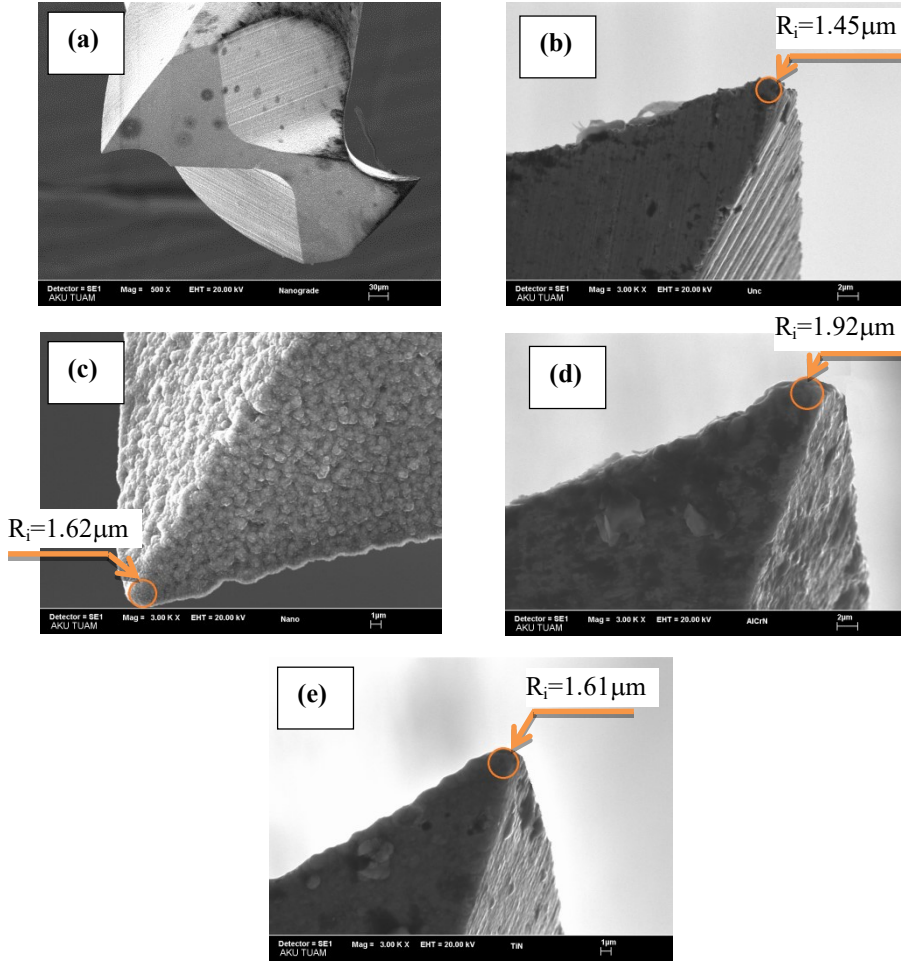


	Değer
Mil çapı, $d_1$ ( mm )	3,2
Takım çapı, $d_2$ ( $\mu\text{m}$ )	0.5
Uzunluk, $L_1$ (mm)	38,3
Helis uzunluğu, $L_2$ (mm)	2,3
Kesici köşe yarıçapı	1 – 1,5
Kesici köşe sayısı, $z$	2
Helis açısı, $\theta$ ( $^\circ$ )	30
Talaş açısı, $\alpha$ ( $^\circ$ )	15
Boşluk açısı, $\gamma$ ( $^\circ$ )	6

Şekil 3. 1 Mikro freze takımların geometrik özellikleri.

Mikro frezeleme işleminde kesici kenar radüsü hem kesme kuvvetlerini hem de yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir unsurdur. Bu nedenle kesme deneyleri öncesinde takımlara ait köşe radüslerini tespit etmek amacıyla Scanning Electron Microscope (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2 de her bir takıma ait SEM resimleri verilmiştir. Mikro takımlara ait kesici kenar radüsünün  $1,45\mu\text{m}$  ile  $1,92\mu\text{m}$  arasında değiştiği tespit edilmiştir. Hem PVD hem de CVD kaplama işleminde kaplama kalınlığını tam olarak elde etmek oldukça zordur. Bu nedenle kaplanan ve kaplamasız kesici takımların köşe radüsleri arasında bir miktar fark ( $0,47\mu\text{m}$ ) oluşmuştur. Fakat bu fark, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından ihmal edilebilir olduğu söylenebilir.

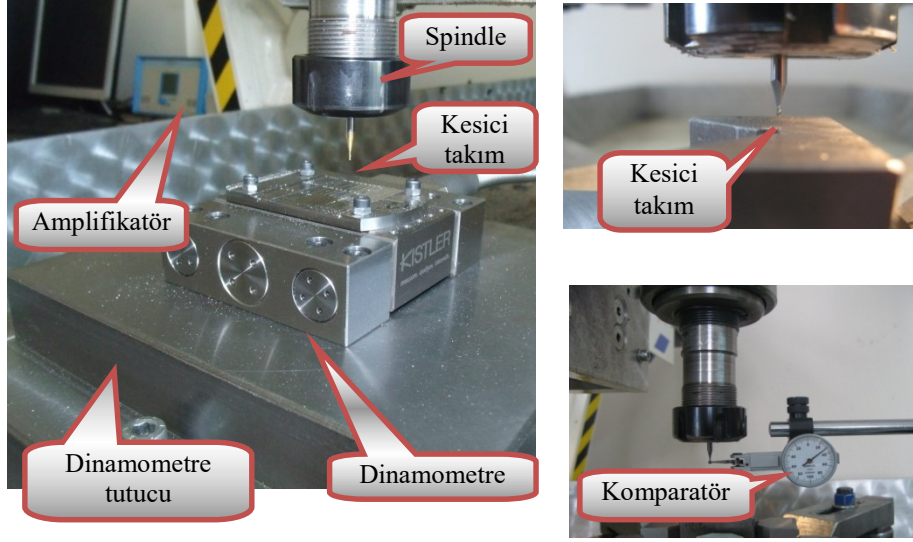




**Şekil 3. 2** Takımların Sem resimleri a) Mikro takım, b) Kaplamasız takım köşe radüsü, c) NCD kaplı takım köşe radüsü, d) AlCrN kaplı takım köşe radüsü, e) TiN kaplı takım köşe radüsü.

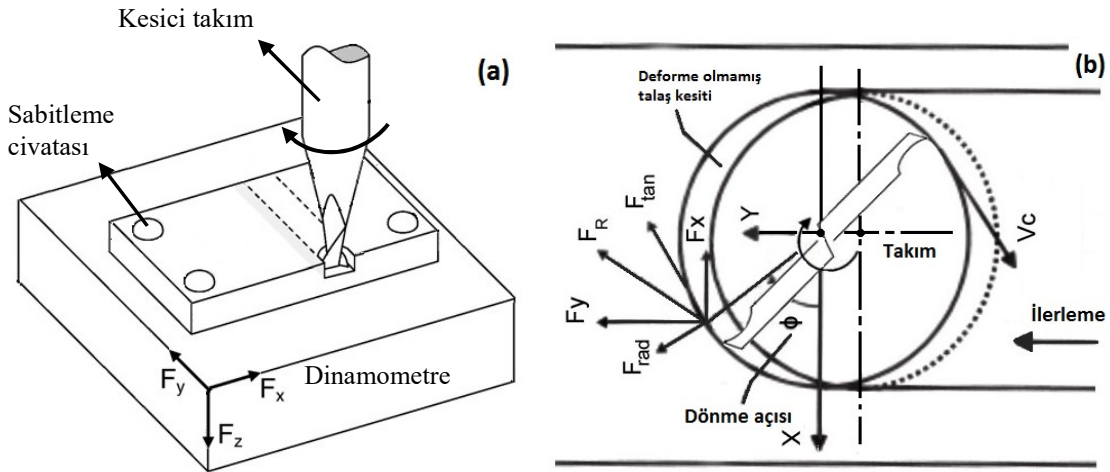
### 3.2 Deney düzeneği ve kesme parametreleri

Mikro frezeleme deneyleri için 2.2 kW motor gücüne ve 24000 dev/dk dönme hızına sahip bir CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır (Şekil 3.3). Deneyler öncesinde iş milinde var olan aksel sapmayı belirlemek adına ön kontroller yapılmış olup bu sapma miktarının yaklaşık 2 mikron olduğu tespit edilmiştir. İş parçası dört farklı noktadan dinamometreye sabitlenmiş olup eşit sıkma momenti için torkmetre kullanılmıştır. Mikro frezeleme esnasında takım üzerinde oluşan kuvvetlerin ölçümünde Kistler 9119AA1 mini dinamometre kullanılmıştır. Kullanılan dinamometre çok hassas olması nedeniyle, kesme deneyleri aynı ortam sıcaklığında yapılmaya özen gösterilmiştir.



Şekil 3. 3 Mikro kesme işleminin gerçekleştirildiği deney düzeneği.

Kesme deneyleri, sabit devir sayısı ( $n=20000\text{dev/dk}$ ) ve kesme derinliğinde ( $a_p=0,1\text{mm}$ ), farklı kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir.. Talaş yükünün ve minimum talaş kalınlığının etkisini görmek adına  $f_z = 0.125-4\mu\text{m}$  arasında yedi farklı ilerleme değeri için kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme deneylerinde kullanılan yöntemin şematik gösterimi Şekil 3.4 de verilmiştir. Şekil 3.4 de ayrıca kesme esnasında takım ucunda meydana gelen  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_t$  ve  $F_r$  kuvvetler ve deneyde kullanılan koordinat sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3. 4 Mikro frezeleme işleminin şematik gösterimi.

İki farklı kesme kuvveti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bunlardan biri; 20mm lik kesme mesafesinde yapılan kuvvet ölçümleridir. Bu ölçümlerde kesme mesafesi kısa tutularak, takım aşınmasının etkisi göz ardı edilmiştir. Diğer kuvvet ölçümü ise 430mm lik kesme mesafesi boyunca yapılmıştır. Böylece takımda meydana gelen aşınmasının kesme kuvvetlerini nasıl etkilediği tespit edilmiştir. Kaplama etkisinin incelendiği deney parametreleri Çizelge 3.3’ de verilmektedir. Çizelge 3.4 de ise soğutma/yağlamannın mikro ferezeleme işlemine etkilerinin incelendiği deneylerde kullanılan parametreler verilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde Nanovea 3D optik yüzey profilometresi kullanılmıştır. Optik profilometre kullanılarak hem yüzey pürüzlülük değerleri hem de çapak boyutları tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kanal genişliği boyunca Ra değerlerinin değişimi elde edilmiştir. Takımlarda meydana gelen aşınmalar için taramalı elektron mikroskop (SEM) ve Enerji Dağılımı Spektrometre analizleri (EDX) gerçekleştirilmiştir.

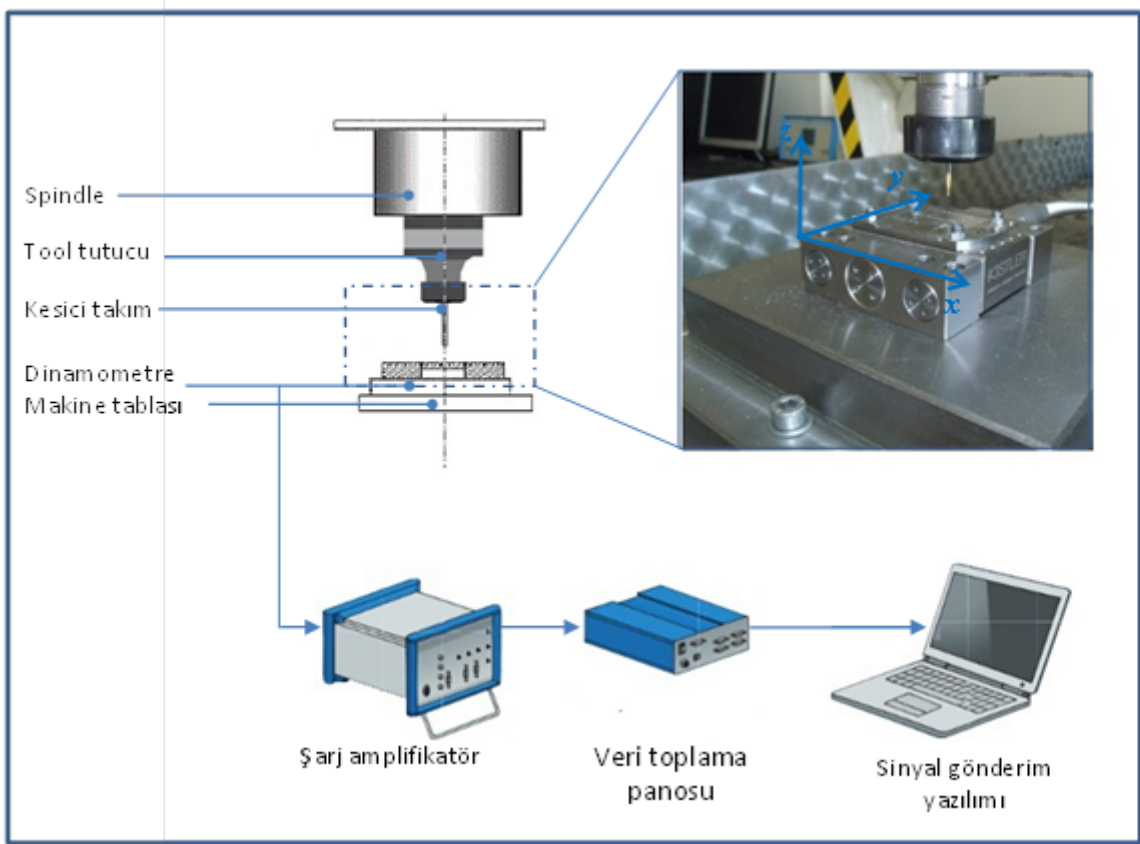
**Çizelge 3. 3** Deneylerde kullanılan kesme parametreleri.

Kesici Takım	Devir (dev/dak)	Kesme Derinliği (mm)	Diş başına düşen ilerleme miktarı (µm/diş)	Kesme mesafesi (mm)
Kaplamasız, NCD, TiN, AlCrN	20000	0,1	2	430
Kaplamasız, NCD, TiN, AlCrN	20000	0,1	0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 2,5, 4	20

Kesme Koşulu	Sıcaklık (°C)	Basınç (Bar)	Kesme mesafesi (mm)
Soğuk hava	-30±2	3	385
Kuru	20±2	-	385
MQL	20±2	3	385
Hibrit	-10±2	3	385

### 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 3.5).



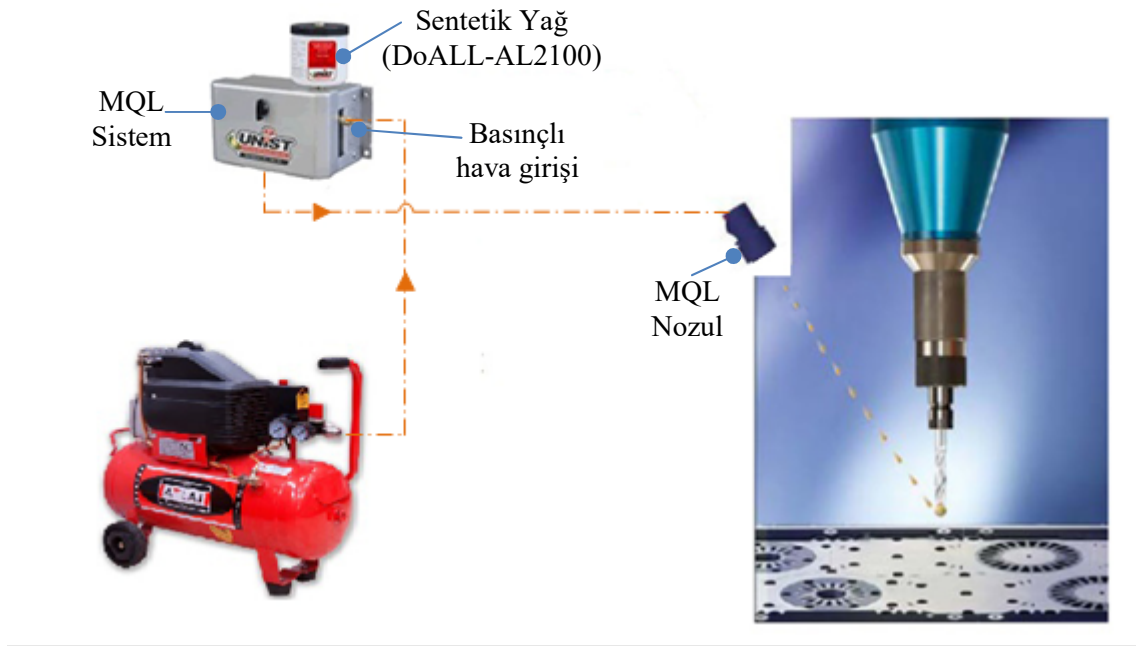
Şekil 3. 5 Mikro frezelemede kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde kullanılan deney düzeneği.

