

**NANO KRİSTAL ELMAS KAPLANMIŞ MİKRO
TAKIMLARIN ALÜMİNYUM 7075-T6
ALAŞIMININ İŞLENMESİNDEKİ
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah Sadık TAZEGÜL

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO KRİSTAL ELMAS KAPLANMIŞ MİKRO TAKIMLARIN
ALÜMİNYUM 7075-T6 ALAŞIMININ İŞLENMESİNDEKİ
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Abdullah Sadık TAZEGÜL

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Abdullah Sadık TAZEGÜL tarafından hazırlanan "Nano Kristal Elmas Kaplanmış Mikro Takımların Alüminyum 7075-T6 Alaşımının İşlenmesindeki Performansının Araştırılması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 10/05/2019 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 :Doç.Dr. Oğuz ÇOLAK
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Üye :Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi



Üye :Doç.Dr. Uğur KÖKLÜ
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



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

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

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

10/05/2019

İmza

Abdullah Sadık TAZEGÜL



ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

NANO KRİSTAL ELMAS KAPLANMIŞ MİKRO TAKIMLARIN ALÜMİNYUM
7075-T6 ALAŞIMININ İŞLENMESİNDEKİ PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Abdullah Sadık TAZEGÜL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Mikro frezeleme işleminde, yüksek devir sayısı ve küçük kesici geometrisi hızlı takım aşınmasına neden olur. Takım aşınması hem kesici geometrisinin hem de işlenen geometrinin değişmesine neden olur. Bu nedenle, mikro takımların kaplanması, sadece takım ömrünün artmasına değil, aynı zamanda geometrik toleransı ve yüzey kalitesini de olumlu etkiler. Bu çalışmada, nano kristal elmas kaplamanın Al 7075-T6 iş malzemesinin mikro frezelenmesindeki performansı araştırılmıştır. Deneysel kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiş olup, farklı kesme parametreleri ile kesme kuvvetlerinin değişimi araştırılmıştır. Ayrıca kaplamanın yüzey pürüzlülüğü ve çapak boyutları üzerindeki etkisi de tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, nano elmas kaplama, kesme kuvvetlerinin azalmasına neden olmuştur. Artan devir sayısı kesme kuvvetlerinin azalmasına neden olmaktadır. Elmas kaplama, ortalama yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık %29 azalmasına neden olmuştur. Ayrıca kaplama malzemesi, çapak genişliğinin de azalmasına da katkı sağlamıştır. Kesme esnasında takımda meydana gelen baskın hasar mekanizması abrasiv aşınmadır. Abrasiv aşınma, takım çapında küçülmeye neden olmaktadır. Kaplanmış takımındaki çap azalması daha küçüktür. Tüm elde edilen veriler beraber değerlendirildiğinde, nano elmas kaplama, alüminyum esaslı alaşımların mikro frezelenmesinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

2019, xiii + 111 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikro frezeleme, Alüminyum 7075-T6, NCD mikro takım,
Takım aşınması, Çapak Oluşumu, Yüzey Pürüzlülüğü

ABSTRACT
M.Sc Thesis

INVESTIGATION OF THE USE OF NCD MICRO-TOOLS IN THE MICRO
MACHINING OF ALUMINUM 7075-T6 ALLOY

Abdullah Sadık TAZEGÜL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Kubilay ASLANTAŞ

In the micro milling process, high speed and small cutting geometry result in rapid tool wear. Tool wear causes both cutting geometry and machined geometry to change. The coating of the micro tools therefore positively affects not only the increase in tool life, but also the geometric tolerance and surface quality. In this study, the performance of nano crystal diamond coating in micro milling of Al 7075-T6 work material was investigated. The experiments were carried out under dry cutting conditions and the change of cutting force with different cutting parameters was investigated. In addition, the effect of the coating on surface roughness and burr width was determined. According to the results, the nano diamond coating caused the cutting forces to decrease. The increased speed causes the cutting forces to decrease. The diamond coating caused an average surface roughness reduction of about 29%. The coating material also contributed to the reduction of the burr width. The dominant mechanism of damage during cutting is abrasive wear. Abrasive wear causes tool diameter reduction. The diameter reduction in the coated tool is smaller. When all the data obtained were evaluated together, nano diamond coating showed that it can be used in micro milling of aluminum based alloys.

2019, xiii + 111 pages

Keywords: Micro-milling, Aluminum 7075-T6, NCD micro tooling, Tool wear,
Burr formation, Surface roughness

TEŐEKKÖR

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

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı muhterem babam, canım annem ve canım babaannem ve değerli kardeşlerimlere teőekkÖr ederim. Bununla birlikte hayatıma dahil olarak beni mutlu eden iki cihan saadetim müstakbel eşime ve dÖnyama renk katan eşimin ailesi annem, babam, kardeşlerime teőekkÖr ederim. Ayrıca çalışmalarım esnasında beni manevi yardımlarıyla destekleyen en yakın üç arkadaşıma ve Mehmed SEYİTOĞLU ile Muhammed Ömer SEYİTOĞLU kardeşlerime teőekkÖrü bir borç bilirim.

Abdullah Sadık TAZEGÖL
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tez Çalışmasının Amacı ve Hedefleri	7
1.1.1 Çalışmanın Amacı.....	7
1.1.2 Çalışmanı Hedefi	8
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	9
2.1 Mikro Frezeleme	9
2.1.1 Mikro Frezeleme İmalatında Kullanılan Takım Tezgâhları	12
2.1.2 Mikro Frezelemede Kullanılan Kesici Takımlar	16
2.1.3 Boyut Etkisi ve Minimum Talaş Kalınlığı.....	22
2.1.4 İş Parçasının Mikro Yapısı ve Mikro Etkileri.....	25
2.1.5 Mikro Frezelemede Kesme Kuvveti	28
2.1.6 İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğü ve Doğruluğu	29
2.1.7 Mikro Frezeleme Sonrası Çapak Oluşumu	33
2.1.8 Mikro Takımların Hasar Mekanizmaları	37
3. MATERYAL ve METOT	41
3.1 İş parçası ve Kesici Takım Özellikleri	41
3.2 Deneş Düzenegi ve Kesme Parametreleri.....	45
3.4 İş parçası deney şartlarına uygun olarak hazırlanması.....	47
3.5 Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü.....	48
3.6 Takım Aşınma Testleri.....	49
3.7 Yüzey Pürüzlülüğü Analizi	51
3.8 Çapak Genişliğinin Ölçülmesi	52
4. BULGULAR	54
4.1 Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkisi	54
4.1.1 Devir Sayısının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi	54

4.1.2 Talaş Derinliğinin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi.....	56
4.1.3 İlerlemenin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi.....	57
4.1.4 Kesme Uzunluğunun Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi	59
4.2 Kesme Parametrelerinin Takım Çapı Aşınması Üzerindeki Etkisi.....	63
4.2.1 İlerlemenin Takım Çapı Aşınması Üzerindeki Etkisi.....	63
4.2.2 Talaş Derinliğinin Takım Çapı Aşınması Üzerindeki Etkisi	65
4.2.3 Devir Sayısının Takım Çapı Aşınması Üzerindeki Etkisi	66
4.3. Kesme Parametrelerinin Takım Kenar Aşınması Üzerindeki Etkisi.....	67
4.3.1 İlerlemenin Takım Kenar Aşınması Üzerindeki Etkisi.....	67
4.3.1 Talaş Derinliğinin Takım Kenar Aşınması Üzerindeki Etkisi.....	69
4.3.3 Devir Sayısının Takım Kenar Aşınması Üzerindeki Etkisi	70
4.4 Takım Aşınma SEM Analizi	71
4.5 Kanal yüzeyleri ve Çapak Oluşumu.....	77
4.6 Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki etkisi.....	84
4.7 Kesme zamanına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi.....	87
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	93
6. KAYNAKLAR.....	95
6.1 İnternet Kaynakları.....	109
ÖZGEÇMİŞ.....	111

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	Alüminyum
AlCrTiN	Alüminyum krom titanyum nitrid
ap (mm - μm)	Talaş derinliği
C	Karbon
Co	Kobalt
Cr	Krom
CrN	Krom nitrid
CrTiAlN	Krom titanyum alüminyum nitrid
Cu	Bakır
D(mm)	Çap
Fe	Demir
fz ($\mu\text{m}/\text{diş}$)	Diş başına ilerleme
g/cm^3	Yoğunluk
hc (μm)	Talaş kalınlığı
h _{min} (μm)	Minimum talaş kalınlığı
HRC	Rockwell sertlik
HV	Vickers sertlik
kHz	(Kiloherz), Frekans birimi
kW	(Kilowatt), Motor gücü
L(mm)	Boy
L _c (mm)	İşlenen kanal boyu
L ₂ (mm)	Helis boyu
m	Metre
mm	Milimetre
mm ²	Milimetre kare
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
MPa	Eğilme ve basma dayanımı
μm	Mikrometre
N(Newton)	Kuvvet
N	Nitrojen (Azot)
n (dev/dk.)	Tezgâh devri
Pa	Pascal (Basınç birimi)
Ra (μm)	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Re (μm)	Kesici takım kenar radyüsü
Sa (μm)	Yüzey pürüzlülüğünde en yüksek değer ile en düşük değer ortalaması
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
TiAlN	Titanyum alüminyum nitrid
TiCN	Titanyum karbon nitrid
TiN	Titanyum nitrid
Torr	Basınç birimi
Vc (m/dk.)	Kesme hızı

Simgeler (devam)

WC	Tungsten karbür
W/mK	Termal iletkenlik
z	Ağız sayısı
μ (Birimsiz)	Sürtünme katsayısı
λ (°)	Helis Açısı
φ (°)	Eksenel boşluk açısı
α (°)	Radyal boşluk açısı
γ (°)	Radyal talaş açısı
\emptyset (mm)	Çap
ϕ (°)	Dönme açısı

Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
CBN	Kübik bor nitrür
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayar destekli kontrol tezgâhı)
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
ECM	Mikro Elektro kimyasal
EDM	Mikro Elektro erozyon
EDX	Enerji Dağılımlı X ışınları Analizi
FGD	İnce taneli elmas
F_x	X ekseninde oluşan kesme kuvveti
F_R	F_x ile F_y kesme kuvvetlerinin bileşke kuvveti
F_{rad}	Radyal kesme kuvveti
F_{tan}	F_x ile F_y kesme kuvvetlerinin Tanjant kuvveti
F_y	Y ekseninde oluşan kesme kuvveti
F_z	Z ekseninde oluşan kesme kuvveti
K	Kuru kesme
LBM	Mikro lazer
LIGA	Litografi
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistem
MST	Mikro sistem Teknolojisi
NCD	Nano kristalli elmas
PCD	Çok kristalli elmas
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TUAM	Teknoloji Uygulama Araştırma Merkez
USM	Ultrasonik İşleme
Vd.	Ve diğerleri
3D	Üç Boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1 İki ağızlı mikro takımın şematik gösterimi.	17
Şekil 2. 2 FGD, NCD kaplanmış ve kaplamasız mikro freze takımlarını kullanarak el edilen kesme kuvvetleri.....	21
Şekil 2. 3 Kesici takımın iş parçasında talaş kaldırma şematik gösterimi.	23
Şekil 2. 4 Minimum talaş kalınlığının etkilerinin şematik gösterimi.	24
Şekil 2. 5 a) perlit, b) ferrit, c) için mikro frezelenmiş oluklu zemin yüzeyleri ferritik DI, d) perlitik DI.	26
Şekil 2. 6 a) perlit, b) ferrit, c) ferritik DI, d) pearlitik DI için mikro frezelenmiş talaşlar.	27
Şekil 2. 7 Al 5083'ün mikro yapıları: a) işlemden önce, b) konvansiyonel işlemde sonra, c) ECAP işleminden sonra.....	27
Şekil 2. 8 Yüzey oluşumu ve kesme kuvvetlerinin üzerindeki etkisi.....	29
Şekil 2. 9 İlerleme değerinin minimum talaş kalınlığından küçük ve büyük olduğunda yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	30
Şekil 2. 10 Kesme uzunluğunun ilerledikçe ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	31
Şekil 2. 11 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün kanal genişliği boyunca frezeleme yönüne (zıt-aynı) göre artışı.....	32
Şekil 2. 12 İlk ve son (4cü) kanalların kesme uzunluğuna bağlı olarak yüzey kalitesi ve topografyaları ve SEM görüntüleri.	32
Şekil 2. 13 Kesme mesafesine ve kaplamalı-kaplamasız takımların türüne bağlı olarak Ra değişimi.....	33
Şekil 2. 14 Mikro frezeleme işleminde oluşan çapak tipleri.	34
Şekil 2. 15 Çapak genişliğinin kesme uzunluğuna bağlı olarak her kanaldaki çapak boyut farklılığının SEM görüntüleri.....	35
Şekil 2. 16 Çapak genişliğinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi ve her kanaldaki çapak boyutu SEM görüntüleri.	35
Şekil 2. 17 Mikro işlemede takım aşınmasının çapak oluşumuna ve işlenen kanalın geometrisine etkisi.	36
Şekil 2. 18 Farklı iş malzemelerinin çapak oluşumuna etkisi.	37
Şekil 2. 19 Fark ilerleme hızlarında aşınmaya bağlı olarak kesici takımın oluşan çapak değişimi a) 0,75 µm/diş b) 1,5 µm/diş c) 3 µm/diş d) 6 µm/diş.....	38
Şekil 2. 20 Kesme derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi (40 m/dk. kesme hızı ve 350 mm/dk. ilerleme hızı kesme şartlarında).	39
Şekil 2. 21 Mikro işlemede aşınmaya bağlı olarak kesici takımın çapındaki değişimi.....	40

Şekil 3. 1	Sıcak filament kimyasal buhar biriktirme (HF-CVD) odasının görüntüsü....	42
Şekil 3. 2	Kaplamanın yapıldığı sistem ve kaplama sırasında alınan bir görüntü.....	43
Şekil 3. 3	Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların geometrik özellikleri.	44
Şekil 3. 4	Elmas kaplanmış ve kaplamasız mikro takımların SEM görüntüleri, a) Elmas kaplanmış takım ve takımın kesici kenar radyüsü, b) Kaplamasız takım ve takımın kesici kenar radyüsü.....	45
Şekil 3. 5	Mikro frezeleme işleminin şematik gösterimi.....	46
Şekil 3. 6	Kesme kuvvetleri data alma sisteminin şematik gösterimi.	48
Şekil 3. 7	Kesme esnasında elde edilen ham kuvvetlerin örneği.	49
Şekil 3. 8	USB mikroskobu yardımıyla elmas kaplanmış ve kaplamasız takımların kenar aşınması ve çaptaki azalma ölçümlerinin yapılması.	50
Şekil 3. 9	İşlenen kanal ve kesme yönlerine bağlı olarak çapak genişliğinin ölçüm noktaları.....	53
Şekil 4. 1	Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı devir sayılarına bağlı olarak kuvvet değişimleri.	55
Şekil 4. 2	Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı talaş derinliği değerlerine bağlı olarak kuvvet değişimleri.	56
Şekil 4. 3	Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların dış başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak her üç yönde elde edilen kesme kuvvetlerinin değişimi.	58
Şekil 4. 4	Kaplamasız ile elmas kaplanmış takımların farklı devir sayıları ve kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.	60
Şekil 4. 5	Kaplamasız ile elmas kaplanmış takımların farklı ilerleme ve kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.....	61
Şekil 4. 6	Kaplamasız ile elmas kaplanmış takımların farklı talaş derinlik değerlerine ve kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.....	63
Şekil 4. 7	Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların kesme uzunluğuna ve dış başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak takım çapındaki değişimi.	64
Şekil 4. 8	Kaplamasız ve elmas kaplanmış kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı talaş derinliği için elde edilen takım çapındaki değişimin grafiği.....	66
Şekil 4. 9	Kaplamasız ve elmas kaplanmış farklı devir sayıları için kesme uzunluğuna bağlı olarak takım çapında meydana gelen değişimi.	67
Şekil 4. 10	Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı ilerleme değerleri için meydana gelen aşınma değerlerinin değişimi. ..	68
Şekil 4. 11	Kaplamasız ve elmas kaplanmış farklı talaş derinlikleri ve kesme uzunluğuna bağlı olarak takım kenarında meydana gelen aşınmanın değişimi.	69
Şekil 4. 12	Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların kesme uzunluğuna bağlı olarak kenar aşınma değerleri.	71

- Şekil 4. 13** a) Kullanılmamış elmas kaplanmış takımın görüntüsü, b) Kullanılmamış kaplamasız takımın görüntüsü, c) Elmas kaplanmış takımın maksimum talaş derinliği şartlarına bağlı olarak uç geometrisindeki değişim, d) Kaplamasız takımın maksimum talaş derinliği şartlarına bağlı olarak uç geometrisindeki değişim, e) Elmas kaplanmış takımın yakınlaştırılmış görüntüsü, f) kaplamasız takımın yakınlaştırılmış görüntüsü..... 73
- Şekil 4. 14** Kaplamasız takımın ($fz=100 \mu\text{m}/\text{diş}$, $n=10\ 000 \text{ dev/dk.}$, $ap=200 \mu\text{m}$) kesme işlemi esnasında meydana gelen talaş yapışması ve EDX analizi görüntüleri.74
- Şekil 4. 15** Elmas kaplanmış takım için farklı devir sayılarına bağlı olarak kenar radyüsünde meydana gelen aşınmaların görüntüleri (sabitler; $ap=200 \mu\text{m}$, $fz=2 \mu\text{m}/\text{diş}$). 75
- Şekil 4. 16** Kaplamasız takım için farklı devir değerlerine bağlı olarak kenar radyüsünde meydana gelen aşınmaların görüntüleri (sabitler; $ap=200 \mu\text{m}$, $fz=2 \mu\text{m}/\text{diş}$). 75
- Şekil 4. 17** Kaplamasız takım için farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kenar radyüsünde meydana gelen aşınmaların görüntüleri (sabitler $n=10\ 000 \text{ dev/dk.}$, $ap=200 \mu\text{m}$). 76
- Şekil 4. 18** Elmas kaplanmış takım için farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kenar radyüsünde meydana gelen aşınmaların görüntüleri (sabitler $n=10\ 000 \text{ dev/dk.}$, $ap=200 \mu\text{m}$). 77
- Şekil 4. 19** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımlar için farklı devir değerlerinde elde edilen işlenmiş kanal görüntüleri (sabitler; $fz=2 \mu\text{m}/\text{diş}$, $ap=200 \mu\text{m}$). 78
- Şekil 4. 20** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımlar için farklı ilerleme değerlerinde elde edilen işlenmiş kanal görüntüleri (sabitler; $n=10\ 000 \text{ dev/dk.}$, $ap=200 \mu\text{m}$). 79
- Şekil 4. 21** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımlar için farklı talaş derinliği değerleri için elde edilen işlenmiş kanal görüntüleri (sabitler; $n=10\ 000 \text{ dev/dk.}$, $fz=2 \mu\text{m}/\text{diş}$). 80
- Şekil 4. 22** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı devir sayılarına, farklı ilerleme değerlerine, farklı talaş derinliklerine bağlı olarak kesme bölgesinde aynı frezeleme ile zıt frezelemede oluşan çapak genişliklerinin değişimi. 82
- Şekil 4. 23** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı devir sayılarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün (Sa) değişimi. 85
- Şekil 4. 24** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların dış başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün (Sa) değişimi. 86
- Şekil 4. 25** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların talaş derinliği değerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün (Sa) değişimi. 86
- Şekil 4. 26** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların kesme mesafesine bağlı olarak farklı devirler değerlerindeki yüzey pürüzlülüğünün değişimi. 87
- Şekil 4. 27** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi. 88
- Şekil 4. 28** Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı talaş derinliği değerlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi. 89

Şekil 4. 29 Farklı devir sayılarına bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası.....	90
Şekil 4. 30 Farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası.....	91
Şekil 4. 31 Farklı talaş derinliği değerlerine bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası.....	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Mikro kesme ve ultra hassas işleme arasındaki karşılaştırma.....	13
Çizelge 2. 2 Ultra hassas mikro freze makinelerinin ana özellikleri.....	16
Çizelge 2. 3 Bazı takımların malzeme özelliklerinin karşılaştırılması.....	19
Çizelge 2. 4 Bazı takımların iş malzemeleri üzerinde işlenebilirliğinin karşılaştırılması.	19
Çizelge 3. 1 Al 7075-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%).	41
Çizelge 3. 2 Al 7075-T6 alaşımına ait mekanik özellikler.....	42
Çizelge 3. 3 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların karakteristik özellikleri.....	44
Çizelge 3. 4 Kaplamasız ve elmas kaplanmış kesici takım deneylerinde kullanılan kesme parametreleri.	47

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

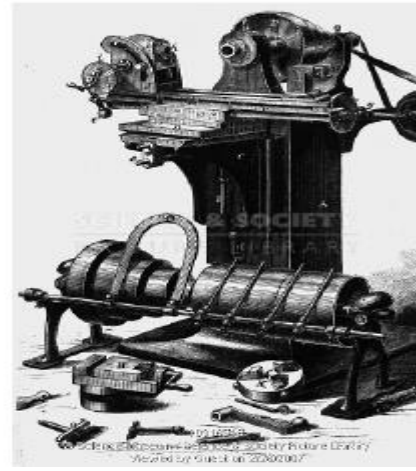
Resim 1. 1 İlk universal freze makinesi: a) Mucit Joseph R. Brown, b) 1861'den evrensel freze makinesi.	1
Resim 1. 2 Mikro frezelenmiş ürünlerin örnekleri a) Hassas Kol Saati Kadranı, b) Lehim Çerçevesi, c) Mikro Elektrot, d) Mikro Pervane, e) Gofret Desenli Optik, f) Mikro Kapakçık.....	6
Resim 2. 1 Kaplanmış ve kaplamasız farklı ağız yapıları ve çaplardaki mikro takımlar.	10
Resim 2. 2 Çeşitli ticari mikro freze makineleri; a) Kern Micro, b) Fanuc Robonano α -0iB, c) Sodick AZ250L, d) Kuglar Micromaster, e) Moore Nanotech 350UPM, f) Makino Hyper2J.	12
Resim 2. 3 Ticari olmayan deney amaçlı bazı mikro freze-torna makine örnekleri a) Beş eksenli freze makinesi, b) Dik eksenli deney amaçlı freze makinesi, c) Mikro torna makinesi, d) Deney amaçlı mikro freze makinesi.....	15
Resim 3. 1 Mikro kesme işleminin gerçekleştirildiği deney düzeneği.	46
Resim 3. 2 İş malzemesinin deney şartlarına geometrik olarak hazırlanması.	48
Resim 3. 3 Dino Lite USB 2.0 optik mikroskop ile takım çapının ölçümü.	50
Resim 3. 4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).	51
Resim 3. 5 Kesme mesafesi boyunca her kanalın belirli ölçü aralıklarında Ra ve Rz değerleri elde edilmesinin şematik gösterimi.....	52
Resim 3. 6 Yüzey analizleri için kullanılan optik profilometre ve üç boyutlu topografya örneği.....	52

1. GİRİŞ

Sanayinin ilerlemesi ile makine endüstrisi daha farklı alanlarda küçük mekanizmalara ihtiyaç duymuştur. İnsanlık her alanda küçük ve hayatı kolaylaştıran mekanizmalara yönelmiştir. Günümüzden geçmişe uzanan minyatür işlemeciliğinin tarihi XVII. yüzyıla dayanmaktadır. XVII. yüzyılın sonuna kadar, saat üreticileri, bilimsel aletlerin üreticileri, mobilya ve tabanca üreticileri, çelik imal etme kapasitesine sahip makinelere geçiş yapmaya başlamışlardı. Bu ürünleri imal etmek için çeşitli dişlilere ve bunları kesebilecek talaş kaldıracabilecek hassas makinelere ihtiyaç duyulmuştur (Watner 1996).



a)



b)

Resim 1. 1 İlk universal freze makinesi: a) Mucit Joseph R. Brown (İnt. Kyn. 1); b) 1861'den evrensel freze makinesi (İnt. Kyn. 2).

İlk pratik metal işleme tezgâhı 1800'de Henry Maudslay tarafından icat edildi (Gandarias 2018). Bu işlenen malzemenin (iş parçasının) bir kelepçeye (iş miline) tutulduğu ve onu döndürerek, bir kesici aletle yüzeyinden talaş kaldıracabilecek ve işleyebilecek düzeyde bir makine geliştirmiştir. Kesici takım, krank ve el çarkları kullanılarak operatör tarafından kontrol edilmiştir. Daha sonraları, 1818'de Amerikan Eli Whitney öncü bir yatay freze makinesi yaptı ve 1861'de, Brown ve Sharpe'in Amerikan şirketi, özellikle dönme yeteneğine sahip matkaplarda olukları işlemek için ilk evrensel freze makinesini üretmişlerdir (bkz. Resim 1.1). 1860'lar ve 1960'lar arasında, insanlığın ham metali oldukça karmaşık bileşenler haline getirme bilgisi olağanüstü bir atılım yaşamıştır (Gandarias 2018). Kimya ve elektrik teknolojisindeki güncel gelişmelere paralel olarak, bu metal işleme devrimini modern dünyanın

endüstriyel omurgası haline getirmiştir (Richter *et al.* 2006). Brown'un makinesi, yirminci yüzyılın gelişmeleri için izlenecek adımları atmıştır; daha yüksek mukavemet ve sertlik, daha hızlı kesme hızları, daha yüksek hassasiyet, elektrik motorunun dahil edilmesi ile tam otomatik çalışma durumu elde edilmiştir (Woodbury 1972). Tam kapasiteye sahip olabilmek için otomatik yardımlar, her zaman doğruluğu ve üretkenliği bu iki ilkeye bağlı kalarak, yıllar boyunca artmıştır. Bu buluşlara dayanılarak, saatçi ve kuyumcular, seri üretim için güvenilir ve sürekliliği olan küçük hassas parçalar üretebilen freze makineleri üretmişlerdir. Yeni tasarımlar o günün şartlarına bakıldığında dar toleranslar ve daha küçük boyutlardaki imalatlar düşünülmesi mümkün olmamıştır. Bu ilk adımlar, önümüzdeki mikro frezeleme teknolojisinin kökenlerini belirlemiştir. 1983 yılında Tokyo Bilim Üniversitesi Norio Taniguchi, makine hassasiyet yeteneklerinin 20. yüzyılın başlarından bu yana geçirdiği evrimi ve bu teknolojilerin 30 yıl boyunca trendini öngörmüştür. Taniguchi, öncelikle çok yüksek hassasiyet ve ultra ince boyutları elde etmek için üretim teknolojisine atıf yaparak, nano teknoloji kavramını tanımlamıştır (Taniguchi 1974).

Günümüz endüstrisi ilerledikçe küçülen minyatür ürünlere duyulan ihtiyaç arttığı görülmektedir. Makineciliğin yanı sıra diğer mühendislik alanlarda bu minyatürleşmeye katkıda bulunulmuştur ve bulunmaya da devam edilmektedir. Her alanda mekaniğin elektrik-elektronikle birleştiği hatta bilgisayar yazılımlarının da dahil olduğu makineler mevcut. Bunlara ek olarak savunma sanayisindeki gelişmeler minyatür parçalara ve makinelere duyulan ihtiyacı daha da arttırmıştır. Minyatür parçalara ilginin artması yeni bir talaşlı imalat yönteminin doğmasına neden olmuştur. Mikro imalat yöntemi dediğimiz, torna, freze, delme, taşlama işlemlerinin minyatür makinelerle ve çok küçük çaplı takımlarla yapılan işleme yöntemidir. (Friedrich and Coane 1997, Dhanorker and Özel 2008). Bu işleme yöntemi, birikiminin birçoğunu atası olarak kabul edebileceğimiz, makro imalat yönteminden alır. Makro (konvansiyonel) imalat ile mikro imalatın talaş kaldırma yöntemleri aynı olsalar bile aralarında büyük farklılıklar mevcuttur. Bazı kaynaklarda makro ve mikro frezelemenin genel farklılıkları şu şekilde ele alınmıştır;

- Makro frezelemenin talaş kaldırma teorisi, mikro frezelemenin talaş kaldırma teorisi ile aynı değildir. Çünkü makrodaki dış etkenler ve takım talaş etkisi buna

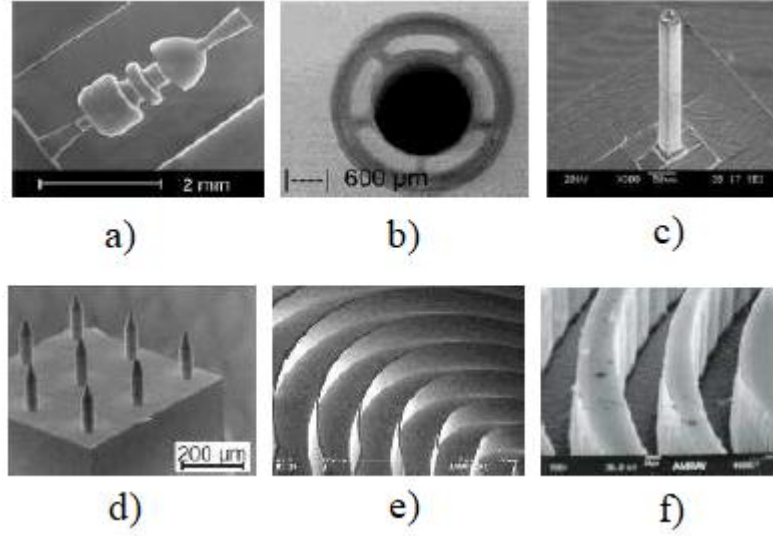
verdiği tepki ile mikro ölçekteki takım talaş etkisi ve buna verdiği tepki aynı değildir. (Li *et al.* 2007, Zhu *et al.* 2009, Heamawatanachai and Bomberg 2009).

- Konvansiyonel freze tezgâhları ile aynı özellikleri taşısa da mikro freze tezgâhları küçük olması ve yüksek devirlerde çalışması çok küçük takım çapları makrodan ayıran en büyük özelliklerdir. Mikro frezeleme işleminde diğer mikro üretim yöntemlerinden en büyük farkı hızlı imalat süreci ve düşük üretim maliyetidir. (Dhonorker and Özel 2008).
- Konvansiyonel freze tezgâhları veya farklı üretim yöntemleri ile üç boyutlu karmaşık mikro parçaların, mikro frezeleme yöntemiyle daha hızlı, kolay ve hassas bir yüzey kalitesiyle üretilebildiği görülmüştür. (Lee and Dornfeld 2004, Ducobu *et al.* 2009).

Makro ile mikro frezelemenin bu farklılıkları sadece boyut ve devir olarak değil, talaş kaldırma teorisi yeniden tanımlanması için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar proses teorisine ve benzeri özel koşulları yeniden tanımlamak adına pek çok çalışmalar yapılmışlardır. (Friedrich and Vasile 1996, Masuzawa and Törshaff 1997, Schaller *et al.* 1999, Vasile *et al.* 1996, Dornfeld *et al.* 2006, Schmidt and Tritchler 2004, Chae *et al.* 2006, Filiz *et al.* 2007). Takım çapının küçük olması, mil hızının yüksek devirlerde dönerek talaş kaldırması ve titreşimin kuvvet etkilerindeki çoğunlukla takımın kırılmasıyla sonuçlandığı görülmüştür. (Tansel *et al.* 1998, Tansel *et al.* 2000, Alting *et al.* 2003).

Son 10 yılda, yüksek hassasiyetli minyatür veya mikro özellikli bileşenler için talep yoğunlaşmıştır. Özellikle havacılık, medikal, telekomünikasyon, optik, otomotiv gibi çeşitli sektörler de olağanüstü bir gelişme yaşanmıştır. Bazı özel uygulamalar arasında, mikro kanalların ve talaşların incelenmesi üzerine laboratuvarlar, mikro yakıt hücreleri, akışkan mikro kimyasal reaktörler, yüksek sıcaklıklı jetler için mikro nozullar, fiber optikler için mikro delikler, mikro kalıplar bulunur (Chae *et al.* 2006, Liu *et al.* 2004a, Vogler *et al.* 2003). Yalnızca mikro elektro mekanik sistemler (MEMS) için, 2010 yılında toplam MEMS pazarının 8 milyar dolardan 2015 yılında 18 milyar dolara çıkacağını gösteriyor. Bununla birlikte, gelişmekte olan Mikro Elektro Mekanik Sistemleri (MEMS) pazarları, 2015 yılına kadar toplam MEMS pazarına 2,2 milyar

dolar daha ilave etme potansiyeline sahip olduğu ön görülmüştür (Wu 2012). Bu gelişmekte olan trend ve rapor edilen gelişmeler, mikro parçaların ve sistemlerin her geçen gün daha da önemli hale geldiğini göstermektedir. Bu durum endüstriyel performansın artması, hem de ürün performansının artması ve ürün çeşitliliğinin arttırması anlamına gelmektedir. Bu büyümenin daha fazla arttırılmak istenmesinin başlıca nedenleri, çok çeşitli uygulamaların farklı gereksinimlerini karşılamaktır. Hızlı bir şekilde üretim, yüksek doğruluk özelliğine sahip bir şekilde üretim, farklı mühendislik malzemeleri işlenmesinde güvenilir ve tekrarlanabilir üretim yapabilme kabiliyetine sahip olmasıdır. Plazma aşındırma ve LIGA gibi bazı geleneksel üretim yöntemleri, esas olarak düzlemsel geometriler üzerinde silikon veya silikon benzeri malzemeler için uygulanabilir ve üç boyutlu bileşenler üretme yeteneği yoktur (Jackson *et al.* 2006, Liu *et al.* 2004a). Bu sınırlamalar nedeniyle, araştırmacılar, yukarıda belirtilen gereksinimleri karşılamak için mekanik imalat süreçlerinin minyatürleştirilmesine yönelmişlerdir (Bruno *et al.* 1995). Mikro mekanik imalat yöntemleri içerisinde yer alan ve en çok kullanılan kesme yöntemi mikro frezelemedir. Yeni gelişmekte olan, bununla birlikte hızlı büyüyen bir teknolojidir ve çeşitli malzemelerden metal veya metal olmayan, onlarca mikrometreden birkaç milimetreye kadar değişen karmaşık şekillerde serbest biçimli mikro yapıların üretilmesi yeteneğine sahip olduğu görülmüştür. (Brecher *et al.* 2008, Takeuchi *et al.* 2006, Bang *et al.* 2005, Weck *et al.* 2001, Weule *et al.* 2001), polimerler (Friedrich *et al.* 1996), ve silikon (Rusnaldy *et al.* 2008, Rusnaldy *et al.* 2007). Şekil 1.1 de mikro frezeleme yöntemiyle farklı malzemelerden üretilen bazı uygulama örnekleri verilmiştir.



Şekil 1. 1 Mikro frezeleme yöntemiyle üretilmiş bazı parça örnekleri a) ve b) Mikro Kalıplar (Çelik) (Brecher *et al.* 2008, Weule *et al.* 2001), c) ve d) Mikro Sütunlar (Pirinç) (Takeuchi *et al.* 2006, Bang *et al.* 2005), e) Mikro Duvarlar (Nikel Gümüş) (Weck *et al.* 2001), f) Mikro Siperler (PMMA, Friedrich *et al.* 1996).

Mikro frezeleme, esneklik, maliyet verimliliği, tekrarlana bilirlilik, en iyi şekil doğruluğu gibi çeşitli avantajlı özelliklere sahiptir ve aynı zamanda küçük ve orta büyüklükteki boyutlarda gerçek üç boyutlu parçaların şekillendirilmesinde önemli bir yöntem olarak yer almaktadır. Mikro frezeleme yönteminin en çok kullanıldığı alanlar ve uygulama örnekleri aşağıda verilmiştir:

Tıp: Diş implantları, köprüler, kalça protezleri, kemik plakaları ve vidaları, omurga kancası, cerrahi forseps ve makas, mikro pompalama mekanizmaları vb.

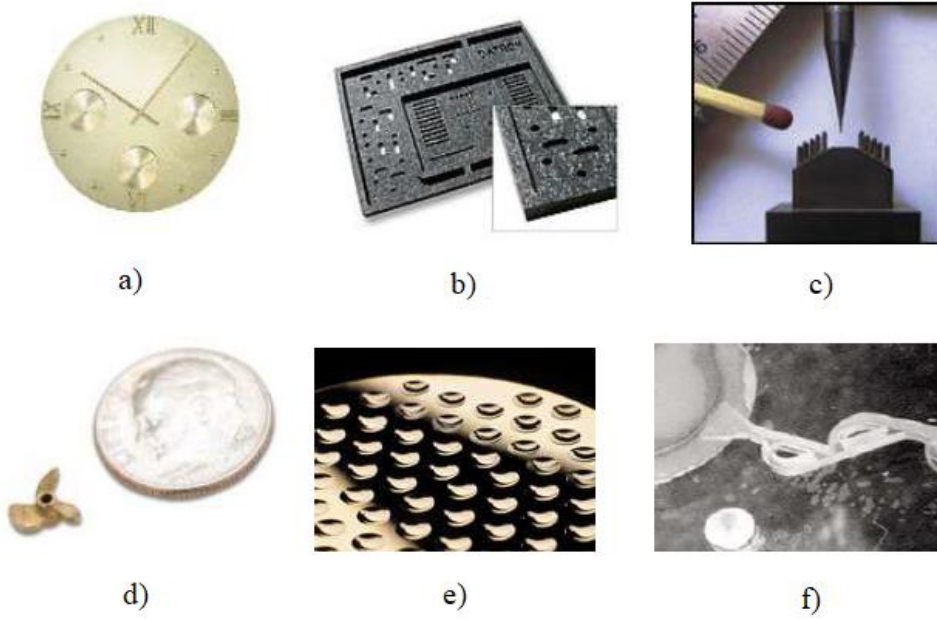
Saat yapımı: Hassas saat kılıfları, kol saati parçaları, hareketler, elektrotlar, kadran vb.

Elektronik: Takılı konektörler, minyatür elektronik cihazlar, mikro sensörler, radyo frekansı tanımlama yongaları vb. İçin mikro kalıplar

Optik: Mikro lens dizileri, optik cihazlar vb.

Havacılık: Planet dişli çarklar için kalıp, roketler için minyatür cihazlar, mikro jiroskop bileşenleri, mikro valfler ve servo cihazlar, vb.

Yukarıda belirtilen bazı özel mikro frezelenmiş bileşenler Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Resim 1. 2 Mikro frezelenmiş ürünlerin örnekleri a) Hassas Kol Saati Kadranı (Wu 2012, İnt. Kyn. 3), b) Lehim Çerçevesi (Wu 2012, İnt. Kyn. 4), c) Mikro Elektrot (Wu 2012, İnt. Kyn. 5), d) Mikro Pervane (Wu 2012, İnt. Kyn. 6), e) Gofret Desenli Optik (Wu 2012, İnt. Kyn. 7), f) Mikro Kapakçık (Wu 2012, İnt. Kyn. 8).

Mikro frezeleme tekniğinin endüstriyel alanda hızlı bir şekilde ilerleyebilmesi için talaş kaldırma alanında geçmiş olan konvansiyonel uygulamaları örnek alınması daha avatajlıdır. Bu durumun ucuz ve ulaşılabilir olması ile birlikte teknolojinin bilimsel gelişiminde bu alanda çok çeşitli konuların ortaya çıkmasına ve hızlı ilerlemesine neden olmuştur. İki kesme işlemi benzer kinematiğe sahiptir ve kesme işlemi, keskin bir takımın iş materyali ile mekanik etkileşimi ile karakterize edilebilir. Takımın tanımlanmış yollar boyunca, malzemenin içinde parça koparmaya ve sonuçta iş parçasının işe yaramaz kısmının talaş biçiminde çıkarılmasına yol açmaktadır. Mikro frezeleme yeni gelişmekte olan bir yöntem olarak ortaya çıkmasına rağmen, her ne kadar geleneksel frezeyle benzese de ikisinde de aynı etkiyi görmek mümkün değildir. (Alting *et al.* 2003).