### 3.4 Soğutma sistemlerinin tasarımı

Titanyum alaşımının mikro frezleme işleminde 3 farklı soğutma sistemi kullanılmış olup kriyojenik işleme için sistem tasarımı yapılmıştır. Minimal miktar yağlama, sıfır altı soğutma olarak bilinen karbondioksit (CO<sub>2</sub>) kullanımı yani kriyojenik işleme ve kuru kesme koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

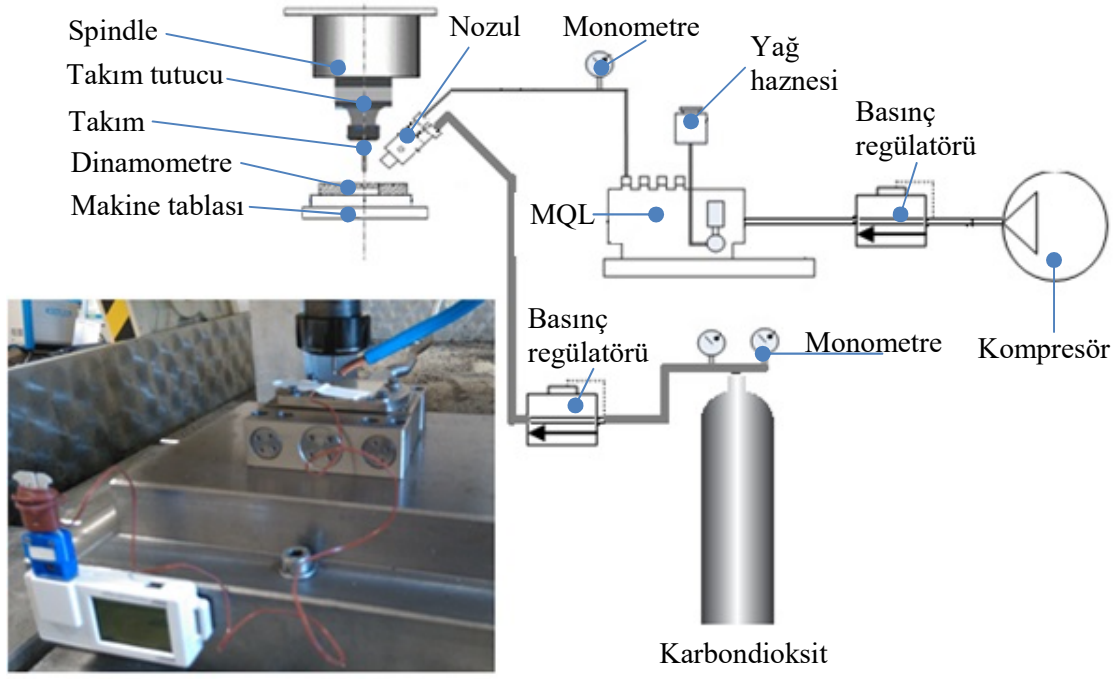
Kesme işlemi boyunca yağlamanın etkisini ortaya koyabilmek için UNİST marka minimal miktar yağlama (MQL) sistemi kullanılmıştır. Bu ekipman, üzerinde bulunan yağ haznesindeki akışkan sıvıyı basınçla hava yardımıyla ve ince bir kesite sahip hortum kanalıyla sistemin ucundaki nozula iletmektedir (Şekil 3.6). Oldukça dar bir kesite sahip olan lastik nozula çarpan basınçlı akışkan, partiküllere ayrılarak buharlaşmakta ve kesme bölgesine iletilmektedir. Bu sayede, özellikle kesici takım ile iş parçası ara yüzünde bir yağ film oluşturularak sürtünme şartlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu sistemle yapılan yağlama işlemiyle birlikte, soğutma sıvısı tüketiminde de tasarruf sağlanmıştır. Yağlama sistemi, yağlayıcı sıvıyı anlık püskürtme şeklinde hedef noktaya iletmektedir. Bununla birlikte sistemde kullanılan yağlayıcı sıvı ise; Al-2100 ester yağından elde edilmiş sentetik bir yağlayıcıdır. Minimal yağlama sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanan kesme yağıdır. Bu yağ, yüksek kesim hızının olduğu demir dışı veya kesimi kolay metallerin kesme işlemlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir., 12 ml/sa akış hızında UNİST sistemi ile yapılmıştır.

Geleneksel kesme işlemlerinde yaklaşık 6 bar lık bir basınç kullanılmasına rağmen mikro frezeleme işleminde 6 bar basınç takımın kırılmasına neden olabilmektedir. Bu yüzden ön deneylerde MQL için 4 barlık bir basınç tercih edilmiş ve tüm deneylerde 4 bar kullanılmıştır.



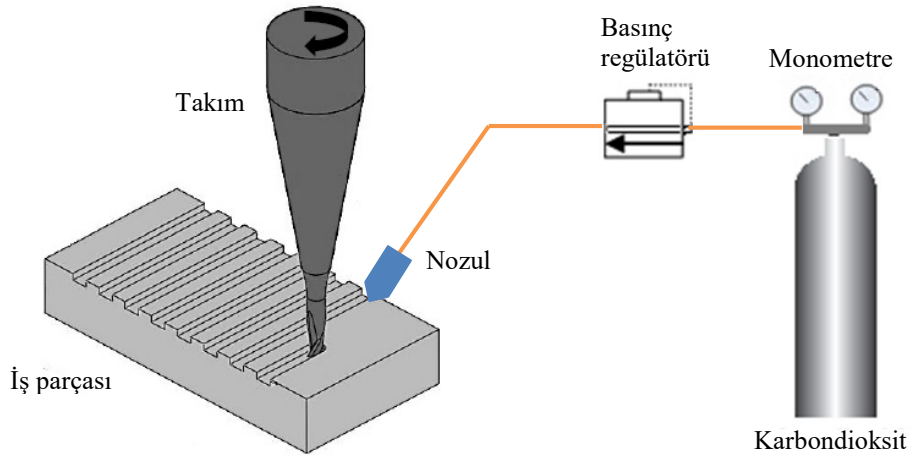
**Şekil 3. 6** Kesme deneylerinde kullanılan MQL sistemi.

MQL yöntemi kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklığın azaltılmasında çokta yeterli değildir. Bu nedenle MQL ile kriyojenik yöntem birleştirilerek hibrit bir soğutma/yağlama sistemi tasarlanmıştır (Şekil 3.7). Soğutma işlemi için karbondioksit gazı kullanılmıştır. Soğutulmuş hava ile yağ karışımı kesme bölgesine 3 bar lık bir basınç ile püskürtülmüştür. Hibrit olarak isimlendirilen sistemde ise MQL ile soğutulmuş hava tek bir çıkışta birleştirilmiştir. Bu sistemde nozülde çıkan hava ve yağ karışımının sıcaklığı  $-10^{\circ}\text{C}$  dir.



Şekil 3. 7 Çalışmada kullanılan Hibrit soğutma/yağlama sistemi.

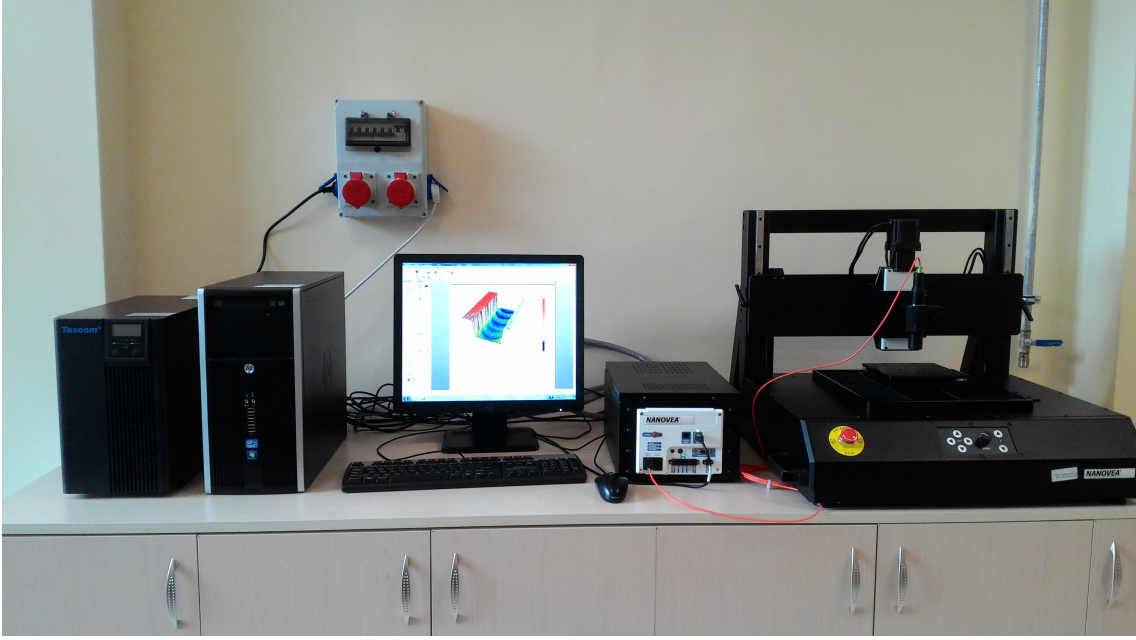
Titanyum alaşımının düşük termal iletkenliğinden dolayı kesme esnasında oluşan yüksek sıcaklıkları minimize etmek adına  $-30^{\circ}\text{C}$ 'ye soğutma yapılmıştır. Soğutucu, kesici takımın talaş kaldıracağı, hemen önündeki işlenmemiş bölgeye karbondioksit püskürtülerek uygulanmıştır. Sistemin şematiği Şekil 3.8 de görülmektedir.



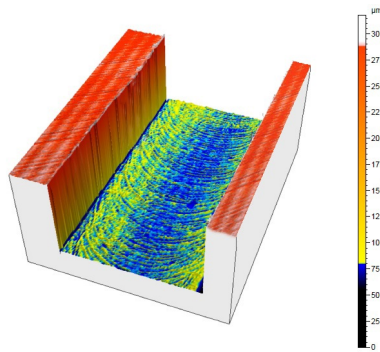
Şekil 3. 8  $-30^{\circ}\text{C}$ ' de kesme işlemi.

### 3.5 İş parçası yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi

Soğutma yönteminin ve kesme parametrelerinin mikro frezelenmiş slotların yüzey kalitesine olan etkilerini belirlemek için, üç boyutlu yüzey taraması gerçekleştirilmiş ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri NANOVEA 3D profilometre ile ölçülmüştür. Kullanılan profilometre temassız ölçüm yapabilmekte ve nanometre hassasiyetindedir.



Şekil 3. 9 Slotların üç boyutlu yüzey analizi.

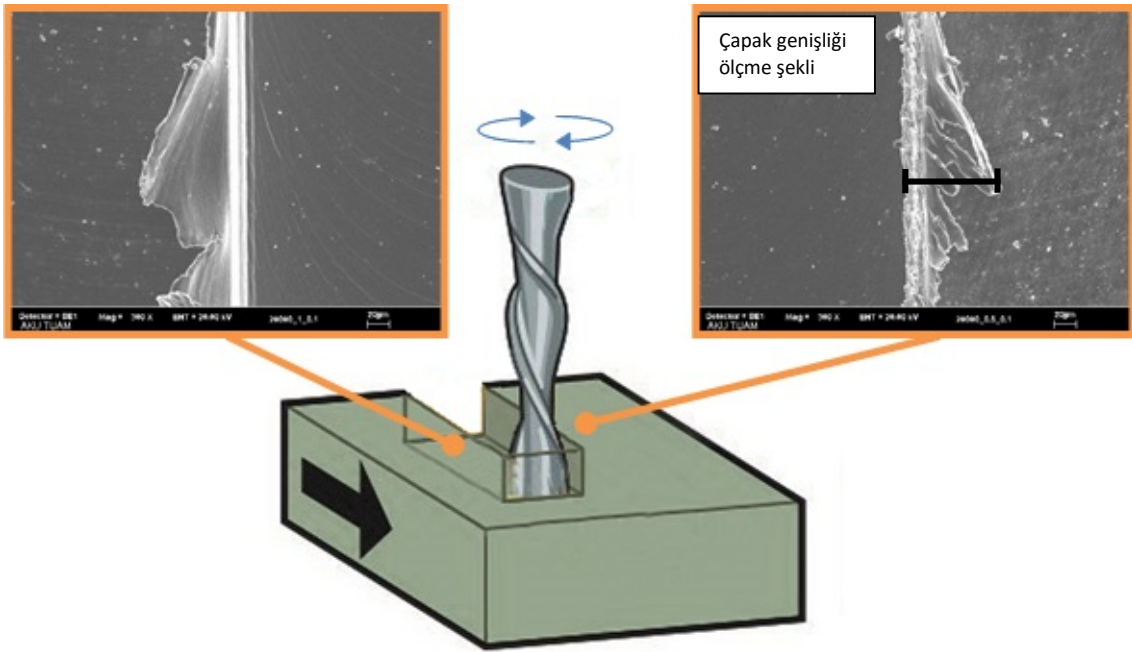


Şekil 3. 10 Yapılan ölçüm sonrasında elde edilen, 3 boyutlu yüzey şekli.



### 3.6 Çapak oluşumunun ölçülmesi

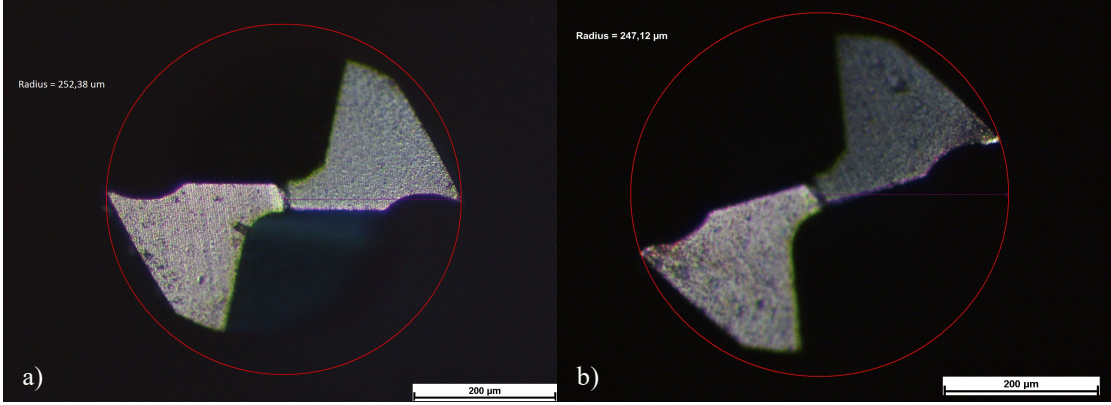
Üretimin kalitesini belirleyen bir diğer parametre ise, işlenen kanallardaki çapak oluşumudur. Yapılan deneysel çalışmalar boyunca, meydana gelen çapak oluşumları SEM kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen çapak oluşumu Şekil 3.11 ' de verilmiştir. Yapılan görüntüleme işlemi, işlenen kanala ait en büyük çapağın meydana geldiği noktadan alınmıştır.



Şekil 3. 11 Çapak genişliği ölçme yöntemi.

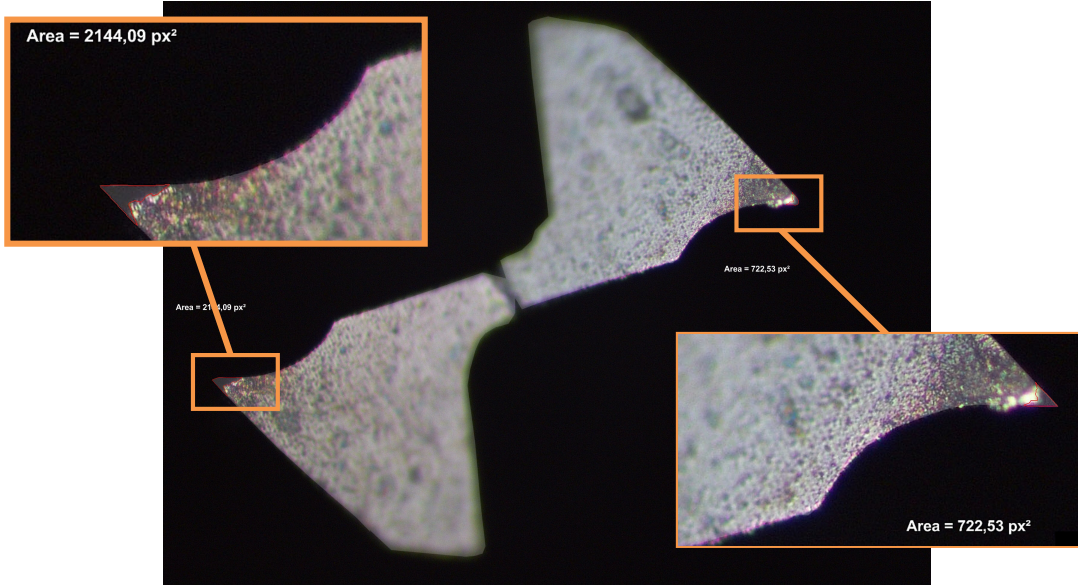
### 3.6 Takım aşınmasının ölçülmesi

Mikro frezeleme işleminde kullanılan kesici takımların kenar radüsü oldukça küçüktür. Kesme esnasında takımda meydana gelen hasar öncelikle kesici kenar radüsünün büyümesine yol açmaktadır. Kenar radüsünün büyümesini takım çapındaki azalma takip etmektedir. Bu nedenle, kesme deneyleri sırasında belirli aralıklarla deney durdurulmuş ve takım aşınması ölçülmüştür. Çalışmada, hem takım çapındaki değişim hem de kesici kenar aşınma miktarı artış dikkate alınmıştır. Deneyler öncesinde kesici takımların çap ölçümleri gerçekleştirilmiş olup ortalama çap 506-508µm arasında değiştiği saptanmıştır Şekil 3.12 a da takımın deney öncesi çap ölçümü verilmiştir. Şekil 3.12 b de deneyin bitimindeki takım çap ölçüsü verilmiştir.



Şekil 3. 12 Deney öncesi çap ölçümleri.

Takım ucunda meydana gelen aşınmanın alan cinsinden değişimi yine kesme mesafesine bağlı olarak incelenmiştir. Takım ucundaki bu aşınma optik mikroskop vasıtasıyla ölçülmüş olup, kıyaslama ve alan hesabı takımın ilk kullanım öncesindeki geometrisine göre yapılmıştır. Şekil 3.13’ de elde edilen sonuç, bir anlamda Şekil 3.12’ de verilen sonuçları hem doğrular niteliktedir, hem de aşınma mekanizmasının tanımlanmasında önemli bilgiler sunmaktadır.

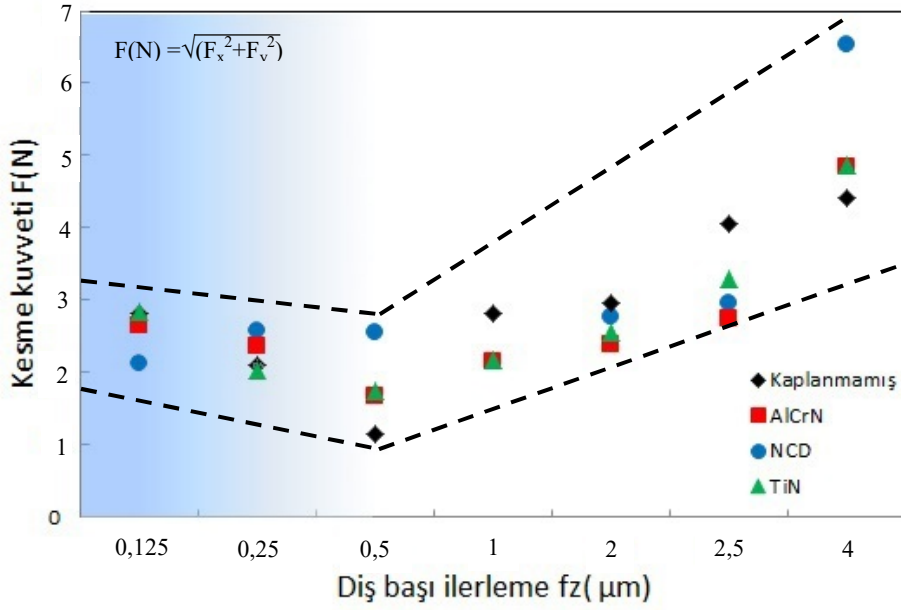


Şekil 3. 13 Takım ucu aşınma miktarının optik mikroskop ile tespit edilmesi.

## 4. BULGULAR

### 4.1 Kesme kuvveti değişimi

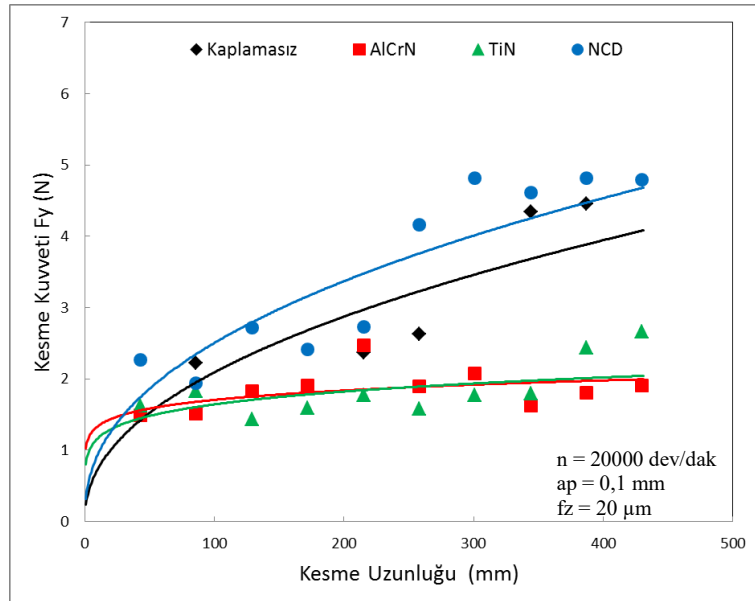
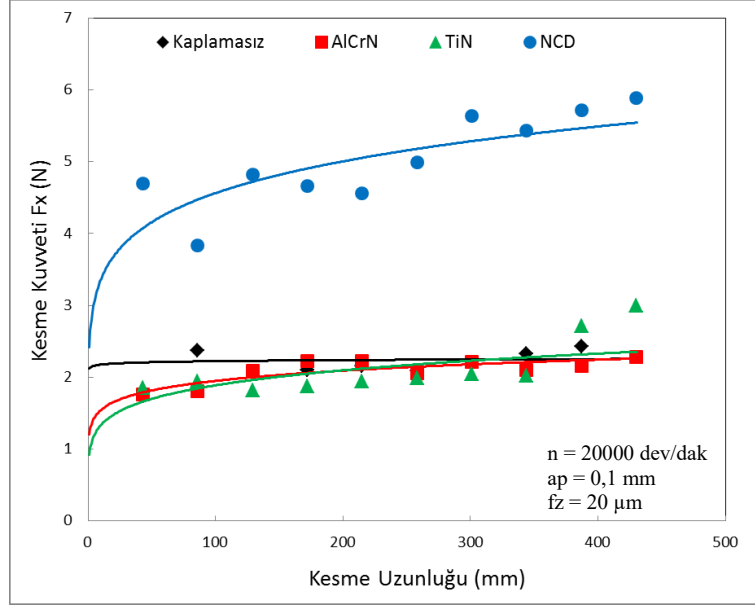
şekil 4.1 da  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvetlerinin bileşkesi olan  $F$  kuvvetinin ilerleme değerine ve kaplama tőrüne bağlı olarak değişimi verilmiştir. Genellikle konvensiyonel frezeleme işleminde artan ilerleme değeri ile kesme kuvveti de artmaktadır. Boyut etkisinden dolayı mikro frezeleme işleminde bu durum farklılık göstermektedir. Kritik talaş kalınlığından daha kőrük olan talaş derinliklerinde kesme kuvvetleri artma eğilimi göstermektedir. şekil 4.1 da da NCD dışındaki takımlarda bunu gőrmeđe mőrmeđin.  $f_z < 0.5\mu\text{m}$  iēin kesme kuvvetleri artmaktadır. Fakat NCD kaplanmış kesici takımında  $f_z \leq 2.5\mu\text{m}$  iēin kesme kuvvetlerinin sabit kaldığı sőrylenebilir. Grafikte  $f_z = 0.5\mu\text{m}/\text{flute}$  ilerlemenin kaplamasız, AlCrN ve TiN kaplı takımlar iēin kesme kuvvetinde bir geēiř noktası olduğu gőrılmektedir. Dikkat edilecek olursa şekil 4.1 de NCD kaplanmış kesici takım iēin  $f_z < 0.5\mu\text{m}$  gibi net bir geēiř noktasının olduğunu sőrlemek zordur. Kazınma bølgesinin en önemli özelliği uniform bir talaş oluşunun meydana gelmemesi ve buna bağlı olarak yüksek sőrtnme koşullarının gőrölmesidir. Bu yüzden dőrük sőrtnme katsayılarına sahip takımların bõe bir kesme modunda önemli bir avantajı olacağı açıktır. NCD kaplı takımla kesme işleminde minimum talaş kalınlığına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde meydana gelen tipik değişimin gőrölmemesinde bu kaplamanın sağlamış olduğu sőrtnme ortamının katkısı ihmal edilmemelidir. Yani NCD kaplama ile talaş ara yüzeyindeki dőrük sőrtnme ve adhesion kesici kenarda kazınma nın azalmasının nedeni olabilir. NCD kaplı kesici takımında  $f_z \leq 2.5\mu\text{m}$  iēin, kesme kuvvetinde kőrük değişimler olsada, ortalama kesme kuvveti yaklaşık 2,5N olarak gerēekleřmiřtir. Dolayısıyla Ti6Al4V malzemenin mikro frezelenmesi işleminde kesme kuvvetleri aēısından kritik ilerleme değerinin  $0.5\mu\text{m}$  olduğunu sőrylenebilir. ēünkü her üç takım iēin de elde edilen bileşke kesme kuvveti  $f_z \geq 1 \mu\text{m}$  iēin lineer olarak artmaktadır. Bu artış özellikle NCD kaplı kesici takımında yüksek ilerleme değerlerinde maksimum olarak gerēekleřmiřtir. Bunun da nedeni; NCD kaplı kesici takımında meydana gelen kenar aşınmasıdır.



**Şekil 4. 1** Kesme kuvvet bileşkesinin diş başı ilerleme ile değişimi.

Artan kesme mesafesiyle takımdaki aşınma artar ve takım geometrisi ilk şeklini kaybeder. Takım geometrisinde meydana gelen bozulma kesme kuvvetlerinin de artmasına neden olur. Şekil 4.2 de kesme zamanına bağlı olarak her kesici takımda meydana gelen  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvetlerinin değişimi verilmektedir. NCD kaplanmış kesici takımda elde edilen kesme kuvvetleri maksimumdur ve artan kesme mesafesi ile de  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvet değerleri artmaktadır. Bunun da iki farklı nedeni olabilir. Birincisi; artan kesme mesafesi ile kaplamanın takım yüzeyinden kalkması. İkincisi ise kesici takıma ait köşe radüsünün artmasıdır. Bununla birlikte Şekil 4.2 deki takım aşınmaları incelendiğinde takım çapındaki en fazla aşınma NCD kaplı takımla elde edilmiştir. Aşınmaya bağlı olarak takımın kesme yapan çapının azalmasıyla birlikte kesme hızıda azalmaktadır. Bilindiği üzere düşük kesme hızlarında daha büyük kesme kuvvetinin oluşturduğu bilinmektedir dolayısıyla NCD kaplı takımda meydana gelen büyük kesme kuvvet değeri için bu durum göz ardı edilmemelidir. AlCrN ve TiN kaplanmış takımlar için elde edilen kesme kuvveti değerleri minimumdur. Ayrıca artan kesme mesafesi ile önemli bir değişimin olmadığını da söylemek mümkündür. Kaplamasız kesici takımda elde edilen kesme kuvvetleri NCD için elde edilen değerlerden daha küçüktür. Bunun da nedeni; NCD için kullanılan kaplama yöntemi olabilir. HF-CVD yönteminde kullanılan işlem sıcaklığı  $700^{\circ}\text{C}$  dir. Kaplama sırasında mikro takımların sertlik değerleri bu sıcaklıktan olumsuz etkilenmiş olabilir. Mikro takımın sertlik değerindeki

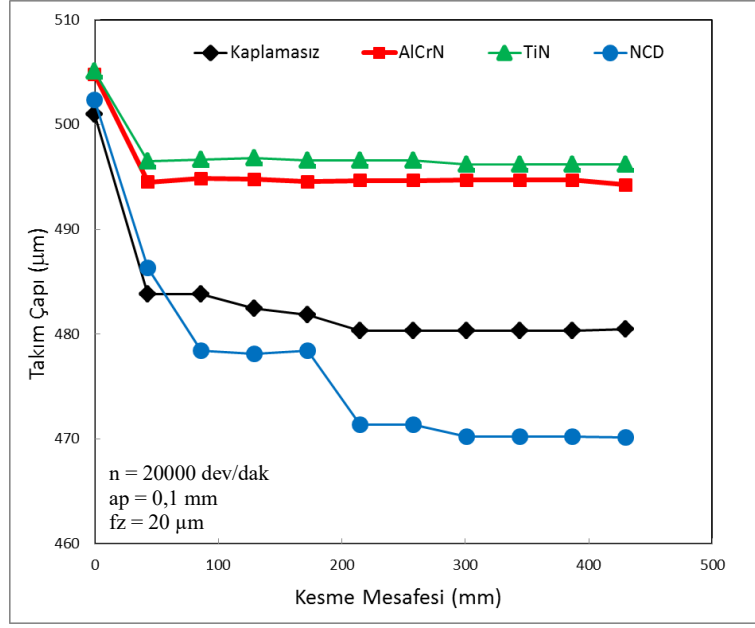
azalma, takım aşınmasının ve kesme kuvvetlerinin artmasına neden olur. NCD kaplanmış kesici takım ile alüminyumun işlenmesinde de benzer bir durum (Torres *et al.* 2009) tarafından ifade edilmiştir.