Bununla birlikte, bilgi geçmişi olan makro frezeleme işlem sürecini etkileyen alt mekanizmalar, mikro seviyeye geçiş sürecinde ortaya çıkan bir takım kritik meseleler vardır. Bunlar; talaş oluşturma prosesinde, kesme kuvvetlerinde, titreşimlerde, proses stabilizesi (işleme kararlılığı) de ve ortaya çıkan işlenmiş yüzeylerin oluşumunda, bu gibi kriterler nedeni ile ürünlerde değişiklikler gösteremeye neden olur (Liu *et al.*

2004a). Makro frezeleme tekniğine nazaran mikro frezelemede bazı kısıtlamalar vardır. Örneğin, öngörülemeyen takım ömrü ve erken takım hasarları, takım aşınmasından dolayı işlenen geometrinin bozulması, takımda meydana gelen elastik sapma vb. Bu kısıtlamalar kesici takımlar ve imalat tekniği süreçlerini, uygun kesme performansı elde etmek konusunda oldukça zorlayıcı kriterlerdir. Bu alanda yapılan çalışmalarda, uygun takım tasarımı ve kesme işlemini optimize etme konularına ağırlık verilmiştir. Mevcutta ve gelecekteki üretim taleplerini karşılamak için üretim tekniğinin mevcut kapasitesi sürekli olarak geliştirilmelidir. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarını daha da genişletmek için konuyu kapsamlı olarak ele almak çok büyük önem taşımaktadır.

1.1 Tez Çalışmasının Amacı ve Hedefleri

1.1.1 Çalışmanın Amacı

Yapılan bu tez çalışmasından makine endüstrisinin farklı alanlarında (ulaşım, elektronik, havacılık, uzay ve bilişim vs.) kullanılan işlenmesi zor olmayan Al 7075-T6 alüminyum alaşımının mikro şartlarda işlenebilirliğini iyileştirmek adına elmas kaplamanın performansı test edilmiştir. Bu amaçla kuru kesme şartlarında elmas kaplanmış ve kaplamasız takımlar sabit kesme parametrelerinde (talaş derinliği, devir sayısı ve ilerleme hızı) mikro kesme testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada hem kesme parametrelerinin hem de kaplama malzemesinin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Bununla birlikte çalışma kapsamında aşağıda sıralanan faktörlerin de etkisi araştırılarak, elde edilen bulgulara da tezde yer verilmiştir.

- Kaplanmış ve kaplamasız takımların çaplarında meydana gelen çevresel aşınmanın etkisi ile işlenen kanal geometrisi üzerine etkisi
- Elmas kaplamanın yüzey kalitesine etkisi
- Kaplamanın kesme kuvvetlerinin değişimine etkisi
- Kesme esnasında meydana gelen aşınma tipi ve aşınma mekanizmalarının tespiti ve elmas kaplamanın rolü
- Endüstri için optimum kesme parametre aralığının tespiti

1.1.2 Çalışmanı Hedefi

Çalışmanın temel hedefi, özellikle demir dışı malzemelerin işlenmesinde kullanılan elmas kaplamanın mikro frezelemede de kullanılabilirliğinin gösterilmesidir. Özellikle kaplamanın, işlenen yüzey kalitesi ve çapak oluşumu noktasında ne denli bir avantaj sağladığını gözler önüne sererek sanayi uygulamalarında bir karşılık bulması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Mikro Frezeleme

Talaşlı üretimde takım tezgahlarının gelişmesinden sonra el ile üretilen minyatür parçalar hassas mikro makinelerde üretilmeye başlanmıştır. Bu minyatür parça üretimi ihtiyacı çoğalmasi ile yeni bir talaşlı imalat alanı ortaya çıkmıştır. Endüstrinin son 20 yılında öne çıkmış olan bu alan, makinecilik alanındaki bilim insanında popüler araştırma konuları arasına girmiştir (Masuzawa 2000, Gandarias 2018).

Minyatürleştirmeye olan eğilim, karmaşık yüzeyli, yüksek hassasiyetli mikro parçaların veya bileşenlerin doğrudan düşük maliyetli etkin bir şekilde üretilmesinde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Teknoloji, geleneksel frezelemeden aşağı doğru ölçeklenen kinematiktir, ancak geleneksel frezeleme, mevcut bilgi ve deneyimleri sınırlıdır. Yüksek kaliteli boyutsal doğruluk için gereksinimler şu şekilde sıralanabilir; form ve yüzey kalitesi, yüksek statik rijitlik, termal kararlılık, düşük ilerleme hataları ve yüksek sönümlenme veya dinamik rijitlik (Gandarias 2018). Takım tezgahının performansı, takım özellikleri, işlenen malzemenin özellikleri, işleme koşulları, mikro frezelemede süreci ve sonrasını etkileyen en önemli dört etkendir (Huo *et al.* 2009a). Ayrıca, sürdürülebilir üretimi korumak için iyi bir takım performansı ve yüksek talaş kaldırma oranı elde etmek için yüksek bir kesme hızı gereklidir (Chae *et al.* 2006).

Mikro işleme literatürde iki alt başlıkta üretim yöntemlerine ayrılır. Birinci üretim yönteminde ise parçadan kaldırmak istenen metalin elektriksel, kimyasal, ultrasonik alışılmamış imalat yöntemine dayanmaktadır (Masuzawa 2000). Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) 1 ile 100 µm ölçüleri arasında parçalar üretir. Diğer bir yöntem olan alışılmamış (MEMS)'de 100 µm üzerindeki ölçülerde parça üretimi yapılabilmektedir. Çalışma prensibi olarak, alışılmamış MEMS'ler farklı enerji kaynaklarından biriktirdikleri enerjiyi iş parçası üzerine yoğunlaşarak gönderir. Parçanın belirli bir bölgesinde yoğunlaşarak gönderir. Parçanın belirli bir bölgesinde yoğunlaşan enerji ısı enerjisine dönüşerek o bölgeyi eriterek parçadan uzaklaştırma mantığı ile çalışır. Burada, kesici ile işlenen parça teması yoktur, dolayısıyla takım

kırılması, takım aşınması gibi mekanik hatalar olmaz (Masuzawa 2000, Rajukar *et al.* 2006, Uhlmann *et al.* 2010, Pham *et al.* 2007, Huo 2008).

İkinci üretim yöntemi ise mikro mekanik kesmedir. Bu yöntemin yukarıda verilen yöntemlere nazaran en önemli avantajı hızlı şekillendirme yapılabilmesidir. Bu yöntemde kendi içersinde mikro frezeleme, mikro tornalama, mikro delik delme ve mikro taşlama olarak gruplandırılır. Bu sayılan dört yöntem de aslında konvensiyonel işlemede kullanılan yöntemlerin mikro ölçekte yapılmasıdır. Bu tanım her ne kadar doğru da olsa, durum tam olarak öyle değildir. Mikro mekanik kesme işleminde takım geometrisi çok küçüldüğü için talaş kesiti çok küçülmektedir. Bu da beraberinde boyut etkisini ortaya çıkarmaktadır.

Kesici takım üzerinde bu tür çalışmaların artması ticari bir alanın oluşmasına sebep olmuştur. Ticari olarak piyasada farklı ağız sayılarında ve farklı çaplarda, kaplanmış kaplamasız türlerde takımlar bulmak mümkündür (Resim 2.1). Mikro freze takımları genelde 25- 1 000 μm çap aralığında değişmektedir. Çaplarının küçük olması takıma bazı sınırlamalar getirmektedir. Bu sınırlamaların başında, rijitlik ve kanal (ağız sayısı) gelmektedir. Mikro takımların bu sınırlamaları ve küçük çaplı üretim zorluğundan çoğu iki kanallı olarak üretilirler. Bunlardan ayrı olarak doğal elmaslardan üretilen takımların çapları 100 μm civarında ve tek kanallı olarak imal edilirler.



Resim 2. 1 Kaplanmış ve kaplamasız farklı ağız yapıları ve çaplardaki mikro takımlar (İnt. Kyn. 9).

Hassas mikro bileşenlerin üretilmesi için takımlar olduğu kadar kullanılan tezgahlarda büyük önem taşırlar (Li *et al.* 2008, Lee *et al.* 2006, Bang *et al.* 2005, Okazaki *et al.* 2001, Tanaka 2001). Bu küçük mikro makineler seri imalatta, üretimin maliyetini düşürme, enerji tasarrufu sağlama ve esnekliği artırma kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, günümüzde esas olarak araştırma amaçlı kullanılmakta olup, temel titreşim problemlerinin yanı sıra yeterli rijitliğe sahip olmamaları nedeniyle uygulama perspektifleri hala belirsizdir (Okazaki *et al.* 2004). Günümüzde bu alanda yapılan çalışmalar artık laboratuvar dışına çıkarak sanayinin ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde seri üretim ticari mikro frezeleme tezgâhları satılmaktadır. Ultra hassas makineler, yüksek kaliteli parçalar üretmek için kritik öneme sahiptir. Mikro parça üretiminde yüksek boyutsal doğruluğu, iyi form ve iyi yüzey kalitesi sonuçlarını elde edebilmek için, mikro freze makinelerinin yüksek statik rijitliğe, termal kararlılığa, düşük ilerleme hatalarına, yüksek sönümlenme veya dinamik kararlılığa sahip olması gereklidir (Huo *et al.* 2009a). Bunlara ek olarak, hızlı ve doğru üretimi sağlamak için, uygun parça boyut aralığında optimum kesme performansı ve yüksek talaş kaldırma hızları elde etmek için maksimum kesme hızı gereklidir. Küçük çaplı mikro kesici takımlar nedeniyle, mikro freze makineleri yaygın olarak yüksek hız ve düşük salgı iş milleri ile donatılmıştır. Ayrıca, makinelerin çok eksenli yapıları, proses esnekliğinin sağlanması ve serbest form bileşenlerinin işlenmesinde doğruluk oluşturulmasında da önemlidir. Avantajı, sıfırlama ihtiyacı olmadan üretilmekte ve böylece üretkenliği büyük ölçüde arttırmakta ve yeniden sıfırlama hatalarını ortadan kaldırmaktadır. Resim 2.2 (a-f) 'de gösterildiği gibi mikro freze tezgâhları çok hassas ve ultra hassas takım tezgâhları donanımı ile tasarlanmıştır (Wu 2012, İnt. Kyn. 10, İnt. Kyn. 11, İnt. Kyn. 12, İnt. Kyn. 13, İnt. Kyn. 14, İnt. Kyn. 15).



Resim 2.2 Çeşitli ticari mikro freze makineleri; a) Kern Micro (Wu 2012, İnt. Kyn. 10), b) Fanuc Robonano α -0iB (Wu 2012, İnt. Kyn. 11), c) Sodick AZ250L (Wu 2012, İnt. Kyn. 12), d) Kuglar Micromaster (Wu 2012, İnt. Kyn. 13), e) Moore Nanotech 350UPM (Wu 2012, İnt. Kyn. 14), f) Makino Hyper2J (Wu 2012, İnt. Kyn. 15).

2.1.1 Mikro Frezeleme İmalatında Kullanılan Takım Tezgâhları

Mikro frezeleme, mikro ürünleri karmaşık şekil ile üretme kabiliyetine sahip mikro üretim süreçlerinden biridir. Klasik ve minyatür imalat yöntemleri karşılaştırıldığında, minyatür imalattaki şekil bütünlüğü yani doğruluğu en önemli istenen sonuçtur. Bu sonuç bizi hassas işlemeye götürmektedir. Çünkü klasik yöntemde 1mm veya onda biri olan 0,1mm ölçüleri karşımıza çıkarken, minyatür imalatta ise 1 μ m gibi yüksek hassasiyet istenmektedir (Lacale *et al.* 2009). Araştırmacılar, geleneksel ultra hassas işleme ile mikro kesme sürecini karşılaştırmıştır. Her iki yöntem birbirine çok benzese de şaşırtıcı farklar vardır (Huo and Cheng 2013). Bunlar;

- Ultra hassas işleme çalışmalarında, mikro kesme mekaniğinde minimum talaş kalınlığının etkisi bulunmuştur (Huo and Cheng 2013).
- Mikro kesme işlemlerinin, talaş oluşumu ve kesme kuvvetleri gibi geleneksel kesme olan bazı ortak özellikleri olduğu görülmüştür (Huo and Cheng 2013).

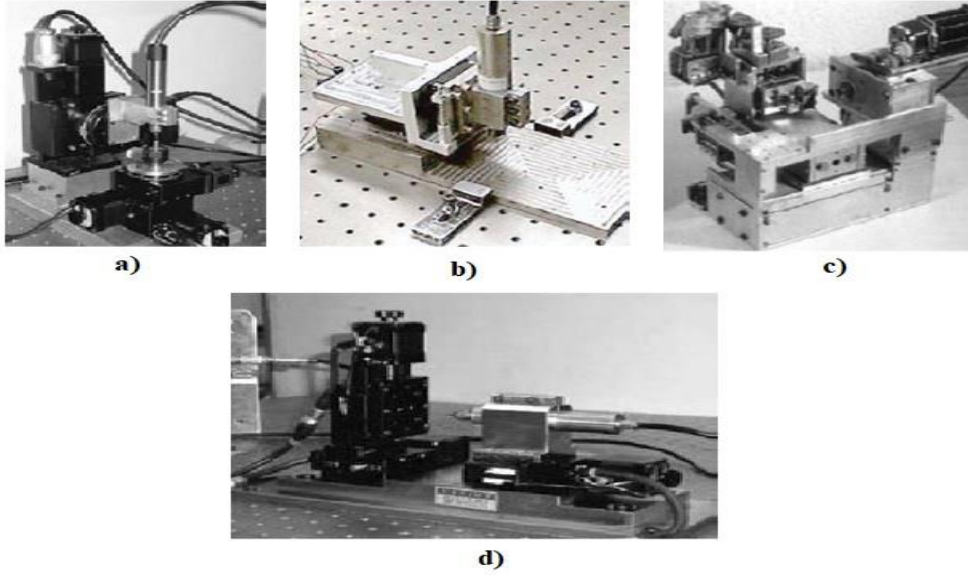
Çizelge 2.1’de, mikro kesme işlemlerinin kapsamını ve ana özelliklerini daha iyi anlamak için geleneksel ultra hassas işleme süreçleriyle mikro kesme işlemlerinin

karşılaştırması yapılmıştır. Ultra hassas işleme, parça boyutundan bağımsız olarak elmas takım kullanılır, yapılan uygulamaların elektro optik ile gözlemlenmesi sonucu, mümkün olan en yüksek boyutsal doğruluğu ve yüzey kalitesini elde etmeye odaklanıldığı görülmüştür. Öte yandan, mikro kesmede, makul derecede yüksek doğruluk ve yüzey kalitesi ile çeşitli takımlar kullanılarak çeşitli mühendislik malzemeleri üzerinde üç boyutlu minyatür mikro mekanik işlemeye odaklanır. Çünkü mikro işlemede işlenecek ürünün boyutu, şekil yapısı çok önemlidir (Huo and Cheng 2013).

Çizelge 2. 1 Mikro kesme ve ultra hassas işleme arasındaki karşılaştırma (Huo and Cheng 2013).

	Mikro Kesme	Ultra Hassas İşleme
Proses	Mikro Tornalama, Frezeleme, Delme, Taşlama vb.	Tek Noktadan Elmas Takımla Tornalama, Tarama Çakısı ile Frezeleme, vb.
Takımlar	Çeşitli Takım Malzemeleri: (kaplanmış) Tungsten Karbür, CVD, CBN, Elmas Takımlar	Doğal Elmas Takımları
Bileşen Boyutu	1–1000 μm	1 mm ve Yukarısı, Çok Daha Büyük Olabilir.
Şekil (Yapı)	3 Boyutlu veya Çok Görünüşlü, Karmaşık Geometrik Şekiller	Dönen Parçalar Hem Küresel Hem de Küresel Olmayan Yüzey, Normalden Daha Az En Boy Oranları.
Doğruluk (Hassasiyet)	Mutlak: <10 μm Göreceli:	Mutlak: <10 μm Göreceli:
Yüzey Kalitesi	<100 nm Ra	Genellikle: <20 nm Ra
Mekanik	Hassas İşleme Merkezleri, Hassas Mikro Makineler, Ultra Hassas Tornalama Makineleri	Ultra Hassas Torna Makineleri
Uygulamalar	Mikro Bileşenler Gerektiren Çeşitli Uygulamalar	Elektro Optik
Kesme Derinliği (Kesilmemiş Talaş Kalınlığı)	1- 10 μm	0.1- 10 μm

Yüzey ve boyut etkisi, ölçeklendirilme etkisine bağlı olarak malzemenin kesme esnasında tepki ve davranışlarıyla başlar (Koç ve Özel 2010). Minyatür parça imalatında, parça bütünlüğünün önemi, üretim kalitesinden geçmektedir. Ölçülerdeki hassasiyet ise imalat işleminde kullanılan takım tezgahına bağlıdır. Mikro imalat yapacak bir takım tezgahında aranan özellikler statik ve dinamik olarak kararlı bir yapıya sahip olmasıdır. Dinamik kararlılığın iyi olabilmesi için, yüksek dönme hızına sahip iş mili (spindle) ihtiyacını doğurur. Yüksek dönme hızı ise termal problemleri karşımıza çıkartmaktadır. Termal kararlılığı sağlayabilmek için iş milinin içindeki rulmanlar, termal genleşme katsayısı düşük olan seramik rulmanlar seçilerek termal kararlılık sağlanmalıdır (Sriyotho *et al.* 2006). Daha küçük takım tezgâhları, makro ölçekli muadillerine kıyasla sıcaklık, basınç ve nem değişiklikleri gibi çevresel dalgalanmalardan daha az etkilenirler. Bu nedenle, minyatür takım tezgâhlarının kullanımı da üretim maliyetlerini düşürmede büyük bir potansiyele sahip olarak görülmektedir (Tanaka 2001). Mikro frezeleme tezgahlarının ticari amaçlı üretilenlerinin yanı sıra çeşitli araştırma gruplarınca ticari olmayan tezgahlar da geliştirilmiştir (Alting *et al.* 2003). Geliştirilen bu makinelerde yüksek hassasiyet, yüksek doğal frekans, az enerji tüketimi, çok az alan kaplaması gibi avantajları da mevcuttur. (Kussul *et al.* 2002, Tanaka 2001, Okazaki *et al.* 2004, Bang *et al.* 2005). Bu tür sistemlerin taşınabilirliği ve az yer kaplaması uzay, askeri sanayi alanında ilgisini çekmiştir. Çeşitli uygulamalar için araştırma amaçlı geliştirilen bazı tezgâh örnekleri Resim 2.3 (a-d)'de verilmiştir. (Wu 2012).



Resim 2. 3 Ticari olmayan deney amaçlı bazı mikro freze-torna makine örnekleri a) Beş eksenli freze makinesi (Bang *et al.* 2005), b) Dik eksenli deney amaçlı freze makinesi (Lee *et al.* 2006), c) Mikro torna makinesi (Kussul *et al.* 2002), d) Deney amaçlı mikro freze makinesi (Li *et al.* 2008).

İş milinin yüksek devirlerde çalışması ile yüksek titreşim sorununu ortaya çıkarmaktadır. Bu önemli etkiyi sönmüleyebilmek için tezgâh gövdesinin ve tezgâh tablasının daha kararlı bir yapıda olması istenmektedir. Tezgâh üreticileri bu sorunu polimerler, betonlar, granitler gibi malzemelerle güçlendirecek titreşimin çoğunu sönmülemişlerdir (Ikawa *et al.* 1991, Son *et al.* 2005, Chae *et al.* 2006, Sun and Cheng 2010). Mikro frezeleme makinelerin motorları yüksek torkludur. Çünkü mikro frezeleme işlemleri arasında 20 000 dev/dk. ve üzeri devirlere çıkması istenmektedir. Hatta 60 000 dev/dk. hıza çıkabilen elektrik motorları vardır. Yüksek devirlerde uzun zamanlı çalışan motorlarda termal genleşme oluşmaktadır (Chae *et al.* 2006). Bu durumu izole edebilmek için hava türbinli motorlar geliştirilmiştir. Ancak hava türbinli motorlarda ise tork kaybı fazladır. Tork kaybı fazla olan hava türbinli motorlarda maksimum 60 000 dev/dk. hıza çıkabilmektedir. Termal genleşme problemini en aza indiren hava türbinli motorlarda, uzun süreli kullanımlarda hassasiyetin yitilmesi ile ileri derecede ölçü bozukluklarının önüne geçilmiştir (Chae *et al.* 2006). Aşağıda ultra hassasiyetli takım tezgahlarının ana özellikleri, mikro freze makinelerinin ve çok fonksiyonlu teknolojik özellikleri kapsamlı bir karşılaştırması Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

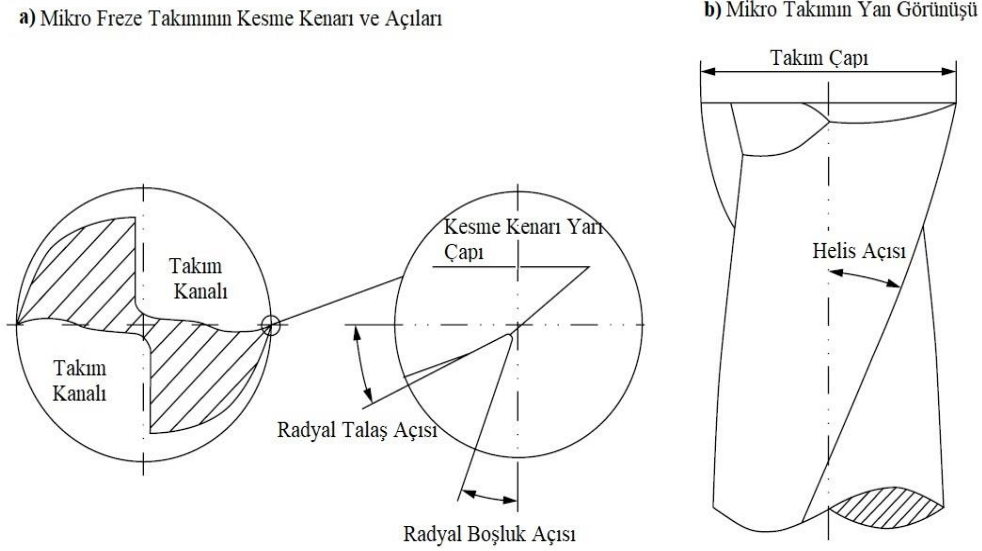
Çizelge 2. 2 Ultra hassas mikro freze makinelerinin ana özellikleri (Wu and Cheng 2013).

	KERN Micro	FANUC ROBO NANO α-0iB	Sodick AZ250L	Kugler Micromaster	Moore Nanotech 350UPM	Makino Hyper 2J	Brüel UltraMill
Çalışma Biçimi	Üç doğrusal eksen ve İki Döner Eksen	Üç Doğrusal Eksen ve İki Döner Eksen	Üç Doğrusal Eksen	Üç Eksen (standart) veya Beş Eksen (isteğe bağlı)	Üç Eksen (standart) veya Dört Eksen (isteğe bağlı)	Üç Doğrusal Eksen	Üç Doğrusal Eksen ve İki Döner Eksen
Temel Yapısı	Polimer Beton	Dökme Demir Üs Beton	Hiçbir Taşma Olmayan Kasa Yapısı	Sert Granit	Karbon Fiber Takviyeli Döküm Epoksi Granit Tabanı	Granit Taban	Doğal Granit
Titreşim İzolasyonu	N/A	Hava ve Yağ Damperi	Karşı Dengeleme Tabloları	Pasif Hava Damperleri	Kendinden Tesviye Hava İzolasyon Sistemi	N/A	Sıkma Film Damperi
Denetleyici	Heidenhain	Fanuc	Sodick	Çok İşlemcili Yol Denetimi	Delta Tau	Fanuc	Delta Tau
Spindles (İş Mili)	Vektör Kontrollü Spindle	Statik Hava Basıncılı Rulman, Hava türbinli	Pnömatik Statik Rulman, Hava Türbinli	Hidrostatik Yatak	Sıvı Soğutulmuş Hava	N/A	Aerostatik Yatak
Hız Limiti(rpm)	160 000'e Kadar	50 000'e Kadar	120 000'e Kadar	200 000'e Kadar	200~60 000'e Kadar	3000~40 000' e Kadar	200 000'e Kadar
Hareket Doğruluk(μm)	<0,1	<0,2	N/A	±0,5	<0,05	±0,3	<1
Tahrik Sistemi	AC Servo	Lineer(Doğrusal) Motorlar ve Gömme Servo Motorlar	AC Çekirdeksiz Lineer (Doğrusal) Motor	Lineer(Doğrusal) Motor	Fırçasız DC Lineer(Doğrusal) Motor	N/A	Fırçasız Tahrikli Motorlar
Tahrik Sistemi Kararlılığı(nm)	N/A	1	3	N/A	0.034	2	5
İş Hacmi(mm)	250×220 ×200	280×150 ×40	250×150 ×100	300×300 ×200	350×350 ×150	200×150 ×150	150×150 ×80

2.1.2 Mikro Frezelemede Kullanılan Kesici Takımlar

Mikro kesici takımların teknolojisi, mikro kesme işleminin en önemli bir parçasıdır, çünkü mikro parçaların işlenmesinde, mikro takımın talaş kaldırmasında ve özelliklerinin kullanılabilmesi için takım geometrisinden faydalanması gerekmektedir. Bu özellikleri sebebi ile mikro imalatın en önemli parçası haline gelmiştir. Mikro kesici takımların boyut geometrisi, işlenecek olan mikro bileşenlerle boyutuna yakın veya daha küçüktür. Kesici takımın geometrisi ve malzeme özellikleri talaş oluşumuna, ısı üretimine, takım aşınmasına, talaş yüzeyine ve benzeri etkilerin üzerinde önemli etkiye

sahiptir (Huo and Cheng 2013). Şekil 2.1’de mikro takımın kesici yüzeyleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 1 İki ağızlı mikro takımın şematik gösterimi (Wu and Cheng 2013).

Kesici takımlar, talaş kaldırılacak işlenecek ürünün kalitesini ve maliyetini belirleyen en önemli unsurdur (Chae *et al.* 2006). Bu durum işlenecek olan malzemeye göre işleme şartları da göz önünde bulundurularak, uygun kesici takım seçimini ön plana koymaktadır. İşlenen malzemenin geometrik bütünlüğünü ve yüzey pürüzlülüğünün kalitesi de seçilen kesici takımın uygunluğuna ve işleme performansına da bağlıdır. Kesici takımın rijitliği, takımı oluşturan malzemelerin yapısı, kaplama malzemesi, kaplama malzemenin kalınlığı vb. değişkenler. İşleme performansını ve takım ömrünü etkilemeyen en önemli faktörlerdir (Chae *et al.* 2006, Okozaki *et al.* 2004). Konvansiyonel frezelemede kullanılan kesici takımlara göre mikro işlemede kullanılan kesici takımlar daha hızlı aşınırlar. Bunun nedeni mikro frezelemedeki kesme devrinin, konvansiyonel frezelemedeki kesme devrinden çok daha yüksek olmasıdır. Yüksek devirlerde kesme yapan mikro takımlarda, talaş kaldırma esnasında, sürtünme kuvvetlerinin fazla olması, o bölgedeki ısıyı arttırmaktadır. Mikro işlemede, kesilmemiş talaş kalınlığı ve takım kenar radyüsü aynı boyutta olduğu takdirde, büyük mekanik yüklere, sürtünmeden dolayı termal gerilmelere ve dolayısıyla uzun bir işleme süresinin

azalmasına, aşınma direncinin azalmasına sebep olur. Mikro takımın sürtünme kuvvetlerine ve ısıya dayanabilme kabiliyetinin ve rijitliğinin iyi olması istenir. Takım malzemesinin içeriği, bağlayıcı oranı, kaplama malzemesinin türü, kaplama malzemesinin kalınlığı vb. gibi unsurlar takımın rijitliğini ve ısıya dayanımını etkiler. Özellikle talaş kaldırma işlemi için uygun kesme parametreleri seçilerek, yüksek kaliteli yüzeye sahip ürün elde edilebilir.

Tek kristalli elmas, eşsiz sertliğinden dolayı, ultra hassas işlemede çoğunlukla kullanılmıştır. Tek kristalli elmas mikro takımlar, belirli bir uygulama alanı için mikro kesmede doğruluk ve yüzey kalitesi konusunda gereksinimleri en iyi karşılayacak şekilde üretilmiştir. Mikro kesme performansı araştırmalarında, elmas mikro kesici takım kullanarak, takım aşınması sorunları hakkında çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Diğer yandan, doğal elmas takımların demirle çok yüksek bir şekilde etkileşime girme özelliği olduğu için, bu özelliği sebebi ile elmas mikro kesimde alüminyum ve bakır gibi demir dışı malzemelerin işlenmesiyle sınırlandırılmıştır (Huo and Cheng 2013).

Tungsten karbür kaplanmış mikro takımlar, mikro kesme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tungsten karbür, yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptir. Aşınma direncini ve sertliğini arttırmak için, çok ince tane boyutlu tungsten karbürü mikro takımlar geliştirilmiştir. Elmas ve titanyum kaplı takımlar gibi çeşitli kaplanmış mikro takımlar, mikro imalatta popüler hale gelmektedir (Huo and Cheng 2013).

Yukarıda belirtilen etkiler nedeni ile mikro kesici takımlar genellikle tungsten karbür (WC-Co), elmas (karbonun tetrahedral formu), kübik bor nitrür (CBN), çok kristalli elmas (PCD) gibi malzemelerden üretilirler (Chae *et al.* 2006). Takım malzemesi ve takım geometrisi, takım performansını belirleyen en önemli iki faktördür. En iyi takım malzemeleri, yüksek sıcaklıkta yeterli sertlik ve kimyasal stabilitesini koruyan takımdır. Herhangi bir takım malzemesi genel olarak her bakımdan mükemmel özelliklere sahip değildir. Örneğin yüksek hız çelikleri daha yüksek tokluğu sahip iken, düşük aşınma direnci sergilerler. Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'te takım malzemelerinin genel özellikleri birbiri ile kıyaslanmıştır.

Çizelge 2. 3 Bazı takımların malzeme özelliklerinin karşılaştırılması (Wu and Cheng 2013).

	Kızıl Sertlik	Tokluk	Aşınma Direnci	Termal Şok Direnci	Kesme Hızı	Yüzey Pürüzlülüğü	Malzeme Maliyeti
Yüksek Hız Çeligi	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Karbür	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
Seramik	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
CBN	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
Elmas	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek

Çizelge 2. 4 Bazı takımların iş malzemeleri üzerinde işlenebilirliğinin karşılaştırılması (Wu and Cheng 2013).

	Yumuşak Demir Dışı	Dökme Demir	Karbon ve Düşük Alaşımli Çelikler	Sertleştirilmiş Çelikler	Nikel Esaslı Alaşımalar	Titanyum Alaşımalar
Yüksek Hız Çeligi	√	×	O	×	×	×
Karbür	√	√	√	O	√	O
Seramik	×	√	√	O	√	×
CBN	×	O	×	√	O	O
Elmas	√	×	×	×	×	√

(√: Güzel , O: Uygun , ×: Kaçınılması Gereken)

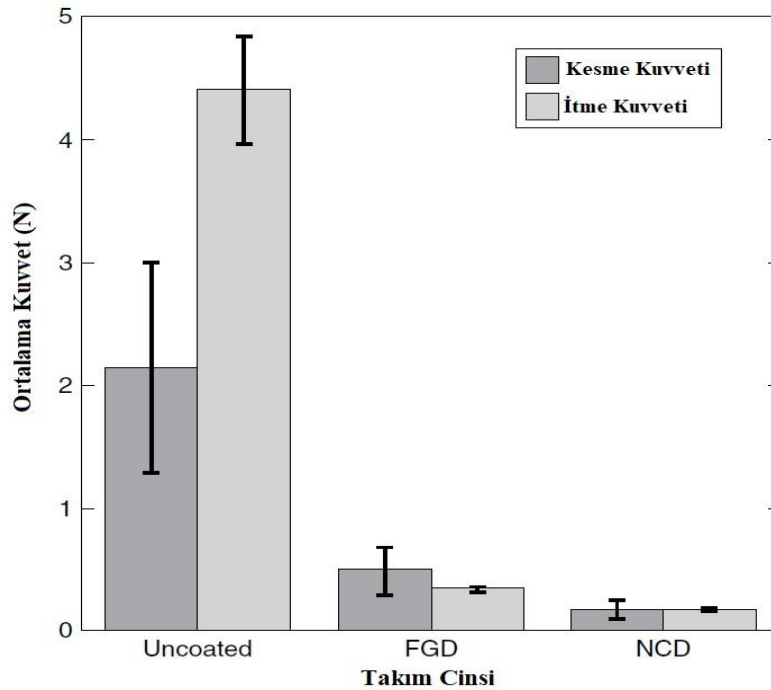
Bu takım malzemeleri arasında elmasın bazı olağanüstü kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri ön plana çıkmaktadır. Yüksek sertlik, daha keskin kesici kenarların elde edilmesini, diğer malzemelere kıyasla çok daha düşük aşınma ve daha uzun takım ömrü bunlardan bazılarıdır. Bununla birlikte, demir için yüksek maliyet, kırılabilirlik ve kimyasal etkileşime girmesi sebebi ile elmas bazlı takımlar demir uygulamalarında kısıtlamıştır. Ticari mikro takımlar için, en yaygın ve popüler malzeme, nispeten düşük maliyet, yüksek sertlikten mukavemet ve yeterli aşınma direnci özelliklerine bağlı olarak, ultra ince taneli (normalde 0,5 µm'den daha küçük tanecik boyutu) kobalt bağlı tungsten karbürdür. En önemlisi, çelikler dahil olmak üzere çok çeşitli mühendislik malzemelerinin işlenmesi için uygun olmasıdır. Tungsten karbür takımların performansı büyük ölçüde aşındırıcı tane oranına ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Kobalt içeriği takımın fiziksel özelliklerini etkileyebilir. Takımın içeriğinde daha az miktarda kobalt olması genellikle daha yüksek sertlik ve takımların kırılabilirliğinin artmasına neden olur,

ince tane boyutu, daha yüksek sertliğin tam tersi bir etki gösterir. Takımın mikro yapısında gereken sertliği veya tokluğu kazandırmak, her zaman en iyi aşınma direncinin olduğu anlamına gelmemektedir. Teorik olarak, tungsten karbür takımlar neredeyse tüm mühendislik malzemelerinin işlenmesinde kullanılabilir, ancak sert malzemelerin yüksek hızda kesilmesinde ciddi aşınmalar söz konusudur. Takım ömrünü uzatmak ve takım performansını iyileştirmek için, bir takım malzemesinin sertliği, tokluğu ve aşınma direnci, işleme işlemleri sırasında sürekli olarak muhafaza edilmelidir. Kaplama teknikleri bu ihtiyacı karşılamak için potansiyel olarak umut verici bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, bu tip takımların ve iş malzemeleri arasındaki düşük sürtünme katsayısı nedeniyle kuru işlemeğe imkân sağlarlar. Kaplamalar aşınmaya karşı koymak, kimyasal aşınmaya karşı daha etkisiz olmak ve kaplama ana malzemesine iyi yapışabilme alt tabakalarda daha zordur (Childs *et al.* 2000).

Kaplanmış takımlar için, iyileştirilmiş yüzey kalitesi, uzun takım ömrü, takım aşınması ya da kırılmaları sonucunda hasar riskinin azaltılması bu iyileştirmelerle birlikte makinanın durma süresinde azalması sonucunda sürecin verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Aramacharoen vd. (2007), yaptığı çalışmada AlCrTiN kaplamalı tungsten karbür mikro frezelemede, daha az takım aşınması ve sertleştirilmiş kalıp çelikleri işlemede kaplamasız takımla işlenmiş yüzeylere göre daha iyi yüzey kalitesi elde edildiği ifade edilmiştir. Diğer bir çalışmada da (Aramcharoen *et al.* 2008) TiN, TiCN, TiAlN, CrN ve CrTiAlN kaplamaların sertleştirilmiş takım çeliklerinin mikro frezeleme işleminde, kaplamasız tungsten karbür takımlar ile performansını karşılaştırmışlardır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle kaplanmış takımların, kesme kenarı bozulmasının ve kenar yarıçapının aşınmasının azalmasının yanı sıra çapak boyutunu azaltmaya yardımcı olduğu ifade edilmektedir.

Mikro frezelemeler için elmas kaplanmış takımlar avantajlı ve umut verici olmaları nedeniyle, iş parçası malzemesinin takım yüzeyine yapışmasını ortadan kaldırarak, yüksek sertlik nedeniyle takım aşınmasını azaltan ve birçok malzemeye karşı düşük sürtünme katsayıları nedeniyle kesme kuvvetlerini azaltarak takım kanal tıkanmasını azaltabilecek kapasitededir (Heaney *et al.* 2008). Bu nedenle, mikro takımların ömrünü artırmak için elmas kaplamaların kullanılması yaygınlaştığı görülmüştür. Torres ve arkadaşları, sıcak filamentli bir kimyasal buhar biriktirme (CVD) işlemi kullanarak,

ince taneli elmas (FGD) ve nano kristalli elmas (NCD) filmlerini tungsten karbür mikro freze takımının ucuna başarıyla kaplamışlardır (Torres *et al.* 2009). FGD'nin tane büyüklüğü 0,5 ~ 1µm arasında iken NCD 0,1µm'den az olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir (Torres *et al.* 2009). Her iki kaplamalı takımın performansını, alüminyum 6061-T6 iş parçasının üzerinde kuru frezeleme işleminde küçük kanallar açarak incelemişlerdir. Kesici takımında düşük aşınma oranları ve gözle görülür bir yapışma olmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca Şekil 2.2'de kaplanmış takımın kuvvetlerinde, kaplamasız oranla önemli bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir (Torres *et al.* 2009).



Şekil 2. 2 FGD, NCD kaplanmış ve kaplamasız mikro freze takımlarını kullanarak el edilen kesme kuvvetleri (Torres *et al.* 2009).

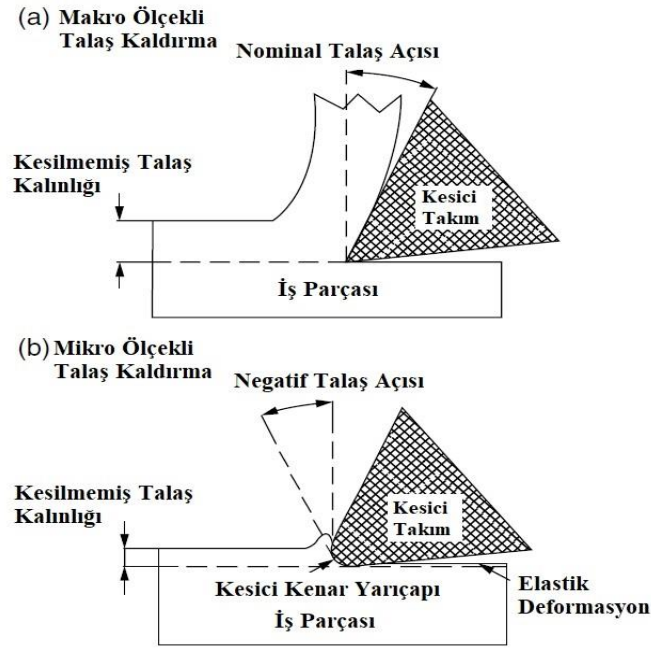
Heaney vd. (2008), mikro frezelemede alüminyum 6061-T6 iş parçası üzerindeki çalışmalarında FGD, NCD kaplanmış ve kaplamasız takımların üzerindeki etkileri incelemişlerdir. FGD kaplanmış takımlar için de benzer avantajlar olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, çalışmalarında, elmas kaplanmış, takımın kırıldığını gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni; alt tablanın iş parçasını bağlamadaki yetersizliği ve bunun sonucunda kuvvelerin artmasına neden olduğunu tespit edilmiştir. Elmas kaplamaların ömrünü artırmak için ve tungsten karbür üzerine kaplanmış takımların

yapışmasını iyileştirmek için daha fazla çalışmanın yapılması gerektiğini öngörmüşlerdir (Heaney *et al.* 2008).