Şekil 4. 2 Kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna bağlı değişimi.

## 4.2 Takım Aşınması

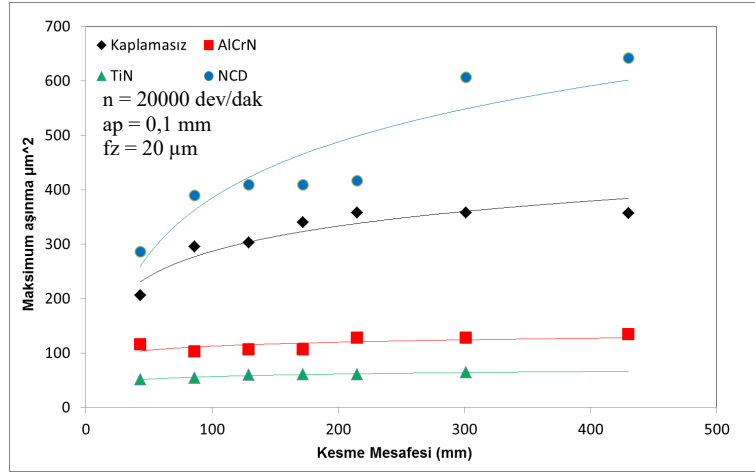
Mikro frezeleme işleminde kullanılan kesici takımların kenar radüsü oldukça küçüktür. Kesme esnasında takımda meydana gelen hasar öncelikle kesici kenar radüsünün büyümesine yol açmaktadır. Kenar radüsünün büyümesini takım çapındaki azalma takip etmektedir. Bu nedenle, kesme deneyleri sırasında belirli aralıklarla deney durdurulmuş ve takım aşınması ölçülmüştür. Çalışmada, hem takım çapındaki değişim hem de kesici kenar radüsündeki artış dikkate alınmıştır. Deneyler öncesinde kesici takımların çap ölçümleri gerçekleştirilmiş olup ortalama çap 506-508 µm arasında değiştiği saptanmıştır. Şekil 4.3 de her bir takım için kesme mesafesine bağlı olarak takım çapındaki değişim verilmektedir. Şekil 4.3 de verilen her bir data 430 mm lik bir kanal boyunca elde edilmiştir. İlk kanal sonunda (kesme mesafesi=430 mm) hem kaplanmış hem de kaplanmamış kesici takımların çapı ani olarak azalmaktadır. NCD kaplanmış kesici takımdaki çap azalması (6,14%) maksimum seviyede gerçekleşmiştir. NCD kaplı takımı kaplanmamış takım takip etmektedir. Bu takımın başlangıçtaki azalma 4,09% dir. İlk kanal sonrasındaki kesme işlemlerinde, TiN ve AlCrN kaplanmış kesici takımlardaki çap değişimi oldukça azdır. Bu takımlarla 400 m lik bir kesme mesafesinde takım çaplarındaki değişimin sabit kaldığı görülmektedir. Kesici takımlarda aşınma direncini belirleyen en önemli parametrelerden bir tanesi takımların sahip oldukları sertlik değerleridir Çizelge 3.1 ' de takımlara ait sertlik değerlerine bakıldığında AlCrN ve TiN kaplı takımların daha iyi bir aşınma direncine sahip oldukları söylenebilir. Buna karşılık kaplamasız ve NCD kaplı takımın sertlik değerleri nispeten daha düşük olduğu görülmektedir. Buda takımları daha fazla aşınabileceğini göstermektedir. Benzer sonuçlar Uzun ve diğerlerinin yapmış oldukları bir çalışmada da ifade edilmiştir. o çalışmada da düşük sertlik değerlerine sahip takımlarda aşınmaya bağlı çap değişiminin daha fazla olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 4. 3 Kesme mesafesine bağlı olarak takım çapındaki değişim.

Şekil 4.4 da takım ucunda meydana gelen aşınmanın kesme mesafesine ve kaplama türüne bağlı olarak değişimi verilmiştir. Takım ucundaki bu aşınma optik mikroskop vasıtasıyla ölçülmüş olup, kıyaslama ve alan hesabı, takımın ilk kullanım öncesindeki geometrisine göre yapılmıştır. Şekil 4.4 de elde edilen sonuç, bir anlamda Şekil 4.3 de verilen sonuçları hem doğrular niteliktedir. Çaptaki aşınma sonuçlarına paralel olarak NCD kaplanmış kesici takımında meydana gelen takım ucu aşınması maksimum iken, AlCrN de bu aşınma minimum seviyede gerçekleşmiştir. Şekil 4.3 de NCD için verilen eğride, kesme mesafesi 200 mm iken takım çapında hızlı bir düşüş gözlenirken, Şekil 4.4 de de yaklaşık aynı kesme mesafesinde takım ucu aşınması artış göstermiştir. Yine benzer şekilde belirli bir kesme mesafesi sonrasında hem çaptaki azalma hem de takım ucu aşınması sabit bir seyir izlemektedir. Bu da takım çapı ile takım ucu aşınmasının birbiri ile ilişkili olduğunu göstermektedir. 43mm lik kesme mesafesi (first slot) sonrasında NCD kaplanmış ve kaplanmamış kesici takımında yaklaşık  $200\mu\text{m}^2$  lik bir aşınma meydana gelmiştir. Aşınmanın seyri parabolic olarak gerçekleşmiş olup, 10. slot sonunda kaplamasız takımında  $360\mu\text{m}^2$  NCD kaplı takımında ise  $500\mu\text{m}^2$  bir aşınma meydana gelmiştir. Diğer kaplamalı kesici takımlarda (AlCrN ve TiN) bu değer  $100\mu\text{m}^2$  nin altındadır. Şekil 4.3 ve 4.4 beraber değerlendirildiğinde abrasive aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak kesici ağızda meydana gelen aşınma, takım çapının

azalmasına da neden olmuştur. Takım çapındaki azalma ise işlenen kanal genişliğinin değişmesine neden olacaktır. Bu noktadan hareketle, NCD kaplamanın Ti6Al4V malzemesinin işlenmesinde çokta uygun olmadığını söylemek mümkündür. AlCrN ve TiN kaplamanın kaplamasız takıma nazaran daha iyi bir takım ömrüne sahip olduğu net olarak tespit edilmiştir.

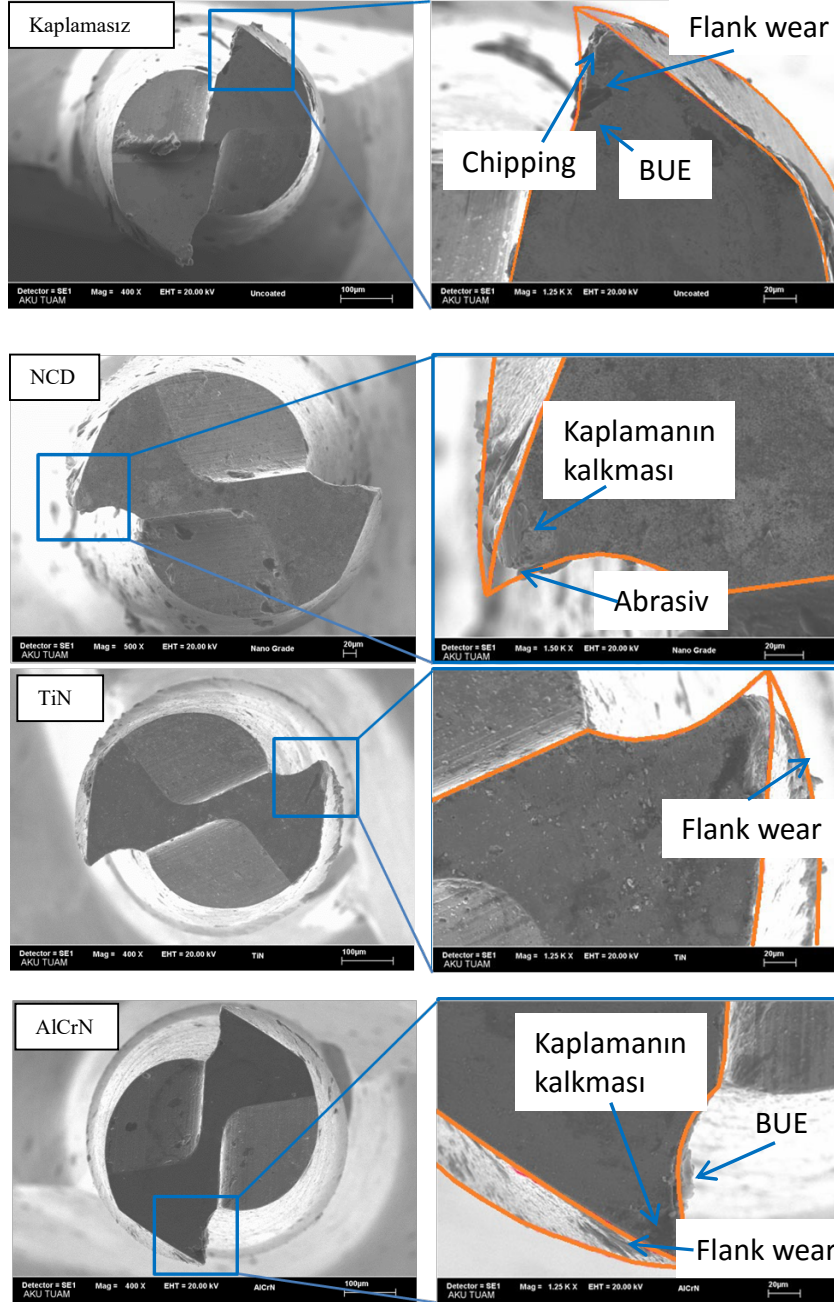


Şekil 4. 4 Kesme mesafesine bağlı olarak kesici kenarında meydana gelen aşınma.

Şekil 4.5 de kesme işleminde kullanılan kesici takımların SEM görüntüleri verilmektedir. Takım geometrisinin bozulmasında abrasive aşınma mekanizmana bağlı olarak yoğun bir yan yüzey aşınması (flank wear) nin meydana gelmesi etkilidir. Bu aşınma tipinin aşırı bir şekilde oluşmasıyla takımın kenar geometrisinin değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte özellikle frezeleme gibi tekrarlı kesme işlemlerinde meydana gelen chipping şeklindeki hasar tipide bir diğer hasar tipidir. Kesici takımlarda görülen bir diğer hasar tipi ise yığıntı talaş oluşumu (BUE) oluşumu dur. Hemen hemen her takımda az da olsa yığıntı talaş (BUE) oluşumuna rastlamak mümkün. Fakat kaplamasız ve NCD kaplı kesici takımda yığıntı talaş (BUE) nin daha yoğun olduğu söylenebilir. NCD kaplı takımın kimyasal olarak karbon ihtiva etmekte ve düşük bir kimyasal affinitive sahiptir. Bu yüzden daha az yığıntı talaş oluşumu beklenmektedir. Ancak aşınmanın etkisiyle kaplamada görülen delaminationla iş parçası malzemesinin takıma yapışma eğilimi artmaktadır. NCD kaplı takımdaki yığıntı talaş oluşumunda bu durumun etkisinin olduğu söylenebilir. Şekil 4.5 de de görüldüğü üzere NCD, AlCrN ve TiN kaplı kesici takımlarda yan yüzey aşınması (flank wear)nin daha yoğun olduğu

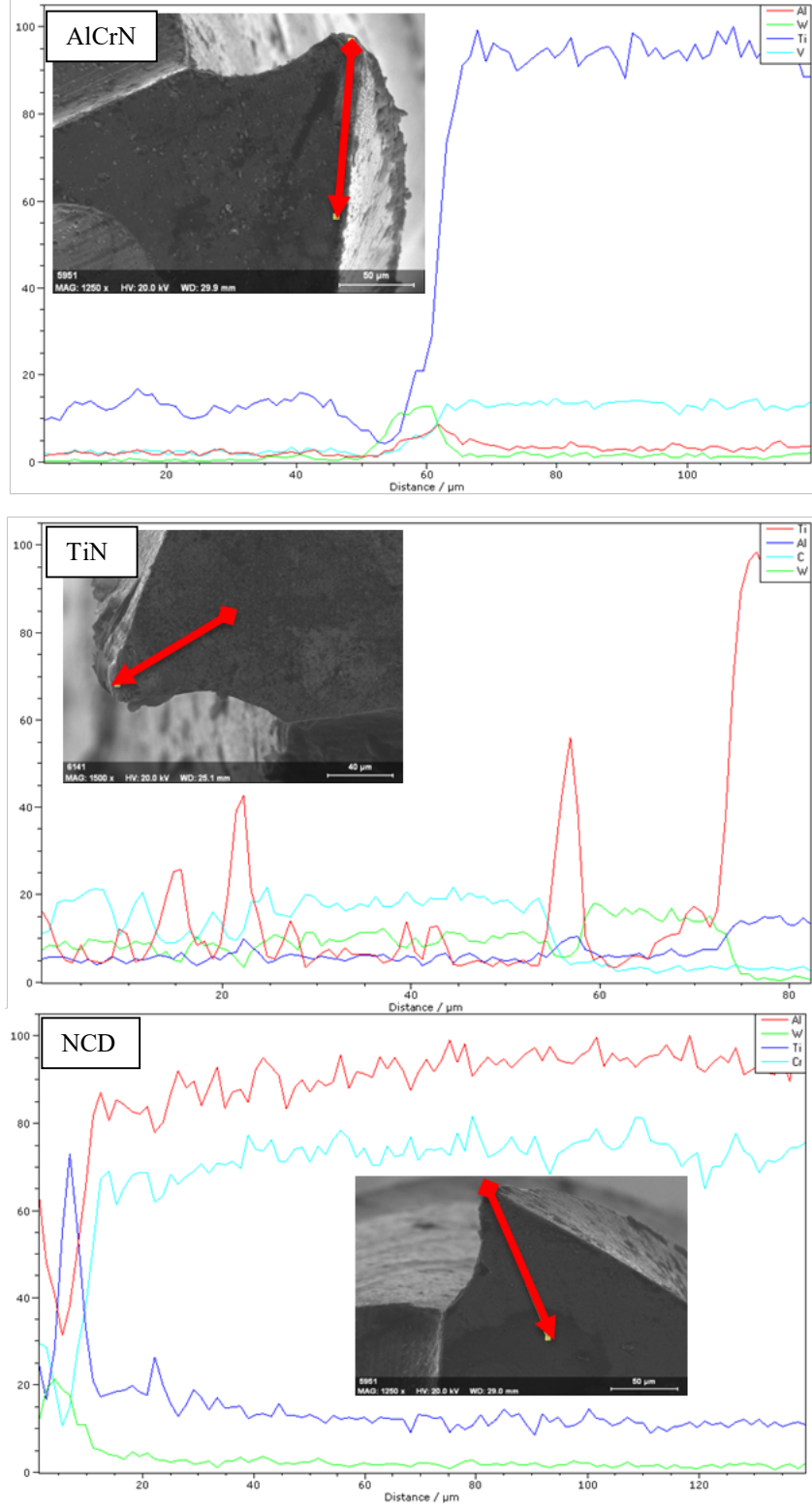


görülmektedir. Ayrıca takımın orjinal geometrisi önemli ölçüde korunmuştur. Buna karşın özellikle kaplamasız kesici takımında takım geometrisinde önemli bir bozulmanın meydana geldiği ve chipping in daha baskın olduğu görülmektedir. Kaplama malzemesi takıma tokluk kazandırmış ve bu da küçük çaplı kırılmaları (chipping) engellemiştir. TiN kaplamanın seramik takımlara uygulanması neticesinde de takım ömrünün arttığı (Aslantas *et al.* 2012) yaptıkları çalışmada belirtilmiştir.



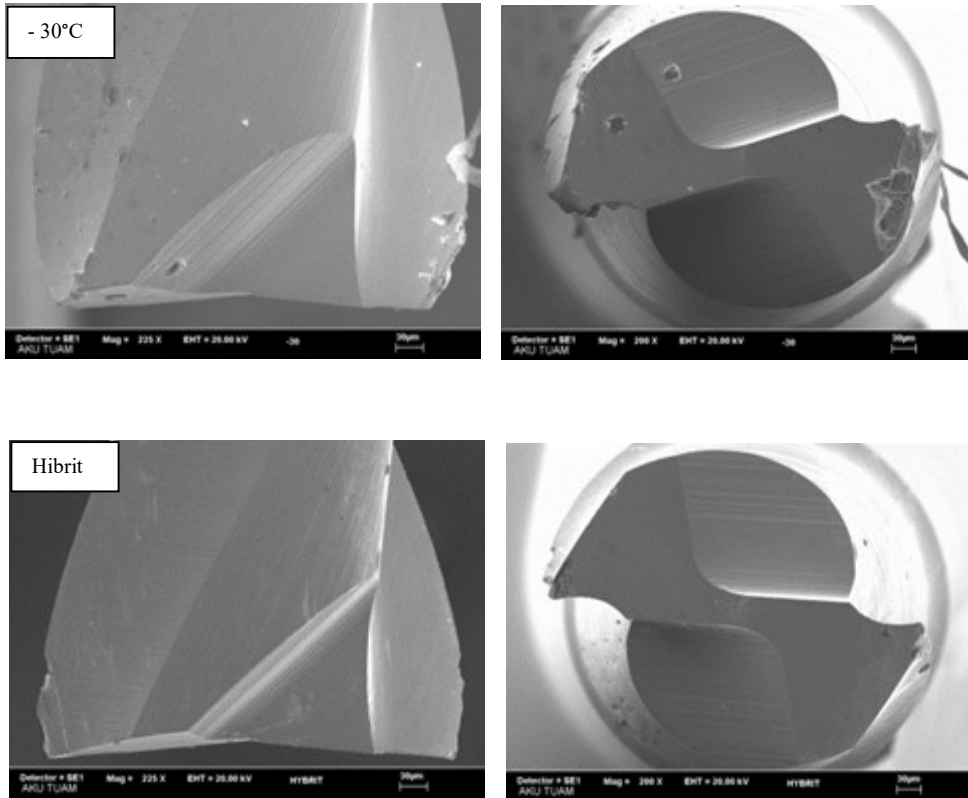
Şekil 4. 5 Kesici takımlara ait SEM görüntüleri a) Kaplamasız takım, b) NCD kaplanmış takım, c) TiN kaplanmış, d) AlCrN kaplanmış.

Şekil 4.6 da deforme olmuş takımlar üzerinde yapılan EDX ve SEM analizlerinde, NCD, AlCrN ve TiN kaplamalı takımlarda ortak olan nokta; kesici ucunda kaplama malzemesinin bir miktar delamination maruz kalmıştır. Bu durum NCD kaplı takımda daha açık bir şekilde görülmektedir. Bu takımın kenar uç bölgesinde iş parçası malzemesinin temel elementleri olan Ti ve Al en yoğun iki element olarak göze çarpmaktadır. AlCrN ve TiN kaplı takımlarda da uç noktalarda Ti ve Al elementleri yoğun bir şekilde görülmektedir. Fakat bu elementlerin iş parçasından mı yoksa kaplamadan mı geldiğini net bir şekilde söylemek zordur. Bununla birlikte AlCrN kaplı kesici takımında, takım ucundan 5 ile 10µm aralığında Ti elementinin varlığından bahsetmek mümkün iken Al ve Cr elementinin de varlığı net olarak görünmektedir. Buradan da kaplamanın tamamen kalkmadığını ama iş parçasının da kısmen de olsa sıvandığını söylemek mümkün. TiN kaplı kesici takımında, takım ucundan 57µm uzunluğuna kadar olan kısımda Ti elementinin azaldığı açıkça görülmektedir. Bu uzunluktan sonraki mesafede kaplama malzemesinin ana bileşeni olan Ti' un varlığından bariz olarak bahsetmek mümkündür.

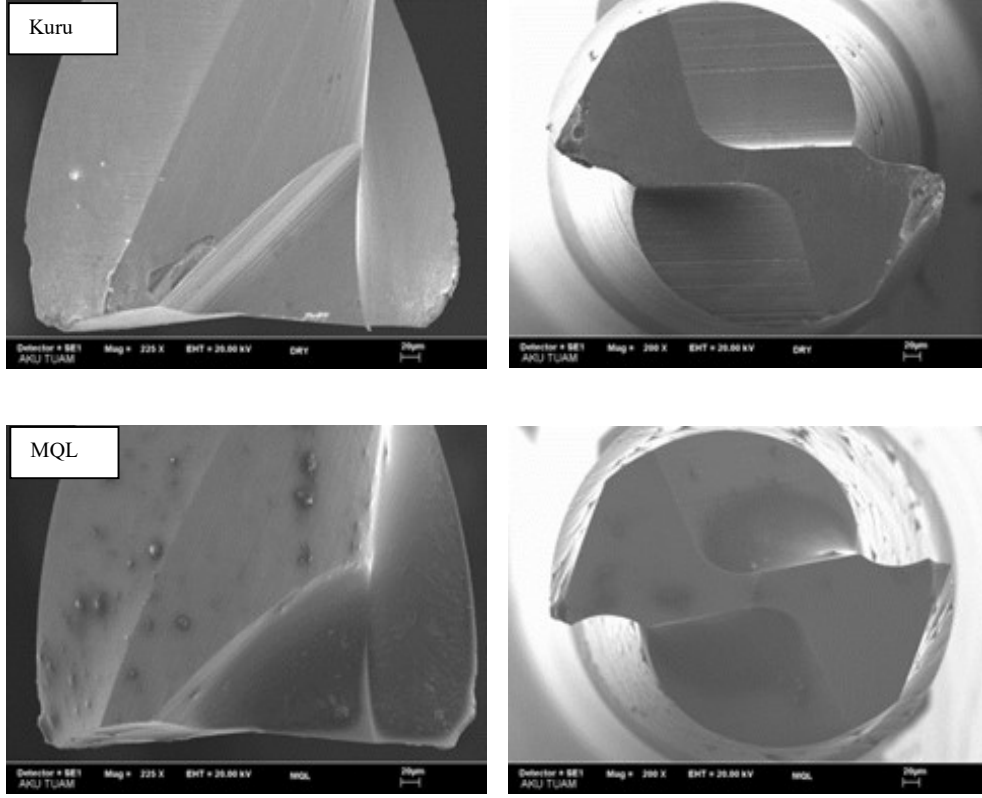


Şekil 4. 6 Kaplanmış takımların EDX analiz sonuçları (n=20000 dev/dak., ap=0.1mm, Kesme boyu: 430mm).

Eşit kesme mesafesi dikkate alınarak yapılan deneylerde kullanılan soğutma/yağlama sisteminin takım aşınma mekanizması ve takım hasar tipi üzerindeki etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Şekil 4.7 de farklı kesme koşullarında yapılan kesme işleminde takım çaplarındaki değişimin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere  $-30^{\circ}\text{C}$  de yapılan kesme işleminde kesici kenarlarında chipping türü hasarın daha baskın olduğu görülmektedir. Bunun da nedeni;  $-30^{\circ}\text{C}$  de soğutulmuş hava kesici takımında gevrekleşmeye neden olmasıdır. Özellikle kesme yapan kenarın kesit alanının küçük olması bu gevrekleşmenin artmasına yol açmış olabilir. Bununla birlikte kesici kenarda talaş yapışması da yığıntı talaş (BUE) gözlenmektedir. Benzer şekilde, kuru kesme şartlarında da chipping türü hasar meydana gelmiştir.  $-30^{\circ}\text{C}$  de yapılan kesme işleminin tersine yığıntı talaş (BUE) oluşumu çok net gözlemlenmemiştir. MQL ile yapılan kesme işleminde takımın meydana gelen hasar daha çok abrasive aşınma mekanizmasının bir sonucudur. Kesici geometrisinde meydana gelen bozulma dry ve  $-30$  a göre daha düşük düzeydedir. Hibrit sistemin kullanıldığı kesme işleminde takım çapındaki azalma minimumdur.

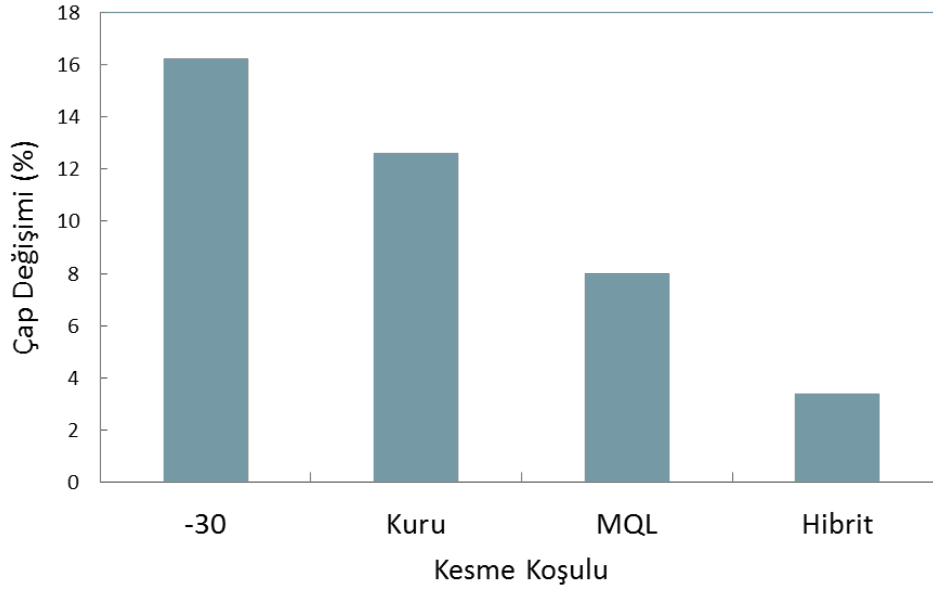


**Şekil 4. 7** Farklı kesme koşullarında yapılan kesme işleminde takım çaplarındaki değişimin SEM görüntüleri.



Şekil 4. 8 (Devam) Farklı kesme koşullarında yapılan kesme işleminde takım çaplarındaki değişimin SEM görüntüleri.

Hybrid sistemde  $-10^{\circ}\text{C}$  soğutulmuş hava ile birlikte yağ zerreciklerinin kesme bölgesine iletilmesi takım ömrü açısından önemli bir iyileşme sağlamıştır. Ayrıca Şekil 4.7' den de görüleceği üzere Hybrid sistemde takım yüzeyinde BUE oluşumuna rastlanmamıştır. Bu dört farklı kesme koşulu birbiri ile kıyaslandığında hybrid sistemin önemli bir avantaj sağladığını söylemek mümkün. Kesme bölgesine püskürtülen havanın  $-30^{\circ}\text{C}$  gibi düşük sıcaklıkta olması avantaj sağlamamıştır. Bu noktadan hareketle Ti6Al4V malzemesinin mikro frezelenmesinde belirli oranda soğutulmuş hava ile MQL in beraber kullanılması takım ömrü açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şekil 4.8 te her bir kesme koşulu için eşit kesme mesafesinde takım çaplarındaki değişim verilmiştir. Şekil 4.8'den de görüldüğü üzere hibrit sistemin kullanılması durumunda takım çapındaki değişim minimumdur.  $-30^{\circ}\text{C}$  de kullanılan soğutulmuş havanın yağlama özelliğinin olmaması da takım talaş ara yüzeyindeki sürtünmenin artmasına neden olmuştur. Bu da takım çapını azalmasına katkıda bulunmuş olabilir.

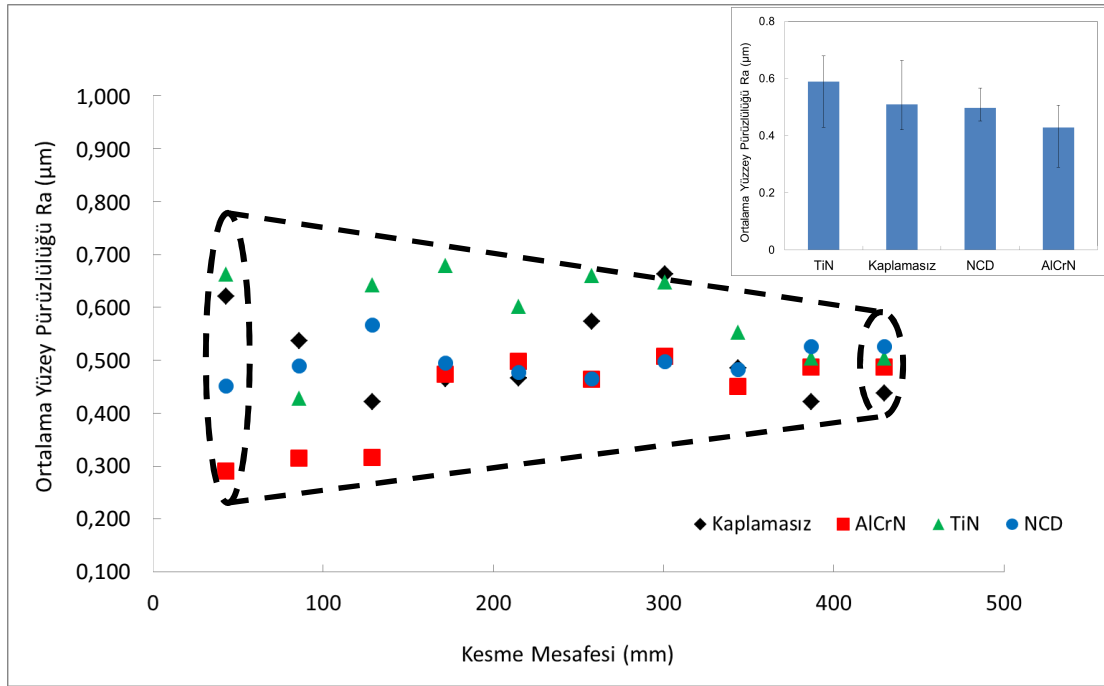


Şekil 4. 9 Kesme işlemi sonrasında takım çaplarındaki değişim.