2.1.3 Boyut Etkisi ve Minimum Talaş Kalınlığı

Geleneksel frezeleme ile mikro frezeleme her ne kadar benzerlik gösterse de iki talaş kaldırma işlemi arasında kaldırılan talaş kalınlığının farkı büyüktür. Mikro frezelemede asıl talaş kaldırma işlemi kesici takım kenar radyüsü yapmaktadır. Ancak konvansiyonel frezelemede talaş derinliği kesici kenar radyüsünden büyük olduğundan talaş kaldırma işlemi normal seyrinde devam etmekte ve düzgün bir talaş akışı oluşmaktadır (Vogler *et al.* 2004, Chae *et al.* 2006). Mikro frezelemede dış başına düşen ilerleme değerinin, kesici takım kenar radyüsüne oranı çok büyük önem sahiptir. Ayrıca talaş kaldırma esnasında takım kesme kenarı yarıçapı ile negatif eğim açısı, işleme esnasında yüzeyin elastik deformasyonu, minimum talaş kalınlığı gibi çok sayıda kritik sorun ortaya çıkmaktadır. Kesme kuvvetlerinin, talaş oluşum işleminin, çapak oluşumunun, titreşim ve işlem stabilizesinin, enerji tüketiminin, yüzey pürüzlülüğünün hepsinin birden etkilenmesi kesme mekanizmalarının etkilenmesine bağlıdır. Kesme mekanizmalarının etkilenmesi bir başka değişle boyut etkisi olarak adlandırılır.

Makro ölçekli talaş kaldırma işlemlerinde, kesilmemiş talaş kalınlığı genellikle takımın kesme kenarı yarıçapından daha büyüktür, bu nedenle kenar köşeleri ihmal edilebilir ve takımların keskin olduğu varsayılır. Ek olarak, etkili talaş açısı neredeyse nominal takım talaşı açısına eşittir. Bu durumda, malzemedeki talaş kaldırma yöntemi, temel olarak geleneksel kesme mekanizmalarının prensiplerine dayandığı söylenebilir. Kesilmemiş talaş kalınlığı, takımın kenar yarıçapı ile aynı büyüklükte olduğunda, takımlar artık keskin olarak kabul edilemez. Takımın keskinliğini kaybetmesinin nedeni talaş açısının negatife bir değer almasıdır. Kesici takım artık yüzeyden talaş kaldırmak yerine, iş parçası yüzeyinde sıkıştırma kazıma işlemi yapmaya başlar. Makro ölçekli ve mikro ölçekli talaş kaldırma işlemlerinde takımın iş parçasından talaş kaldırması Şekil 2.3'de şematik olarak gösterilmiştir. Kesilmemiş talaş kalınlığı talaş kaldırma sırasında, takımın kesici kenar yarıçapı belirli kritik bir değere düştüğünde, talaş oluşmaz ve bu değer minimum talaş kalınlığı olarak adlandırılır (Wu and Cheng 2013).

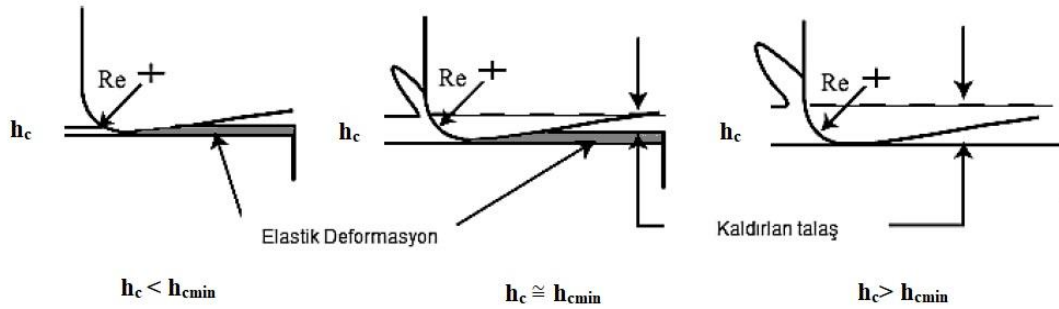


Şekil 2. 3 Kesici takımın iş parçasında talaş kaldırma şematik gösterimi (Wu and Cheng 2013).

Kesilmemiş talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığından daha küçük olduğunda, takımda sadece büyük negatif bir talaş açısı oluşmaz aynı zamanda iş parçasından sıkıştırma kazıma işlemi yapmış olur. Sıkıştırma kazıma işlemi ise iş parçası yüzeyinde elastik toparlanma yaparak işlenen yüzeyin pürüzlülüğünü ciddi anlamda bozduğu görülmüştür (Vogler *et al.* 2004). Bu kazıma olayının artan kesme kuvvetlerine ve çapak oluşumuna daha büyük özgül kesme enerjisine ve düşük yüzey kalitesine neden olduğu görülmüştür (Lee and Dornfeld 2004, Lucca *et al.* 1991, Ng *et al.* 2006).

Mikro frezeleme için, ticari olarak temin edilebilen kesici takımlar normal olarak fabrikasyon sınırlamaları nedeniyle kesme kenarı yarıçapları 0,8 μm ila 5 μm arasındadır. Takım çapının azaltılmasıyla, takımdaki radyal sapmada önemli hale gelmektedir. Artan radyal sapma takım kenarlarının dengesiz aşınmasına ve erken takım kırılmalarına neden olmaktadır. Mikro frezelemede ilerleme hızı düşük seçilerek, kesme kuvvetlerinin ve talaş yükünün azaltılması bir çözüm olarak görülebilir. Fakat ilerlemenin azalması, beraberinde kazınmanın oluşmasına da zemin hazırlayacağı unutulmamalıdır. İlerlemenin büyük seçilmesi, kazınmayı bertaraf edebilir ama talaş yükünü arttırdığı için takım kırılma riski de artar.

Minimum talaş kalınlığının etkisi mikro frezeleme işleminin iki deformasyon mekanizmasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunlardan ilki plastik deformasyondur ($h_c > h_{cmin}$), uniform talaş oluşumu meydana gelmektedir. İkincisi, elastik-plastik deformasyondur ($h_c < h_{cmin}$), düzgün bir talaş oluşumunun olmadığı takımın iş parçası üzerinden ovalama/kazıma işlemi meydana gelmektedir (Chae *et al.* 2006). (Şekil 2.10) Kesici takımın iş parçası üzerinde talaş kaldırmak yerine ovalama/kazıma yapması deformasyonun oluşmasına ve bunun sonucunda başka problemlerin çıkmasına neden olmuştur. Talaş kaldırma işlemi devam ettikçe deformasyonun sonuçları daha belirgin hale gelmektedir; bunlar, yüzey kalitesinin düşmesi, çapak oluşumunun artışı ve kesme kuvvetlerinin artışı olarak gözlemlenmiştir. (Yuan *et al.* 1996, Chae *et al.* 2006, Filiz *et al.* 2007).



Şekil 2. 4 Minimum talaş kalınlığının etkilerinin şematik gösterimi (Chae *et al.* 2006).

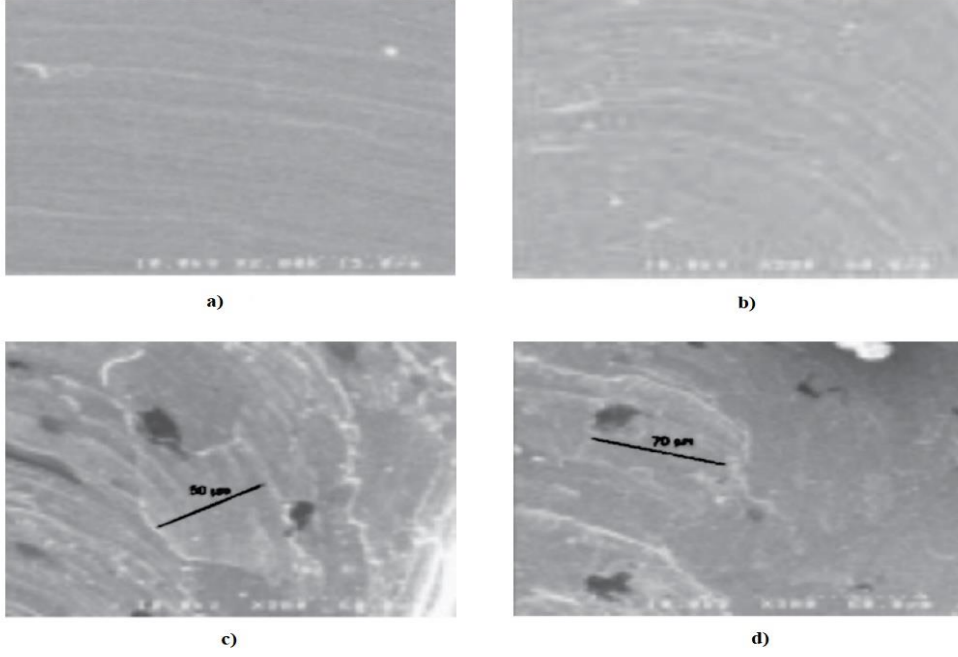
Mikro işlemede minimum talaş kalınlığını elde etmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya da devam etmektedir. Ancak minimum talaş kalınlığını elde etmek çok ta kolay değildir. (Şekil 2.4). Minimum talaş kalınlığının direk olarak elde edilmesi oldukça zordur. (Weule *et al.* 2001, Schmidt *et al.* 2002, Kim *et al.* 2002, Vogler *et al.* 2004a, Vogler *et al.* 2004b, Schmidt and Tritzler 2004, Kim *et al.* 2004). Vogler vd. (2004b), yaptığı çalışmada sonlu elemanlar metodu ile çelik malzeme üzerinde minimum talaş kalınlığının elde etmek için perlit malzemede kesici takım kenar radyüsü 0,2 ve ferrit malzemede kesici takım kenar radyüsünün 0,3 katı olduğu gözlemlenmiştir. Minimum talaş kalınlığı işlenen malzemenin özelliğine göre değişkenlik göstermektedir (Yuan *et al.* 1996). Mikro işlemede çeşitli iş parçalarının minimum talaş derinliğinin farklılığı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Liu vd. (2006) minimum talaş kalınlığı için iki farklı malzeme üzerinde (AISI 1040 ile Al 6082-T6)

deneysel çalışma yapmıştır. Çalışmalarında AISI 1040 çeliği için $h_{cmin}/R_e = 0,2-0,4$ arasında, Al 6082-T6 alüminyum malzemesi için ise; $h_{cmin}/R_e = 0,4$ oranlarını elde etmişlerdir (Liu *et al.* 2006).

2.1.4 İş Parçasının Mikro Yapısı ve Mikro Etkileri

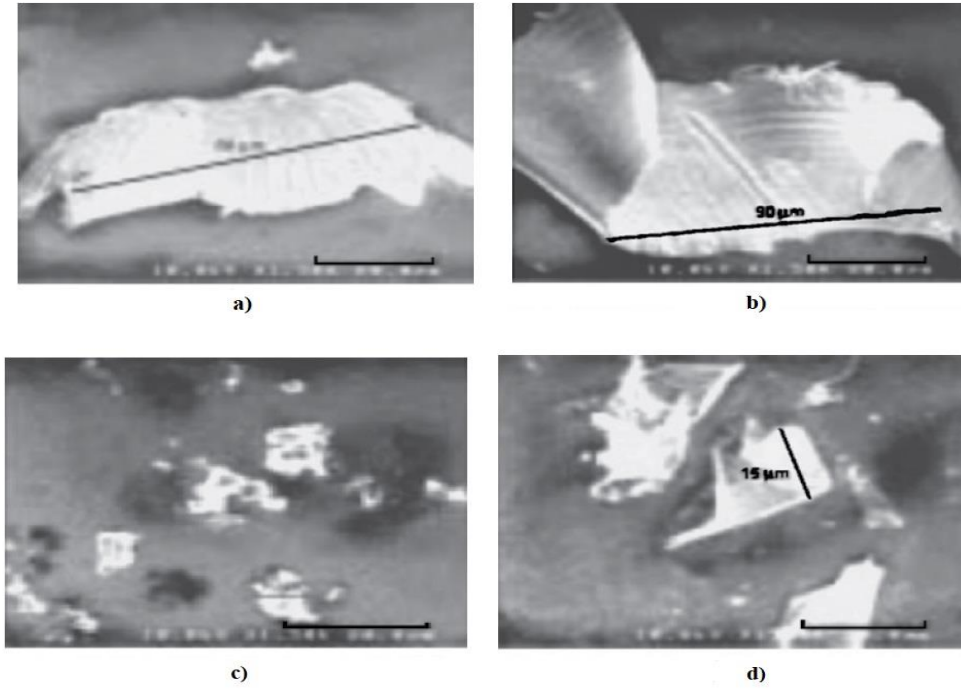
Geleneksel frezelemede, iş malzemeleri homojen ve izotropik olarak kabul edilir ve talaşlar büyük miktarda bir malzemenin kesilmesiyle oluşturulur. Bununla birlikte, mikro ölçekli talaş kaldırmada, kesilmemiş talaş kalınlığı ile iş parçasının ortalama tane büyüklüğü aynı/yakın ölçekli olur ve kesme tek bir tanenin parçalanması ile gerçekleştirilir. Bu durumda, iş parçasının mikro yapısı homojen olmayan ve anizotropik olarak kabul edilmesi çok yanlış olmayacaktır.

Malzemelerin mikro yapıları birbiri ile farklılık arzedeceğinden işleme sırasındaki kesme mekanizmaları ve etkileri de farklı olabilir. Araştırmacılar, mikro ölçekli işlemede, iş malzemesinin tane boyutu ve kristalografik yönelimi gibi mikro yapısının değiştirilmesinin kesme kuvvetini, talaş oluşumunu, yüzey pürüzlülüğünü ve çapak oluşumunu etkileyebileceğini bulmuşlardır (Yuan *et al.* 1994, Simoneau *et al.* 2006, Simoneau *et al.* 2007). Mikro frezeleme işlemlerinde iş parçasının malzeme özelliklerinin kesme kuvveti, yüzey kalitesi ve yüzey bütünlüğü üzerindeki etkilerini anlamak için çalışmalar yapılmıştır (Cheung *et al.* 2002, Min *et al.* 2006). Vogler vd. (2003), tek fazlı ve çok fazlı malzemelerin mikro frezelenmesinde, kesme kuvvetlerinin mikro yapı ile değişimini araştırmışlardır. Sfero dökümün mikro kesme deneylerinde kesme kuvvetlerinin yüksek frekans (7-12 kHz) bileşenlerinin varlığını gözlemlenmiştir. Ancak saf ferrit ve perlit demirinin işlemlerinde bu durum gözlemlenmemiştir. Bu durum, malzeme mikro yapısındaki tane büyüklüğüne ve ikincil faz boşluğuna bağlandı. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi tek fazlı ve çok fazlı mikro frezelenmiş yüzey işlemleri karşılaştırıldığında, çok fazlı sfero demirdeki mikro frezelenmiş yüzeylerin, tek fazlı ferrit ve perlitik iş parçalarındakinden çok daha pürüzlü olduğunu gözlemlenmişlerdir (Vogler *et al.* 2004a).



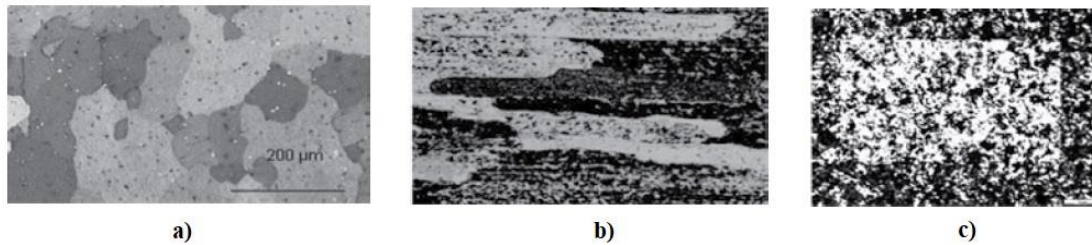
Şekil 2. 5 a) perlit, b) ferrit, c) için mikro frezelenmiş oluklu zemin yüzeyleri ferritik DI, d) perlitik DI (Vogler *et al.* 2004a).

Mikro frezelemede çok fazlı malzemelerin işlenmesi, süreksiz bir talaş oluşumu sürecine yol açar. Talaş oluşumunun süreksiz olması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olur. Yüzey pürüzlülüğünün artmasının nedeni ise faz sınırı etkilerinin bir sonucu olarak açıklanmıştır. Şekil 2.6’da mikro frezeleme tek fazlı ferrit ve perlit, çok fazlı ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demir malzemelerindeki karşılık gelen talaşlarına örnek gösterilmiştir.



Şekil 2. 6 a) perlit, b) ferrit, c) ferritik DI, d) pearlitik DI için mikro frezelenmiş talaşlar (Vogler *et al.* 2004a).

Schmidt vd. (2002), mikro frezelemede çelik malzemeler için yüzey kalitesinin değişimini araştırmışlardır. Malzemenin optimum kesme koşullarına ulaşması için talaş kaldırmadan önce mikro yapıda çok ince ve eşit derecede ısıl işlem görmesini önermişlerdir (Schmidt *et al.* 2002). Popov vd. (2006) daha homojen malzeme özellikleri elde etmek için Al 5083 parçalarının mikro yapılarını eşit kanallı açılı presleme (ECAP) ile değiştirmişlerdir. Şekil 2.7’de (CP) geleneksel işlemden önce ve ECAP işleminden sonra Al 5083’ün mikro yapılarını gösterir. ECAP işlem görmüş taneciklerin boyutunun, CP materyalinden beş kat daha küçük olduğu gözlenmiştir.



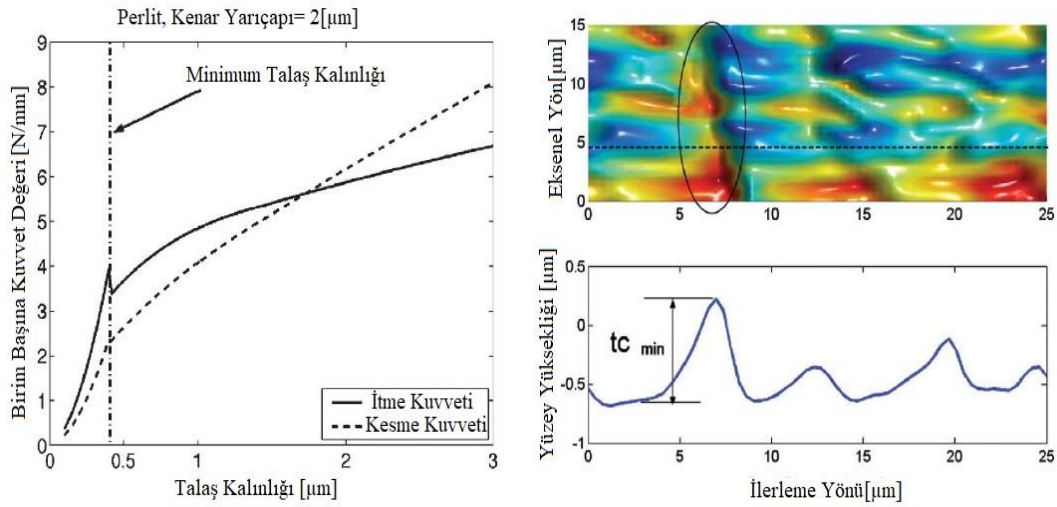
Şekil 2. 7 Al 5083’ün mikro yapıları: a) işlemden önce, b) konvansiyonel işlemden sonra, c) ECAP işleminden sonra (Popov *et al.* 2006).

Mikro frezelemede malzemenin kalitesinin yüzey bütünlüğü üzerindeki etkilerinin araştırılmasında, alüminyum alaşımlarının tane büyüklüğünün ve malzeme anizotropisinde azalma ile yüzey pürüzlülüğünün büyük ölçüde iyileştirilebileceğini bildirmişlerdir. Benzer bir çalışmada bakır malzemesi numunelerinin üzerinde yapılmıştır. Deneyleerde, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey kusurlarının araştırılması sırasında, malzemenin mekanik ve metalürjik özelliklerinin daha küçük tane büyüklüğü ve mikro taneler arasındaki sınır mesafelerinin azaltılması sonucunda yüzey kusurlarının önemli ölçüde azaldığını bulmuşlardır (Pham *et al.* 2009).

2.1.5 Mikro Frezelemede Kesme Kuvveti

Mikro frezelemenin en önemli etkenlerinden biride şüphesiz kesme kuvvetleridir. Geleneksel frezeleme ile mikro frezeleme konularında kesme kuvvetlerinin etki alanı çok geniş olduğu bilinmektedir. Çünkü kesme kuvvetleri her iki yöntemde de takım aşınmasına ve yüzey pürüzlülüğüne doğrudan etki etmektedir. Kesme kuvvetlerinin takımın ömrü ile doğrudan bağlantısı kurulabilir. Bao ve Tansel, Tlusty ve Macneil'in geleneksel modeline dayanan mikro frezeleme kuvvetlerinin tahmini için analitik bir model geliştirmiştir (Tlusty and Macneil 1975, Bao and Tansel 2000a). İşleme koşulları, takım geometrisi ve iş malzemesi, talaş kalınlığını, kesici takım ucunun yörüngesi dikkate alınarak, modele dahil etmişlerdir. Ek olarak, önerilen model ile geleneksel model arasındaki farklılıkları karşılaştırmışlardır. Daha sonra, takım bozulması ve takım aşınmasının etkilerini dikkate alarak modelleme çalışmalarını değiştirdiler (Bao and Tansel 2000b, Bao and Tansel 2000c). Aynı geleneksel kuvvet modeline dayanan Kang vd. (2007), takım kenarı yarıçapı etkileri göz önüne alındığında, kesme kuvvetleri modeli olan mikro takım frezeleme modelini ortaya koymuştur. Zaman vd. (2006) mikro frezeleme işlemleri için ilk üç boyutlu kesme kuvveti modelini oluşturmuşlardır. Kesilmemiş talaş kalınlığından ziyade takım dönme açısındaki değişkenliğin teorik talaş alanı ile birleştirilmiş ve öngörülen maksimum kesme kuvvetleri değerleri deneysel sonuçlarla eşleştirilmiştir (Zaman *et al.* 2006). Li vd. (2007), takım ucu takım aşınmasını ve minimum talaş kalınlığı etkilerini birleştiren üç boyutlu bir kuvvet modeli geliştirdi. Kesme kuvvetleri hesaplamalarında anlık kesilmemiş talaş kalınlığı algoritmalarını hesaplamak için kullanmışlardır (Li *et al.* 2007). Jun vd. (2006a,b), mikro frezeleme işleminde hem talaş kaldırma hem de kazıma kesme mekanizmalarını

dikkate alan dinamik bir kesme kuvveti ve titreşim modeli geliştirmiştir. Talaş kalınlığı modelinde, takıma yapışan talaşın kenar üzerindeki etkisi ve minimum talaş kalınlığının, elastik toparlanmanın ve elastik-plastik yapının etkilerini dikkate alınmıştır. Şekil 2.8’de talaş kalınlığının minimum talaş kalınlığından küçük olduğunda durumlarda kesme kuvvetlerinin artış oranının çok daha yükseldiği açıkça tespit etmişlerdir (Liu *et al.* 2004b, Liu *et al.* 2006).



Şekil 2. 8 Yüzey oluşumu ve kesme kuvvetlerinin üzerindeki etkisi (Liu *et al.* 2004b, Liu *et al.* 2006).

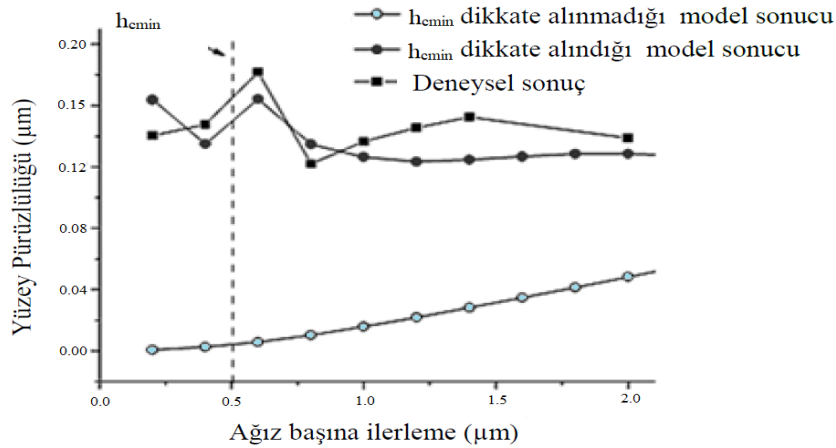
Takımın dönme sırasındaki eksen kayması yani salgının da kesme kuvveti üzerindeki olumsuz etkileri olabilir. Takımın dönme sırasında iş parçasına yaklaşınca salgıdan dolayı bir ağzın talaş kaldırdığı diğer ağzın talaş kaldırmadan elastik plastik olarak malzeme üzerinde deformasyon oluşturduğu görülmüştür. Takım ilerledikçe bir ağıza düşen kesilmemiş talaş miktarı fazla olmasından takımın bir kenarına fazla yük binmekte ve takımın bir tarafı çok aşınırken diğer kesici kısmı çok aşınmamaktadır.

2.1.6 İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğü ve Doğruluğu

Geleneksel frezeleme işlemlerinde daha kaliteli bir yüzey elde etmek için son posada az talaş derinliği, takım dönüş hızının yükseltilmesi yani devir yükseltme ve normalden az ilerleme miktarı verilerek düzgün bir yüzey elde edilebilir. Bu işlemin üzerine farklı işlemler (taşalama gibi) uygulanarak çok kaliteli bir yüzey elde edilebilir. Ancak mikro

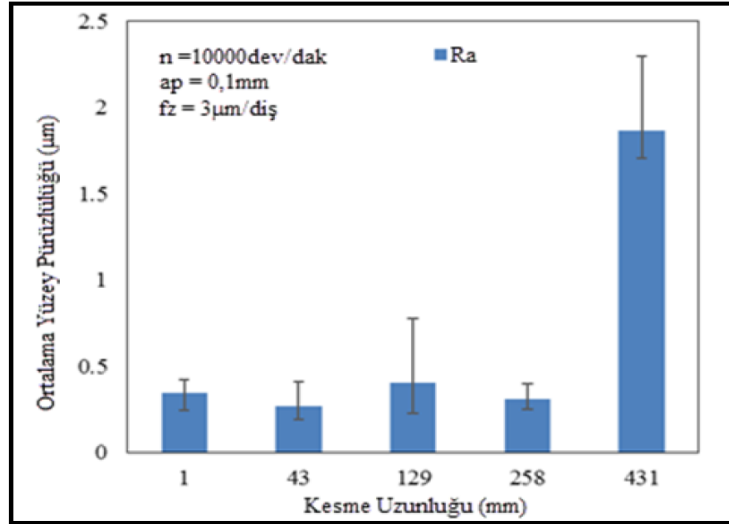
frezeleme işlemlerinde iş parçasının küçüklüğü sebebi ile farklı işlemlerin uygulanması zordur. İş parçası küçük ve karmaşık bir geometriye sahip olması durumunda, yalnızca mikro frezeleme işlemi ile yetinmek zorunda kalınmamaktadır. Bu durum mikro frezeleme işlemlerinin yüzey pürüzlülüğü alanında daha çok araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılmasını zorunlu kılmıştır.

Mikro frezelemede işlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğünün kalitesi birçok parametreye bağlıdır. Takım iş parçasından talaş kaldırma esnasında diş başına düşen ilerleme değeri, kesme hızı, devir sayısı, kesici kenar yarıçapı, takım talaş derinliği, takım aşınması, takım çapı ve kesici takımın salgısı gibi birçok parametre yüzey kalitesini olumlu ya da olumsuz olarak etkileyebilmektedir. Takımın diş başına düşen ilerleme miktarının minimum talaş kalınlığı değerinden büyük olduğunda yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür (Yuan *et al.* 1996, Vogler *et al.* 2004). Yüzey pürüzlülüğü ile ilgili bir çalışmada da minimum talaş kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin büyük olduğu vurgulanmıştır (Rahman *et al.* 2001). Başka çalışmalarda minimum talaş kalınlığına bağlı yüzey pürüzlülüğü modelleri geliştirilmiştir (Vogler *et al.* 2004, Li *et al.* 2008). Şekil 2.19'da elde edilen grafiğin minimum talaş kalınlığının altındaki ilerleme değerlerinde yüzey kalitesini olumsuz etkilediği görülmüştür.



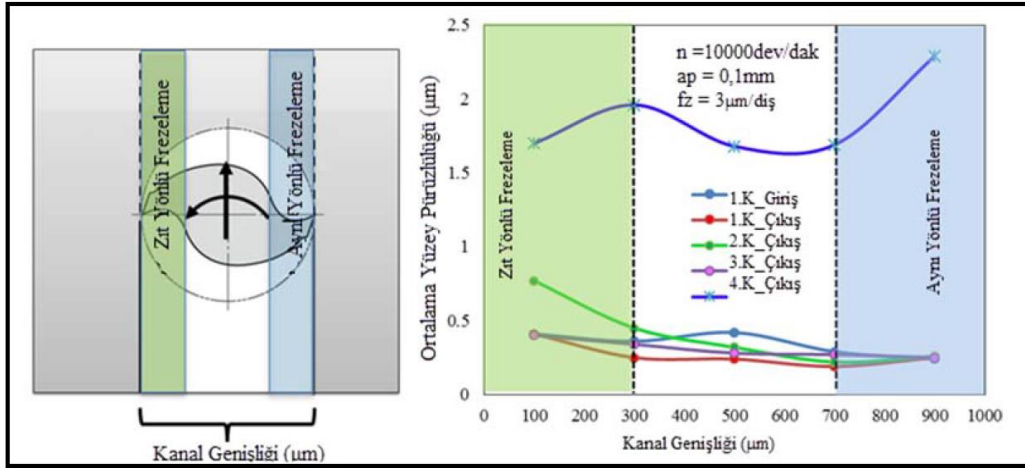
Şekil 2. 9 İlerleme değerinin minimum talaş kalınlığından küçük ve büyük olduğunda yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Li *et al.* 2008).

Bunlara ek olarak minimum talaş kalınlığı altındaki ilerleme değerlerinde yapılan kesme işlemleri yüzeyde kazınmaya neden olduğu tespit edilmiştir (Vogler *et al.* 2004). Kesme uzunluğu arttıkça kesici takım kenar radyüsü bozulmakta ve takım aşınmasının artışı devam etmektedir. Buna bağlı olarak kazıma işlemi yapan takımın ise yüzey pürüzlülüğüne olumsuz etkilediği görülmektedir (Aslantaş *et al.* 2016a, Şekil 2.10).

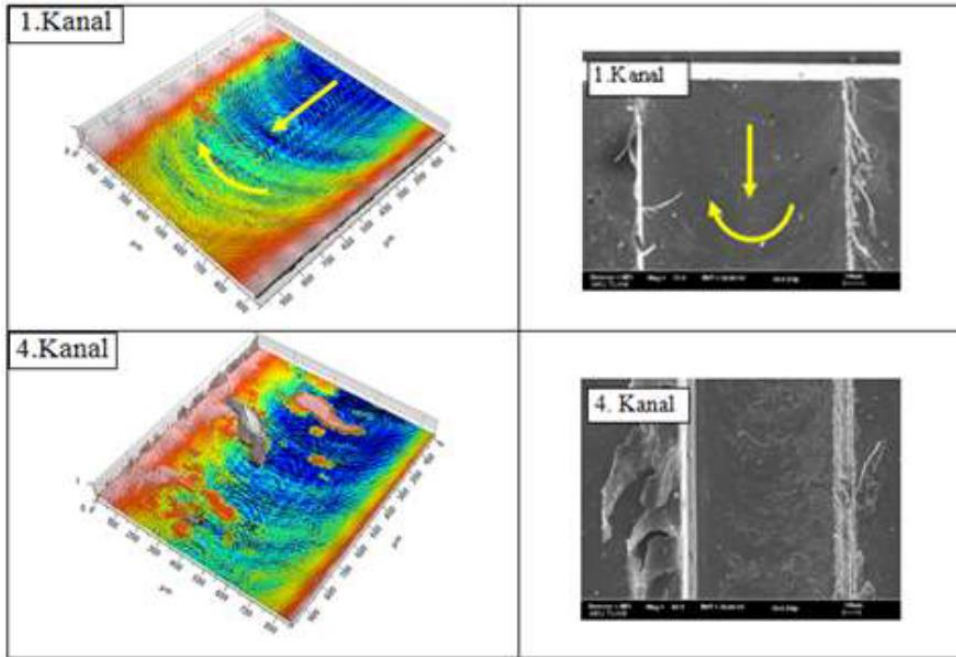


Şekil 2. 10 Kesme uzunluğunun ilerledikçe ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Aslantaş *et al.* 2016a).

Bu sonuçların tersine bazı çalışmalar ve tespitler de olduğu bilinmektedir. Yani aşınmanın olumlu bir etkisi olduğu yüzey kalitesini arttırdığı görülmüştür (Schmidt and Tritschler, 2004, Filiz *et al.* 2007, Li *et al.* 2008). Mikro takımda meydana gelen çevresel aşınmalar yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemekte, ancak takımdaki aksel aşınmalar ise kesme radyüsünü azalttığı için yüzey pürüzlülüğüne olumlu etki yapmaktadır. Yukarıdaki iki zıt görüşün nedeni aksel ve çevresel etkilerin ortalama yüzey pürüzlülüğüne olumlu ya da olumsuz etki yapmasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Aslantaş vd. (2016a) yaptığı çalışmada, ortalama yüzey pürüzlülüğünün kanal genişliği boyunca frezeleme yönüne (zıt-aynı) göre artışını gözlemlenmişlerdir (Şekil 2.11, Şekil 2.12).



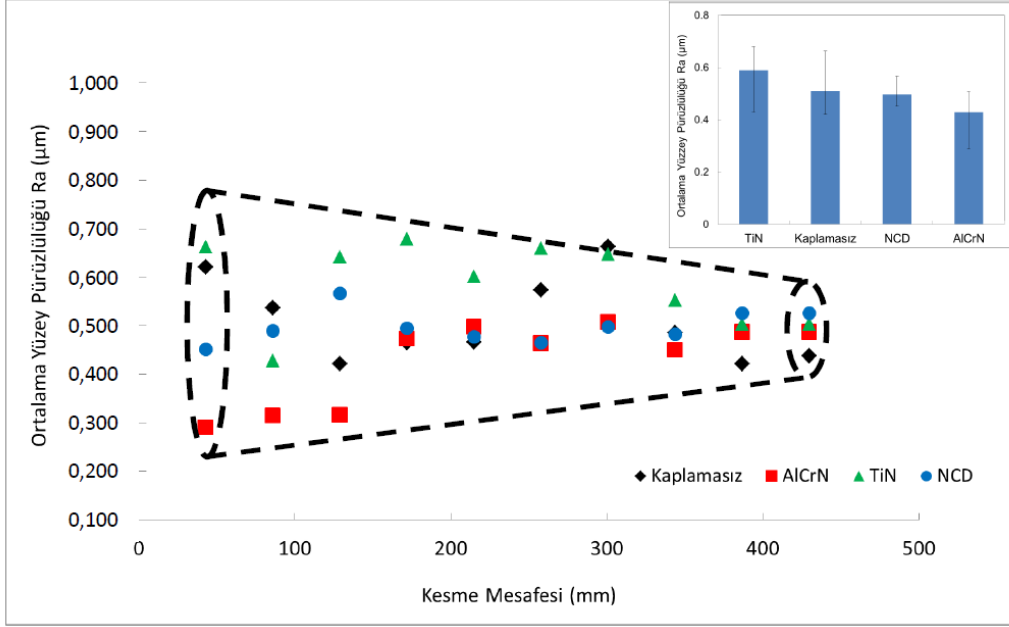
Şekil 2. 11 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün kanal genişliği boyunca frezeleme yönüne (zıt-aynı) göre artışı (Aslantaş *et al.* 2016a).



Şekil 2. 12 İlk ve son (4cü) kanalların kesme uzunluğuna bağlı olarak yüzey kalitesi ve topografyaları ve SEM görüntüleri (Aslantaş *et al.* 2016a).

Mikro frezeleme işleminde kaplama malzemesinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisi de en çok çalışılan konular arasındadır. Kesme mesafesi ile kaplamalı ve kaplamasız takımların ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri Şekil 2.13’de gösterilmiştir. Çalışmada dikkati çeken kısım kanal giriş ve çıkışlarında ortalama yüzey pürüzlülüğündeki (Ra) ani değişimler gözlemlenmektedir. Bu ani değişimler kesme

mesafesine bağı olarak kesici takımında meydana gelen aşınma ve talaş yapışması olarak yorumlanmıştır (Hopa 2016).

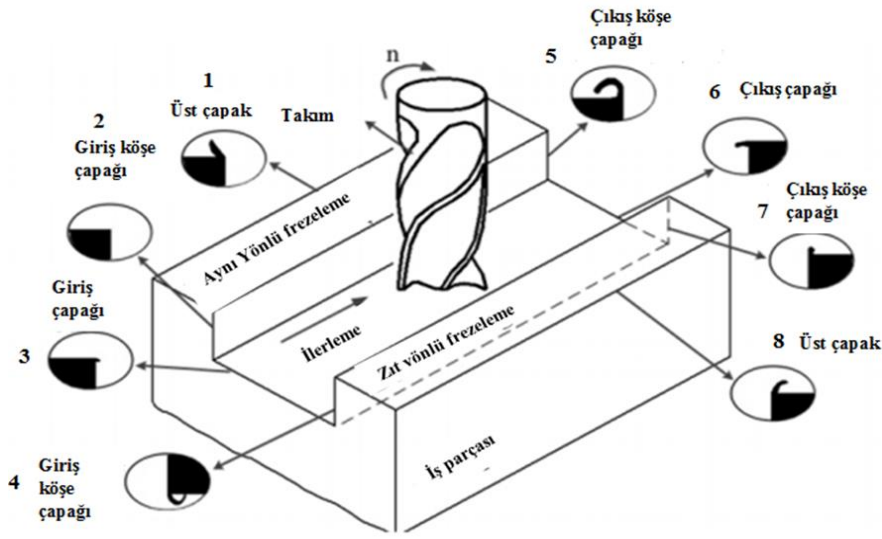


Şekil 2.13 Kesme mesafesine ve kaplamalı-kaplamasız takımların türüne bağı olarak Ra değışimi (Hopa 2016).

2.1.7 Mikro Frezeleme Sonrası Çapak Oluşumu

Konvansiyonel frezeleme işleminde parça alanının büyük olması ve ekstra işlemlerin çeşitliliği nedeni ile yüzeyde oluşan çapakların yüzey pürüzlülüğü açısından çok büyük öneme sahip değildir. Çünkü ek işlemler (son paso veya lebleme) oluşan çapakların yüzeyden kaldırılmasında gayet kolay ve başarılı olduğundan geleneksel işleme bu konu büyük bir sorun olarak çok öne çıkmamıştır. Mikro frezelemede parça alanının küçük olması ve ek işlemlere imkân vermemesinden dolayı yüzey pürüzlülüğü gibi çapak oluşumu konusu da büyük öneme sahiptir. Çapak oluşumu sorunun giderilmesinde yüzey alanının elverişsizliği ve maliyet-zaman konusu büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Lee and Dornfeld 2005, Chae *et al.* 2006, Filiz *et al.* 2007). Bu nedenle mikro işlemeye başlamadan önce çapak oluşumunu dikkate alarak en aza indirgeyecek ve takım aşınmasını tetikleyecek etkenleri iyileştirme üzerine prosesi kurgulamak gerekmektedir (Lee and Dornfeld, 2005, Venkatesh *et al.* 2016). Çapak oluşumunu tetikleyen unsurların en başında kesme parametreleri ve takımın aksenel

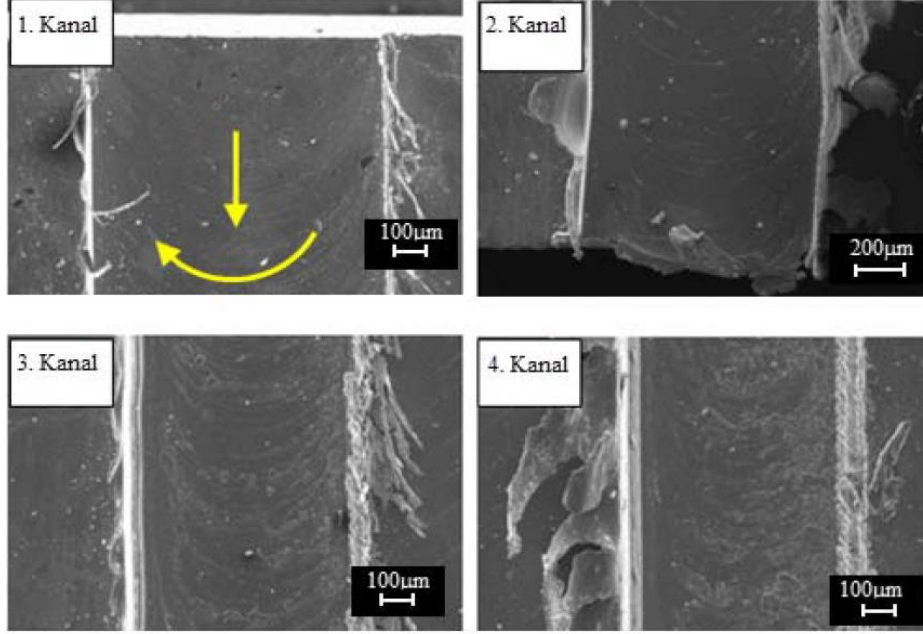
sapmadan dolayı aşınarak yüzeyde çapak oluşturması gelmektedir (Schmidt and Tritschler 2004, Lee and Dornfeld 2005, Litwinski *et al.* 2006, Chern *et al.* 2007). Mikro frezeleme için takımın iş parçası üzerinde giriş-çıkış ve kesme yönüne göre çapak şekil ve boyut farklılıkları göstermektedir. İş parçası kanal giriş ve çıkışlarında farklı çapak boyutları meydana gelmektedir (Kou *et al.* 2015, Şekil 2.14). Ayrıca işlenen kanal kenarında meydana gelen çapak şekli ise çapak yükseklik ve genişliği olarak tanımlanır.



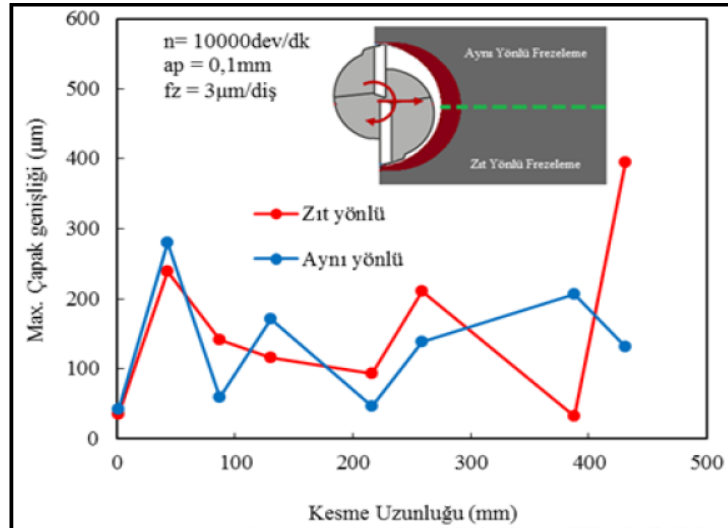
Şekil 2. 14 Mikro frezeleme işleminde oluşan çapak tipleri (Kou *et al.* 2015).

Kenar radyüsünün aşınma etkilerinden biri olan çevresel ve eş zamanlı olarak aksel aşınmadan kaynaklanan negatif bir talaş açısı meydana gelmektedir. Negatif açığa sahip olan takım ise istenmeyen çapak oluşumuna katkı sağlamaktadır (Schaller *et al.* 1999, Fang *et al.* 2004). Mikro frezelemede devir sayısının yüksekliği ve kesme mesafesinin büyüklüğü takım aşınmasını arttırmakta bu ise istenmeyen çapak oluşumuna katkı sağlamaktadır. Takımın iş parçası üzerinde kesme işlemi yerine kazıma işlemi yapmasının nedeni; takımındaki abrasif aşınmadır. Bu aşınma türü, takım kenar radyüsünün artmasına neden olmakta ve takım kesme kabiliyetinin kaybettiği için kazıma işlemi yapmaktadır. İşlenen parçanın kanal dip kenarlarında çapak oluşumunun artmasına neden olmaktadır. Bir çalışmada araştırmacılar Inconel 718'i iş malzemesi olarak belirlemişlerdir, kesme uzunluğunun artması ile çapak genişliğinin dalgalı bir grafik oluşturduğunu gözlemlemişlerdir (Aslantaş *et al.* 2016a, Şekil 2.15). Grafiğin

dalgalı bir şekil oluşturmasının nedeni olarak, çevresel ve aksel aşınmaya maruz kalmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonunda aksel aşınmanın çapak boyutunda azalma olduğunu, ancak zıt yönlü frezelemede ise çapak boyutunun en fazla olduğunu belirtmişlerdir (Aslantaş *et al.* 2016a, Şekil 2.16).

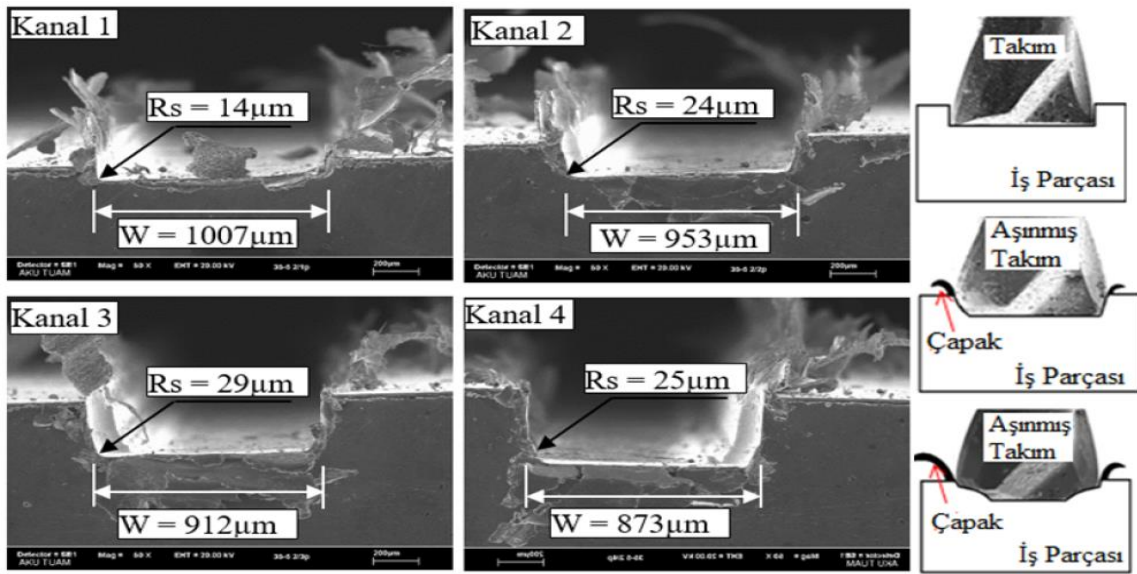


Şekil 2. 15 Çapak genişliğinin kesme uzunluğuna bağlı olarak her kanaldaki çapak boyut farklılığının SEM görüntüleri (Aslantaş *et al.* 2016a).



Şekil 2. 16 Çapak genişliğinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi ve her kanaldaki çapak boyutu SEM görüntüleri (Aslantaş *et al.* 2016a).

Abrasif aşınma çapak genişliklerini artmasına ve buna bağlı olarak iş parçası geometrisinin bozulmasına neden olmaktadır (Aslantaş *et al.* 2016a). Takımdaki çevresel aşınma, takım çapının azalmasıyla birlikte işlenen kanalın genişliğinin azalmasını beraberinde getirmektedir. Kesme uzunluğunun artması ile takım kenar radyüsündeki arttığı eş zamanlı olarak, iş parçası kanal kenar radyüsünde arttığı görülmüştür. Bunların da dışında takımın belirli bir kesme uzunluğundan sonra eksenel aşınma ile birlikte takım kenar radyüsünün de azaldığı ve eş zamanlı olarak da kanal kenar radyüsünde de azalma olduğu görülmüştür (Aslantaş *et al.* 2016a, Şekil 2.17).



Şekil 2. 17 Mikro işlemede takım aşınmasının çapak oluşumuna ve işlenen kanalın geometrisine etkisi (Aslantaş *et al.* 2016a).

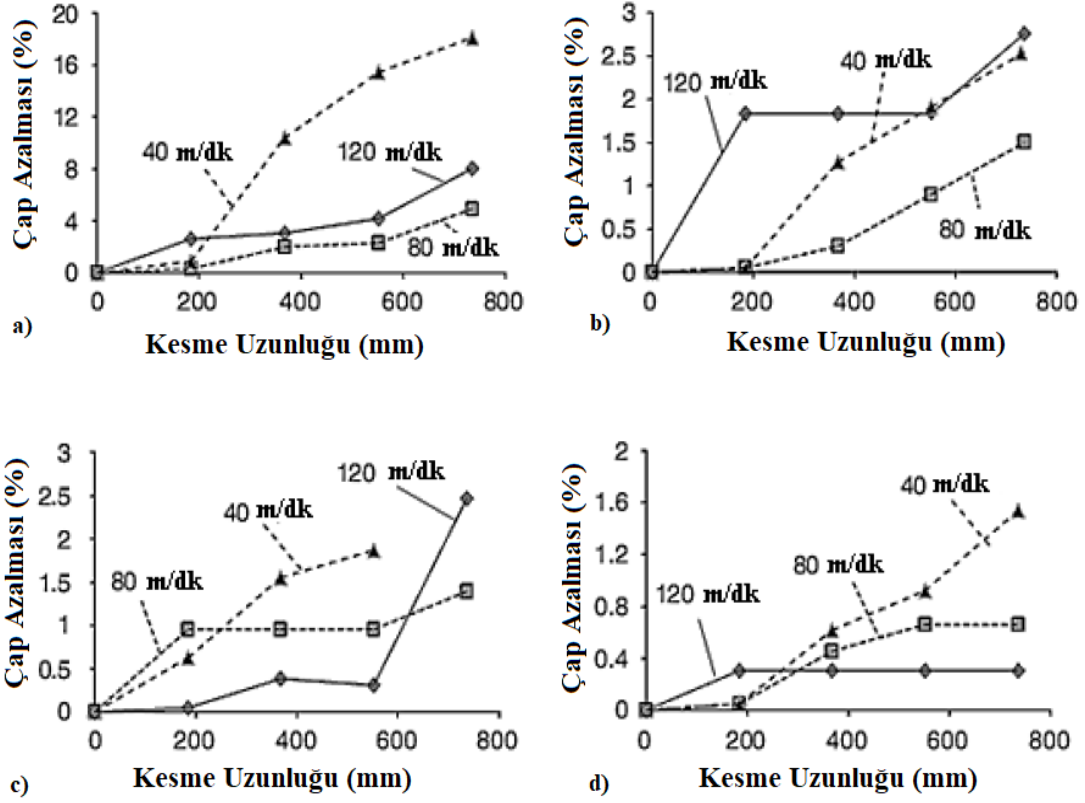
Ayrıca başka bir çalışmada farklı sertliklere sahip malzemelerin işlenmesinde, sert malzemedeki çapak oluşumunun, yumuşak malzemelere göre daha fazla olduğu ve sert malzemelerde takım aşınmasının kesme boyunca, yumuşak malzemeye göre çok daha fazla aşındığını gözlemlemişlerdir (Weule *et al.* 2001, Şekil 2.18).



Şekil 2. 18 Farklı iş malzemelerinin çapak oluşumuna etkisi (Weule *et al.* 2001).

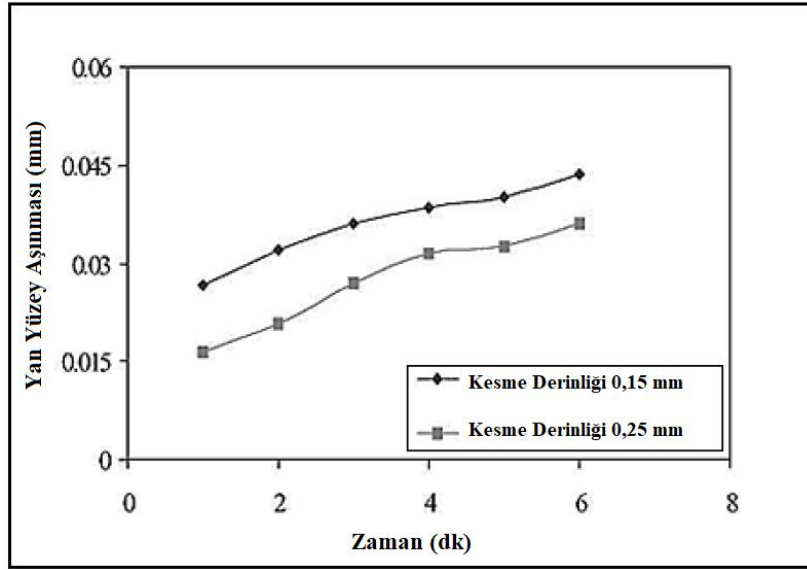
2.1.8 Mikro Takımların Hasar Mekanizmaları

Konvansiyonel frezeleme ile mikro frezeleme işlemlerinde boyut farkından dolayı kesme parametreleri ve takımın üzerine gelen etkilerde farklı olduğundan takım ömürlerinde farklılık göstermektedir. Mikro frezeleme de minimum talaş derinliğinin altındaki işlemlerde her zaman düzgün bir talaş oluşmadığı için takım genelde kazıma işlemi yapmaktadır. Bu kazıma işleminde kesme kuvvetleri arttığından, artan kuvvetler takımın ömrünün kısılmasına katkıda bulunmaktadır (Liu and Mittal 1996, Rahman *et al.* 2001, Xiao *et al.* 2003, Filiz *et al.* 2007). Ayrıca benzer bir çalışmada düşük ilerleme hızlarında takım aşınmasının daha fazla arttığı ve büyük ilerleme hızlarında düzgün bir gerilme dağılımı olduğundan takım aşınmasının yavaşladığı görülmüştür. Bunun sebebi kesme kuvvetlerinin düşük ilerleme hızlarında arttığı, büyük ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür (Filiz *et al.* 2007, Şekil 2.19). Yapılan bu çalışmada işlenen malzeme oksijensiz yüksek iletkenlik bakır olarak seçilmiştir (Filiz *et al.* 2007, Şekil 2.19).



Şekil 2. 19 Fark ilerleme hızlarında aşınmaya bağlı olarak kesici takımında oluşan çap değişimi a) 0,75 µm/diş b) 1,5 µm/diş c) 3 µm/diş d) 6 µm/diş (Filiz *et al.* 2007).

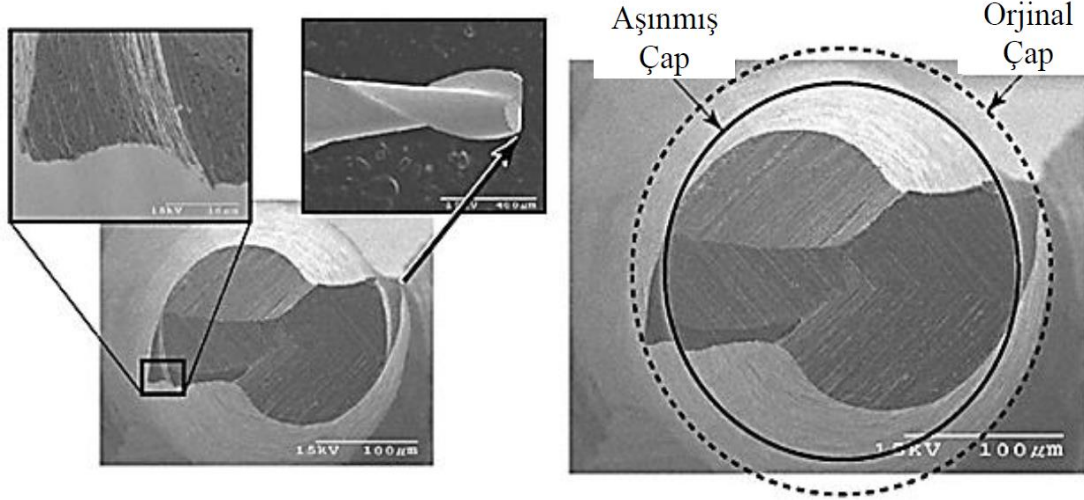
Hasar mekanizmaları üzerine başka bir açıyla yaklaşan araştırmacılarda olmuştur. Bakır bir malzeme üzerine yapılan bir çalışmada küçük kesme derinliğinde takımda 0,15 mm aşınma miktarı ile büyük kesme derinliğinde 0,25 mm aşınma miktarı oluştuğu görülmüştür. Küçük kesme derinliğinin büyük kesme derinliğine göre takımında daha hızlı aşınma oluştuğu ve bu aşınmanın takımın talaş yüzeyinden hemen uzaklaşmamasından takıma fazladan bir yük geldiğine bağlamışlardır. Ayrıca takım aşınmasının kesme derinli ve takım helis açısına göre değişkenlik gösterdiğini belirtmişlerdir (Rahman *et al.* 2001, Şekil 2.20).



Şekil 2. 20 Kesme derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi (40 m/dk. kesme hızı ve 350 mm/dk. ilerleme hızı kesme şartlarında) (Rahman *et al.* 2001).

Kaplanmış kesici takımlar kullanılarak yapılan bir çalışmada, takım ömrü tahmin edilmeye çalışılmıştır. Deneylerin sonucunda kaplanmış kesici takımın kesme kenarında büyük bir yan yüzey aşınmasının oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Parkash *et al.* 2001). Makro frezelemede ISO 3685 standardına göre takım aşınmasının sınırları çizilmiştir. Ancak makro frezelemede olduğu gibi mikro frezelemede bu gibi bir standart ve sınır verilmemiştir. Sonuç olarak mikro takımın aşınmasının bir standardı olmadığı için aşınmanın göreceli bir kavram olduğunu söylemek mümkündür. Mikro frezeleme işleminde çoğunlukla takımın ömrü ani kırılmalarla sonuçlandığı görülmüştür. Takımdaki ani kırılmanın sebebi kesici kenar ve uç bölgelerinin aralıklı olarak tekrarlı yüklere maruz kalması, görülmektedir (Li and Guan 2004). Takımın ani kırılması, imalat sürecini yavaşlattığı gibi, kırılan takımın minyatür parça yüzey hassasiyetini büyük ölçüde bozmaktadır. Kesici takım çapının azalması ve kenar radyüsündeki artış aşınmanın bir sonucudur (Liu *et al.* 1996, Xiao *et al.* 2003, Filiz *et al.* 2007) (Şekil 2.29). Takımdaki boyutsal ve açısal değişiklikler iş parçasına da yansımaktadır. Takım çapının küçülmesinin iş parçası üzerindeki ölçülerinde küçülmesine ve kenar radyüsünün artışı iş parçasının geometrisinin bozulmasına neden olmaktadır (Liu *et al.* 1996, Xiao *et al.* 2003, Filiz *et al.* 2007, Şekil 2.21). Aynı zamanda kesici kenar radyüsünde artış minimum talaş kalınlığındaki değerin değişmesine neden olacaktır. Mikro frezelemede kesme işleminin başlangıcında takımın kenar radyüsü pozitif açılı iken işleme sonuna

doğru kesici kenar radyüsünün negatif bir açu oluşması, istenmeyen bir durum ola talaş oluşumuna katkı sağlamaktadır. (Schaller *et al.* 1999, Fang and Liu 2004).



şekil 2. 21 Mikro işlemede aşınmaya bağlı olarak kesici takım çapındaki değişimi (Filiz *et al.* 2007).

Bu konu üzerinde farklı yöntemler kullanarak çalışma yapanlarda mevcuttur. Ses dalgaları ile akustik emisyon ve titreşim sinyallerini kullanarak kesme kuvvetlerinin değişimi araştırılmıştır (Noori-Khajavi and Komanduri 1995, Lin and Ting 1999, Choudhury and Rath 2000, Lee *et al.* 2006, Jemielniak and Arrazola 2008). Ayrıca başka bir çalışmada akustik emisyon sinyalleri ve titreşim rezonansının kesme kuvveti üzerinde etkileri üzerine çalışmalarda yapılmıştır (Jemielniak and Arrazola 2008). Buna benzer bir çalışmada çelik ve alüminyum iş malzemeleri üzerinde kesme kuvvetlerinden farklı sinyaller elde etmişlerdir. Alüminyum işlenmesi sırasında kesme kuvvetleri düzgün artarken, çelik malzemede kesme kuvvetleri ani bir sıçrayış yaptığı görölmüştür. Çünkü alüminyumda takım düzgün bir şekilde aşınırken, çelik malzemede ani bir kırılma gözlemlenmişlerdir (Tansel *et al.* 2000).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 İş parçası ve Kesici Takım Özellikleri

Bu çalışmada, otomotiv, uzay, havacılık, silah ve savunma sanayi alanında kullanılan hafif, sünek ve yüksek mukavemetli bir malzeme olan Al 7075-T6 alaşımı kullanılmıştır. Bu amaçla, kuru kesme şartları altında, mikro frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımları seri numaralarından sonra bazı harflerle işlem durumlarını göstermektedir. Bununla birlikte kendi serilerinin içinde alaşım içerikleri farklı alaşım elementleri de içerebilirler (Nam and Lee 2000). 7XXX serisi alaşımlar içeriğinde çinko, bakır, düşük oranda magnezyum, krom ve zirkonyum alaşım elementleri bulundurduğundan, alüminyum alaşımları içerisinde mukavemeti en yüksek alaşım serisidir. Alüminyum alaşımlarının yanında gösterilen harflerden T ısıtılma işlemi görmüş anlamına gelmektedir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtılma işlemleri T harfi ile birlikte 1 ile 10 arasında yer alan sayı yazılarak gösterilir. Örneğin T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9 ve T10 şeklinde gösterilmektedir (Savaşkan 2018). Alüminyum 7XXX alaşımının çözündürme işleminden sonrası yapay yaşlandırılmış halindeki malzemesi T6 harfi ve sayısı ile yazılarak karşılanmaktadır. Alüminyum 7075 alaşımlarında sertlik değerinin en yüksek olduğu değer T6 ısıtılma işlem şartlarında edebilmektedir (Özyürek ve Kibar 2012). Çalışmada kaplamasız takımların yanı sıra elmas kaplanmış mikro takımlar da kullanılmıştır. İş malzemesi olarak seçilen Al 7075-T6 alaşımının bazı kimyasal özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

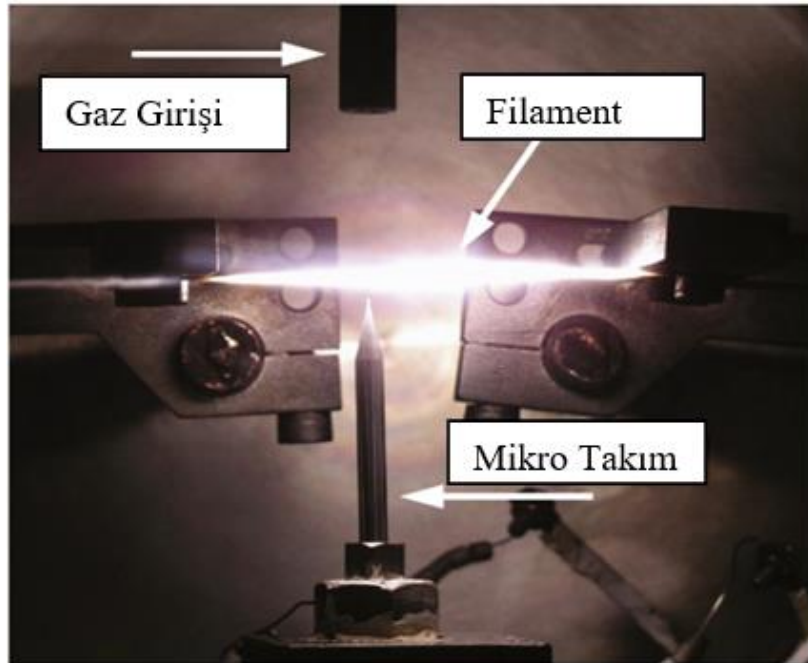
Çizelge 3. 1 Al 7075-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%), (İnt. Kyn. 16).

Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Ti	Mn	Cr	Diğer Toplam
87,1-91,4	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	0,5	0,4	0,2	0,3	0,18-0,28	0,155

Çizelge 3. 2 Al 7075-T6 alaşımına ait mekanik özellikler (İnt. Kyn. 16).

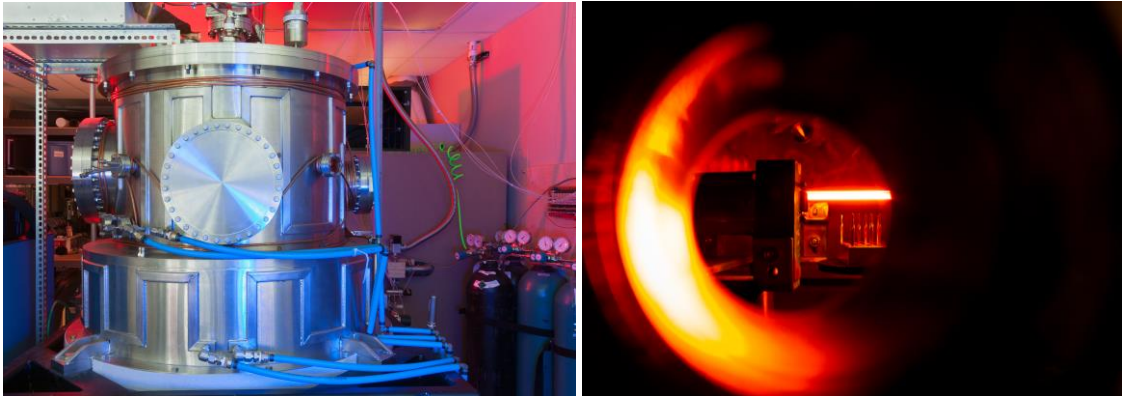
Sertlik (HV)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama %	Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (g/cm ³)
175	572	503	11	130	2,81

HF-CVD sistemi, gazların en az 1800 ° C'lik sıcaklıkta, vakumlu (taban basıncı $\sim 10^{-3}$ Torr (0,000133 Pa)) tutulan bir odada, sıcak tungstenin (W) beyaz filamentin üzerine aktığı bir ortamdan oluşur. Mikro takım, bir takım tutucuya monte edilir ve filamentin 5 mm altına yerleştirilir. Filamentte üretilen hidrokarbon radikallerinin serbest kalan boş bir yol içinde mikro takım filament tarafından radyal olarak ısıtılır. Oda daha sonra boşaltılır ve gaz akışı sırasında ~ 30 Torr (~ 4 Pa)'da basınçta tutulur. Fazla olan giriş gazları hidrojen (H₂) ile özellikle metan (CH₄) karışımı, ~ 2000 ° C'ye ısıtılan filament üzerinden geçirilir. Sıcak filament, H₂'yi atomik hidrojen (H °) ve CH₃'ü hidrokarbon türlerine (her ikisi de olabilir C₂H₂ veya CH₃) ayrıştırır. Bu hidrokarbon türleri, substrat (alt katmanlar) üzerinde grafit ve amorf karbon formunda yoğunlaştırılmış olur (Chang *et al.* 2003, Heaney *et al.* 2008).



Şekil 3. 1 Sıcak filament kimyasal buhar biriktirme (HF-CVD) odasının görüntüsü (Heaney *et al.* 2008).

Atomik hidrojen, elmas olmayan bileşenleri biriktiklerinden daha hızlı aşındırır. Elmas kaplama, karbon türleri, hidrojen çekimi reaksiyonu yoluyla ekilerek elmas çekirdeğine bağlandıkça büyümektedirler. Biriktirme, çekirdeklerin sürekli bir kaplama oluşturarak birlikte büyümesine izin verecek kadar uzundur. Çekirdeklenme yoğunluğu kritik öneme sahiptir. Çekirdeklenme yoğunluğu büyük olan çekirdekler birleşmeden önce büyümek için daha dar bir mesafeye sahiptirler, buda daha ince sürekli kaplamanın oluşmasını sağlamaktadır. Çekirdeklenme yoğunluğu küçük olan çekirdekler daha büyük bir mesafeye sahiptir ve daha kalın bir kaplama ile sonuçlanmaktadır. Takımın düzgün bir elmas biriktirme işlemi için uygun sıcaklığın olması kritik öneme sahiptir. Filamentlerin en az 1800 ° C olması önemlidir. Çünkü bu sıcaklıkta filamentlerin H₂ ve CH₄ gazlarını ayrıştırabildiği sıcaklık olarak tespit edilmiştir. Ancak takım üzerinde sıcaklığın elmas gelişimi için ayrı bir önemi vardır. Takım üzerine uygun elmas kaplamanın olması için takım sıcaklığının (~925 ° C) olması yeterlidir (Jackson *et al.* 2003, Jackson *et al.* 2005, May *et al.* 2006, Heaney *et al.* 2008, Şekil 3.2).



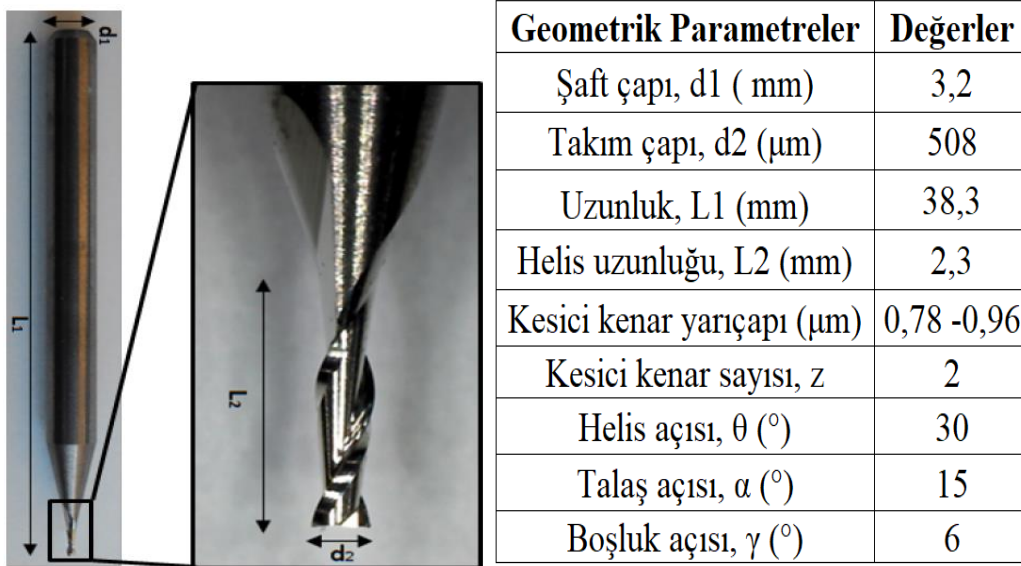
Şekil 3. 2 Kaplamanın yapıldığı sistem ve kaplama sırasında alınan bir görüntü (İnt. Kyn. 18).

Bu çalışmada, iki kesici ağızlı 508 µm çapında elmas kaplanmış ve kaplamasız mikro takımlar kullanılmıştır. Kaplamasız mikro takımlar Performance Micro Tool (PMT) tarafından imal edilmiş, kaplanmış diğer takım ise NCD (nano kristalli elmas) ile kaplanmış olan takımların kaplama işlemi NCD Technologies tarafından yapılmıştır. NCD kaplamalar kimyasal buhar biriktirme (HF-CVD) ile yapılmıştır. Ayrıca Çizelge 3.3’de bu kaplanmış takımın karakteristik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3. 3 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların karakteristik özellikleri (Hopa 2016, int. Kyn. 17).

Kaplama tipi	Kimyasal Bileşimi	Kaplamanın Mikro Yapısı	Sertlik (HV 0,05)	Sürtünme katsayısı	Kaplama kalınlığı (µm)	Kesici kenar yarıçapı (µm)	Kaplama sonrası kesici kenar yarıçapı (µm)
Kaplamasız	-	-	1680	0,4- 0,6		0,78- 0,96	0,87
Elmas Kaplanmış, NCD (HF-CVD)	Karbon C atomunun Tetrahedral formu	Kristal	8500	0,1- 0,05	0,75- 1,5	0,78- 0,96	1,63

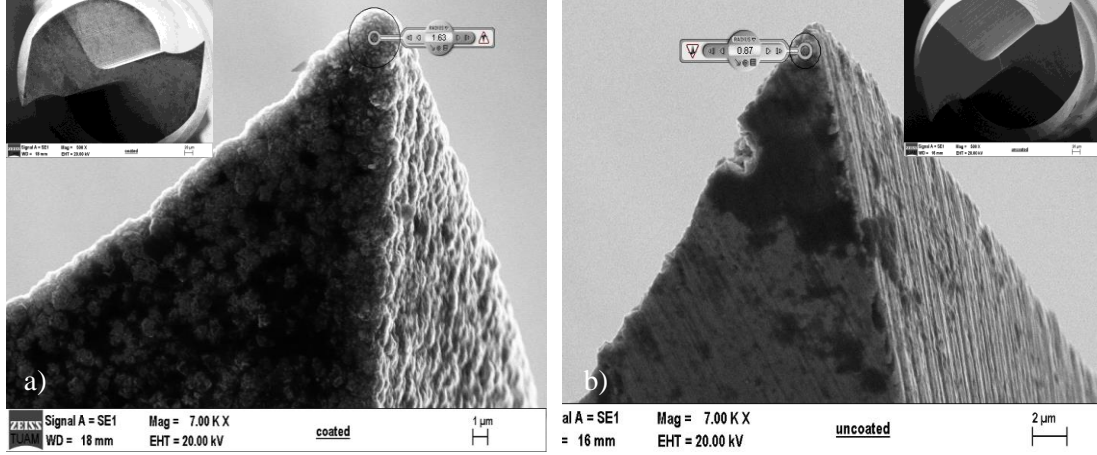
Mikro frezeleme işlemini en çok etkileyen unsurlardan biri kesici takım kenar radyüsüdür. Kesici kenar radyüsünün aşınması veya kırılması, yüzey kalitesini, kesme kuvvetlerini olumsuz etkilemektedir. Şekil 3.3’de kesici takımın geometrik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3. 3 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların geometrik özellikleri.

Kesici takımların kesme deneyleri öncesinde kenar radyüslerinin ölçümlerini en hassas bir şekilde yapabilmek adına Scanning Electron Microscope (SEM) görüntüleri alınmıştır. Şekil 3.4’de kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların (SEM) görüntüleri verilmiştir. Kaplamasız takımın kenar radyüsünün 0,87 µm olduğu ve elmas kaplanmış takımın kesici kenar radyüsü ise 1,63 µm olarak tespit edilmiştir. Kaplamasız takım ile

elmas kaplanmış takımın arasındaki 0,8 μm 'lik farkın kaplama film kalınlığının etkisiyle olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu küçük farkın kuvvetler ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin ihmal edilebilir değer olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 4 Elmas kaplanmış ve kaplamasız mikro takımların SEM görüntüleri, a) Elmas kaplanmış takım ve takımın kesici kenar radyüsü, b) Kaplamasız takım ve takımın kesici kenar radyüsü.

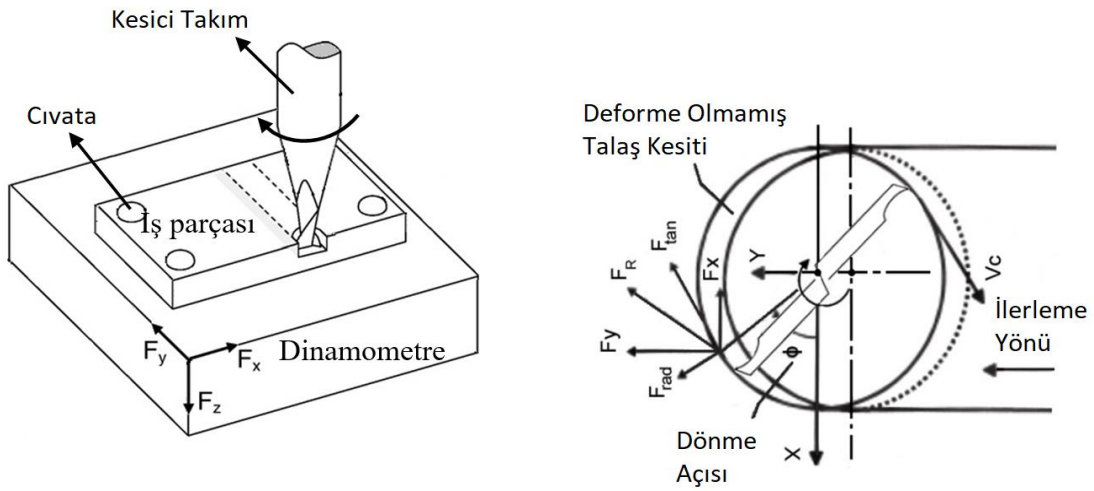
3.2 Deney Düzenegi ve Kesme Parametreleri

Deneyleerde mikro frezeleme işlemine uygun 2,2 kW motor gücünde ve maksimum 24000 dev/dk.'ya çıkabilen 3 eksenli CNC dik işleme freze tezgâhı kullanılmıştır (Resim 3.1). Mikro işleme esnasında iş malzemesi üzerine gelen kuvvetlerin ölçümü için Kistler 9119AA1 marka mini dinamometre kullanılmıştır. Dinamometreyi etkileyen bir diğer unsur ise çok sıcak ve soğuk ortamda kuvvetlerin farklı çıkması önlenmesi için ortam sıcaklığı aynı tutulmaya çalışılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



Resim 3. 1 Mikro kesme işleminin gerçekleştirildiği deney düzeneği.

Kesme parametrelerinin etkilerini araştırmak amacıyla farklı devir sayısı, ilerleme değeri ve farklı talaş derinliği değerleri dikkate alınmıştır. Kesme paraterelerinin hem kesme kuvveti hem de takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Benzer deneyler hem kaplamalı hem de kaplamasız takım için gerçekleştirilerek, elmas kaplamasının etkisi ortaya konulmuştur. Kesme deneyinde kullanılan kesme yönleri, koordinat sistemleri, ilgili açıların tümü Şekil 3.5 şematik olarak verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.4 kullanılan koordinat sistemine bağlı olarak takım ucunda meydana gelen kuvvetler sırasıyla F_x , F_y , F_z verilmiştir.



Şekil 3. 5 Mikro frezeleme işleminin şematik gösterimi.

Deneyleer kuru kesme Őartlarında gerĥekleŐtirilmiŐ olup, ĥalıŐmada kullanılan kesme parametreleri Ćizelge 3.4 de verilmiŐtir. Her bir kesme parametresi iĥin deneyleer en az uĥ kez tekrarlanmıŐ olup bazı tutarsız olan sonuĥların elde edilmesi durumunda deney sayısı beŐe kadar arttırılmıŐtır. Kesme parametrelerinin etkisinin test edildiği deneyleerde takım aŐınma etkisini en aza indirebilmek adına kesme mesafeleri 10 ile 42 mm arasında tutulmuŐtur. AŐınma deneyleeri ise sabit kesme Őartlarında ve toplam 210 mm'lik kesme masafesi baz alınarak gerĥekleŐtirilmiŐtir.

Ćizelge 3. 4 Kaplamasız ve elmas kaplanmış kesici takım deneyleerinde kullanılan kesme parametreleri.