### 4.3 Yüzey Pürüzlülüğü

Kesme mesafesine bağlı olarak her bir takım için elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme mesafesine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi, Şekil 4.9' da verilmiştir. Artan kesme mesafesiyle birlikte Ra değerleri dalgalı bir değişim sergilemektedir. İlk kanal sonunda (kesme mesafesi = 43mm) kaplamasız ve TiN kaplı kesici takımda elde edilen Ra değerleri maksimumdur. Fakat ikinci kanal sonunda elde edilen Ra değerleri daha küçüktür. Artan kesme mesafesi ile Ra değerleri tekrar artmaktadır. AlCrN ve NCD kaplı kesici takımlar farklı bir davranış sergilemektedir. 4. Kanal sonunda elde edilen Ra değeri 10.kanal sonuna kadar sabit kaldığı söylenilebilir. Şekil 4.9' da dikkati çeken bir unsur ise, 10.kanal sonunda tüm takımlar için elde edilen Ra değerleri birbirine çok yakındır. Artan kesme mesafesiyle birlikte kesici kenar radüsü büyümektedir. Kenar radüsünün büyümesi teorik olarak yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olur. Takımın aşınmadığı veya aşınmanın minimum düzeyde gerçekleştiği ilk kesme mesafelerinde AlCrN kaplı kesici takım yüzey kalitesi açısından önerilebilir bir kaplama türüdür. TiN, NCD ve kaplamasız takım için artan kesme mesafesiyle birlikte takımdaki aşınma artmakta ve köşe radüsü de büyümektedir. Köşe radüsünün büyümesi ise Ra değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. (Filiz *et al.*

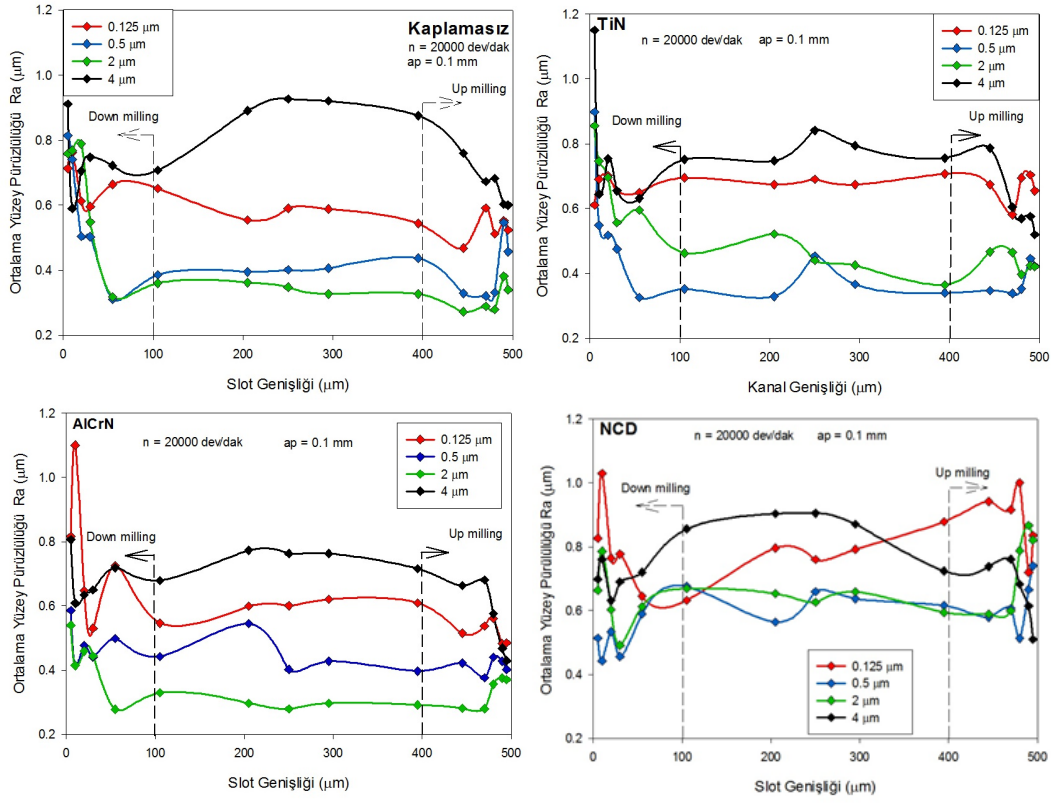
2007, Aramcharoen *et al.* 2008) yapmış oldukları çalışmada, kesme uzunluğunun artmasıyla birlikte pürüzlülük (Ra) değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak, artan kesme mesafesiyle birlikte kesici takımın aşınması ve kenar radius değerinin büyümesi olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4. 10** Kesme mesafesine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değişimi.

Şekil 4.10 te her kesici takım için ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin kanal genişliği boyunca değişimi verilmiştir. Burada dikkati çeken ilk unsur; frezeleme esnasında takımın giriş ve çıkış yaptığı down milling (eş yönlü frezeleme) ve up milling (zıt yönlü frezeleme) yaptığı konumlarda Ra değerlerinin ani olarak değişim göstermesidir. Bu bölgedeki kararsızlık kazınma mekanizmasının bir sonucu olarak görülebilir. Kanalın orta kısmı referans alındığında, özellikle 0,5 ve 2µm olan ilerleme değerlerinde elde edilen Ra değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Buna karşın yine kanalın orta kesiminde maksimum Ra değerlerinin  $f_z = 0,125$  ve  $4\mu\text{m}$  olduğu açıkça görülmektedir. Bunun da en önemli nedeni,  $f_z = 0,125\mu\text{m}/\text{flute}$  olan ilerleme değerinin takım radiusü (ki bu çalışmada yaklaşık 1 ile  $1,5\mu\text{m}$ ) ile kıyaslandığında, kritik talaş kalınlığına çok yakın olmasıdır. Bunun da sonucu olarak kazınma mekanizmasının hakim olduğu bir kesme işleminin gerçekleşmesiyle talaş oluşumu meydana gelmiş ve

bu da Ra değerlerinin artmasına neden olduğunu işaret etmiştir. Bununla birlikte kaplamasız ve TiN kaplı kesici takım için  $fz \leq 2\mu\text{m}$  için eş yönlü frezeleme ve zıt yönlü frezeleme bölgelerinde Ra değerleri maksimumdur. Tüm kesici takımlar için  $fz = 4\mu\text{m}$  için kanalın orta kısmında elde edilen Ra değerleri daha büyüktür. Kaplama malzemesinin etkisini gözlemlemek adına Şekil 4.9 te verilen her üç grafik birbiri ile kıyaslandığında, minimum ve maksimum fz değerleri için kanalın orta kesiminde elde edilen Ra değerleri arasındaki fark NCD kaplı kesici takımında  $0.3\mu\text{m}$  iken, bu değer TiN de  $0,55\mu\text{m}$ , AlCrN için  $0,45\mu\text{m}$  ve kaplamasız da ise  $0.6\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla NCD kaplı kesici takımında fz nin Ra üzerinde daha az bir etkiye sahip olduğunu söylemek mümkündür.



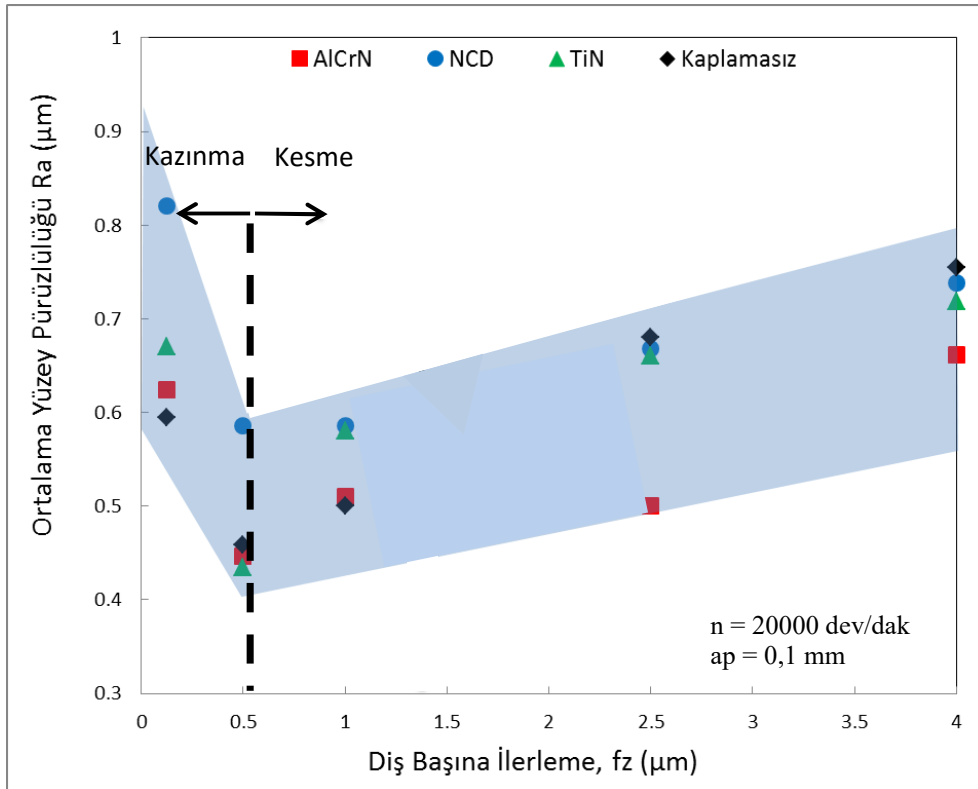
Şekil 4. 11 Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme ile değişimi.

Şekil 4.11 de diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak her bir takım için elde edilen Ra değerleri verilmiştir. Bu değerler, Şekil 4.10 da verilen 100 ile  $400\mu\text{m}$  aralığında ki kanal genişliği boyunca elde edilen Ra değerlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Bilindiği üzere konvensiyonel kesme işleminde ilerleme değerinin



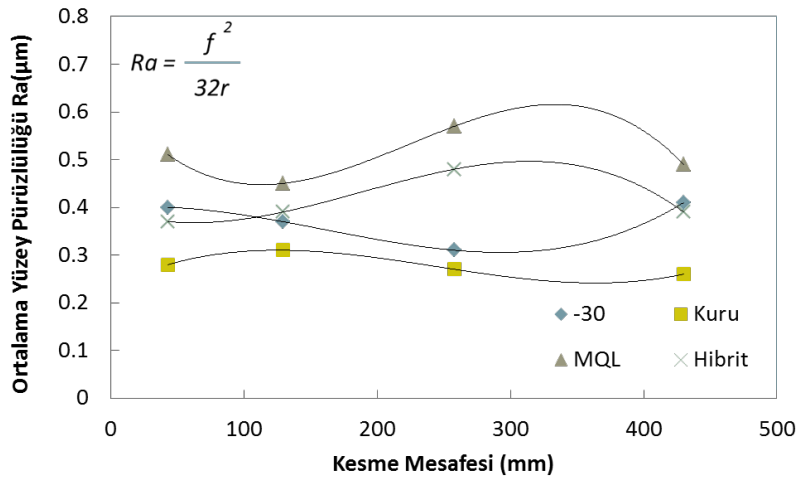
azalması ile Ra değeri de azalır ve daha kaliteli bir yüzey elde edilir. Burada dikkati çeken en önemli unsur,  $f_z = 0.5\mu\text{m}$  dan daha küçük değerlerde Ra değerlerinin artmış olmasıdır. İlerleme değerinin azalmasıyla kritik talaş kalınlığının hakim olduğu kazınma bölgesinin uzunluğu artmaktadır. . Böylece uniform bir talaş oluşumunun görüldüğü bölgenin uzunluğu azalmaktadır. Bu durum bir anlamda Şekil 4.10 da verilen zıt yönlü frezeleme ve eş yönlü frezeleme alanının genişlemesine neden olmaktadır.

Ti6Al4V malzemesinin mikro frezelenmesinde kritik ilerleme değerinin  $f_z = 0,5\mu\text{m}$  olduğunu söylemek mümkün. Şekil 4.11 de  $f_z < 0,5\mu\text{m}$  için hem kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülük değeri artmaktadır. Kullanılan mikro kesici takımların ortalama köşe radüsünün  $1,65\mu\text{m}$  olduğu (Şekil 3.2) dikkate alınacak olursa, Ti6Al4V alaşımı için  $f_z(\text{min}) \equiv 0,3R_i$  dir. Bu ifadeyi hem Şekil 4.1 de verilen kesme kuvveti değerleri hem de Şekil 4.10 da verilen Ra değerleri desteklemektedir.  $f_z > 0,5\mu\text{m}$  için hem kesme kuvveti hem de Ra değerlerinin lineer olarak arttığı söylenilebilir. Diğer bir ifadeyle  $f_z < 0,5\mu\text{m}$  için kesme işleminde kazınma dominant iken,  $f_z > 0,5\mu\text{m}$  için kesme işlemi shear dominant olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4. 12 Dış başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak Ra değerlerinin değişimi.

Şekil 4.11’ de ortalama yüzey pürüzlülüğünün farklı kesme koşulları altında, kesme mesafesine göre değişimi verilmiştir. Şekilde kuru kesme koşulları haricindeki koşullarda, Ra değerlerinin, artan kesme mesafesine bağlı olarak dalgalanarak ilerlemesi söz konusudur. 135 mm lik kesme sonrasında tüm koşullar için Ra değeri birbirine yaklaşmıştır. Ancak 270 mm lik kesme tamamlandığında Ra değerleri birbirlerinden farklı olarak artış sergilemiştir. En yüksek ortalama Ra değerleri MQL şartlarında olurken, en düşük Ra değerleri kuru kesme şartlarında gerçekleştiği gözükmemektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki değişimi daha iyi anlamak için, takım aşınması ile olan ilişkinin daha iyi incelenmesi gerekmektedir. Ra değerleri görüldüğü üzere -30°C ve kuru kesme şartları altında en düşük seviyededir. Şekil 4.8 deki takım aşınmaları incelendiğinde -30°C ve kuru kesme şartları altında artan kesme mesafesi ile en fazla takım aşınması gerçekleştiği gözükmemektedir. Abrasif aşınmanın etkisiyle takımların kesici köşelerinin radüsleri kesme mesafesiyle artmaktadır Şekil 4.7. Teorik olarak formülden de görüleceği üzere artan köşe radüsünün artması ile de yüzey pürüzlülüğü düşmüştür.

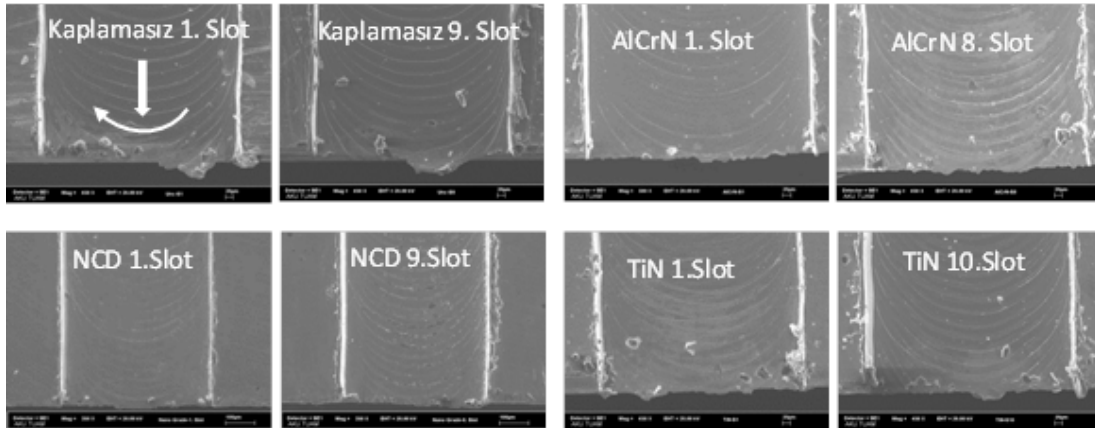


Şekil 4. 13 Kesme mesafesine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

#### 4.4 Çapak Oluşumu

Şekil 4.13 de her bir takım için kesici takımın kanalı terk ettiği noktadaki çapak oluşumları verilmiştir. Şekil 4.13 de aynı zamanda kesici takımın ilerleme yönü ve dönme yönü de gösterilmiştir. Her kesici takım için ilk kanal sonunda çapak oluşumu minimum düzeydedir. Artan kesme mesafesine bağlı olarak çapak oluşumunun arttığı

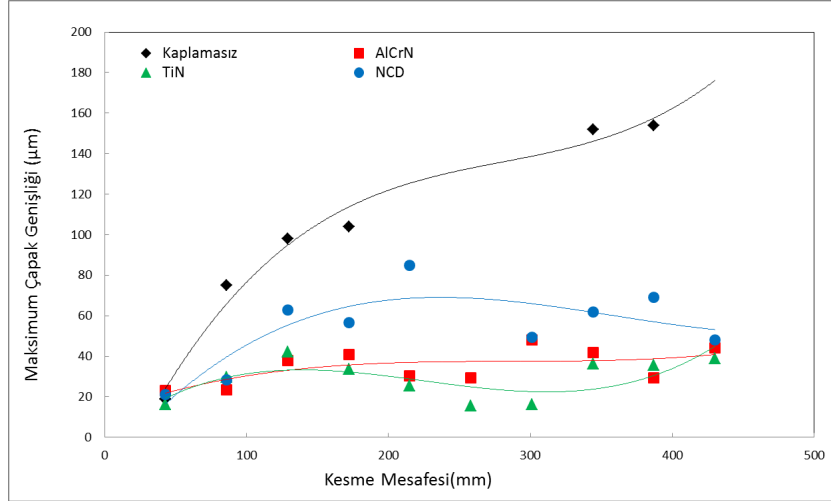
net olarak gözlemlenmektedir. Özellikle eş yönlü frezeleme olan kenarda çapak genişliği daha büyüktür. Hem kaplamasız hem de NCD kaplı kesici takım için 9.kanal sonunda elde edilen çapak genişliği maksimumdur. Kaplamasız takımın kanalı terk ettiği noktada kesme yönünde de çapak oluşumu meydana gelmiştir. Maksimum çapak boyunun kesme mesafesiyle değişim grafiği verilmiştir. Kesme işleminin hemen başlangıcında meydana gelen çapak yükseklikleri genel olarak birbirlerine benzediği görülmektedir. Fakat özellikle kaplamasız takım, kesme işleminin hemen başlangıcında diğerlerine nispeten boyut olarak daha büyük çapak oluşumuna sebebiyet verdiği görülmektedir. İlk 86 mm lik uzunlukta kaplamasız takımla yapılan kesme işleminde çapak yüksekliği maksimumdur. Bunun nedeni abrasiv aşınma mekanizmasının etkisiyle takım köşe radüsünde meydana gelen büyüme olabilir. Çünkü iş parçasının yüksek bir dayanıma sahip olması, böyle bir durumun ortaya çıkmasına neden olabilir. Kesme işleminin ilerlemesiyle birlikte 430 mm' lik kesme işlemi sonunda, bütün takımlar için çapak yoğunluğunun arttığı görülmektedir.



**Şekil 4. 14** Kanal sonlarında meydana gelen çapak oluşumunun SEM görüntüleri.

Şekil 4.14 deki veriler incelendiğinde, kaplamasız takım ile yapılan işlemlerde çapak boyutunun kaplanmış takımlara nazaran çok çok yüksek olduğu rahatlıkla görülebilir. Bununla birlikte AlCrN, TiN ve NCD kaplamalı kesici takımlarla elde edilen çapak yüksekliklerinin diğerlerine göre daha az olması kaplamanın aşınmaya karşı direncinin yüksek olmasıyla açıklanabilir. kaplanmış takımlar benzer bir seyir izlemesine rağmen TiN kaplı takımda elde edilen çapak boyutlarının daha küçük olduğunu söylemek mümkündür. Kaplamasız kesici takımda elde edilen çapak boyutlarının daha büyük

olmasının nedeni; takımda meydana gelen çevresel aşınma ve bu aşınmaya bağlı olarak köşe radüsünün büyümesi . Özellikle mikro kesme işleminde, köşe radüsünün büyümesi talaş kaldırma işlemini olumsuz etkiler. Artan köşe radüsü kesme işlemi yapmak yerine kazıma işlemi yaparak çapak oluşumuna katkıda bulunur. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 de verilen aşınma grafikleri ile birlikte incelenirse, artan takım aşınmasının çapak boyutunun da artmasına neden olduğu sonucu çıkartılabilir.

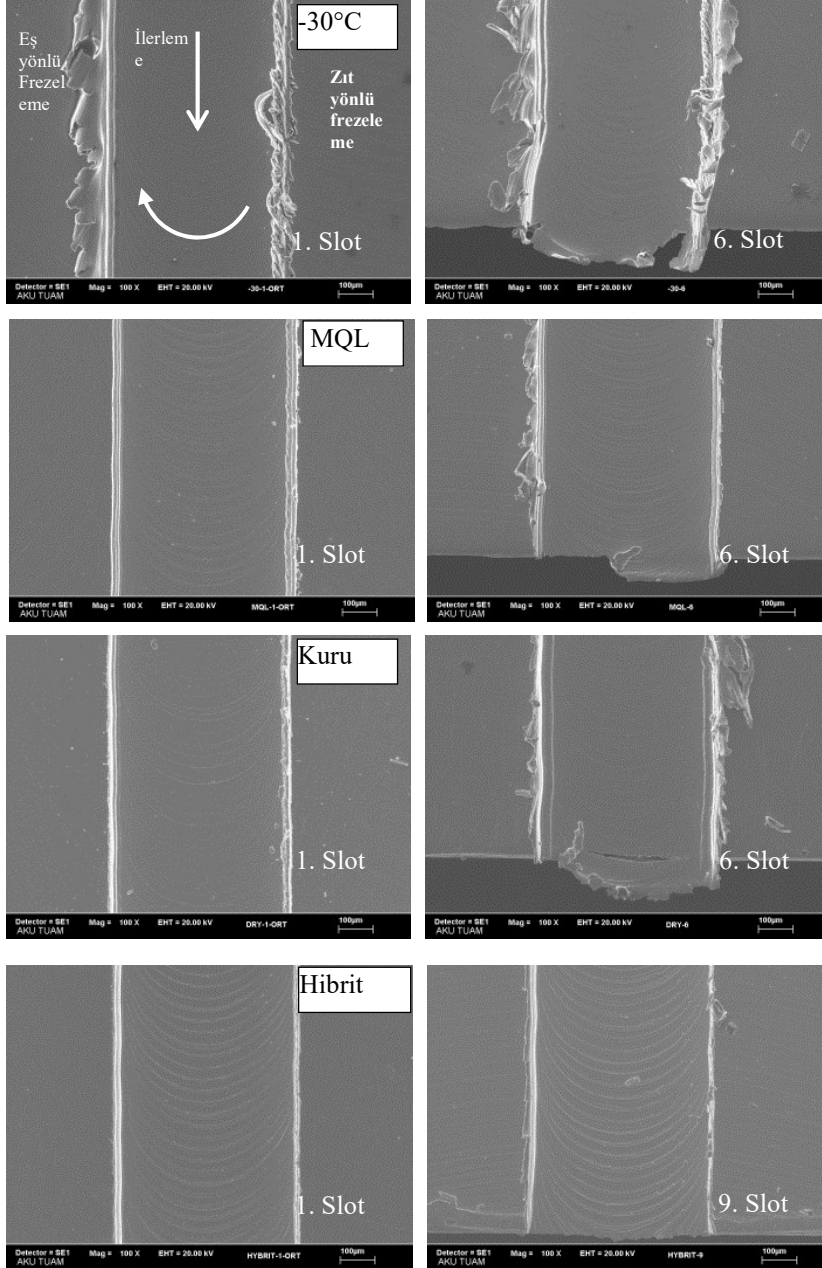


**Şekil 4. 15** Maksimum çapak genişliğinin kesme mesafesiyle değişimi

Mikro frezeleme işleminde takım çapındaki değişim kadar çapak oluşumu da önemli bir unsurdur. İşlenen kanalın kenarlarında meydana gelen mikro çapak, takım aşınmasıyla da doğrudan ilişkilidir. Meydana gelen aşınma takımın geometrisinin bozulmasına neden olur ve takım kesme kabiliyetini yitirir. Bu çalışmada kullanılan farklı kesme koşullarının çapak oluşumunu nasıl etkilediği de araştırılmıştır. Deneyle sonrasında iş parçası yüzeyi SEM ile incelenmiştir.

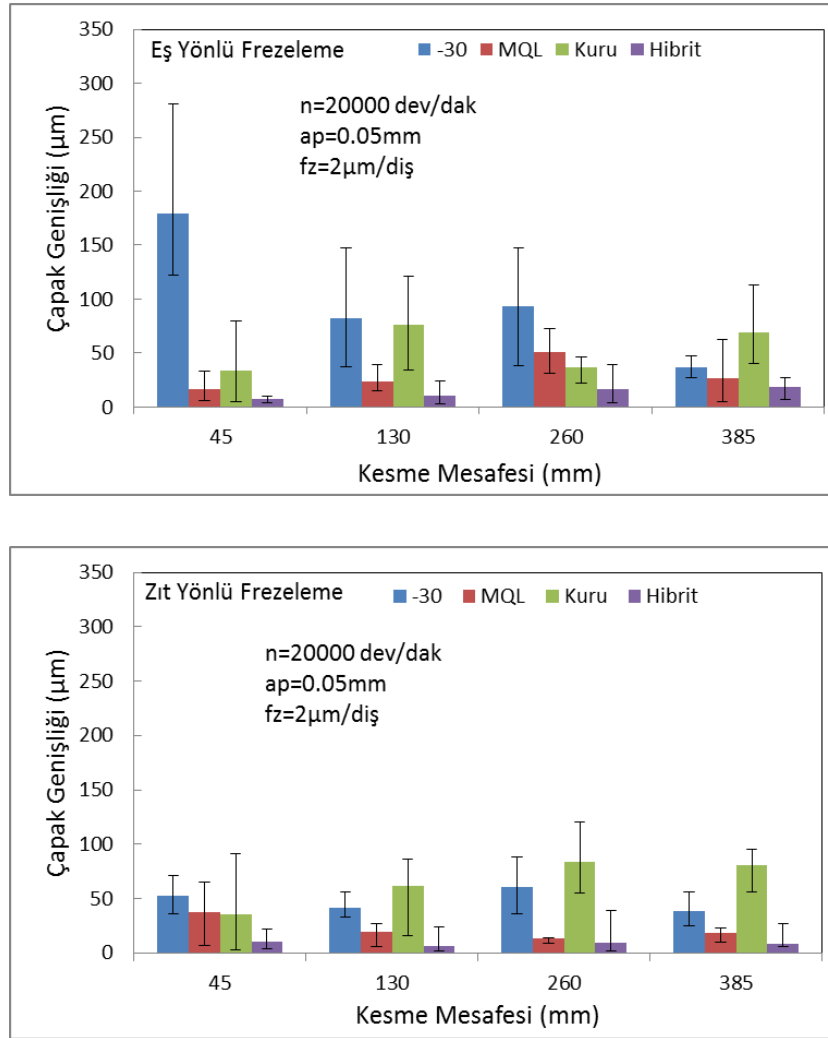
Şekil 4.15 de her bir kesme koşulunda kanal kenarında meydana gelen çapak oluşumuna ait görüntüler verilmektedir. Genellikle maksimum çapak yüksekliği eş yönlü frezeleme de elde edilmiştir. Şekil 4.15 de hibrit hariç her bir kesme koşulu için 6. slot daki kanal çıkışı verilmiştir. Artan kesme mesafesiyle birlikte çapak oluşumu da artmaktadır. Bunun nedeni; kesici kenarda meydana gelen aşınma ve köşe radüsünün büyümesidir. Fakat kuru kesme işleminde takımın kesici ağızlarındaki aşınma dengeli olmadığından 6. kanal sonunda zıt yönlü frezeleme de çapak genişliği daha büyüktür. Minimum çapak boyutları MQL ve hibrit kesme koşulunda elde edilmiştir. Özellikle de

hibrit metodun kullanılması çapak oluşumunu önemli oranda azaltmıştır. Şekil 4.15 de hibrit sistemin etkisini ortaya koymak adına 9. Slot çapak oluşumu verilmiştir. Dikkat edilecek olursa, hibrit sistemde 9. kanaldaki elde edilen çapak boyutu MQL in 6.slot daki çapak boyutundan da daha küçüktür. Şekil 4.15 de dikkati çeken bir diğer unsur ise, hibrit sistem dışındaki kesme koşullarında çıkış yönünde çapak oluşmasıdır. Özellikle  $-30^{\circ}\text{C}$  de ve kuru kesme şartlarında bu çapak boyutu maksimumdur.



Şekil 4. 16 Çapak oluşumuna ait görüntüler verilmektedir.

Şekil 4.16 de kanalın eş yönlü frezeleme ve zıt yönlü frezeleme bölgesinde meydana gelen çapağın kesme mesafesi ile değişimi verilmiştir. Maksimum çapak genişliğinin eş yönlü frezeleme bölgesinde meydana geldiğini söylemek mümkündür. -30°C de yapılan kesme işleminde 1. Slot ta (kesme mesafesi=45mm) çapak boyutu maksimum elde edilmiştir. Bunun nedeni; düşük sıcaklığın etkisiyle takımda meydana gelen gevrekleşmedir. İş parçası ile ilk temasıyla birlikte takım kenarlarında chipping türü hasar oluşmuştur. Bu da kesme işleminin sağlıklı gerçekleşmesini engellemiştir. Şekil 4.14 den de görüldüğü üzere kesme mesafesinin artması ile çapak genişliği dalgalı değişken bir durum sergilemektedir.



Şekil 4. 17 Çapak genişliğinin kesme mesafesi ile değişimi.

Çalışmada hem yağlama hem de soğutmanın bir arada kullanılmasının takım aşınması ve apak oluşumu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre,  $-30^{\circ}\text{C}$  gibi düşük sıcaklıklarda mikro frezeleme işlemi yapmak önerilecek bir yöntem değildir.  $-10^{\circ}\text{C}$  gibi daha yüksek sıcaklıkta bir hava ile MQL in kullanılması hem takım ömrü hem de apak oluşumu açısından önemli avantajlar sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca kullanılan hibrit sistemde artan kesme mesafesine bağlı olarak apak boyutları da çok değişmemiştir. Bu da mikro frezeleme işlemi için önemli bir avantajdır.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada Ti6Al4V titanyum alaşımının mikro frezelenmesinde farklı kaplama türlerinin kesme parametrelerinin ve soğutma/yağlama şartlarının kesme kuvvetleri, takım aşınması, çapak oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmanın bulguları aşağıda sıralanmıştır.

- Kaplamalı takımlarla yapılan işlemlerde iş parçası üzerindeki çapak boyutları çok daha küçüktür.
- Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen bir diğer faktör, takımın aşınmasıdır. Takım kesme köşesinin geometrisinin bozulması, yüzey pürüzlülüğünün değişmesine neden olmuştur.
- Hem yüzey pürüzlülüğü hem de çapak oluşumu açısından değerlendirildiğinde AlCrN kaplamanın tercih edilmesi daha isabetli olacaktır.
- Kesme kuvveti açısından değerlendirildiğinde kritik olan ilerleme değerinin  $f_z = 0,5 \mu\text{m}$  olduğu saptanmıştır. Bu ilerleme değerinden daha küçük seçilen değerlerde kazınma mekanizmasının baskın olduğu kesme işlemi meydana gelmektedir.
- Kanal genişliği boyunca elde edilen Ra değerleri de göstermiştir ki,  $f_z = 1 \mu\text{m}$  değeri yüzey kalitesi açısından kritik bir değerdir. Bu değer altındaki ilerleme değerlerinde kanalın ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri artmaktadır.
- Kesme uzunluğunun artmasıyla, takım üzerine etkiyen kuvvetlerin artması; takım kesici köşesinin aşınmasına ve kenar radüsünün büyümesine yol açmıştır. Bu olay aynı zamanda, artan köşe radüsü ile birlikte ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) düşmüştür.

Elde edilen görüntülerde ilk göze çarpan durum, kesici takımın talaş kaldırmaya başladığı ilk noktada zıt yönlü frezeleme zıt yönlü talaş oluşum bölgesinde meydana gelen çapak yoğunluğunun, talaşın iş parçasından uzaklaştığı diğer noktada meydana gelen çapak yoğunluğundan daha az olduğudur. Talaş oluşumu zıt yönlü frezeleme modunda başlamaktadır. Daha sonra oluşan talaş, eş yönlü frezeleme modunda dışarı doğru atılmaktadır. Burada dışarı atılmaya çalışılan talaşın bir kısmı yırtılarak kanal



kenarlarına yığılmaktadır. Bu sayede çapak oluşumu gerçekleşmektedir. Bu mekanizmanın oluşmasında kesici kenarın keskinliğinin de büyük bir payı vardır. Nitekim aşınmış kesici uçlarla yapılan kesme işlemlerinde çapak yoğunluğu önemli ölçüde artmaktadır. Farklı kaplamalı kesici takımlarla yapılan kesme işlemi neticesinde iş parçasında meydana gelen çapakların. Resimlerden görüldüğü üzere NCD ve kaplanmamış takımda oluşan çapak boyları TiN ve AlCrN kaplı takımlara göre daha fazladır.