Devir, n (dev/dk.)	Diş Başına İlerleme, fz (μm/diş)	Talaş Derinliği, ap (μm)	Kesme Mesafesi, Lc (mm)
2 500	1	100	
5 000	1-2	100-200	
10 000	0,25-0,5-1-2-4-5	50-100-200-300-400	210
15 000	1	100	
20 000	1-2	100-200	

3.4 İŞ parĥası deney Şartlarına uygun olarak hazırlanması

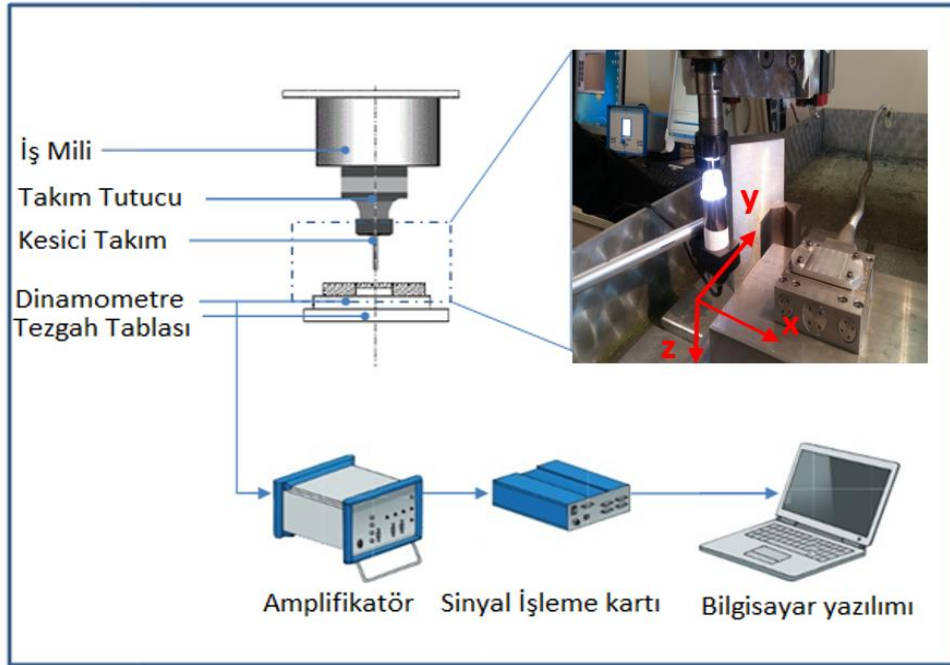
Al 7075-T6 malzemesi ĥapı 100 mm ve silindirik formda tedarik edilmiştir. Sonrasında dinamometre boyutların uygun olacak Şekilde kesilerek boyutlandırılmıŐtır. Dinamometreye bağlanan numune boyutları 100X42X5 mm Őeklinindedir (Resim 3.2). Deneyleer uñcesinde numunenin hem dinamometreye temas edecek yuzyeyi hem de kesme testlerinin yapılacağı yuzyey numune parlatma cihazında parlatılmıŐtır. Ayrıca, mikro frezeleme testleri uñcesinde, ĥapı 8 mm olan bir karbür kesici takım kullanılarak numune yuzyeyinden ince bir talaş alma işlemi gerĥekleŐtirilmiŐtir. Buylece parĥa yuzyeyi ile tezgâh miline dik hale getirilmiŐ oldu. İŞ malzemesinin dinamometreye doğru bir Şekilde bağlamak iĥin tork kolu yardımı ile alyan baŐlı civatalar sıkılmıŐtır. Alyan baŐlı civatların aynı oranda sıkılmasının en uñemli nedeni, kesme esnasında iş malzemesi uzerinde oluŐacak gerilmeleri eşit bir Şekilde dağıtılması ve kesme kuvveti sonuĥlarını etkilememesi istenmektedir.



Resim 3. 2 İş malzemesinin deney şartlarına geometrik olarak hazırlanması.

3.5 Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü

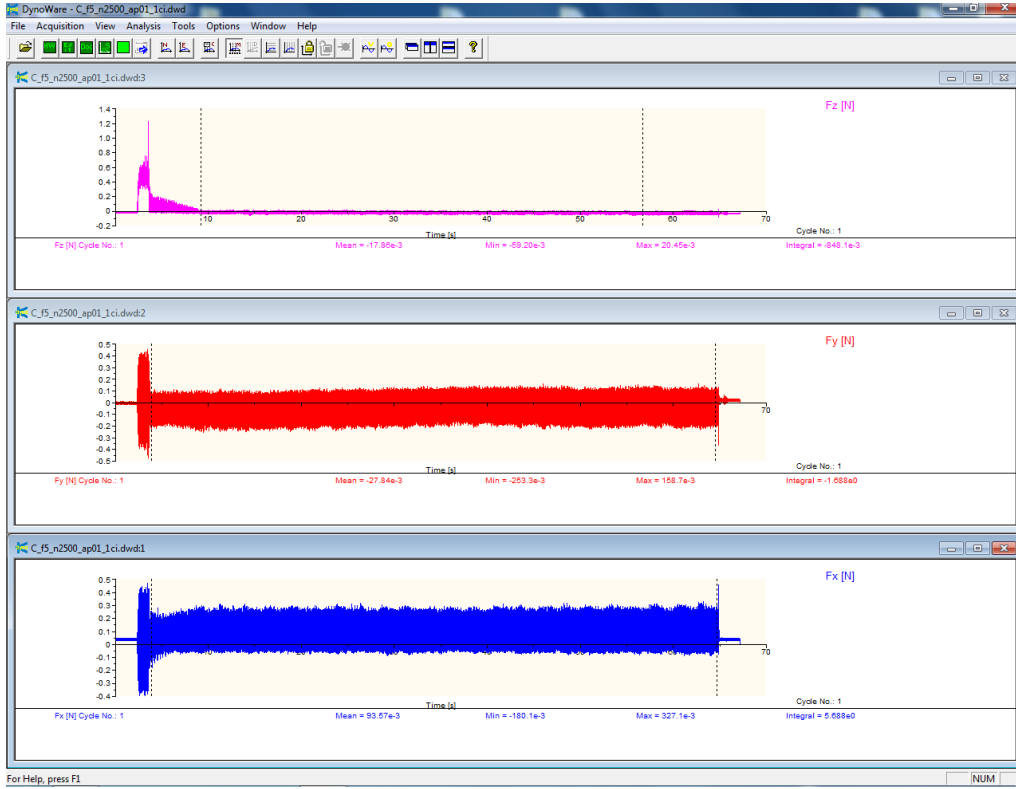
Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların deney sırasındaki kesme kuvvetlerinin ölçümü Resim 3.1'deki Kistler 9119AA1 dinamometre ile yapılmıştır. Ayrıca deney sırasında anlık kuvvet verilerini işleyen düzenekte Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3. 6 Kesme kuvvetleri data alma sisteminin şematik gösterimi.

Deneylerde belirlenen değerler baz alınarak elmas kaplanmış ve kaplamasız takımların

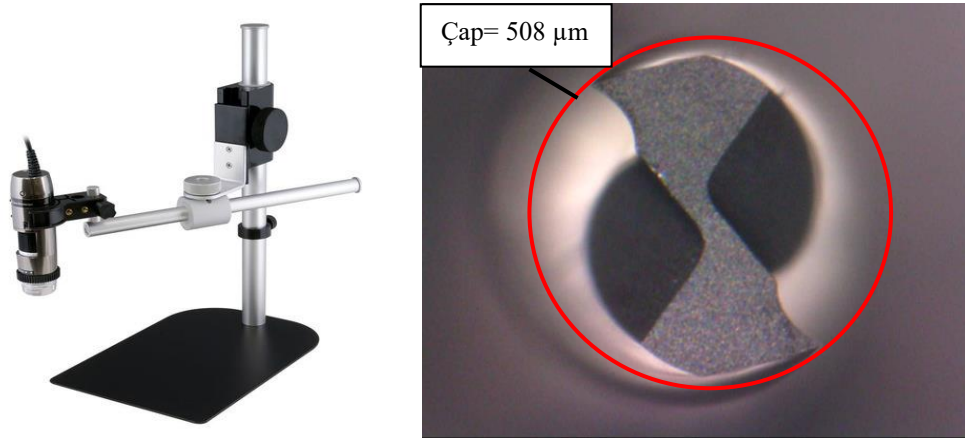
kesme esnasında kuvvet değerleri elde edilmesinin Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Bununla birlikte takımın kesmeye başladığı andan itibaren parçanın bağlı olduğu dinamometre amplifikatöre sinyaller göndermiştir. Bu sinyaller amplifikatörden sinyal işleme kartına gönderilmiştir. İşlenen sinyaller bilgisayara kuvvet verileri ve grafik olarak çıktısı sağlanmaktadır. Kesme esnasında elde edilen ham kuvvetlerin örneği Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3. 7 Kesme esnasında elde edilen ham kuvvetlerin örneği.

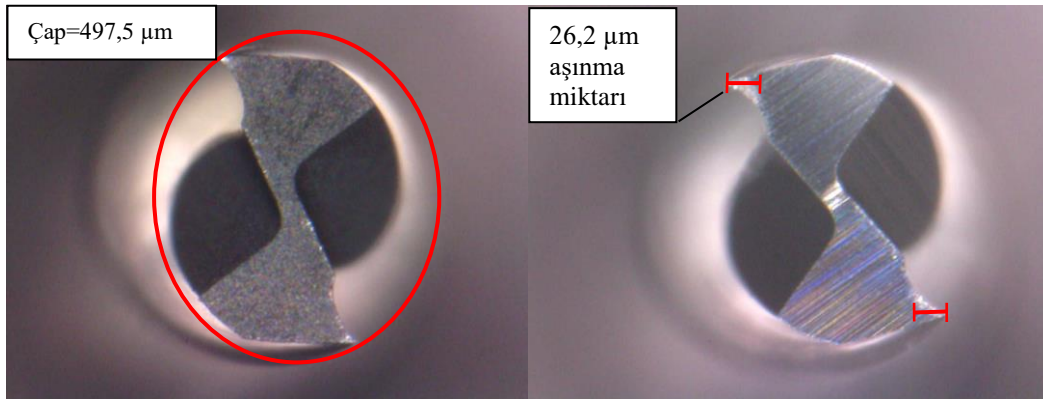
3.6 Takım Aşınma Testleri

Her deneyin başlangıcında takımın kırılıp kırılmadığını USB mikroskobu ile tespit edilmiştir (Resim 3.3). Deney sonunda takımı iş milinden sökmeden aşınmış takımın resmi kayıt altına alınmıştır. Resim 3.3’de her bir deney için takım çaplarındaki aşınma miktarını ölçümünde kullanılan USB optik mikroskobu (Dino Lite USB 2.0) ve deneyde ölçülen bir takım örneği verilmiştir. Kullanılmamış takım çapları ortalama $508 \pm 5 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



Resim 3.3 Dino Lite USB 2.0 optik mikroskop ile takım çapının ölçümü.

Bunlara ek olarak aşınma testleri için belirli aralıklarla hem takım çapındaki değişim hem de kesici ağızda meydana gelen aşınma miktarı ölçülmüştür. Bu ölçme işlemi için Dino Lite USB mikroskoba ait yazılım kullanılmıştır. Bu yazılım sayesinde görüntü üzerinde yapılan ölçümlerin hassasiyeti $\pm 1\mu\text{m}$ dir. Ölçümler sırasında her iki kenardaki aşınma miktarının eşit/dengeli olup olmadığına özellikle bakılmıştır. Aralarında önemli fark olanlar için deney tekrarı yapılmıştır. Şekil 3.8’de de görüleceği üzere takımlarda meydana gelen aşınma ve çaptaki değişim çok net olarak görülebilmektedir.



Şekil 3.8 USB mikroskobu yardımıyla elmas kaplanmış ve kaplamasız takımların kenar aşınması ve çaptaki azalma ölçümlerinin yapılması.

Mikro takımlarda meydana gelen aşınma tipini ve aşınma mekanizmasını ortaya koymak adına taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır (Resim 3.4). Aynı zamanda iş malzemesi üzerindeki kanalların yüzey pürüzlülüğü ile çapak oluşumunun görüntülenmesi için de SEM analizi yapılmıştır. Deney sonrasında aşınmış takımlara

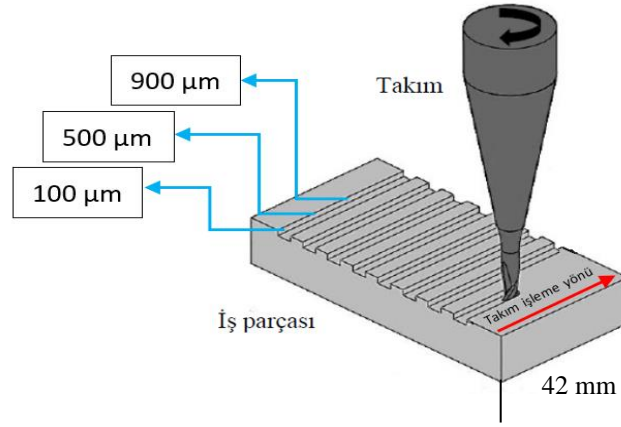
Enerji Dağılımlı X-Işınları analizleri (EDX) de gerçekleştirilmek suretiyle aşınma mekanizmalarına karar verilmiştir.



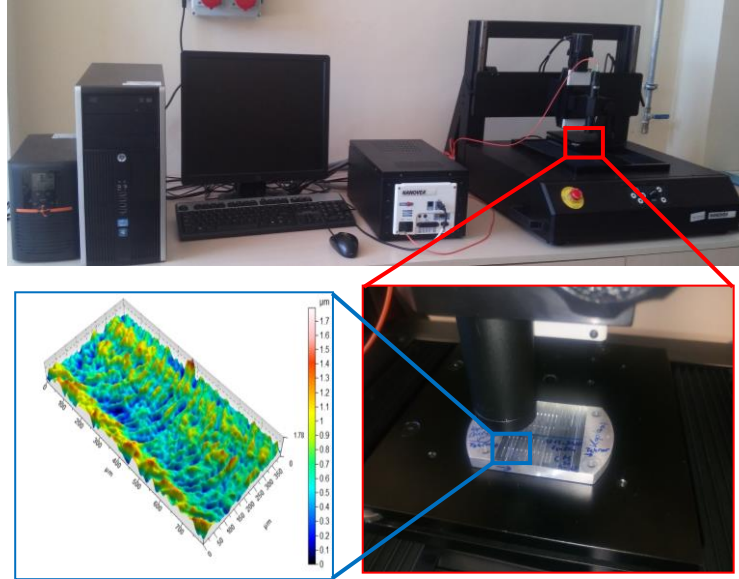
Resim 3. 4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

3.7 Yüzey Pürüzlülüğü Analizi

Al 7075-T6 alaşımının mikro frezelenmesinde kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı kesme parametrelerinde işlenen kanallara ait yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için Afyon Kocatepe Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki Nanovea 3D ST400 marka optik yüzey profilometresi kullanılmıştır. Kesme mesafesi boyunca her kanalın belirli ölçü aralıklarında Ra ve Rz değerleri elde edilmesinin şematik gösterimi verilmiştir (Resim 3.5). Resim 3.5’de mikro frezeleme işlemi sonrasında her kanalın kesme mesafesi boyunca kanal giriş kısmından 100 μm , kanalın orta kısmından 500 μm ile kanalın çıkış kısmından 900 μm aralığında ölçülen değerlerin ortalaması alınarak Ra ve Rz değerleri elde edilmiştir. Yüzey ölçümlerinde kullanılan profilometre nanometre hassasiyetinde olup, optik zoomu sayesinde temassız ve üç boyutta ölçüm yapabilen bir yapıya sahiptir. Yapılan bir ölçümün sonucu örnek olarak Resim 3.6’de verilmiştir.



Resim 3. 5 Kesme mesafesi boyunca her kanalın belirli ölçü aralıklarında Ra ve Rz değerleri elde edilmesinin şematik gösterimi.

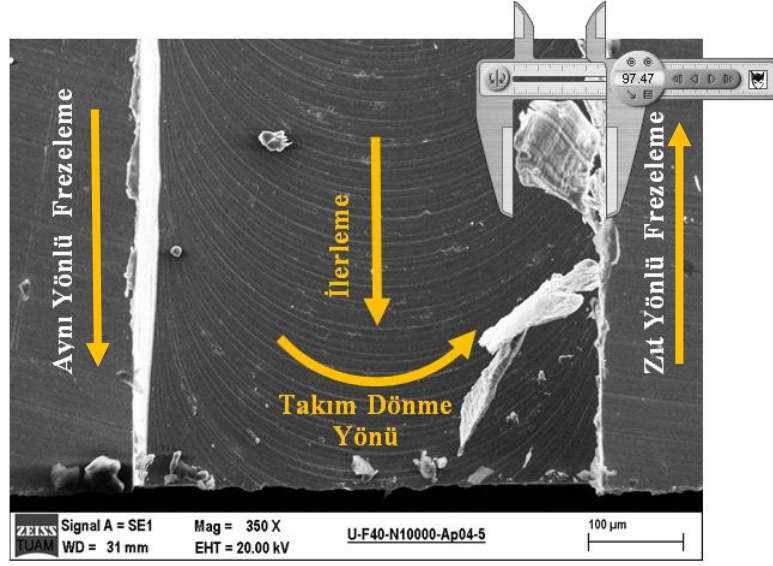


Resim 3. 6 Yüzey analizleri için kullanılan optik profilometre ve üç boyutlu topografya örneği.

3.8 Çapak Genişliğinin Ölçülmesi

Kesme testleri sonrasında takımda meydana gelen çevresel aşınma ve kesici kenar radyüsünün değişmesi hem yüzey kalitesini hem de çapak boyutlarını etkilemektedir. Bu nedenle kesme mesafesine bağlı olarak, kanal kenarlarında meydana gelen çapak genişliklerinin ölçümleri SEM fotoğrafları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bunun için Screen Caliper yazılımı kullanılmıştır. Çapak boyu ölçümleri, maksimum talaş boyu baz alınarak ve aynı frezeleme yönü ile zıt yönlü frezeleme ölçümleri ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 3.9'da işlenen kanalın takım ilerleme yönü, takım dönüş yönü, aynı ve

zıt yönlü frezeleme yönleri ile çapak genişliğinin ölçülmesi gösterilmiştir.



Şekil 3. 9 İşlenen kanal ve kesme yönlerine bağlı olarak çapak genişliğinin ölçüm noktaları.

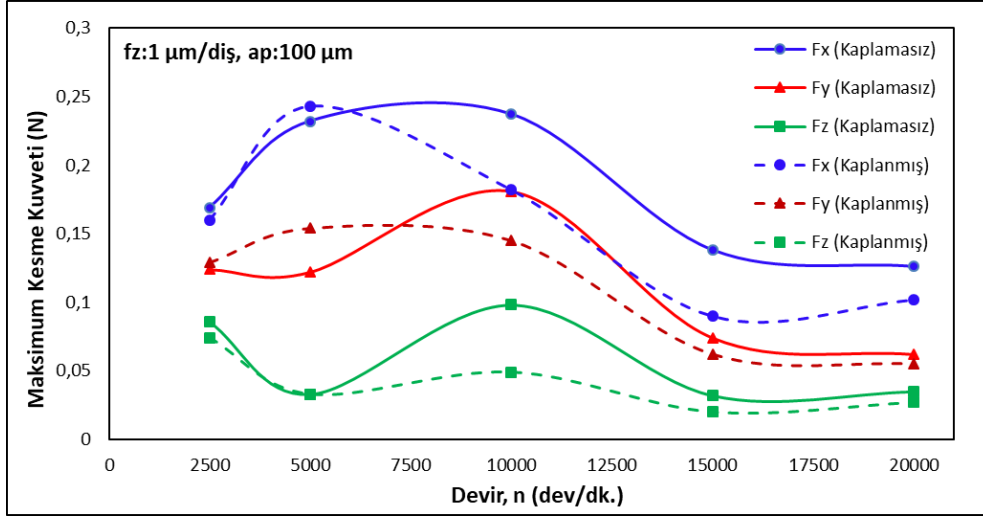
4. BULGULAR

4.1 Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkisi

Kesme parametrelerinin içerisinde özellikle kesme kuvvetlerini etkileyen unsurlar kesme hızı, ilerleme değeri ve talaş derinliği gelmektedir. Bu bölümün altında her biri kendi içerisinde değerlendirilerek, kesme kuvvetlerinin değişimi üzerindeki etkileri analiz edilmeye çalışılmıştır.

4.1.1 Devir Sayısının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi

Al 7075-T6 serisi malzemesinin mikro frezelemede işlenebilirliğini araştırmak amacıyla, beş farklı devir sayısı değeri alınmıştır. Devir sayısının etkisini test etmek adına diş başına düşen ilerleme değeri ile talaş derinliği sabit alınmıştır. Elmas kaplanmış ve kaplamasız kesici takımlar için kesme kuvvetlerinin değişimleri elde edilmiştir. Kesme sırasında meydana gelen kuvvetlerden F_y ilerleme yönünde meydana gelen kuvvet, F_x radyal kuvveti ve F_z ise takım eksenine paralel meydana gelen aksel kuvveti ifade etmektedir. Kesme sırasında elde edilen maksimum kesme kuvvetleri değerleri referans alınmıştır. Şekil 4.1’de kaplamasız ve kaplanmış takımlar için elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin farklı devir sayılarına bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Şekil 4.1’de dikkati çeken ilk unsur; elmas kaplanmış olan kesici takımında elde edilen kesme kuvvetlerinin, kaplamasız kesici takımında elde edilen kuvvetlere nazaran daha düşük olduğudur. Şekil 4.1’de elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin farklı devir sayılarına bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Aynı zamanda hem elmas kaplanmış hem de kaplamasız kesici takımlar için elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri verilmiştir. Şekil 4.1’de dikkati çeken ilk unsur elmas kaplanmış olan kesici takımında elde edilen F_x , F_y , F_z kuvvetlerinin, kaplamasız kesici takımında elde edilen kuvvetlere nazaran daha düşük değerler elde edilmiştir. Şekil 3.5’de verilen test düzeneğindeki koordinat sistemi dikkate alındığında, F_y kuvvetleri ilerleme yönündeki kuvvetlere karşılık gelmektedir. Buna karşılık F_x kuvveti ise çevresel kuvvet olarak isimlendirilmiştir. F_z kuvveti ise kesici takıma aksel yönde etki eden kesme kuvveti olarak tanımlanmıştır.



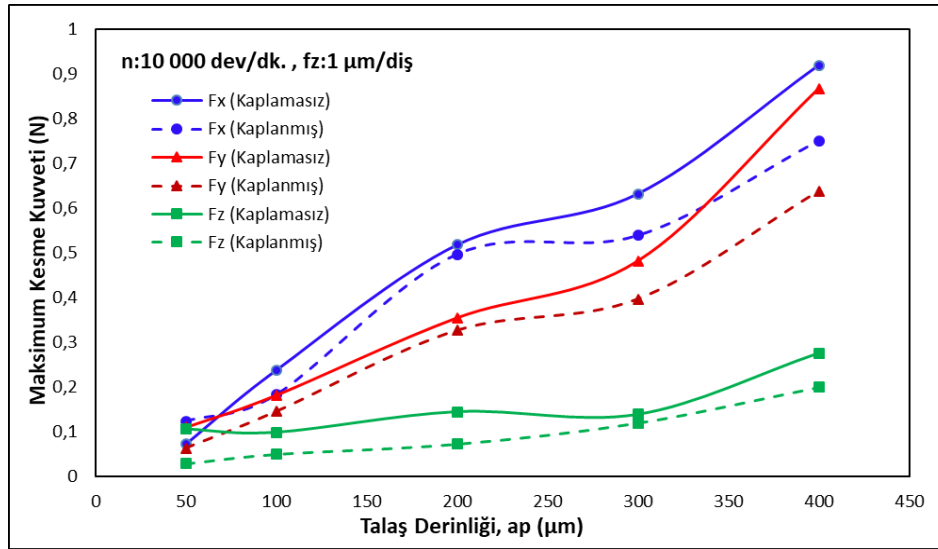
Şekil 4. 1 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı devir sayılarına bağlı olarak kuvvet değişimleri.

Şekil 4.1' den de görüldüğü üzere minimum kesme kuvvetleri $n=20\ 000$ dev/dk.'ya karşılık gelen devir sayısında elde edilmiştir. Buna karşın, devir sayısının azalması ile birlikte kesme kuvvetlerinin de arttığı görülmüştür. Fx ve Fy için maksimum kesme kuvvetleri yaklaşık $n=10\ 000$ dev/dk.'da elde edildiği görülürken, Fz'de bu bir miktar değişkenlik göstermektedir. Devir sayısının minimum olduğu $2\ 500$ dev/dk. durumunda kesme kuvvetleri bir miktar azalma eğilimi göstermiş ve artan devir sayısı ile birlikte kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. Fakat $n=10\ 000$ dev/dk.'dan sonra her üç yöndeki kesme kuvvetlerinin de azalmaktadır. Şekil 4.1'de ilginç olan bir diğer durum ise minimum devir sayısı olan $n=2\ 500$ dev/dk.'da elmas kaplanmış takım ile kaplamasız takım arasındaki kesme kuvvetleri arasındaki farkın olmayışdır. Dikkat edilecek olursa $n=2\ 500$ dev/dk.'da hem elmas kaplanmış hem de kaplamasız olan kesici takımların her üç yöndeki kesme kuvvetleri de hemen hemen aynı olduğunu söylemek mümkündür. Fakat artan devir sayısına bağlı olarak kaplanmış takım ile kaplamasız takım arasındaki fark artmaktadır. Özellikle de $n=10\ 000$ dev/dk.'da her üç yöndeki kesme kuvvetleri arasındaki fark maksimumdur. Bununla birlikte artan devir sayısı ile, özellikle $n=15\ 000$ dev/dk.'dan sonraki değerlerde iki takım arasındaki farkın azaldığı Şekil 4.1'de görülmektedir. Talaşlı imalatta bilindiği üzere artan devir sayısı kesme işleminin daha da kolaylaşmasına neden olmaktadır. Özellikle kesme bölgesinde meydana gelen ısının etkisiyle iş parçası termal yumuşamaya maruz kalmakta ve kesici takımın yüksek hızlarda dönmesiyle depolamış olduğu enerjiyi iş parçasına aktararak, iş

parçasını daha kolay deforme etmektedir. Bu iki unsurun neticesinde artan devir sayısına bağlı olarak kesme kuvvetleri de azalmaktadır.

4.1.2 Talaş Derinliğinin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi

Bilindiği üzere talaşlı imalatta artan talaş derinliği ve artan ilerleme değeri hem tornalama hem de frezeleme işleminde talaş kesitinin artmasına neden olmaktadır. Artan talaş kesiti ile kesme kuvvetlerinin lineer olarak büyümesi beklenmektedir. Şekil 4.2’ de elmas kaplanmış ve kaplamasız takımlar için her üç yönde meydana gelen kesme kuvvetlerinin talaş derinliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil 4.1’de olduğu gibi elmas kaplanmış kesici takımlarda kesme kuvvetlerinin daha düşük seviyede olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 2 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı talaş derinliği değerlerine bağlı olarak kuvvet değişimleri.

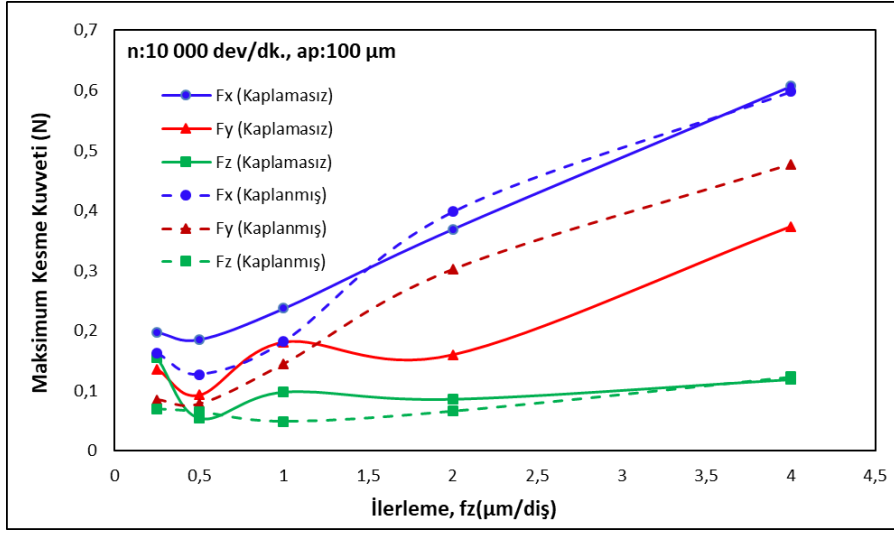
Şekil 4.2’de görüleceği üzere, minimum olan talaş derinliği $ap=50 \mu\text{m}$ ’den, $ap=400 \mu\text{m}$ ’ye kadar olan tüm talaş derinliklerinde kaplanmış takım için elde edilen kesme kuvvetlerinin daha düşüktür. Bununla birlikte artan talaş derinliği, kesilmeye çalışılan talaş kesitinin artmasına neden olduğu için kesme kuvvetlerinin de lineer arttığını söylemek mümkündür. Fakat Şekil 4.2’de dikkat edilecek olursa, takıma eksenel yönde etki eden Fz kuvvetinin $ap=300 \mu\text{m}$ ’lik talaş derinliğine kadar önemli bir artış sergilemediği görülmektedir. $300 \mu\text{m}$ ’den daha büyük olan talaş derinliğinde Fz

kuvvetlerinde daha belgin bir artış olduğunu söylemek mümkün. Oysa ilerleme radyal yönde olan F_x ve F_y kuvvetinin her ikisi de artan talaş derinliği ile lineer olarak arttığı görülmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de elmas kaplanmış olan kesici takımlarda kesme kuvvetlerinin daha düşük elde edilmesinin asıl nedeni; kaplanmış olan kesici takımında, takım talaş ara yüzeyindeki sürtünme katsayısının daha düşük olmasıdır. Karbür kesici takımlarda sürtünme katsayısı $\mu=0,3-0,5$ arasında değişmekte iken, elmas kaplanmış olan kesici takımlarda sürtünme katsayısı $\mu\cong 0,1$ ’ler civarında olduğu bilinmektedir. Kaplamanın düşük sürtünme katsayısına sahip olması, kesme işlemini kolaylaştırdığı, bunun neticesinde de meydana gelen kesme kuvvetlerinin daha düşük seyrettiği görülmüştür. Talaş derinliğinin en düşük ($a_p=50 \mu m$) olduğu durumda her üç yönde (F_x , F_y , F_z) de elde edilen kesme kuvvetlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Buna karşın artan talaş derinliği ile birlikte, kaplamalı ile kaplamasız takımlara ait F_x ve F_y kuvvetleri arasındaki farkın açıldığını söylemek mümkündür. Burada ilginç olan bir nokta ise, talaş derinliğinin çok küçük alındığı durumda ($a_p=50 \mu m$) F_z kuvvetinin, F_x ve F_y kuvvetlerine eşit olduğudur. Talaş derinliğinin çok küçük seçilmesi, aksel yönde kazınma mekanizmasının devreye girmesine neden olur. Buda sağlıklı bir kesme işleminin gerçekleşmemesi anlamına gelmektedir. Eğer talaş derinliği $a_p=50 \mu m$ ’den daha düşük alınacak olursa, muhtemelen F_z kuvveti hem F_x hem de F_y kuvvetlerinden daha büyük çıkacağı düşünülmektedir. Bununda nedeni kesme esnasında kesici kenarın iş parçasına rahat bir dalma işlemi gerçekleştirememiş olmasından kaynaklanmaktadır. Yani aksel yönde kritik talaş derinliğinin etkisinin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla mikro frezelemede sadece radyal yönde değil, aynı zamanda aksel yönde bir kritik talaş derinliğinin olduğu burada ortaya koyulmuştur.

4.1.3 İlerlemenin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.3’de elmas kaplanmış ve kaplamasız takımların dış başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak, her üç yönde elde edilen kesme kuvvetlerinin değişimi verilmiştir. İlerlemenin artması, talaş derinliğinde olduğu gibi, birim zamanda kaldırılan talaş kesitinin artmasına neden olmaktadır. Bunun neticesinde ise kesme kuvvetlerinin artması beklenmektedir. Şekil 4.3’ de görüldüğü üzere hem elmas kaplanmış hem de kaplamasız kesici takımında, kesme kuvvetlerinin artan ilerleme değerlerine bağlı olarak,

özellikle F_x ve F_y kuvvetlerinin lineer arttığı görülmüştür.



Şekil 4. 3 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak her üç yönde elde edilen kesme kuvvetlerinin değişimi.

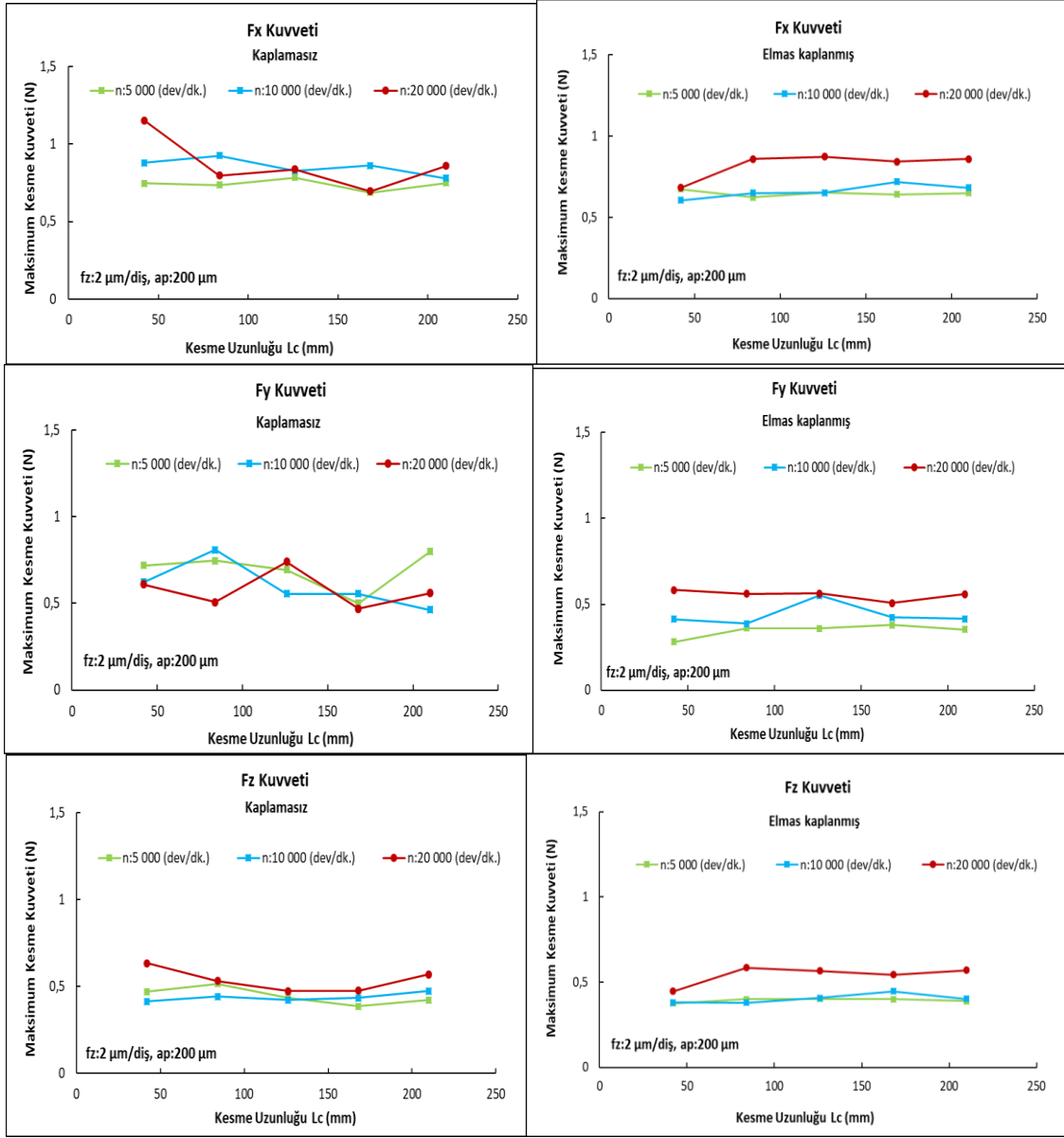
Buna karşın F_z kuvvetinin küçük değişimlere uğramış olmasına rağmen sabit kaldığını söylemek mümkündür. Fakat burada dikkati çeken bir unsur ise, çok düşük olan $0,5\ \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerlerinde, kesme kuvvetlerinin artmasıdır. Bunun nedeni, radyal yöndeki talaş kalınlığının azalması olduğu düşünülmektedir. Radyal yöndeki talaş kalınlığının azalması kazınmanın oluşmasına neden olur ki bu hem kesme kuvvetlerinin artmasına hem de yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğu bilinmektedir. Nitekim yapılmış olan daha önceki çalışmalarda da buna benzer durumlar gözlemlenmiştir. Özellikle İnconel ve Titanyum gibi alaşımların işlenmesinde de rastlanmıştır (Aslantas *et al.* 2016a,b). Şekil 4.3’de dikkati çeken bir unsur ise elmas kaplanmış ve kaplamasız kesici takımlar arasındaki kuvvet farklılığıdır. Talaş derinliği ve devir sayısının elmas kaplanmış olan kesici takımlarda düşük kesme kuvveti elde edildiği görülmüştür. Elmas kaplanmış kesici takımında ilerleme değeri için özellikle F_y kuvveti daha düşük elde edildiği görülmüştür. Bu durum özellikle düşük ilerleme değerlerinde elmas kaplanmış ve kaplamasız kesici takımlar arasındaki farkında azaldığı görülmektedir. Buna karşın, kaplanmış ve kaplamasız takımların, $1,5\ \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerinin üzerinde özellikle F_x ve F_z kuvvetleri birbiriyle hemen hemen örtüştüğü görülmüştür. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 beraber değerlendirilecek olursa, mikro şartlarda Al 7075 serisinin sağlıklı bir kesme işlemi için talaş derinliğinin $ap=100\ \mu\text{m}$ ’den daha

büyük olması, ilerleme değerinin de 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve üzerinde bir değer alınması önerilmektedir.

4.1.4 Kesme Uzunluğunun Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi

Genellikle mikro frezeleme işleminde takım çok yüksek devirlerde döndüğü için hızlı bir takım aşınması beklenmektedir. Meydana gelen takım aşınması, takım çapı ve kenar radyüsünü etkilediğinden, kesme kuvvetlerinin değişmesi gayet normaldir. Çalışmanın bu kısmında, kaplamanın kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini görmek adına, kesme uzunluğuna bağlı olarak, kesme kuvvetlerinin değişimi araştırılmıştır. Şekil 4.4'deki grafikte farklı devir sayıları için hem kaplanmış hem de kaplamasız kesici takıma ait kesme uzunluğu ile birlikte kesme kuvvetlerinin değişimi verilmiştir. Genel itibariyle bir değerlendirme yapılacak olursa, artan kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin çok değişmediğini söylemek mümkündür. Bu durum ise kesici takımın kesme sırasında çok aşınmadığının ve kenar geometrisinin çok değişmediğinin bir göstergesidir. Şekil 4.4'de dikkati çeken bir unsur ise elmas kaplanmış olan kesici takımda kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetleri daha stabil bir durum sergilediği görülmüştür. Özellikle F_x ve F_y kuvvetlerine bakılacak olursa, kaplamasız olan takımda F_x ve F_y kuvvetleri artan kesme uzunluğuna bağlı olarak, bir dalgalanma sergilerken, elmas kaplanmış olan kesici takımda bu dalgalanmanın çok daha az olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte, F_x ve F_y kuvvetleri hem elmas kaplanmış hem de kaplamasız kesici takımlar için bir kıyaslama yapıldığında, kaplamasız takıma göre elmas kaplanmış olan kesici takımdaki kesme kuvvetlerinin bir miktar daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.4'de dikkati çeken bir diğer unsur ise, elmas kaplanmış olan kesici takımın yüksek devirde kesme kuvvetinin belirgin bir oranda artmasıdır. 5 000 – 10 000 dev/dk.'da artan kesme uzunluğuna bağlı olarak, kesme kuvvetleri birbirine yakın iken, 20 000 dev/dk.'daki kesme kuvveti belirgin bir şekilde daha yüksek olduğu görülmüştür. Hatta F_x kuvvetinin artan kesme uzunluğu ile bir miktar arttığını söylemek mümkündür. Bununda nedeni, yüksek devir sayısında elmas kaplanmış olan kesici takımında meydana gelen kısmi aşınma olabilir. Abrasiv aşınmanın etkisiyle kaplama, fonksiyonunu yitirerek, takımla talaş ara yüzeyindeki sürtünme katsayısını arttırmış olabilir. Fakat yine de meydana gelen kesme

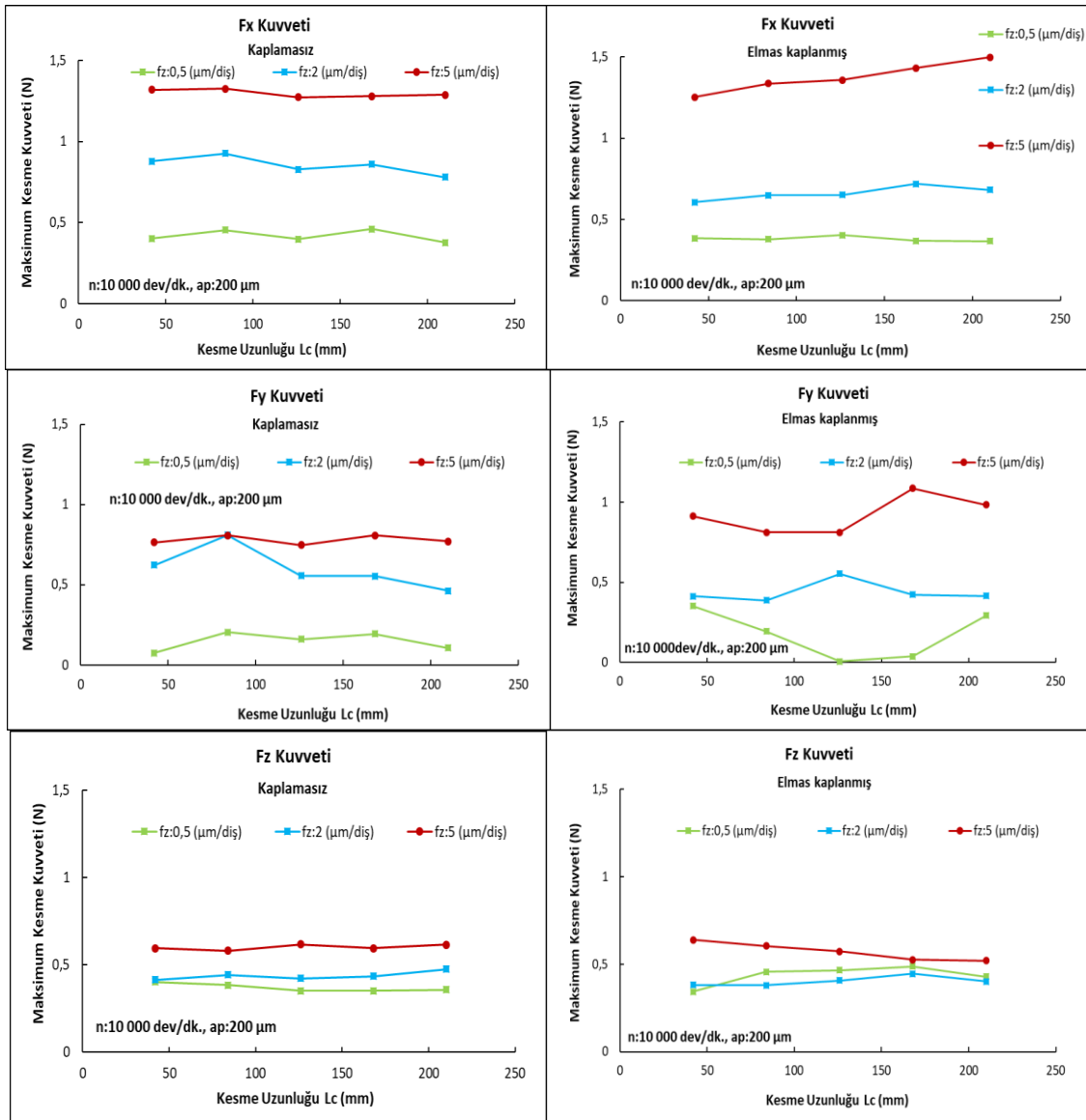
kuvveti kaplamasız takımındaki kuvvetlerden daha büyük değildir.



Şekil 4. 4 Kaplamasız ile elmas kaplanmış takımların farklı devir sayıları ve kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.

Şekil 4.5’de ise, kaplanmış ve kaplamasız olan kesici takımlara ait olan farklı ilerleme değerleri için kesme uzunluğuna bağlı olarak, kesme kuvvetlerinin değişimi verilmiştir. Devir sayısının tersine artan ilerleme değerine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin arttığı net olarak görülmektedir. Elmas kaplanmış kesici takım ve kaplamasız kesici takımların ilerleme değerlerine bağlı olarak, Fx kuvvetleri karşılaştırılacak olursa, 0,5 N ve altında olduğu görülmektedir. Bununla birlikte ilerleme değerinin dört kat artmasına bağlı

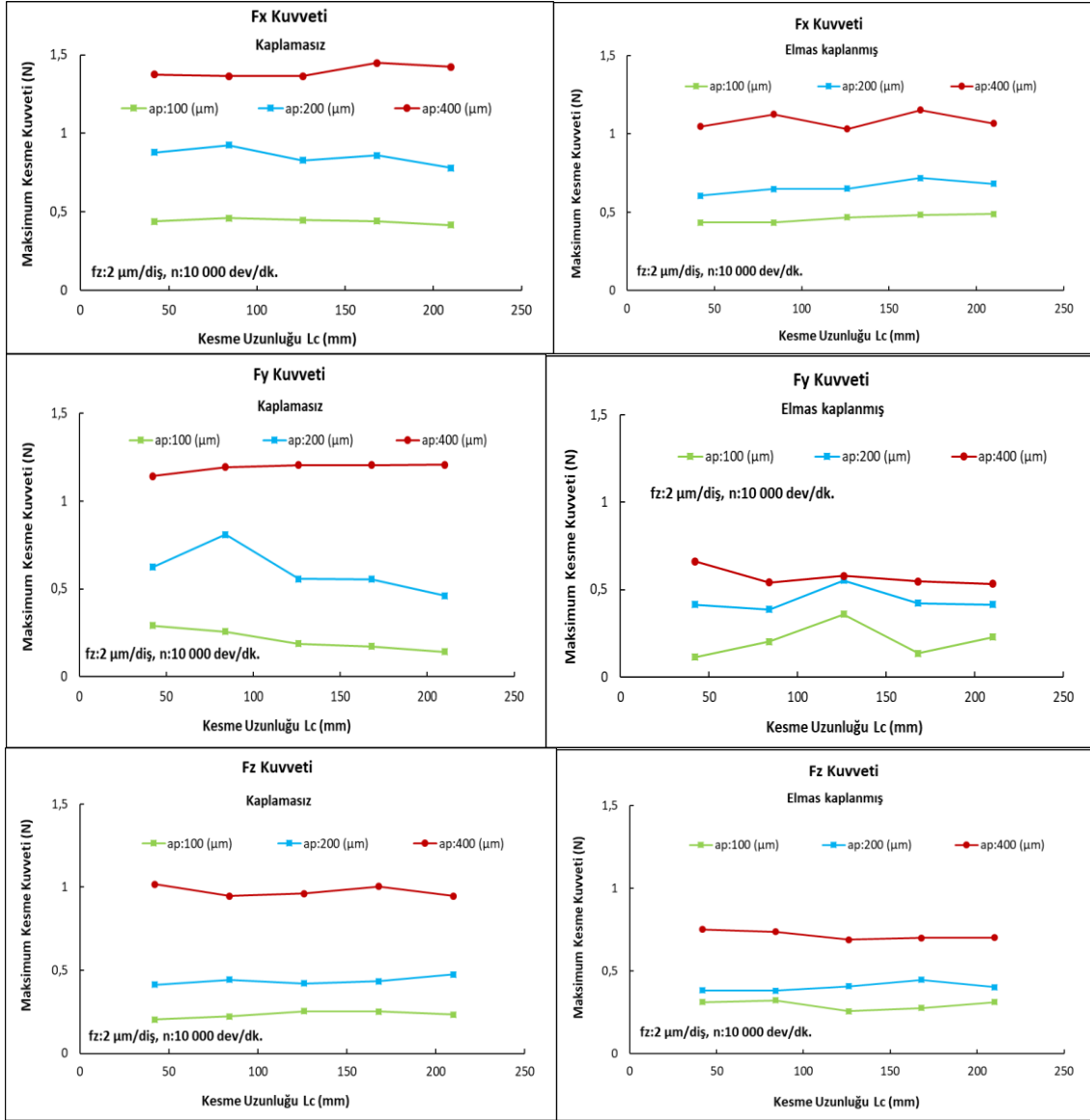
olarak Fx kuvvetleri de belirgin oranda arttığı görülmüştür. Fakat bu artış kaplamasız olan kesici takımında daha net görülmektedir. Kaplamasız olan kesici takımında bu artış yaklaşık iki kat civarında iken, elmas kaplanmış olan kesici takımında bu artış iki kattan çok daha düşük seviyelerdedir. Her iki takım içinde Fy kuvvetleri karşılaştırılacak olursa, özellikle elmas kaplanmış olan kesici takımında kesme uzunluğuna bağlı olarak Fy kuvvetleri stabil bir durum sergilemediği görülmektedir.



Şekil 4. 5 Kaplamasız ile elmas kaplanmış takımların farklı ilerleme ve kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.

Benzer bir durum 5 μm/diş olan ilerleme değerinde de görülmüştür. Fakat burada ilginç olan bir nokta ise, elmas kaplanmış ve kaplamasız olan kesici takımların Fy kuvvetleri

karşılaştırılacak olursa, elmas kaplanmış olan kesici takımında özellikle 5 µm/diş için bir miktar daha büyük olduğunu söylemek mümkündür. Kaplamasız olan kesici takımında artan ilerleme değerine bağlı olarak kuvvet değerinde artış biraz daha bariz bir şekilde görülmektedir. Oysa elmas kaplanmış olan kesici takımında artan ilerleme değeri ile Fz kuvvetlerinin artışı kaplamasız kesici takım kadar net değildir. Şekil 4.5’de özellikle Fx kuvvetinde ilginç olan bir durum ise, artan kesme uzunluğuna bağlı olarak, elmas kaplanmış olan kesici takımında kuvvetlerin eğimi düşük de olsa lineer olarak arttığı görülmüştür. Bu durum kaplanmış kesici takımın kenar radyüsünün daha büyük olmasına bağlı olarak artan talaş yükü ile açıklanabilir. Kesme esnasında artan ilerleme değeri talaş yükünün artmasına neden olur. Kenar radyüsünün de kaplamasız takıma göre daha büyük olması ise zamanla kesme kuvvetini artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.6’da ise kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı talaş derinliklerinde kesme kuvvetlerinin değişimi verilmiştir. Elmas kaplanmış kesici takımında elde edilen kesme kuvvetlerinin kaplamasız kesici takıma nazaran daha düşük olduğu net olarak görülmektedir. Fx kuvvetlerine bakıldığında kaplamasız kesici takımında 1,5 N’a yaklaşırken, elmas kaplanmış olan takımında ise kuvvetler 1 N civarında gerçekleşmektedir. Buna karşın, ilerleme yönündeki kuvvet olan Fy kuvvetleri tüm talaş derinlikleri için karşılaştırıldığında, elmas kaplanmış kesici takımdaki meydana gelen kuvvetler 1 N’un altındayken, kaplamasız kesici takımında özellikle 400 µm olan talaş derinliğinde kesme kuvvetleri 1 N’un üzerine çıktığı görülmektedir. Şekil 4.6’da görüldüğü üzere, Fz kuvvetleri daha büyüktür ve artan talaş derinliği ile birlikte kesme kuvvetleri arasındaki farkta artmaktadır. Buna karşın elmas kaplanmış olan kesici takımında meydana gelen kuvvetler 1 N’un altında gerçekleşmiş ve talaş derinliği arasındaki artış kaplamasız olan kesici takımdaki kadar bariz değildir. Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 beraber değerlendirildiğinde, işlenen malzeme Al 7075 serisinden olması nedeniyle kesici takımında artan kesme uzunluğu ile birlikte belirgin bir aşınmanın olmadığını söylemek mümkündür. Aynı zamanda elmas kaplanmış olan kesici takımında meydana gelen kuvvetlerin, kaplamasız olan kesici takıma nazaran daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat yüksek olan kesme parametrelerinde örneğin; maksimum olan ilerleme, maksimum olan devir sayısı ve maksimum olan talaş derinliklerinde, elmas kaplanmış olan kesici takımında kesme uzunluğu ile birlikte kuvvetin bir miktar attığı görülmüştür.



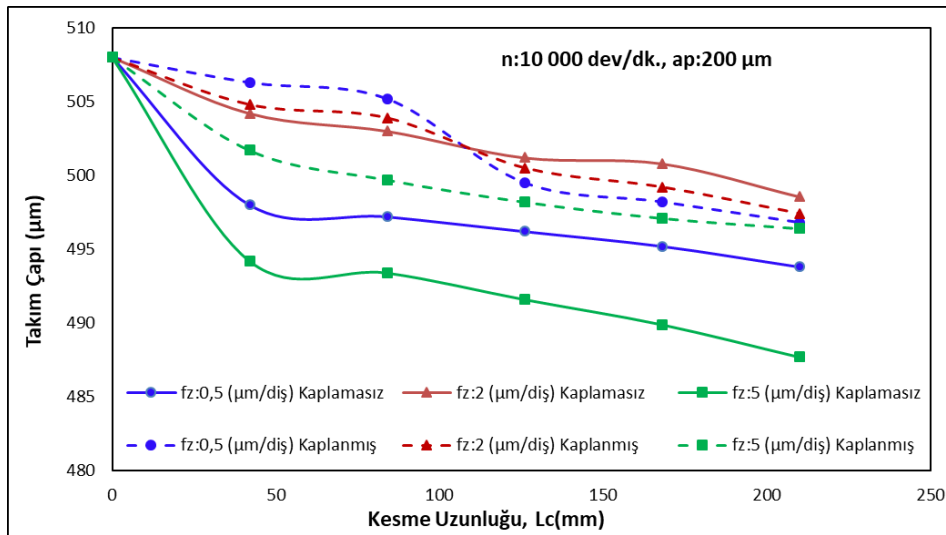
Şekil 4. 6 Kaplamasız ile elmas kaplanmış takımların farklı talaş derinlik değerlerine ve kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.

4.2 Kesme Parametrelerinin Takım Çapı Aşınması Üzerindeki Etkisi

4.2.1 İlerlemenin Takım Çapı Aşınması Üzerindeki Etkisi

Mikro frezeleme işleminde takım aşınması genellikle iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlardan biri çevresel meydana gelen takım aşınmasıdır ve takım çapında küçülmeye neden olmaktadır. Bir diğeri ise, takım kenar radyüsünde meydana gelen büyümedir. Bu iki aşınma tipi de kesici takımın kenar geometrisinin değişmesine neden olmaktadır. Kenar geometrisinin değişmesi aynı zamanda kesme esnasında meydana

gelen kuvvetleri, işlenen yüzeyin kalitesini ve işlenen kanalların kenar kısımlarında oluşan çapağın boyutunu etkilemektedir. Bu tez çalışmasında, takımda meydana gelen aşınma iki farklı şekilde ele alınmıştır. Öncelikli olarak, takım çapında meydana gelen değişim, kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilmiştir. İkincisi ise, takım kenarında meydana gelen kenar aşınması, kesme uzunluğuna bağlı olarak, belirli aralıklarla ölçülmek suretiyle tespit edilmiştir. Kesme esnasında herhangi bir takım kırılmasına veya kenarda meydana gelen küçük çaplı chipping türü kırılmalara rastlanmamıştır. Dolayısıyla takımda meydana gelen aşınmanın ağırlıklı olarak hazar mekanizması abrasiv aşınma mekanizması olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.7’de kesme uzunluğuna ve diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak, takım çapındaki değişim verilmiştir. Talaş derinliği, 200 μm ve devir sayısı 10 000 dev/dk. olarak sabit alınmıştır.



Şekil 4. 7 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların kesme uzunluğuna ve diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak takım çapındaki değişimi.

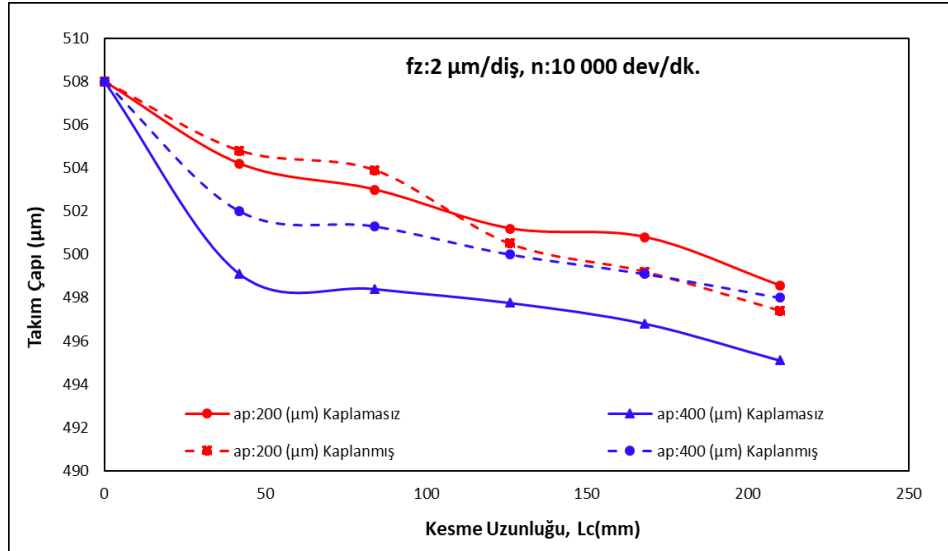
Şekil 4.7’den de görüldüğü üzere, artan kesme uzunluğuna bağlı olarak, takım çapındaki küçülme hemen hemen lineer olarak gerçekleşmektedir. Takımın ilk kullanılmadan önceki çapları ortalama olarak 508 μm olarak ölçüldüğü için kesme mesafesinin sıfır olduğu durumdaki çap ta sabit 508 μm olarak alınmıştır. Her kesme uzunluğu sonrasında, takım çapı değişimi USB Mikroskobu vasıtasıyla alınan görüntü üzerinden ölçülmüştür. Şekil 4.7’de sürekli olan çizgiler kaplamasız olan kesici takımı ifade ederken, kesikli olan çizgiler ise elmas kaplanmış olan takımları göstermektedir.

Dikkat edilecek olursa, özellikle 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve 5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ olan ilerleme değerlerinde, kaplamasız olan kesici takım çapındaki meydana gelen aşınma maksimum düzeyde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte ilerleme değerinin 2 $\mu\text{m}/\text{diş}$ olduğu durumda hem kaplamasız hem de elmas kaplanmış olan kesici takım çapındaki değişimin birbirine çok yakındır. 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ile 5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerlerinde elde edilen takım çaplarındaki küçülmeye bağlı olarak, birbirine yakın olmasının asıl nedeni, 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerinin kritik talaş derinliğine yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Mikro frezeleme işleminde seçilen ilerleme değerinin küçülmesiyle birlikte, takımda meydana gelen aşınmanın arttığı daha önceki yapılan çalışmalarda da ortaya konulmuştur (Aslantas *et al.* 2016a,b). Şekil 4.7’de ilerleme değeri 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ’den 5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ’e yani on kat ilerleme değerinin artmasına karşın, takım çapındaki meydana gelen aşınmanın on kat artmadığı çok net olarak görülmektedir. Dolayısıyla düşük ilerleme değerinin kullanılması takım çapında daha fazla bir aşınmaya neden olmaktadır. Bu durum ise takım geometrisinin bozulması anlamına gelir. Şekil 4.7.’den çıkartılacak bir diğer sonuç ise, takımın elmas kaplanmış ve kaplamasız olduğuna bakılmaksızın 2 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerinin seçilmesi takımdaki değişimin azalması açısından daha avantajlı bir ilerleme değeri olduğunu söylemek mümkündür.

4.2.2 Talaş Derinliğinin Takım Çapı Aşınması Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.8’de kesme uzunluğuna bağlı olarak, farklı talaş derinliği için elde edilen takım çapındaki değişimin grafiği verilmektedir. Talaş derinliğinin 400 μm olduğu durumda kaplamasız takımda meydana gelen takım çapı küçülmesinin maksimum olduğu, buna karşı elmas kaplanmış olan kesici takımda da takım çapı küçülmesinin daha az olduğu çok net olarak görülmektedir. Buradan çıkarılacak bir diğer sonuç ise talaş derinliğin çok küçük seçilmesi aksenel olarak kritik talaş derinliğine yaklaşıldığından dolayı kullanılmış olan takımın kaplamasız veya elmas kaplanmış olması takım çapındaki değişimi farklı etkilemektedir. Şekil 4.8’de çıkartılacak bir diğer sonuç ise ister elmas kaplanmış ister kaplamasız olsun kesici takımlarda talaş derinliğinin 200 μm ’den 400 μm ’ye alınması takım çapında ciddi bir aşınmanın meydana gelmediğini göstermektedir. Çünkü takım çapının 508 μm olduğu düşünülürse talaş derinliğinin 400 μm olduğu elmas kaplanmış takımda ise 210 mm’lik bir kesme

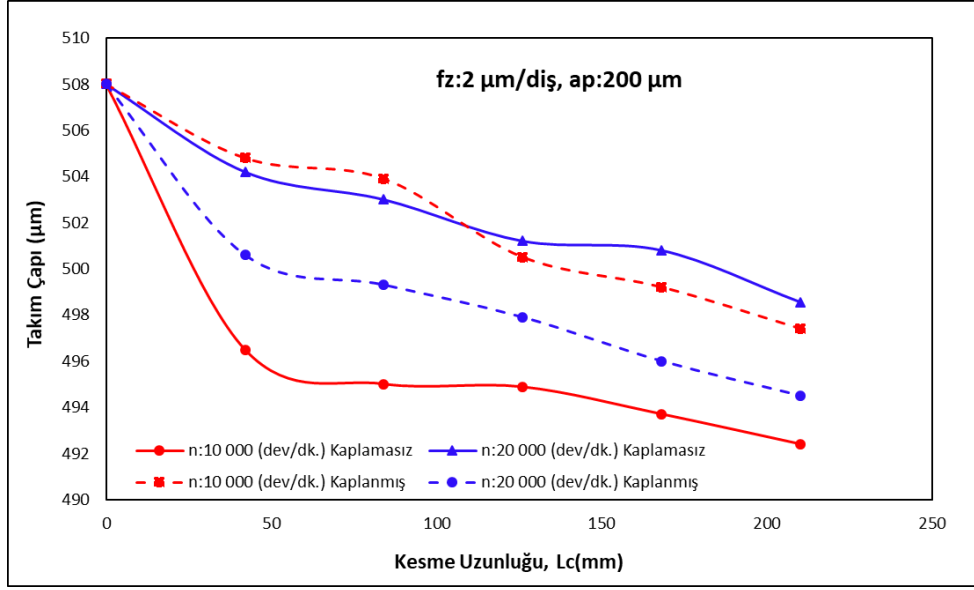
uzunluğu sonrasında meydana gelen takım çapı yaklaşık 495 μm 'lar civarında olduğu görülmüştür. Bu durumda seçilen ilerleme değeri takım çapındaki değişime daha fazla etki etki ettiği görülmüştür. Oysa talaş derinliğinin artması ilerleme kadar takım çapını etkilememektedir.



Şekil 4. 8 Kaplamasız ve elmas kaplanmış kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı talaş derinliği için elde edilen takım çapındaki değişimin grafiği.

4.2.3 Devir Sayısının Takım Çapı Aşınması Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.9'da farklı devir sayıları için kesme uzunluğuna bağlı olarak takım çapında meydana gelen değişim verilmiştir. Şekil 4.9'da ilerleme değeri 2 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliği 200 μm olarak sabit alınmıştır. 10 000 dev/dk.'da kaplamasız olan kesici takım çapındaki aşınmanın daha fazla olduğu görülmektedir. Artan devir sayısı ile birlikte bu aradaki farkında değişkenlik gösterdiğini söylemek mümkündür. Şöyle ki 10 000 dev/dk.'da kaplamasız ile elmas kaplanmış takım arasındaki takım çapı farkı artarken, devir sayısının 20 000 dev/dk. olduğu durumda kaplamasız ile elmas kaplanmış takımlarda elde edilen takım çapları arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. 20 000 dev/dk.'da kaplamasız takımın daha az aşındığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak kaplamanın aşınması olduğunu söylemek mümkündür.



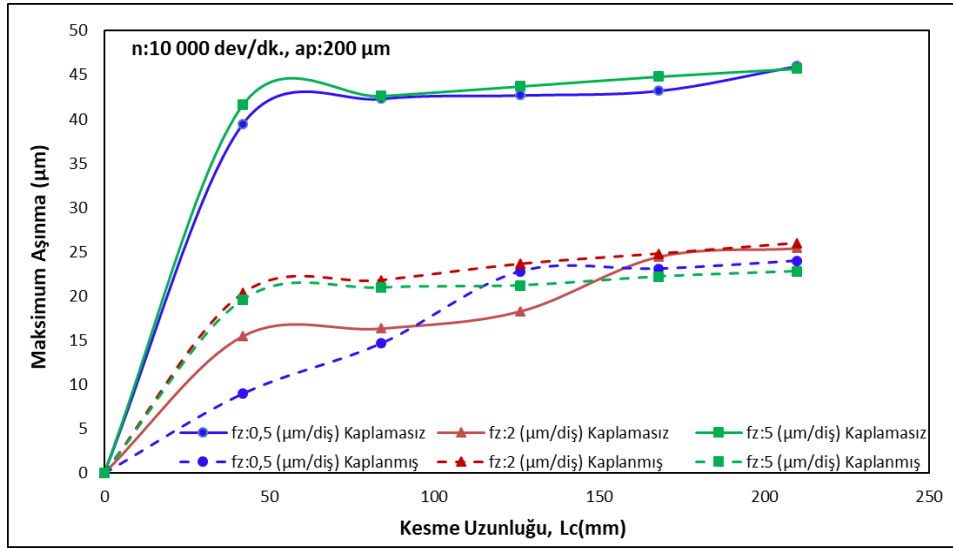
Şekil 4. 9 Kaplamasız ve elmas kaplanmış farklı devir sayıları için kesme uzunluğuna bağlı olarak takım çapında meydana gelen değişimi.

4.3. Kesme Parametrelerinin Takım Kenar Aşınması Üzerindeki Etkisi

4.3.1 İlerlemenin Takım Kenar Aşınması Üzerindeki Etkisi

Mikro frezeleme işleminde karşılaşılan temel aşınma tiplerinden biride kenar aşınmasıdır. Özellikle kesme mesafesinin artması ve kesme parametrelerinin değişimi ile birlikte kenar yüzeyinde meydana gelen aşınma, geleneksel frezeleme işleminde kenar aşınması (flank wear) olarak isimlendirilen aşınmaya karşılık gelmektedir. Bu kenar aşınması daha çok abrasif aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle de kesme mesafesinin artmasıyla birlikte, takımla talaşın temas ettiği yüzeyde meydana gelen bir aşınmadır ve takım yüzeyinden malzeme kaybının bir sonucu olarak takım geometrisi zamanla bozulmaya uğramaktadır. Şekil 4.10' da kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı ilerleme değerleri için meydana gelen aşınma değerlerinin değişimi verilmiştir. Elmas kaplanmış olan kesici takımlarda meydana gelen kenar aşınmasının minimum düzeyde kaldığı ve ilerleme değerine bağlı olarak, aralarında çok ciddi bir farkın olmadığı çok bariz olarak görülmektedir. Örneğin ilerleme değerinin 5 µm/diş alındığı durum ile 2 µm/diş alındığı durumda, kaplanmış ve kaplamasız olan kesici takımda meydana gelen kenar aşınması benzer bir seyir izlemiştir. Fakat ilerleme değerinin 0,5 µm/diş olduğu durumda özellikle ilk 125 mm'lik kesme mesafesinde kenar aşınması daha küçük bir düzeyde gerçekleşmiştir. Fakat 125

mm'lik kesme uzunluğu sonrasında, artan kesme uzunluğu ile birlikte neredeyse sabit kalmış ve 2 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerleriyle benzer bir seyir izlemiştir. Grafikte dikkati çeken diğer bir unsur ise, kaplamasız olan kesici takımda ilerleme değerinin çok düşük veya çok yüksek alındığı her iki durumda takım aşınması benzer bir eğilim sergilemiştir. Buna karşın, 2 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerinde, kaplanmış olan kesici takımda meydana gelen takım aşınması ise $fz=5 \mu\text{m}/\text{diş}$ ile benzerlik göstermektedir.



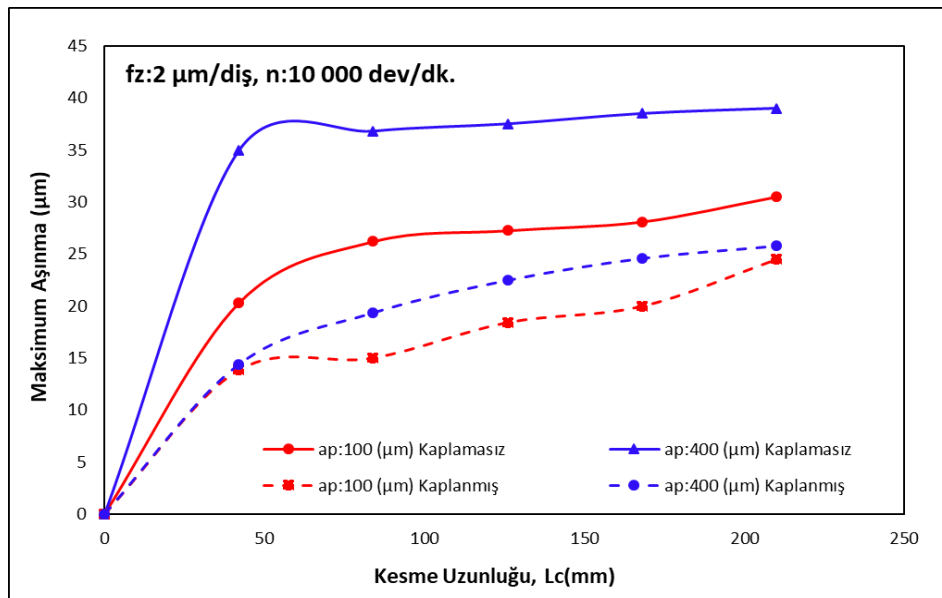
Şekil 4. 10 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı ilerleme değerleri için meydana gelen aşınma değerlerinin değişimi.

Burada ilk akla gelecek olan soru şudur, niçin ilerleme değerinin çok düşük olduğu durumla çok yüksek olduğu iki durumun birbirine benzer bir eğilim sergilemiş olmasıdır. Mikro frezeleme işleminde özellikle kenar radyüsünden daha düşük veya kenar radyüsüne yakın olan ilerleme değerlerinde, minimum talaş kalınlığına yaklaşıldığı için kesme işleminin çokta sağlıklı gerçekleşmediği literatürde vurgulanmaktadır. Özellikle minimum talaş kalınlığına yakın ilerleme değerlerinde kesme kuvvetleri artma eğilimine girerken, buna bağlı olarak yüzey kalitesi bozulmaktadır. Benzer bir durum takım aşınmasında da görülmektedir. Şöyle ki 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ olan ilerleme değeri hemen hemen kesici takımın kenar radyüsüne en yakın olan ilerleme değeridir. Bu durumda kesici takım, sağlıklı bir kesme yapamadığı ve kazınma ağırlıklı bir kesme yaptığı için kenar aşınmasının da maksimum düzeyde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Elmas kaplanmış olan kesici takımda ilerleme değeri, çok düşük (0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$) alındığı durumda da kenar aşınmasının daha düşük seviyelerde kalmış

olduğu görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında elmas kaplamanın özellikle mikro frezeleme işleminde çok düşük ilerleme değerleri için takım ömrünü arttırabildiği aynı zamanda kesme kuvvetleri açısından da takım ömrüne avantaj sağladığını söylemek mümkündür. Daha öncede ifade edildiği üzere, ilerleme değerinin $0,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ 'den daha altında olan ilerleme değerlerinde kesme kuvvetleri ciddi bir artış göstermemiştir (Şekil 4.3). En azından kaplamasız kesici takımlar kadar bir artış göstermediğini söylemek mümkündür.

4.3.1 Talaş Derinliğinin Takım Kenar Aşınması Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.11'de farklı talaş derinlikleri ve kesme uzunluğuna bağlı olarak takım kenarında meydana gelen aşınmanın değişimi verilmiştir. Talaş derinliğinin değişmesiyle birlikte, kaplanmış olan kesici takımlar arasındaki fark kaplamasız takıma nazaran daha düşük bir düzeyde kalmıştır. Elmas kaplanmış olan kesici takımlarda aşınmanın minimum düzeyde kalmış olması da çıkarılabilecek diğer bir sonuçtur. Kaplamasız kesici takım için ilginç olan bir durum ise yine talaş derinliğinin minimum ve maksimum olduğu iki durumda yani $100 \mu\text{m}$ ile $400 \mu\text{m}$ derinliklerinde takım kenarında meydana gelen aşınmanın maksimum düzeyde gerçekleşmiştir.

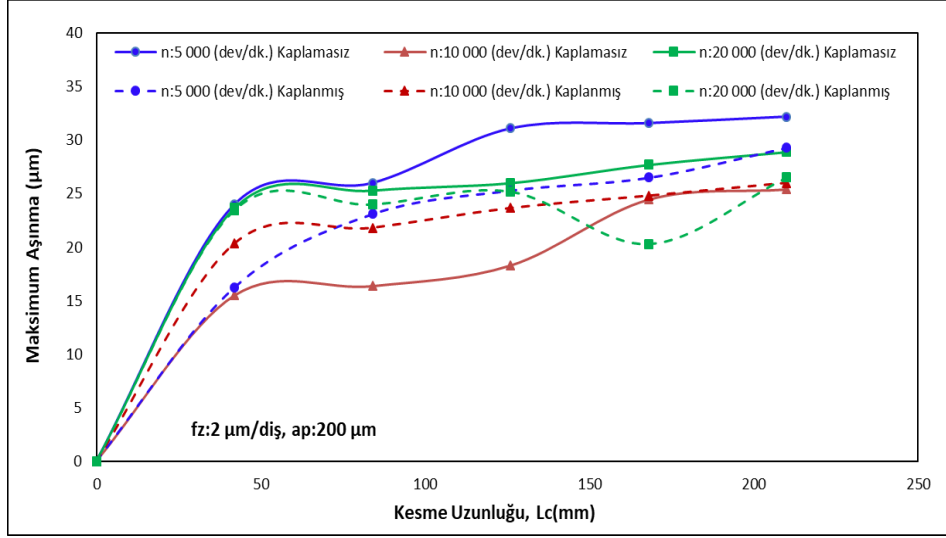


Şekil 4. 11 Kaplamasız ve elmas kaplanmış farklı talaş derinlikleri ve kesme uzunluğuna bağlı olarak takım kenarında meydana gelen aşınmanın değişimi.

Mikro frezeleme işleminde minimum talaş kalınlığının yanısıra bir de minimum talaş derinliğinden bahsetmek mümkündür. Minimum talaş kalınlığı kenar radyüsü ile bağlantılı iken, minimum talaş derinliği de kesici takımın köşe radyüsü ile alakalıdır. Talaş derinliği takımın köşe radyüsünün yaklaşıkça da kesme işlemi kazınma ağırlıklı bir keşme işlemine döner. Bu da hem takım aşınma davranışını hem de yüzey kalitesini olumsuz etkiler. Burada 400 µm talaş derinliğinde aşınmanın maksimum olmasının sebebi kaldırmış olduğu talaş kesitinin yüksek olmasıdır. 100 µm'de ise aşınmanın yüksek olmasının temel nedeni ise, minimum talaş derinliğine yaklaşmış olmasıdır. Gerek Şekil 4.10'da gerekse Şekil 4.11'de benzer bir durum olarak karşımıza çıkan bir diğer unsur ise 50 mm'den sonraki kesme uzunluklarında meydana gelen aşınmanın çok düşük düzeyde gerçekleşmiş olmasıdır. Bunun altındaki temel unsur kesilmekte olan iş parçasının alüminyum esaslı bir malzeme olması hasebiyle, takımın ilk kesme esnasındaki hızlı ve düşük düzeydeki aşınma sonrasında çok daha yavaş bir aşınma bölgesine girmektedir.

4.3.3 Devir Sayısının Takım Kenar Aşınması Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.12'de ise farklı devir sayıları için kaplanmış ve kaplanmamış kesici takımların kesme uzunluğuna bağlı olarak kenar aşınması değerleri verilmiştir. Burada diş başına düşen ilerleme değeri $f_z:2 \mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliği ise 200 µm olarak alınmıştır. Kaplamasız olan kesici takımda özellikle 5 000 dev/dk. ile 20 000 dev/dk.'da elde edilen aşınmanın maksimum düzeyde gerçekleşmiş olmasıdır. En düşük aşınma değerleri 10 000 dev/dk. olduğu görülmüştür. Elmas kaplanmış olan kesici takımda elde edilen aşınma değerlerinin her üç devir için de birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

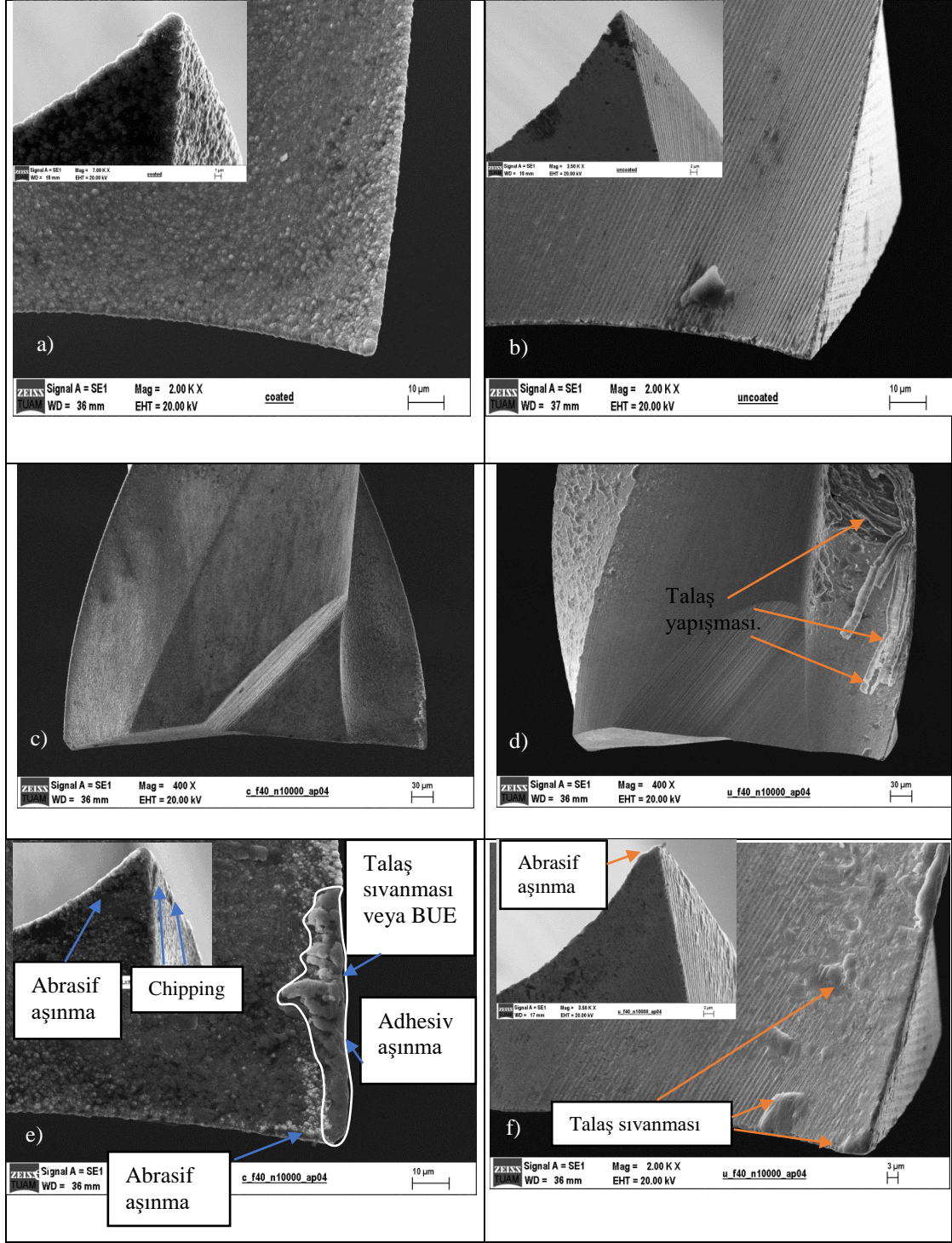


Şekil 4.12 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların kesme uzunluğuna bağlı olarak kenar aşınma değerleri.