## 6. KAYNAKLAR

- Allen, P. (1996). Titanium alloy development. *Adv Mater Process*, **154**: 35–37.
- Aramcharoen, A. and Mativenga, P.T. (2009). Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, **44(3)**: 402-407.
- Aramcharoen, A. and Mativenga, P.T. (2008). Tool Wear Modes in Micro/Meso Scale Milling of Hardened Die Steel. 3rd Cirp International Conference High Performance Cutting. 179-188.
- Arslan, E. and İrican Z. (2011). Takım tezgahlarında otomatik merkezi yağlama sisteminin önemi. 4. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kngresi, 395-404.
- Autret, R. and Liang, S.Y. (2003) Minimum quantity lubricationin finish hard turning. HNICEM.
- Bajpai, V., Ramesh K., Singh., Ajay., K. Kushwaha (2013). Burr Formation and Surface Quality in High Speed Micromilling of Titanium Alloy (Ti6Al4V). *ASME*.
- Baharudin, B.T.H.T., Dimou, N., Hon, K.K.B., (2004). Tool Wear Behaviour of Micro-Tools in High Speed Cnc Machining. *Proceedings of the 34th International MATADOR Conference*, 111–118.
- Bao, W.Y., Tansel, I.N., (2000). Modeling Micro-End-Milling Operations. *Part I: Analytical Cutting Force Model. International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**: 2155–2173.
- Bissacco, G., Hansen H.N., Slunsky, J. (2008). Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **57(1)**:113–116.
- Chunxiang, C., BaoMin, H., Lichen, Z., Shuangjin, L., (2011). Titanium alloy production technology, market prospects and industry development, *Materials and Design*, **32**: 1684–1691.
- Chae, J., Park, S. S., Freiheit, T. (2006). Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46(3)**: 313-332.

- Chen, W.K., Kuriyagawa, T., Huang, H., Yosihara, N. (2005). Machining of micro aspherical mould inserts, *Precision Engineering*, 29: 315–323.
- Corbett, J., McKeon, P., Peggs, G. and R Whatmore. (2000). Nanotechnology: international developments and emerging products. *Annals of CIRP*. **49**: 523-546.
- Cox, D., Newby, G., Park, H. and Liang, S., (2004). Performance evaluation of a miniaturized machining center for precision manufacturing. Paper presented at the Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- Demir H., Ulaş H.B. and Zeyveli M. (2009). Talaşlı üretimde kullanılan kesme sıvılarından istenen özellikler. 5th International Advanced Technologies Symposium.
- Dhanorker, A. and Özel T., (2006). An Experimental and Modeling Study on Meso/Micro End Milling Process.
- Dhar, N.R. and Poul, S. (2001). Machining of AISI 4140 Steel Under Cryogenic Cooling–Tool Wear Surface Roughness and Dimensional Deviation *Journal of Material Processing Technology*, **123**: 483-489.
- Donachie, M.J.(2000). Titanium a Technical Guide, The Material Information Society, *Second Edition*.
- Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y., (2006). Recent Advances in Mechanical Micromachining. *Annals of the CIRP*, **55(2)**: 745-768.
- Ehmann, K. F., Bourell, D., Culpepper, M., DeVor, R. E., Hodgson, T., Kurfess, T. and Rajurkar, K. (2005). An international assessment of micro-manufacturing research technology. In Processing and Fabrication of Advanced Materials XIV With Frontiers in Materials Science 2005: Innovative Materials and Manufacturing Techiques - Proceedings of a Symposium (pp. 211–224). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33645023321&partnerID=tZOtx3y1>
- Ensarioğlu, C., Çakır, M.C. (2005). Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü. *Mühendis ve Makine*, Cilt:46 – 546.

- Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M. (1997). Titanium alloys and Their Machinability – a review. *Journal of materials processing technology*, 68: 262 – 274.
- Filiz S., Caroline M., Conley M., Matthew B., Wasserman B., Özdoğanlar and O.B., (2007) An Experimental Investigation of Micro Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro Endmill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47**: 1088–1100.
- Friedrich, C. R., and Vasile, M. J. (1996). The micromilling process for high aspect ratio microstructures. *Microsystem Technologies*, 2(3): 144–148. <http://doi.org/10.1007/s005420050032>
- Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N., Engel, U. (2001). Microforming. *CIRP. Annals-Manufacturing Technology*. **50(2)**: 445-462.
- Grum, J., Kisin, M., (2003). Influence of Microstructure on Surface Integrity in Turning-part 2: The Influence of a Microstructure of the Work piece Material on Cutting Forces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43: 1545-1551.
- Gu, J., Barber, G., Tung, S., Gu, R.J., (1999) Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts, *Wear*, **229**: 273-284.
- 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.
- Heaney, P.J., Sumant, A.V., Torres, C.D., Carpick, R.W., Pfefferkorn, F.E., (2008). Diamond Coatings for Micro End Mills. *Enabling The Dry Machining of Aluminum at The Micro-Scale. Diamond and Related Materials*, **17(3)**: 223-233.
- Heamawatanachai, S., Bamberg, E., (2009). Design and Characterization of a PZT Driven Micromachining Tool Based on Single-Point Tool Tip Geometry. *Precision Engineering*. **33**: 387-394.
- 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.
- Horsch, C., Schulze, V., Lohe, D., (2002). Topography and Microstructure of Cavities Obtained by Micro-Milling of Tool Steel. European Congress on Advanced Materials and Processes.
- Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., (1992). Minimum Thickness of Cut in Micromachining. *Nanotechnology*, **3**: 6-9.
- Itoigawa F., Childs T.H.C., Nakamura T. and Belluco W. (2006). Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy. *Wear*, 260: 339-344.
- Jackson, M. J., Robinson, G. M., Whitfield, M. D., and Ahmed, W. (2007). Burr formation and elimination in micromilling processes. *International Journal of Nanomanufacturing*, **1(4)**: 458-467.
- Kalpakjian, S. and Schmid, S. R., (2002). Manufacturing Processes for Engineering Material. Paper presented at the Prentice-Hall.
- Kang, I.S., Kim, J.S., Kim, J.H., Kang, M.C., Seo and Y.W. (2007). A Mechanistic Model of Cutting Force in the Micro End Milling Process. *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188, 250-255.
- Kaplan, H., and Dölen, M. (2003), Mikro-Elektro-Mekanik-Sistemler(Mems), Üretim Teknikleri, *11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*.
- 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, B. (2005) Ti – 6Al – 4V Alaşımı İle Farklı Tip Paslanmaz Çeliklerin Difüzyon Kaynağı”, Fırat Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Kim, J.D., Kim and D.S., (1995). Theoretical Analysis of Micro-Cutting Characteristics in Ultra-Precision Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **49**: 387-398.

- Kim, C.J., Bono, M., Ni, J., (2002). Experimental analysis of chip formation in micro milling. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, **30**: 247-254.
- Lacalle, L. N. L. d. and Lamikiz, A., (2009). Machine Tools for High Performance Machining.
- Lang, W. (1999). Reflexions on the future of microsystems. *Sensor and Actuators*. **72**: 1–15.
- Li, X. and Guan, P. (2004). Time fequency analysis based minor cutting edge fracture detection during end milling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**: 1485-1496.
- Lee, K., Dornfeld, D.A., (2005). Micro-Burr Formation and Minimization Through Process Control. *Precision Engineering*, **29**: 246-252.
- Lee, K., Dornfeld, D.A., (2002). An Experimental Study on Burr Formation in Micro Milling Aluminum and Copper. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, **30**: 255-262.
- Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., (2006). An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **128**: 474-481.
- Lopez, L.N., Lacalle, A. Lamikiz, J.A. Sanchez M.A. Salgado (2004). Effects of tool deflection in the high-speedmilling of inclined surfaces. *Int J Adv Manuf Technol*, **24**: 621–631.
- Masuzawa, T. and Fujino, M. (1990). A process for manufacturing very fine pin tools . *SME Tech. Paper*, 90: 307.
- Motorcu A.R. (2009) Nikel Esaslı Süperalasımların ve Titanyum Alasımlarının İslenebilirliği. *Electronic Journal of Machine Technologies*, **7(2)**: (1-17).
- Oshida, Y. (2007). Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials. *Elsevier*
- Özdoğanlar, O. B. and Filiz, S. (2006) Characteristics of Mecha nical Micromilling Using Tungsten Carbide Tools.

- Özel, T., Liu, X., Dhanorker, A., (2007). Modelling and Simulation of Micro-Milling Process. *4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds*.
- Patrick J. Heaney, Anirudha V. Sumant, Christopher D. Torres, Robert W. Carpick and Frank E. Pfefferkorn. (2007) Diamond Coatings for Micro end Mills: Enabling the *Dry Machining of Aluminum at the Micro-Scale*.
- Pham D.T., Elkaseer A.M., Popov K.P., Dimov S.S., Olejnik L. and Rosochowski A., (2008). An Experimental and Statistical Study of the Factors Affecting Surface Roughness in the Micromilling Process. *International Journal of Materials and Product Technology*, **32(2-3)**: 264 – 275.
- Qin, Y. (2006). Micro-forming and miniature manufacturing systems development needs and perspectives. *Journal of Materials Processing Technology*, **177**: 8–18.
- Schaller, T., Bohn, L., Mayer, J., Schubert, K., (1999). Microstructure Grooves with a Width of Less than 50 Micrometer Cut with Ground Hard Metal Micro End Mills. *Precision Engineering*, **23**: 229–235.
- Schmidt, J., Tritschler, H., (2004). Micro Cutting of Steel. *Microsystem Technologies*, **10**: 167-174.
- Schueller, J.K., Tlusty, J., Smith, S. and Leigh, E. (2000). Advanced machining techniques on titanium rotor parts. *American Helicopter Society*.
- Sein, H., Ahmed, W., Jackson, M., Woodward, R., Polini, R., (2004). Performance and Characterisation of CVD Diamond Coated. Sintered Diamond and WC–Co Cutting Tools for Dental and Micromachining Applications. *Thin Solid Films*, 447–448, 455–461.
- Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmuri, G., Uchikoshi, J. and Yoshinaga, H. (1993). Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation. *Annals of the CIRP*, **42**: 91–94.
- Simoneau, A., Ng, E., Elbestawi, M.A., 2006. Surface Defects During Microcutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13): 1378-1387.

- Son, S.M., Lim, H.L., Ahn and J.H. (2005) Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 529–535
- Spath, D., Huntrup, V., (1999). Micro-milling of Steel for Mold Manufacturing Influences of Material, Tools and Process Parameters. *Precision Engineering Nanotechnology, Proceedings of the First International Euspen Conference*, **31**: 203–206.
- Sreejith P.S. (2008) Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions. *Materials Letters*. 62(2): 276–278.
- Suresh K. R., N. and Rao V., P. (2006) Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **46**: 189-198.
- 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, X., Cheng, K. (2010). Micro/Nano-Machining through Mechanical Cutting. *Engineering and Technology*. 24-38.
- Tansel, I.N., Rodriguez, O., Trujillo, M., Paz, E. and Li, W. (1998). Micro-End-Milling I. Wear and breakage. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. **38**: 1419–1436.
- Thepsonthi T., Ozel T (2014). An integrated toolpath and process parameter optimization for high-performance micro-milling process of Ti–6Al–4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **75(1-4)**: 57-75
- Torres C.D., Heaney P.J., Sumant A.V., Hamilton M.A., Carpick R.W., Pfefferkorn F.E. (2009). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 49: 599-612.
- 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. (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.
- Ucun, İ., Aslantaş, K., Bedir, F. (2011). Kesici Takım Kaplama Malzemesinin Mikro Frezeleme İşleminde Takım Elastik Deformasyonu Üzerindeki Etkisi. *6th International Advanced Technologies Symposium*.
- Uriarte, L., Zatarian, M., Albizuri, J., Lacalle, L.N.L.D., Lamikiz, A., (2006). Effect of the Tool Wear in Micro-Milling Cutting Forces. *Proceedings of the Second Cirp International Conference High Performance Cutting*.
- Wang, J.S., Gong, Y.D., Abba, G., Chen, K., Shi, J.S., Cai, G.Q., (2007). Surface Generation Analysis in Micro End-Milling Considering the Influences of Grain. Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, 25-27.
- Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., Wakabayashi, T. (2004). Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **53(2)**: 511-537.
- Weule, H., Huntrup, V., Tritschle, H., (2001). Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization. *Annals of the CIRP*, **50(1)**: 61-64.
- Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor and S.G. (2004). On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro Endmilling Part I: Surface generation. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126**: 685- 694.
- Yasir, A., CH, C. H., Jaharah, A. G., Yanuar, B., Gusri, A. I., Nagui, H. E. (2007). Cutting Force Analysis and Performance of PVD coated tungsten carbide When Milling of Ti6Al4V under MQL.
- 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.
- Yuan, Z.J., Zhou, M., Dong, S., (1996). Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultra Precision Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **62(4)**: 327-330.

- Yui. A. and Soo Lee H. (1996). Surface grinding with ultra-high speed CBN wheel. *Journal of Materials Processing Technology*, 62: 393-396.
- Yücel, E., Çiçek, A. (2011). İmalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri. *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, **15(1)**: 46-59.
- Yücel E., Günay M., Ayyıldız M., Erkan Ö. and Kara Ö. (2011). Talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının insan sağlığına etkileri ve sürdürülebilir kullanımı. 6th International Advanced Technologies Symposium, 116-121.
- Zaman, M.T., Senthil Kumar, A., Rahman, M., Sreeram, S., (2006). A Three-Dimensional Analytical Cutting Force Model for Micro End Milling Operation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3-4): 353-366.
- 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.
- Zhu, K., Wong, Y. S., Hong, G. S., (2009). Multi-Category Micro-Milling Tool Wear Monitoring with Continuous Hidden Markov Models. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23**: 547– 560.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hüseyin Ender HOPA  
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir- 23,02,1984  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : enderhopa@gmail.com / 05075750760

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise :Muzaffer Çil Anadolu Lisesi (1998-2002)  
Lisans :Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü  
(2002-2008)  
Yüksek Lisans :Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Makine Mühendisliği (2014-2016)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

Yazıcılar Mühendislik Ltd Şti., Sorumlu Mühendis (2008-2010)  
Hidroes Ltd. Şti., Bakım Mühendisi (2010-2011)  
Aydın Torna Ltd. Şti., Üretim & Kalite Mühendisi (2011-2012)  
Endel A.Ş., Kalite Mühendisi (2012-2013)  
Estep A.Ş., Kalite Mühendisi (2013-2014)  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, TÜBİTAK 213M572 Projesi Asistanı 2014-2016

### Yayınları (SCI ve diğer) :

K, Aslantas., H.E. Hopa., M. Perçin., İ. Uçun., A. Çiçek. (2016). Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy, *Journal of Precision Engineering*, DOI information: 10.1016/j.precisioneng.2016.01.009.

Hopa H. E., Aslantaş K., (2015). Mikro Frezeleme İşleminde Kaplama Malzemesinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınması Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. 8. *Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*. 14-15 Mayıs 2015, Çankaya Üniversitesi, Ankara.

Aslantaş K, Uçun İ, Hopa H. E., Perçin M., Çiçek A. (2015) Ti6Al4V Alaşımının Mikro Frezelenmesinde Elmas Benzeri Kaplamaların Performans Değerlendirmesi. *6.Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu* .5-7 Kasım 2015, Sabancı Üniversitesi.

Aslantaş K, Uçun İ, Perçin M., Hopa H. E., Çiçek A. (2016). Performance evaluation of a hybrid cooling-lubrication system in micro milling of Ti6Al4V alloy. *7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting*.