4.4 Takım Aşınma SEM Analizi

Şekil 4.13-a) ile b) şıklarında elmas kaplanmış ve kaplamasız kesici takımlara ait örnek SEM görüntüleri verilmektedir. Şekilde öncelikle dikkati çeken ilk unsur kaplamasız olan takımın talaş yapışmasının yoğun bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte takımın meydana gelen aşınmaya bağlı olarak burun radyüsünde de değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 4.13-e) şıkında kaplanmış olan kesici takımın üzerine talaş yapışmasıyla birlikte aynı zamanda burun radyüsünde bir miktar büyüdüğü görülmektedir. Buradaki aşınma ağırlıklı olarak abrasif aşınma mekanizmasıdır. Bu abrasif aşınma ile birlikte adhesiv aşınmanın da olduğu net olarak görülmektedir. Şekil 4.13-e) şıkında özellikle iş parçası malzemesi olan alüminyum alaşımının kesici yüzeye sıvanmış (BUE (Build Up Edge)) olduğu net olarak görülmektedir. Aynı zamanda iş parçasının takımın yüzeyine sıvanmadığı kısımlarda da kısmen abrasif aşınma meydana geldiğini söylemek mümkündür. Şekil 4.13'de verilen resimlerde aynı zamanda aynı takımın alın yüzeyinden alınan görüntülerde verilmiştir. Şekil 4.13-e) şıkında alın yüzeyinden verilen görüntüye dikkat edilecek olursa, abrasif aşınmanın etkisiyle kaplamanın bir miktar takımın kesici bölgesinden kalktığı ve talaş yapışmasının meydana geldiği net olarak görülmektedir. Bununla birlikte aynı bölgede abrasif aşınmanın olduğu görülmekle birlikte, takımın kesme yapan diğer yüzeyinde küçük çaplı kırılmaların olduğu da net olarak görülmektedir. Şekil 4.13'de kaplamasız

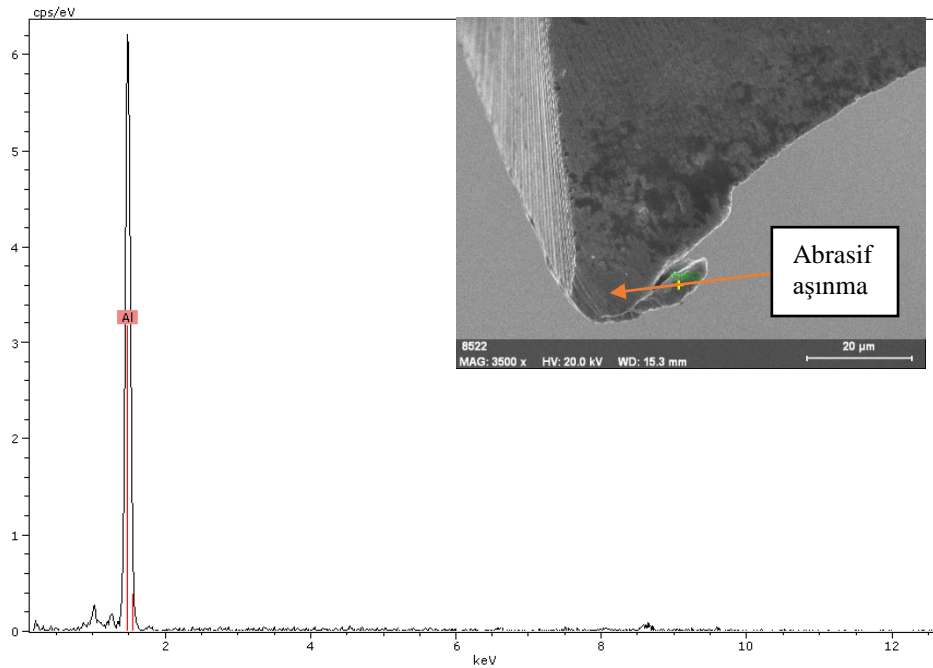
takımın kullanılmamış hali ile kullanılmış halini karşılaştıracak olursak (Şekil 4.13'deki-b-d-f şıkları), ağırlıklı olarak talaş yapışmasının meydana geldiği net olarak görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.13-f) şıkında kaplamasız takımın kenar radyüsünde talaş yapışmasının olduğu net olarak görülmektedir. Aynı zamanda takımın alın yüzeyinden alınan görüntüye bakılacak olursa, kenar radyüsünün abrasif aşınmayla birlikte büyüdüğü çok net olarak görülmektedir.



Şekil 4. 13 a) Kullanılmamış elmas kaplanmış takımın görüntüsü, b) Kullanılmamış kaplamasız takımın görüntüsü, c) Elmas kaplanmış takımın maksimum talaş derinliği şartlarına bağlı olarak uç geometrisindeki değişim, d) Kaplamasız takımın maksimum talaş derinliği şartlarına bağlı olarak uç geometrisindeki değişim, e) Elmas kaplanmış takımın yakınlaştırılmış görüntüsü, f) kaplamasız takımın yakınlaştırılmış görüntüsü.

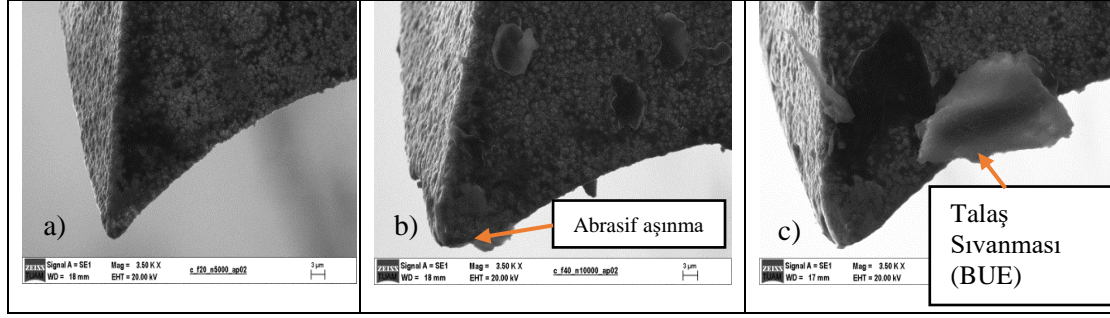
Alüminyum alaşımlarının işlenmesi sırasında talaşın takıma sıvanması en büyük

problemlerden bir tanesidir. Bu çalışmada da özellikle kaplamasız olan kesici takıma talaşın yapışması sıkça rastlanılan bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 4.14’de kaplamasız olan kesici takımla yapılan bir kesme işleminde talaşın takıma nasıl yapıştığını gösterme adına hem SEM görüntüsü hem de EDX analiz sonucu verilmiştir. Şekil 4.14’de takımın kenar radyüsünün abrasif aşınma etkisiyle büyüdüğü net olarak görülmektedir. Bununla birlikte yapışan talaşın gerçekte işlenen iş parçası olup olmadığı EDX analizi ile test edilip, görüntülenen talaşın iş parçasından (Al 7075-T6) çıkan talaş olduğu analiz sonucunda ispatlanmıştır.



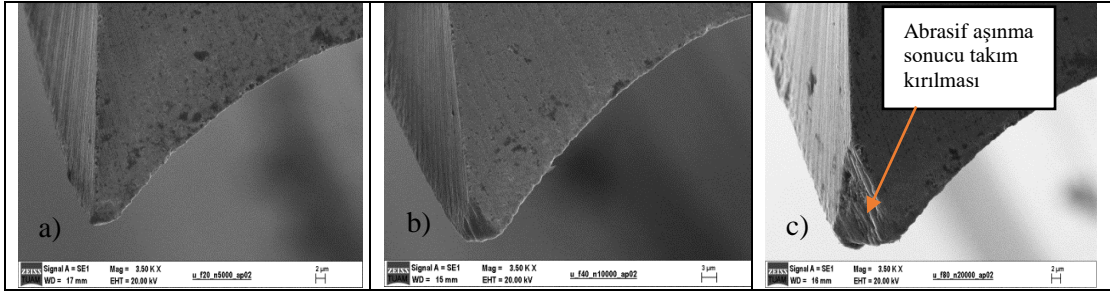
Şekil 4. 14 Kaplamasız takımın ($f_z=100 \mu\text{m}/\text{diş}$, $n=10\,000 \text{ dev}/\text{dk.}$, $a_p=200 \mu\text{m}$) kesme işlemi esnasında meydana gelen talaş yapışması ve EDX analizi görüntüleri.

Şekil 4.15’de elmas kaplanmış olan kesici takımın farklı devir sayılarında talaş kaldırdıktan sonraki kenar radyüslerinin değişimleri verilmiştir. Burada diş başına düşen ilerleme değeri $2 \mu\text{m}/\text{diş}$, talaş derinliği de $200 \mu\text{m}$ olarak sabit tutulmuştur. Şekil 4.15’de görüldüğü üzere devir sayılarının artmasıyla birlikte kenar radyüslerindeki artışı net olarak görülmektedir. Bununla birlikte artan devir sayısı kesme bölgesindeki kesme sıcaklığının artmasına neden olacağı bilinmektedir. Ek olarak abrasif aşınmanın kesici takımın aşınması hızlanacaktır.



Şekil 4. 15 Elmas kaplanmış takım için farklı devir sayılarına bağlı olarak kenar radyüsünde meydana gelen aşınmaların görüntüleri (sabitler; $a_p=200 \mu\text{m}$, $f_z=2 \mu\text{m/diş}$).

Şekil 4.16'da ise kaplamasız olan kesici takımın farklı devir sayılarında talaş kaldırdıktan sonraki kenar radyüslerinin değişimleri verilmiştir. Burada diş başına düşen ilerleme değeri $2 \mu\text{m/diş}$, talaş derinliği de $200 \mu\text{m}$ olarak sabit tutulmuştur. Şekil 4.16'da ilk olarak dikkati çeken devir sayısının $20\ 000 \text{ dev/dk.}$ 'da abrasif aşınmaya bağlı olarak küçük çaplı bir kırılmanın gerçekleştiğini söylemek mümkündür.

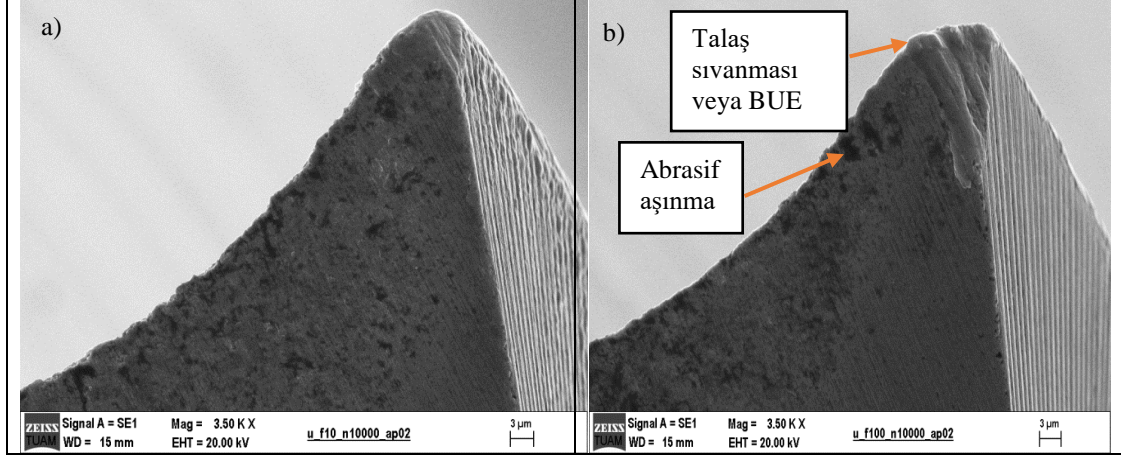


Şekil 4. 16 Kaplamasız takım için farklı devir değerlerine bağlı olarak kenar radyüsünde meydana gelen aşınmaların görüntüleri (sabitler; $a_p=200 \mu\text{m}$, $f_z=2 \mu\text{m/diş}$).

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 birlikte kıyaslanacak olursa, kaplamasız kesici takımında artan devir sayısına bağlı olarak kenar radyüsünün daha fazla büyüdüğü görülmektedir. Bunun sebebi abrasif aşınmanın sonucunda kenar radyüsünün arttığını söylemek mümkündür. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 için elmas kaplanmış ve kaplamasız kesici takımlara ait olan SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.17-a) şıkında $0,5 \mu\text{m/diş}$ ilerleme değeri için yapılan devir sayısındaki takım kenar radyüsündeki değişim verilmiştir. Şekil 4.17-b) şıkında $5 \mu\text{m/diş}$ ilerleme için takım kenar radyüsündeki değişim verilmiştir. Şekil 4.17'de ilerleme artmasıyla birlikte talaşın takım yüzeyine daha fazla sıvandığı (BUE) her iki şıkta da görülmektedir. Aynı zamanda takımın diğer

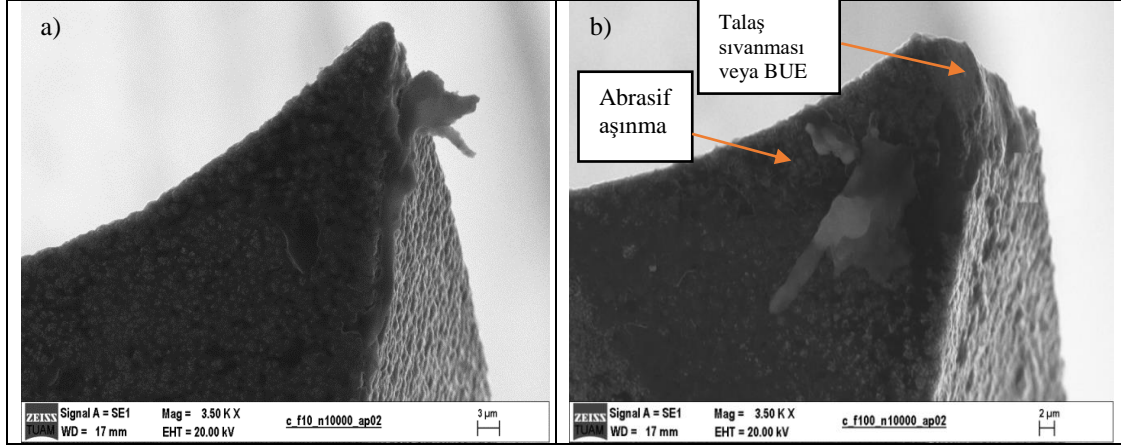
yüzeyinde abrasif aşınmanın da fazla olduğunu söylemek mümkündür.

Bunula birlikte kenar radyüsünün ilerleme hızına bağlı olarak önemli oranda arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 17 Kaplamasız takım için farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kenar radyüsünde meydana gelen aşınmaların görüntüleri (sabitler $n=10\ 000$ dev/dk., $ap=200$ µm).

Şekil 4.18’de elmas kaplanmış kesici takımın $0,5$ µm/diş ve 5 µm/diş ilerleme değerlerine ait olan kenar radyüslerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Özellikle $0,5$ µm/diş ilerleme değerinde kenar radyüsündeki aşınmanın kaplanmış takım için çok küçük düzeylerde kaldığını söylemek mümkündür. Bununla birlikte kesici kenar radyüsünün ilerlemenin artmasına bağlı olarak talaş sıvanması ile abrasif aşınmanın olduğu görülmektedir. Aynı zamanda ilerlemenin artması ile birlikte kenar radyüsünde arttığı net olarak gözlemlenmektedir.

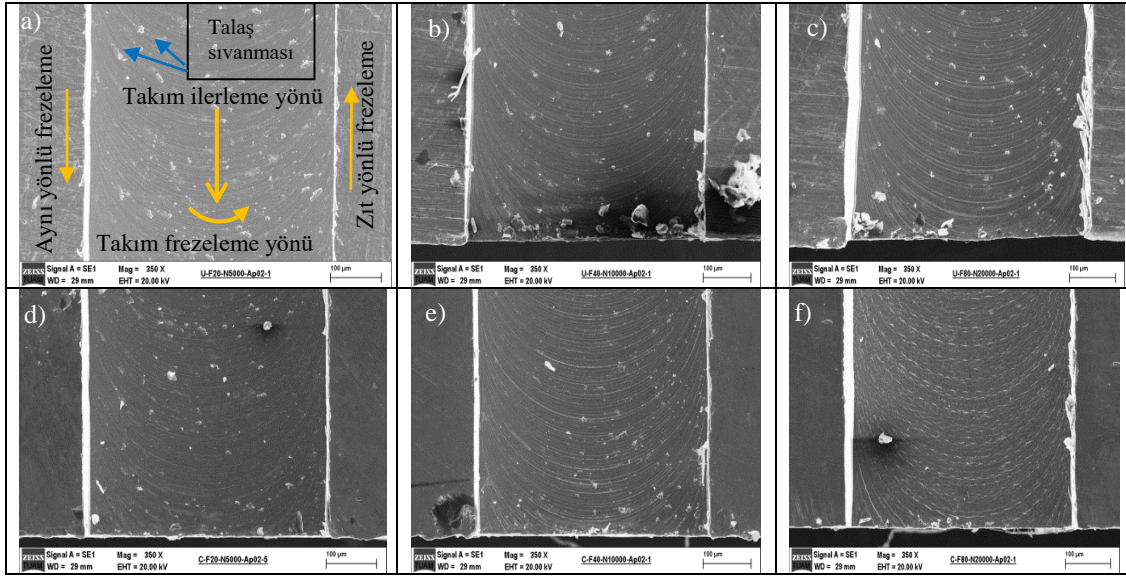


Şekil 4. 18 Elmas kaplanmış takım için farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kenar radyüsünde meydana gelen aşınmaların görüntüleri (sabitler $n=10\ 000$ dev/dk., $a_p=200\ \mu\text{m}$).

4.5 Kanal yüzeyleri ve Çapak Oluşumu

Mikro frezeleme işleminde hem işlenen yüzeyin kalitesi hem de kanal kenarlarında veya işlenen yüzeylerde meydana gelen çapak oluşumu önemli bir unsurdur. Çünkü ikinci bir operasyonla hem yüzeyin düzeltilmesi hem de çapakların izlenmesi neredeyse imkansızdır. Bu nedenle kesme işleminde kullanılan parametrelerin seçimi hem yüzey kalitesi hem de çapağın minimum tutulması gerekmektedir. Şekil 4.19-a-b-c)'deki kaplamasız takımların farklı devirlerde işlediği kanallara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Burada dikkati çeken ilk unsur işlenen yüzeye bakıldığında yüzey altında küçük parçacıkların sıvandığı görülmektedir. Bununla birlikte artan devir sayısı (10 000 dev/dk. ile 20 000 dev/dk.) azaldığını söylemek mümkündür. Özellikle 10 000 dev/dk.'da talaş sıvanmasının daha düşük düzeylerde olduğu görülmektedir. Elmas kaplanmış ve kaplamasız kesici takımların işlediği yüzeyleri karşılaştırılacak olursa; elmas kaplanmış olan kesici takımın işlediği yüzeylerde kaldırılan talaşların yüzeye sıvanma oranının kaplamasız takımın işlediği yüzeylere nazaran daha da azaldığı görülmektedir. 5 000 dev/dk.'da elmas kaplanmış takımın işlediği yüzeylerdeki talaş sıvanma miktarı kaplamasız takımla işlenen yüzeye nazaran daha azaldığı net olarak görülmektedir. Özellikle elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeyler talaş sıvanma oranının 10 000 dev/dk. ile 20 000 dev/dk.'da bariz şekilde azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla elmas kaplanmış kesici takımlarda kaplama yüzey kalitesi açısından önemli bir avantaj sağladığı da burada görülmektedir. Şekil 4.19'da ele alınması gereken bir

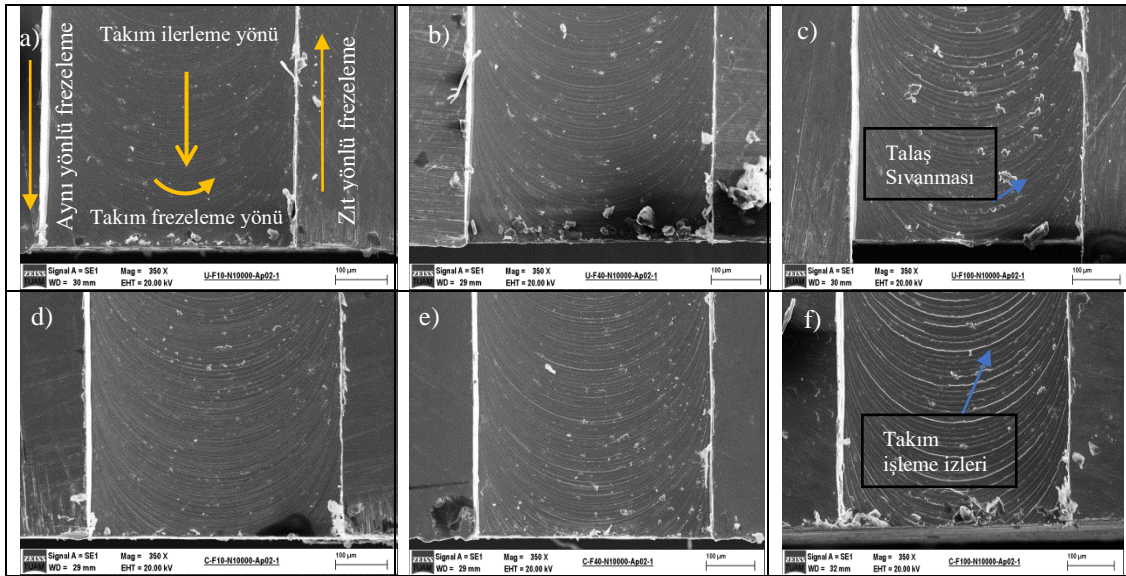
diğer unsur ise çapağın genişliğidir. Dikkat edilecek olursa kaplamasız olan kesici takımın işlediği yüzeylerde artan devir sayısı ile birlikte kanal kenarlarında çapak oluşumu bir miktar arttığı görülmektedir. Elmas kaplanmış takımın işlediği yüzeye bakılacak olursa sadece 20 000 dev/dk.'da ki kanal kenarında meydana gelen çapağın bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir. 5 000 dev/dk. ile 10 000 dev/dk. arasındaki elmas kaplanmış olan takımın işlediği yüzeyleri üzerinde neredeyse çapak oluşumunun hiç olmadığı veya sıfır düzeyine yakın olduğunu söylemek mümkündür. Dolayısıyla elmas kaplamanın hem işlenen yüzey kalitesini arttırdığı hem de çapak boyutlarını azalttığını söylemek mümkündür.



Şekil 4. 19 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımlar için farklı devir değerlerinde elde edilen işlenmiş kanal görüntüleri (sabitler; fz=2 µm/diş, ap=200 µm).

Şekil 4.20-a-b-c)'deki resimlerde kaplamasız takımlar ile d-e-f)'deki resimlerde ise elmas kaplanmış takımların farklı ilerleme değerlerinde işlediği kanallara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.20'de devir sayısı ile talaş derinliği sabit tutularak ilerleme değerleri sırasıyla 0,5 µm/diş, 2 µm/diş ve 5 µm/diş değerleri hem kaplamasız takım için hem de elmas kaplanmış takımdaki işlenen yüzeylerin etkileri gösterilmektedir. Burada ilk dikkati çeken unsur ise işlenen yüzeye bakıldığında yüzey altında küçük parçacıkların sıvandığı görülmektedir. Bununla birlikte artan ilerleme sayısı ile (2 µm/diş ve 5 µm/diş) yüzeydeki sıvanma izlerinin daha da arttığını söylemek mümkündür. Özellikle 5 µm/diş'de talaş sıvanmasının daha yüksek düzeylerde olduğu

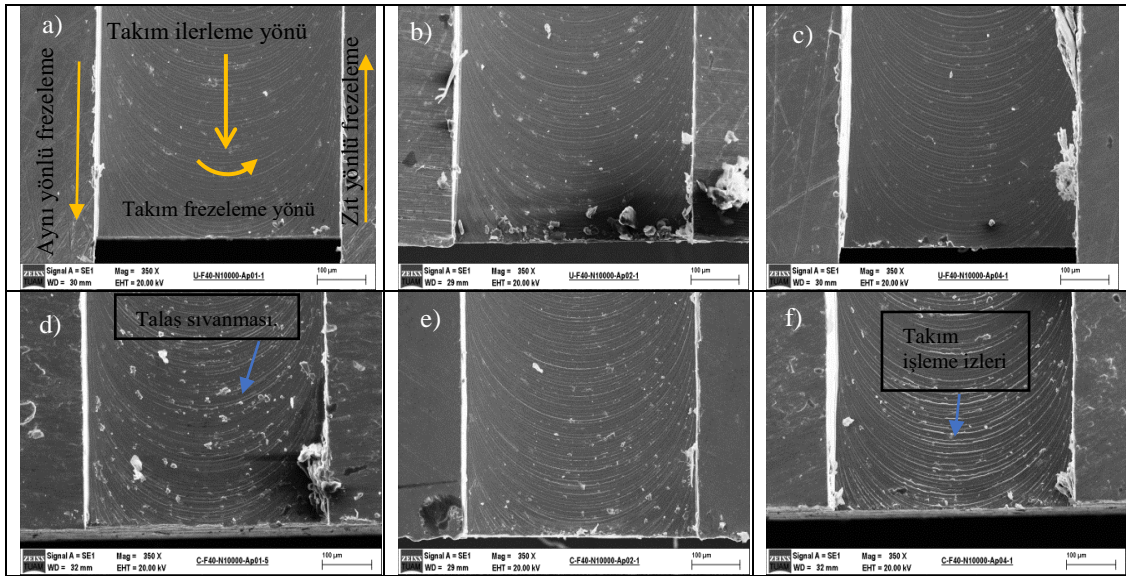
görülmektedir. Elmas kaplanmış ve kaplamasız kesici takımların işlediği yüzeyleri karşılaştırılacak olursa; elmas kaplanmış olan kesici takımın işlediği yüzeylerde kaldırılan talaşların yüzeye sıvanma oranının kaplamasız takımın işlediği yüzeylere nazaran daha da azaldığı görülmektedir. Fakat maksimum ilerleme değerinde (5 $\mu\text{m}/\text{diş}$), kaplamasız olan kesici takımda yüzey izlerinin elmas kaplanmış takım kadar belirgin olmadığı görülmektedir. Ayrıca maksimum ilerleme değerinde (5 $\mu\text{m}/\text{diş}$), elmas kaplanmış takımın işlediği yüzeyin kaplamasız takıma nazaran daha belirgin olduğu ve bu izlerin kanal kenarına kadar ulaştığı görülmektedir. Bunun temel nedeni ise takım kenar radyüsünde meydana gelen aşınmanın bir sonucu olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4. 20 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımlar için farklı ilerleme değerlerinde elde edilen işlenmiş kanal görüntüleri (sabitler; $n=10\ 000\ \text{dev}/\text{dk.}$, $a_p=200\ \mu\text{m}$).

Şekil 4.21-a-b-c)'deki resimlerde kaplamasız takımlar ile d-e-f)'deki resimlerde ise elmas kaplanmış takımların farklı talaş derinliği değerleri için işlediği kanallara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.21'de devir sayısı ile ilerleme değerleri sabit tutularak talaş derinlik değerleri sırasıyla 100 μm , 200 μm ve 400 μm değerleri hem kaplamasız takım için hem de elmas kaplanmış takımdaki işlenen yüzeylerin etkileri gösterilmektedir. Burada ilk göze çarpan durum artan talaş derinliği ile birlikte kanal kenarlarındaki çapağın genişliği artmaktadır. Ayrıca işlenen yüzeye bakıldığında yüzey altında azda olsa küçük parçacıkların sıvandığı görülmektedir. Özellikle minimum ve

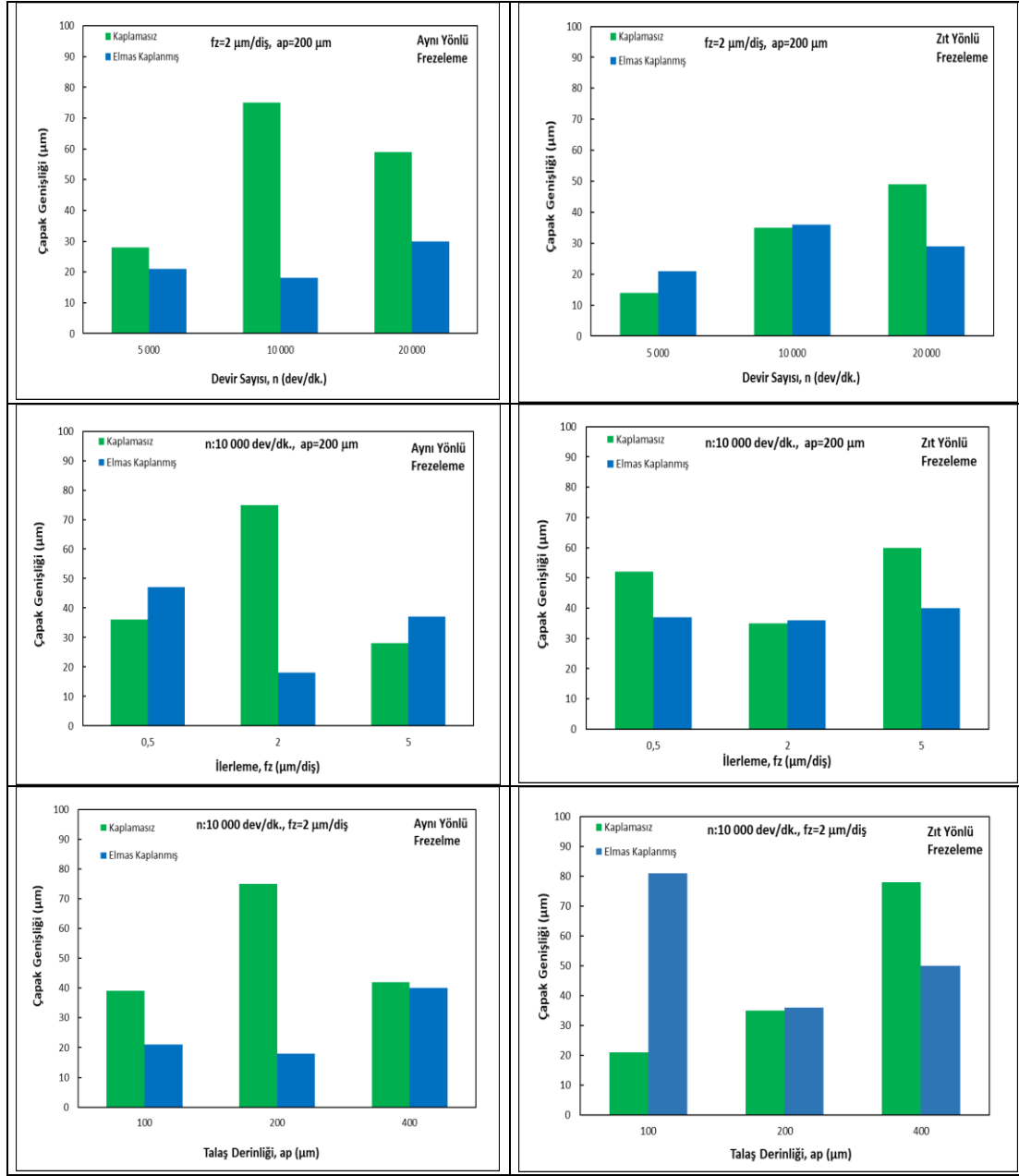
maksimum talaş derinliklerinde (100 µm ile 400 µm) yüzey izlerinin artmasıyla birlikte talaş sıvanma oranının da arttığı görülmektedir. Bununla birlikte 400 µm talaş derinliğinde kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği kanal kenarlarında çapak oluşumu diğerlerine nazaran çok fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.21’de c ile f şıkları yani 400 µm talaş derinliğinde kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği kanallar kıyaslanacak olursa; elmas kaplanmış takımın işlediği yüzeyde işleme izleri ile talaş sıvanmasının çok fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 400 µm talaş derinliğinde elmas kaplanmış takımın işlediği kanalda çapak oluşumu kaplamasız nazaran daha olduğu görülmektedir. Ek olarak Şekil 4.21’de a ile d şıkları yani 100 µm talaş derinliğinde kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği kanalları kıyaslanacak olursa; elmas kaplanmış takımın işlediği yüzeyde işleme izleri ile talaş sıvanmasının çok fazla olduğu buna karşın kaplamasız takımın işlediği yüzeyin elmas kaplanmış nazaran daha düzgün olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak 100 µm talaş derinliğinde kaplamasız takımın işlediği kanal kenarında oluşan çapağın elmas kaplanmış takıma nazaran daha az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 21 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımlar için farklı talaş derinliği değerleri için elde edilen işlenmiş kanal görüntüleri (sabitler; n=10 000 dev/dk., fz=2 µm/diş).

Şekil 4.22’de kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı devir sayılarına, farklı ilerleme değerlerine, farklı talaş derinliklerine bağlı olarak kesme bölgesinde aynı yönlü frezeleme ile zıt yönlü frezelemede oluşan çapak genişliklerinin değişimi verilmiştir.

Burada ilk satırda verilen değerler farklı devir sayılarına bağlı olarak aynı ve zıt yönlü frezelemede elde edilen apak genişlikleri verilmiştir. İlk iki grafikten de görüleceği üzere elmas kaplanmış takımın işlediği kanallardaki devir sayıları değişse bile kaplamasız takımdan daha düşük apak genişliklerinin oluştuğu net olarak görülmektedir. Ek olarak aynı yönlü frezelemede elmas kaplanmış takımın 5 000 ile 20 000 dev/dk.'larında talaş genişliğinin 20 – 30 µm arasında olduğu gözlemlenmektedir. Buna karşın 10 000 dev/dk.'da aynı yönlü frezelemede kaplamasız takımın 80 µm talaş boyutuna yaklaştığı görülmektedir. Bunun sebebinin kaplamasız takımın sürtünme katsayısının yüksek olması ve alüminyum 7075 malzemesinin yumuşak bir alaşım olmasının bir sonucu olarak talaş boyunun aynı yönlü frezelemede büyük olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. 22 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı devir sayılarına, farklı ilerleme değerlerine, farklı talaş derinliklerine bağlı olarak kesme bölgesinde aynı frezeleme ile zıt frezelemede oluşan çapak genişliklerinin değişimi.

Ayrıca kesici takımlar bakımından optimum devir sayıları değerlerine bakılacak olursa, aynı yönlü frezelemede kaplamasız takım için 5 000 dev/dk. iken elmas kaplanmış takım için 10 000 dev/dk. olduğu görülmektedir. Bununla birlikte zıt yönlü frezelemede kesici takımlar için optimum devir sayıları, kaplamasız ile elmas kaplanmış takımların 5 000 dev/dk.'da hemen hemen ortak bir değer elde edildiği gözlemlenmektedir. Ek

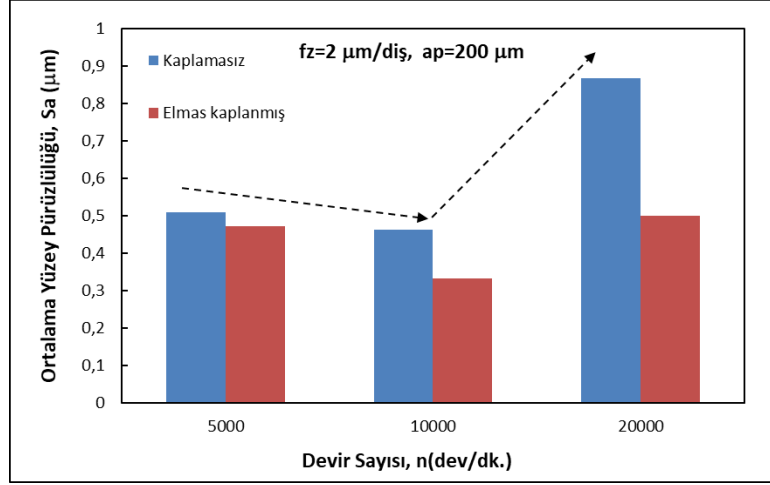
olarak zıt yönlü frezelemede 5 000 dev/dk.'da kaplamasız takımın elmas kaplanmış takımından daha düşük çıkması dikkati çeken diğer bir unsurdur. Ayrıca zıt yönlü frezelemede hem kaplamasız hem de elmas kaplanmış takımlardan elde edilen çapak genişliklerinin değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı yönlü frezeleme ile zıt yönlü frezeleme devir sayılarına bağlı olarak kendi içlerinde karşılaştırılacak olursa, zıt yönlü frezelemede çapak genişliğinin daha az olduğu net olarak görülmektedir. Yine Şekil 4.22'de farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği kanallardaki çapak genişliği ölçümleri verilmiştir. Minimum ilerleme değeri için aynı yönlü frezelemede, ilerlemenin 0,5 µm/diş olduğu bölgede kaplamasız takımın yaklaşık 35 µm'lerde, elmas kaplanmış takımın ise 50 µm çapak genişliğine yaklaştığı gözlemlenmektedir. Yani elmas kaplanmış takımın devir ve talaş derinliği sabitken düşük ilerlemelerde kaplamasız takıma göre biraz daha büyük çapak genişliği oluştuğu net olarak görülmektedir. Ancak yine aynı yönlü frezelemede elmas kaplanmış takım için 2 µm/diş ilerleme değerinde 17 µm çapak genişliğine kadar düştüğü, ilerlemenin 5 µm/diş olduğu değerlerde çapak genişliğinin 40 µm kadar yaklaştığı net olarak görülmektedir. Yani aynı yönlü frezelemede elmas kaplanmış takım için ilerleme minimumdayken en yüksek çapak genişliğinin elde edildiği, ilerleme yükseldikçe çapak genişliğinin azaldığı ancak belirli bir seviyeden sonra tekrar yükselmeye başladı görülmektedir. Buna karşın aynı yönlü frezelemede kaplamasız takım için durum tam tersi olarak gerçekleşmektedir. Kaplamasız takımında en düşük ilerleme değerinde çapak genişliğinin 40 µm kadar yaklaştığı, ilerlemenin 2 µm/diş olduğu bölgede çapak genişliğinin 80 µm civarında olduğu ve ilerlemenin 5 µm/diş olduğu bölgede 30 µm olduğu görülmektedir. Yani ilerleme arttıkça çapak genişliğinin arttığı bununla birlikte maksimum ilerlemede çapak genişliğinin tekrar düşüşe geçtiği net olarak görülmektedir. Zıt yönlü frezelemede elmas kaplanmış takım için tüm ilerleme değerlerinde elde edilen çapak genişliklerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ancak kaplamasız takımında elde edilen değerlerin minimum ilerlemede çapak genişliğinin 50 µm'yi geçtiği ve ilerlemenin 2 µm/diş olduğu bölgede çapak genişliğinin 30 µm civarında olduğu, maksimum ilerlemede ise çapak genişliğinin 60 µm'lere yükseldiği net olarak görülmektedir. Aynı şekilde farklı talaş derinliği değerlerine bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği kanallardaki çapak genişliği ölçümleri verilmiştir (Şekil 4.22). Farklı talaş derinliği değerleri için aynı yönlü frezelemede, elmas

kaplanmış takımın kaplamasız takıma göre daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Talaş derinliğinin 100 µm olduğu bölgede elmas kaplanmış takımın oluşturduğu çapak genişliğinin 20 µm civarında olduğu, talaş derinliğinin 200 µm olduğu bölgede ise çapak genişliğinin 15 µm civarında olduğu ve 400 µm talaş derinliğindeki çapak genişliğinin 40 µm civarına çıktığı net olarak görülmektedir. Yani talaş derinli arttıkça çapak genişliği de belirli bir seviye düşmekte, ancak maksimum talaş derinliğinde çapak genişliği minimumda elde edilen çapak genişliğinden iki kat daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı yönlü frezelemede 400 µm talaş derinliği için kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların çapak genişliğinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte aynı durum zıt yönlü frezelemedeki 200 µm talaş derinliği içinde söylenebilir. Ayrıca zıt yönlü frezelemede 100 µm talaş derinliğinde elmas kaplanmış takımın çapak genişliği 80 µm civarındayken, kaplamasız takımın ise 20 µm civarında çapak genişliği olduğu görülmektedir. Kaplamasız takım için zıt yönlü frezelemede minimum talaş derinliğinde maksimum talaş derinliğine geçerken çapak genişliğinin aynı oranda arttığı gözlemlenmiştir. Ancak aynı durum elmas kaplanmış takım için söylenmesi mümkün değildir. Ama elmas kaplanmış takım için aynı yönlü ve zıt yönlü frezelemede 200 µm talaş derinliğinin optimum değer olduğu sonucuna varılabilir.

4.6 Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki etkisi

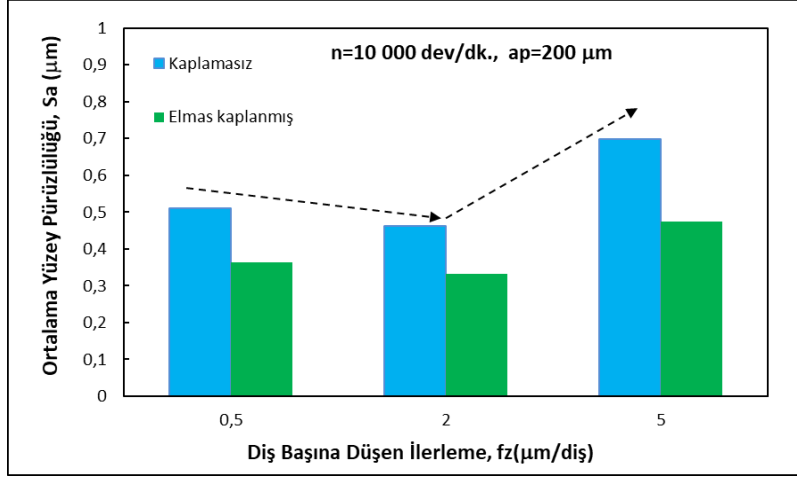
Genellikle mikro frezeleme işleminde konvansiyonel işlemeye bağlı olarak artan devir sayısı ile birlikte yüzey pürüzlülüğün daha kaliteli olması beklenmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.23'de devrin 5 000 dev/dk.'dan 10 000 dev/dk. ya çıkmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü bir miktar azaldığı görülmektedir. Ek olarak devir sayısının artmasıyla hem kaplamasız hem de elmas kaplanmış olan kesici takımda yüzey pürüzlülüğü (Sa) değerlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.23'de kaplamasız takımda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin daha yüksek olduğu net olarak görülmektedir. Buda deneyde kullanılan bir diğer takımın (elmas kaplanmış) alüminyum alaşımlarında kullanılabileceğinin bir göstergesi olarak vurgulanabilmektedir. Özellikle elmas kaplanmış olan kesici takıma bakıldığında 20 000 dev/dk. da dahi yüzey pürüzlülüğünün çok fazla artmadığı net olarak görülmektedir. Ek olarak 20 000 dev/dk.

ile 5 000 dev/dk. devirlerinde yüzey pürüzlülük değerinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir.



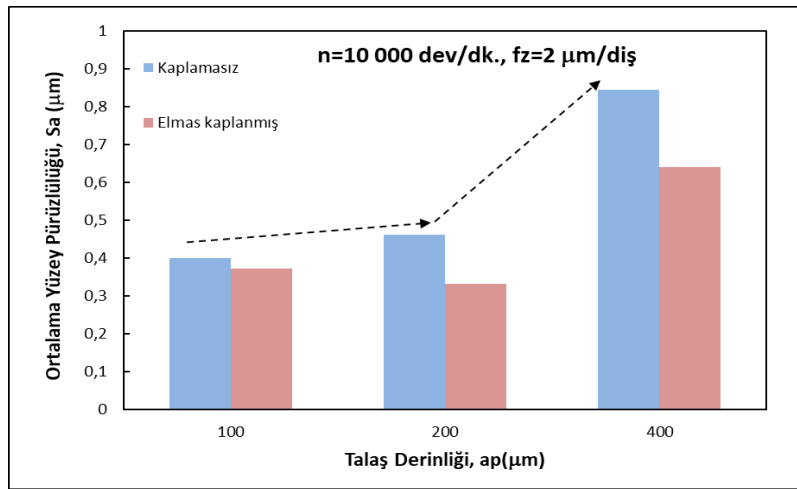
Şekil 4. 23 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı devir sayılarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün (Sa) değişimi.

Şekil 4.24’de ise diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi verilmektedir. Burada dikkati çeken ilk unsur elmas kaplanmış olan kesici takımında elde edilen “Sa” değerlerinin kaplamasız takıma nazaran düşük olduğu görülmüştür. Genellikle mikro frezeleme işleminde kritik ilerleme değerinin altındaki ilerleme değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün artması beklenmektedir (Aslantas *et al.* 2016a,b). Buna karşın 2 µm/diş’den daha düşük olan ilerleme değerinde yüzey pürüzlülüğünün bir miktar arttığını görülmektedir. Bununla birlikte 2 µm/diş’den daha yüksek olan ilerleme değerlerinde yüzey pürüzlülüğü daha belirgin bir şekilde artmaktadır. Hem kaplamasız hem de elmas kaplanmış kesici takım için geçerli bir durumdur. Dolayısıyla alüminyum 7075-T6 malzemesi için kritik ilerleme değerinin hem kaplamasız hem de elmas kaplanmış takımlar için 2 µm/diş olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4. 24 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların dış başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün (Sa) değişimi.

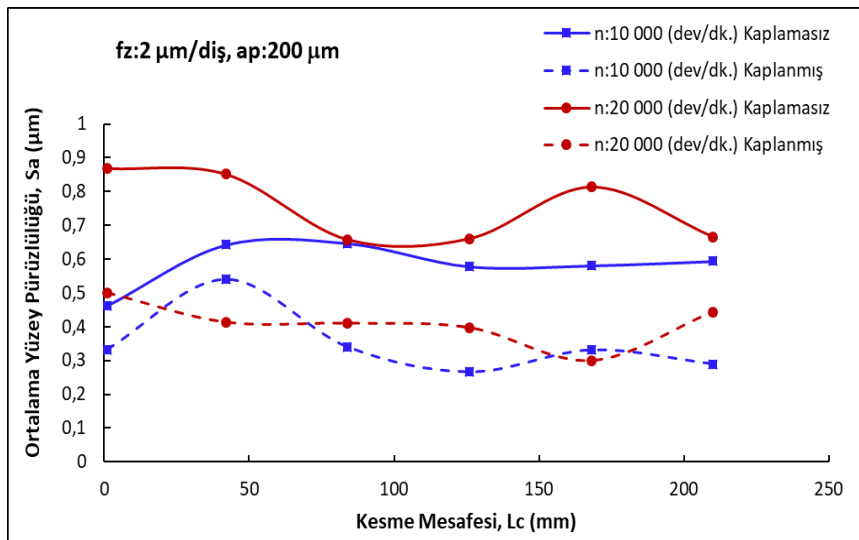
Şekil 4.25’de “Sa” değerlerinin talaş derinliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Burada ilk dikkati çeken durum ise artan talaş derinliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Çünkü artan talaş derinliğine bağlı olarak birim zamanda kaldırılan talaş kesiti artmaktadır (Aslantas *et al.* 2016a,b). Dolayısıyla kaplamasız kesici takımda 100 µm’den 200 µm’ye geçildiğinde nispeten küçük bir artış gözlemlenmektedir. Bununla birlikte 200 µm’den 400 µm talaş derinliğine çıktığında büyük bir artış gözlemlenmektedir. Bu artış aynı zamanda elmas kaplanmış takımda da görülmektedir. Fakat ilginç olan 200 µm olan talaş derinliğinde elmas kaplanmış takımda elde edilen “Sa” değerlerinin minimum olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 25 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların talaş derinliği değerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün (Sa) değişimi.

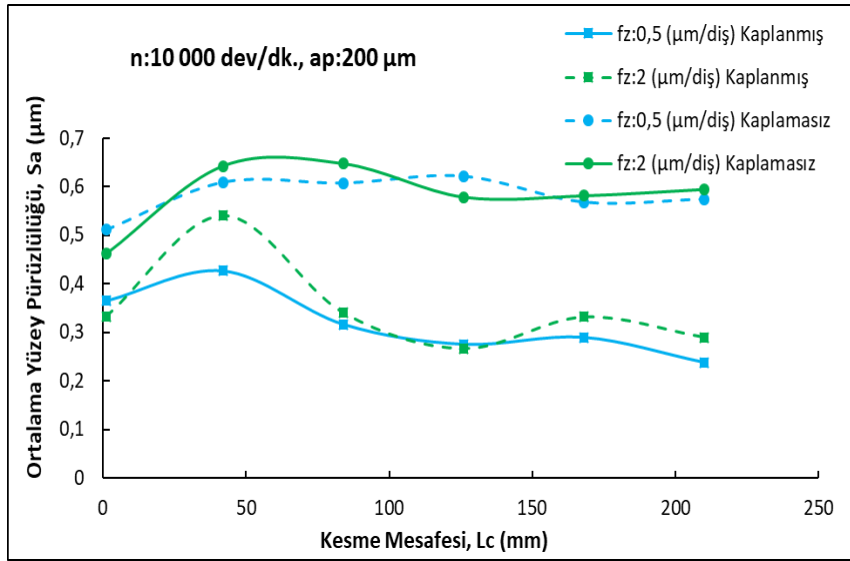
4.7 Kesme zamanına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi

Şekil 4.26'da kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların 10 000 dev/dk. ile 20 000 dev/dk. devirlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi verilmiştir. Şekil 4.26'da artan devir sayısına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerinin bir miktar arttığını ve kesme zamanına bağlı olarak da kısmen bir değişim gösterdiğini söylemek mümkündür. Kaplamasız takımlar için 10 000 dev/dk.'ya bakıldığında; kaplamasız takımda elde edilen "Sa" değerlerinin elmas kaplanmış takıma nazaran daha büyük olduğunu ve tüm kesme boyunca bu durumun değişmeden sürdüğü görülmektedir. Bununla birlikte benzer durum elmas kaplanmış takımda 20 000 dev/dk.'da gözlemlenmektedir. 20 000 dev/dk. için kaplamasız takımda elde edilen "Sa" değerleri ile elmas kaplanmış takımda elde edilen "Sa" değerlerinden yaklaşık iki kat daha büyük olduğu görülmektedir. Burada kesme zamanı ile birlikte takım yüzey pürüzlülüğünün değişmesinin iki nedeni olabilir; bunlardan biri işleme esnasında takım kenar radyüsünde meydana gelen anlık değişim ile kenar radyüsünün artması yüzey pürüzlülüğünün değişmesine neden olacağı bilinmektedir. Diğer bir unsur ise takımın kenar yüzeylerine veya kesme kenarına yapışan talaşın (BUE (Build Up Edge)) etkisi olduğu düşünülmektedir. Çünkü talaş yapışması hem takım geometrisinin değişmesine hem de işlenen yüzey kalitesinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olacaktır.



Şekil 4. 26 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların kesme mesafesine bağlı olarak farklı devirler değerlerindeki yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

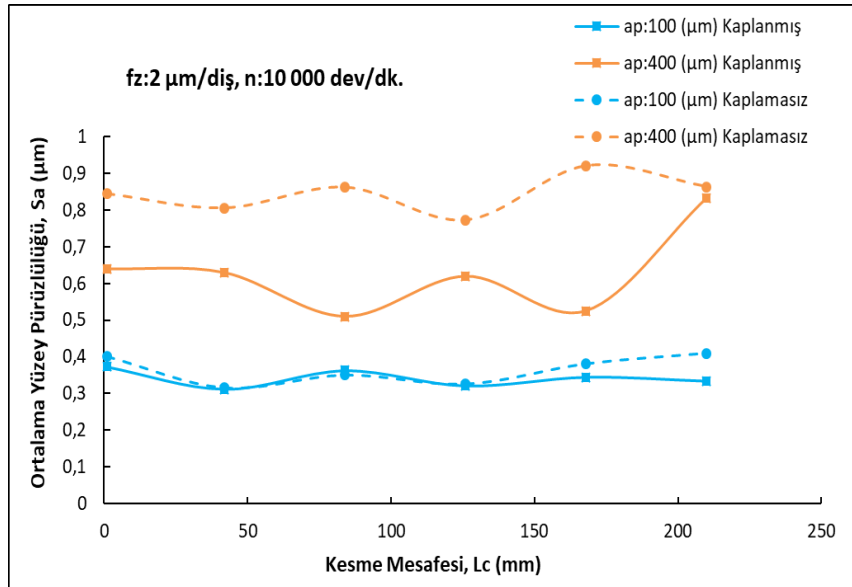
Şekil 4.27’de artan kesme zamanı ile iki farklı ilerleme değerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi verilmiştir. Burada dikkat edilecek olursa 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerine karşılık gelen hem kaplamasız hem de elmas kaplanmış olan takımın yüzey pürüzlülük değerinin bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir. Yani 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerlemede yüzey pürüzlülüğünün ortalama 0,6 μm civarlarında meydana geldiği ve takımın kaplamasız ile elmas kaplanmış olmasının çokta etkili olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte diş başına düşen ilerleme değerinin 2 $\mu\text{m}/\text{diş}$ olduğu durumda yüzey pürüzlülüğünün bir miktar azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda bu azalmanın kesme mesafesiyle devam ettiği net olarak görülmektedir. Burada dikkati çeken bir durum ise; ilerlemenin 2 $\mu\text{m}/\text{diş}$ olduğu esnada elmas kaplanmış olan takımın 42 mm kesme mesafesine gelindiğinde yüzey pürüzlülüğünün normalden fazla bir artış olduğu net olarak görülmektedir. Normalin dışında gerçekleşen bu davranışın takımın kesici kenarına bir talaş yapışması nedeni ile olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. 27 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

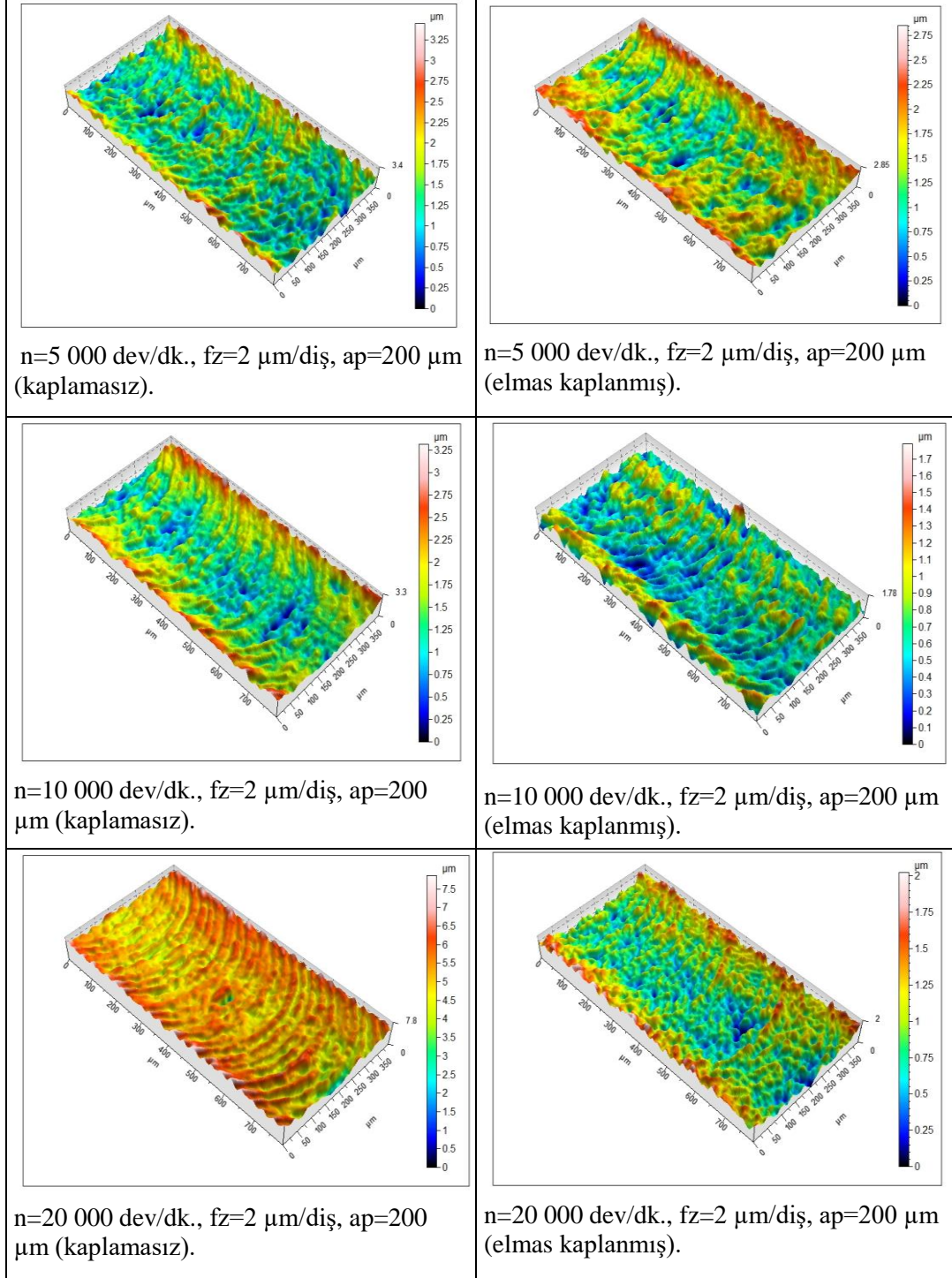
Şekil 4.28’de Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların 100 μm ile 400 μm talaş derinliği değerlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi verilmiştir. Talaş derinliğinin 100 μm olduğu durumda takımın kaplanmış veya kaplamasız olmasının çok önemi olmadığını söylemek mümkündür. Çünkü her iki takım içinde ortalama olarak

“Sa” değerinin 0,4 μm civarında olduğunu görülmektedir. Fakat artan talaş derinliği ile elmas kaplanmış ve kaplamasız takımlar arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Talaş derinliğinin 400 μm olduğu elmas kaplanmış takımında “Sa” değerinin 0,65 μm olduğu görülmektedir. Bununla birlikte aynı talaş derinliğinde kaplamasız olan takımında bu değer 0,85 μm ’ler civarında seyrettiği net olarak görülmektedir. Dolayısıyla bu grafikte talaş derinliğinin artmasıyla birim zamanda kesilen talaş kesitinin artması anlamına gelmektedir. Buda kesme bölgesinde kesilmeye zorlanan ve takım talaş ara yüzeyinde kalan talaşın artması anlamına gelmektedir. Bunun neticesinde talaşın işlene yüzeye sıvanması veya takım talaş temas boyunun (BUE) artmasıyla birlikte “Sa” değerlerinin de arttırdığını söylemek mümkündür.



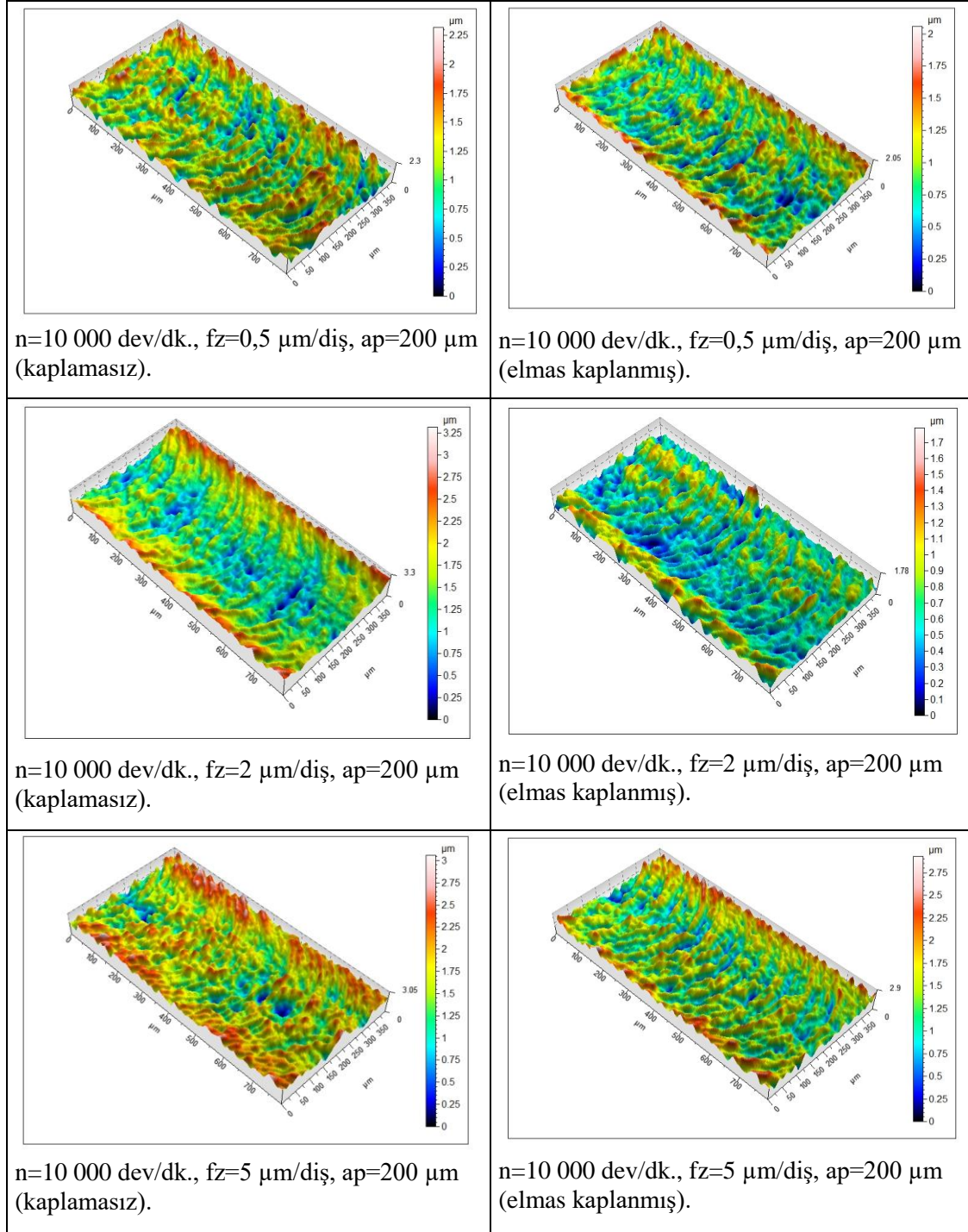
Şekil 4. 28 Kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların farklı talaş derinliği değerlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

Şekil 4.29’da Farklı devir sayılarına bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası verilmiştir.



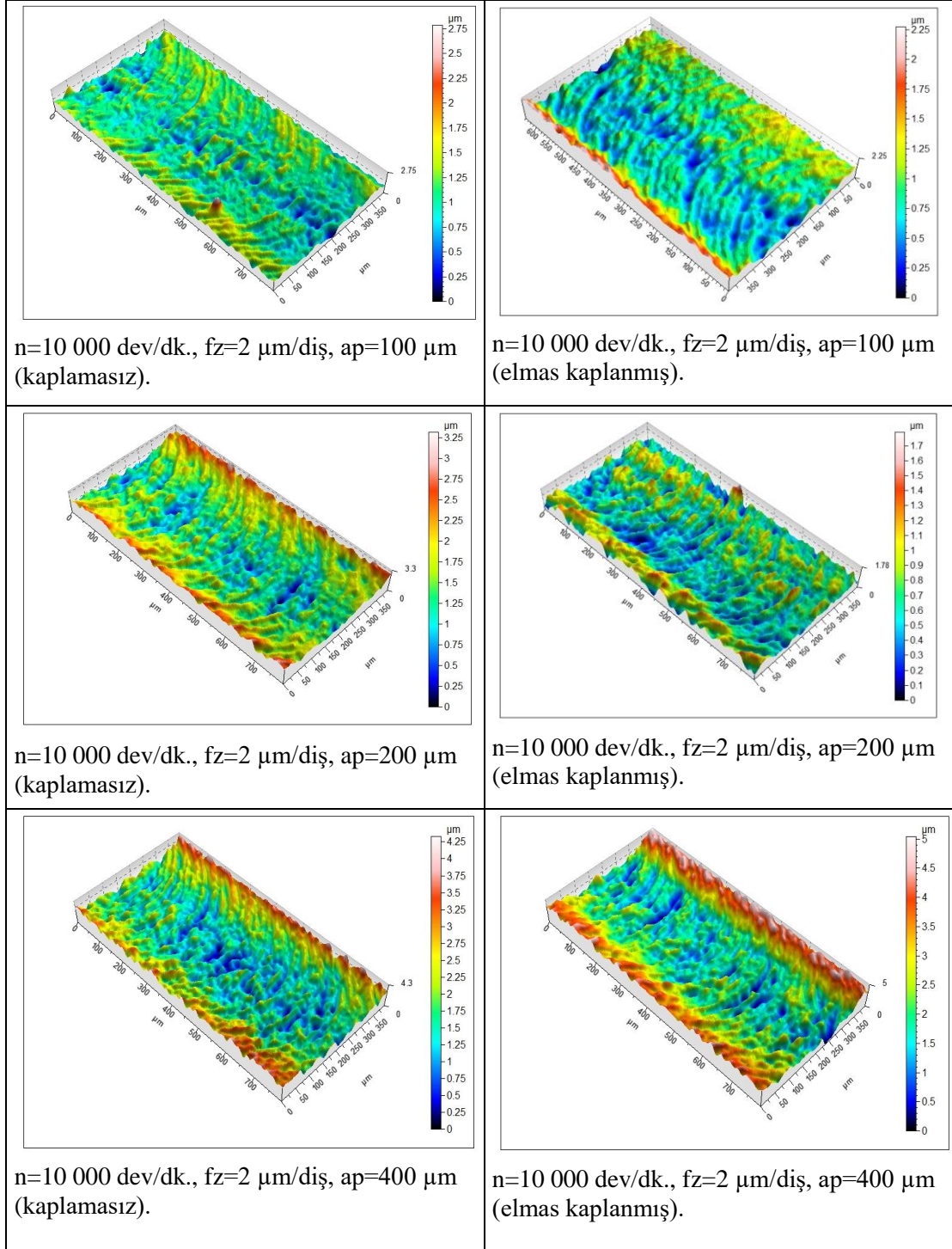
Şekil 4. 29 Farklı devir sayılarına bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası.

Şekil 4.30 Farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası verilmiştir.



Şekil 4. 30 Farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası.

Şekil 4.31 'de Farklı talaş derinliği değerlerine bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası verilmiştir.



Şekil 4. 31 Farklı talaş derinliği değerlerine bağlı olarak kaplamasız ve elmas kaplanmış takımların işlediği yüzeylerin üç boyutlu topografyası.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, 508 μm çapında elmas kaplanmış ve kaplamasız mikro takımların, Al 7075-T6 iş malzemesi üzerinde kuru kesme şartları ile sabit kesme parametrelerinde (talaş derinliği, devir sayısı ve ilerleme hızı) mikro frezeleme testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada hem kesme parametrelerinin hem de kaplama malzemesinin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve çapak oluşumu üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

Kesme kuvvetleri için yapılan deneylerde; 20 000 dev/dk.'da kesme kuvvetlerinin küçük çıktığı ancak takım aşınmasının, talaş sıvanmasının ve takım yüzeyine talaş yapışmasının en fazla devir sayısı olarak tespit edilmiştir. Minimum devir sayısındaki kesme kuvvetlerinin, maksimum devri sayısına göre çok fazla olduğu görülmüştür. Elmas kaplanmış takım için 10 000 dev/dk.'da kesme kuvvetleri artsa da talaş sıvanmasının, çapak genişliğinin ve yüzey pürüzlülük değerinin daha düşük düzeylerde olduğu tespit edilmiştir. Elmas kaplanmış takımında her üç yöndeki kesme kuvvetlerinin (F_x , F_y , F_z) kaplamasız takıma göre daha düşük değerler elde edilmiştir. 0,5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme değerinde kesme kuvvetlerinin çok fazla arttığı bunun sebebinin radyal yöndeki talaş kalınlığının azalması olduğu sonucuna varılmıştır. Kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından hem elmas kaplanmış takım için hem de kaplamasız takım için kritik ilerleme değerinin 2 $\mu\text{m}/\text{diş}$ olduğu tespit edilmiştir. Kesme mesafesi ile farklı talaş derinliklerine bağlı olarak, elmas kaplanmış kesici takımında elde edilen kesme kuvvetleri kaplamasız kesici takıma göre düşük olduğu net olarak görülmüştür. Elmas kaplanmış ve kaplamasız takımlarda her üç yöndeki kesme kuvvetlerinin, minimum talaş derinliği ile maksimum talaş derinliği arasında lineer bir artış olduğu tespit edilmiştir. 50 μm ve altındaki değerlerde takım talaş kaldırmak yerine kazıma işlemi yapmakta ve kesme kuvvetlerin büyük çıkmaktadır. Maksimum ve minimum talaş derinliklerinde elmas kaplanmış takımın çapında ciddi bir azalma görülmemiştir. 200 μm olan talaş derinliğinde elmas kaplanmış takımında elde edilen "Sa" değerlerinin minimum olduğu ve aynı yönlü ile zıt yönlü frezelemede içinde bu değerlerin optimum değer olduğu tespit edilmiştir.

- İşlenen malzeme Al 7075 serisinden olması nedeniyle kesici takımın artan kesme uzunluğu ile birlikte belirgin bir aşınmanın olmadığını söylemek mümkündür. Aynı zamanda elmas kaplanmış olan kesici takımın meydana gelen kuvvetlerin, kaplamasız olan kesici takıma nazaran daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Yüksek olan kesme parametrelerinde örneğin; maksimum olan ilerleme, maksimum olan devir sayısı ve maksimum olan talaş derinliklerinde, elmas kaplanmış olan kesici takımın kesme uzunluğu ile birlikte kuvvetin bir miktar attığı görülmüştür. Bu durum ise elmas kaplanmış olan kesici takımın kısmen de olsa aşınmaya maruz kaldığı bunun neticesinde de takım talaş ara yüzeyindeki sürtünme katsayısının artmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Elmas kaplanmış olan kesici takımın azda olsa aşınmaya maruz kalmasının sonucu olarak kesme kuvvetlerinin arttığı görülmektedir.
- Yüksek olan kesme parametrelerinde örneğin; maksimum olan ilerleme, maksimum olan devir sayısı ve maksimum olan talaş derinliklerinde, her iki kesici takımın kesme uzunluğu ile birlikte talaş sıvanmasında arttığı görülmüştür.
- Mikro şartlarda Al 7075 serisinin sağlıklı bir kesme işlemi için talaş derinliğinin $a_p=100 \mu\text{m}$ 'den daha büyük olması, ilerleme değerinin de $0,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ ve üzerinde bir değer alınması önerilmektedir.
- Alüminyum 7075-T6 iş malzemesinin; kesme kuvvetleri açısından, takım aşınması, çapak genişliğinin en az olduğu, talaş sıvanmasının en az olduğu ve yüzey pürüzlülük değerinin düşük olduğu optimum değerler; devir sayısı için 10 000 dev/dk., ilerleme değeri için $2 \mu\text{m}/\text{diş}$, talaş derinliği için $200 \mu\text{m}$ değerleri seçilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak iki kesici takımın meydana gelen aşınmanın ağırlıklı olarak hasar mekanizması abrasiv aşınma mekanizması olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda her iki kesici takımın talaş yapışması meydana gelmiştir. Ayrıca kesme kuvvetleri, takım aşınmaları ve köşe radyüsü büyümesi elmas kaplanmış takımın daha düşük seviyelerde seyretmiştir. Son olarak elmas kaplanmış kesici takımın takım ömrü açısından kaplamasız takıma kıyasla daha uzun ömürlü olduğu tespit edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Alting, L., Kimura, F., Hansen, H.N., Bissacco, G. (2003). Micro Engineering. *Annals of CIRP, Manufacturing Technology*, **52**: 635-657.
- Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., and Yang, S. (2007). The Effect of AlCrTiN Coatings on Product Quality in Micro-Milling of 45 HRC Hardened H13 Die Steel. Proceedings of the 35th International MATADOR Conference, 203-206.
- Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Yang, S., Cooke, K.E., and Teer, D.G. (2008) Evaluation and Selection of Hard Coatings for Micro Milling of Hardened Tool Steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48**: 1578-1584.
- Aslantaş, K., Çelik, S. G., Çiçek, A., Uçun, İ. (2016a). Mikro işlemede takım aşınması-kanal geometrisi ilişkisi üzerine deneysel bir çalışma. 7.Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu. Marmara Üniversitesi, İstanbul, 3-5 Kasım.
- Aslantas, K., Hopa, H. E., Percin, M., Uçun, I., Çiçek, A. (2016b). Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Precision Engineering*, **45**: 55-66.
- Bakkal, M., Nakş [idot] ler, V. (2009). Cutting mechanics of bulk metallic glass materials on meso-end milling. *Materials and Manufacturing Processes*, **24**: 1249-1255.
- Bang, Y.B., Lee, K.M. and Oh, S., (2005). 5-Axis Micro Milling Machine for machining micro parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **25**: 888-894.
- Bao, W.Y., and 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.
- Bao, W.Y., and Tansel, I.N. (2000). Modeling Micro-End-Milling Operations. Part II: Tool Run-Out. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**: 2175–2192.

- Bao, W.Y., and Tansel, I.N. (2000). Modeling Micro-End-Milling Operations. Part III: Influence of Tool Wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**: 2193–2211.
- Brecher, C., Wenzel, C. and Klar, R., (2008). Characterization and optimization of the dynamic tool path of a highly dynamic micromilling machine. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **1**: 86-91.
- Bruno, F., Friedrich, C. and Warrington, R.O., (1995). The miniaturization technologies: past, present and future. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **42**: 423-430.
- Brousseau, E. B., Dimov, S. S., Pham, D. T. (2010). Some recent advances in multi-material micro-and nano-manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **47**: 161-180.
- Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T., (2006). Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**: 313-332.
- Chang, C., Liao, Y., Wang, G.Z., Y.R. Ma, R.C. Fang (Eds.), (2003). 4 CVD Diamond Growth. Crystal Growth Technology, Springer, Heidelberg, 93.
- Cheung, C., To, S., and Lee, W. (2002). Anisotropy of Surface Roughness in Diamond Turning of Brittle Single Crystals. *Materials and Manufacturing Processes*, **17**: 251–267.
- Cherku, S., (2008). Study of Machining Characteristics and Modeling of Micro Ultrasonic Machining. University of Nebraska, M. Sc. Thesis, Lincoln.
- Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., and Yamane, Y. (2000). Metal machining: theory and applications. Butterworth-Heinemann.
- Choudhury, S. K., and Rath, S. (2000). In-process tool wear estimation in milling using cutting force model. *Journal of Materials Processing Technology*, **99**: 113-119.
- DeVor, R.E. Ehmman, K. F. Kapoor, S.G. (2004). Technology Assessment on Current Advanced Research in Micro-Machining and Related Areas by AMT-The Association For Manufacturing Technology. ISEM 2011 Proceedings.

- Demirci, A. H. (2004). Malzeme bilgisi ve muayenesi: seçilmiş temel kavramlar ve endüstriyel uygulamalar. Alfa akademi yayıncılık, Bursa.
- Deuis, R. L., Subramanian, C., and Yellup, J. M. (1997). Dry sliding wear of aluminium composites—a review. *Composites science and technology*, **57**: 415-435.
- Dhanorker A., Özel, T., (2008). Meso/Micro Scale Milling for Micro-Manufacturing. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, **1**: 23-42.
- Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y., (2006). Recent Advances in Mechanical Micromachining. *Annals of the CIRP*, **55**: 745-768.
- Dubey, A. K., Yadava, V. (2008). Laser beam machining—a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48**: 609-628.
- Ducobu, F., Filippi, E., Riviere-Lorphevre, E. (2009). Chip formation in micro-milling. In Proceedings of the 8th national congress on theoretical and applied mechanics, 333-339.
- Durakbaşa, M. N., Akdogan, A., Vanlı, A. S., and Günay, A. (2014). Surface roughness modeling with edge radyüs and end milling parameters on Al 7075 alloy using taguchi and regression methods. *Acta Imeko*, **3**: 46-51
- Dursun, T., and Soutis, C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials Design*, **56**: 862-871.
- Fang, F.Z. and Liu, Y.C. (2004). On Minimum Exit-Burr in Micro Cutting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **14**: 984-988.
- Filiz, S., Conley, C.M., Wasserman, M.B., Özdoğanlar, 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). Development of the micromilling process for high-aspect-ratio microstructures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, **5**: 33-38.
- Friedrich, C.R., Coane, P.J., (1997). Micromilling Development and Applications for Microfabrication. *Journal of Microelectronic Engineering*, **35**: 367-372.

- Gandarias, E. (2007). MICROM: A revolutionary monitoring system to detect tool breakages and collisions, enhance machine cycles and introduce a new probing concept in micromilling, Mondragon Unibertsitatea.
- Güleryüz, K., and Kaçar, R. (2011). Deformasyon Yaşlanması AA7075 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. In 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11).
- 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.
- Heaney, P.J., Sumant, A.V., Torres, C.D., Carpick, R.W., and 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**: 223-233.
- Hopa, E.A. (2016). Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Koşulları ve Kaplama Malzemesinin Ti6al4v Alaşımının İşlenebilirliği Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Afyonkarahisar.
- How, H. C., and Baker, T. N. (1997). Dry sliding wear behaviour of Saffil-reinforced AA6061 composites. *Wear*, **210**: 263-272.
- Hu, X., Yu, Z., and Rajurkar, K. P. (2006). State-of-the-art review of micro ultrasonic machining. In ASME 2006 International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 1017-1024.
- Huo, D., Cheng, K. (2008). A dynamics-driven approach to the design of precision machine tools for micro-manufacturing and its implementation perspectives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **222**: 1-13.
- Huo, D., Cheng, K. and Wardle, F., (2009a). Design of a five-axis ultra-precision micromilling machine-UltraMill. Part 1: holistic design approach, design considerations and specifications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **47**: 867-877.

- Huo, D., Cheng, K. and Wardle, F., (2009b). Design of a five-axis ultra-precision micromilling machine-UltraMill. Part 2: integrated dynamic modelling, design optimisation and analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **47**: 879-890.
- Huo, D. and Cheng, K., (2010). Experimental investigation on micromilling of oxygenfree, high-conductivity copper using tungsten carbide, chemistry vapour deposition, and single-crystal diamond micro tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **224**: 995-1003.
- Huo, D., and Cheng, K. (2013). Micro cutting mechanics. *Micro-Cutting: Fundamentals and Applications*, 19-44.
- Ikawa, N., Donaldson, R. R., Komanduri, R., König, W., McKeown, P. A., Moriwaki, T., Stowers, I. F. (1991). Ultraprecision Metal Cutting—The Past, The Present And The Future. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **40**: 587-594.
- Isadare, A. D., Aremo, B., Adeoye, M. O., Olawale, O. J., and Shittu, M. D. (2013). Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy. *Materials Research* **16**: 190-194.
- Jackson, M. J., Gill, M. D. H., Sein, H., and Ahmed, W. (2003). Manufacture of diamond-coated cutting tools for micromachining applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, **217**: 77-83.
- Jackson, M. J., Robinson, G. M., Ahmed, W., Sein, H., Jones, A. N., Ali, N., Gracio, J. (2005). Time-modulated chemical vapor deposition of diamond films. *Journal of materials engineering and performance*, **14**: 163-172.
- Jackson, M.J., Robinson, G., M. and Ahmed, W., (2006). Micromachining selected metals using diamond coated cutting tools. *International Journal of Nanomanufacturing*, **1**: 304-317.
- Jemielniak, K., and Arrazola, P. J. (2008). Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **1**: 97-102.

- Jun, M.B.G., Liu, X., DeVor, R.E., and Kapoor, S.G. (2006). Investigation of the Dynamics of Microend Milling-Part I: Model Development. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **128**: 893–900.
- Jun, M.B.G., DeVor, R.E., and Kapoor, S.G. (2006). Investigation of the Dynamics of Microend Milling-Part II: Model Validation and Interpretation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **128**: 901–912.
- Kang, I. S., Kim, J. S., Kim, J. H., Kang, M. C., and Seo, Y. W. (2007). A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process. *Journal of Materials Processing Technology*, **187**: 250-255.
- 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.
- Kim, B., Schmittiel, M. C., Degertekin, F. L., and Kurfess, T. R. (2004). Scanning grating microinterferometer for MEMS metrology. *Journal of manufacturing science and engineering*, **126**: 807-812.
- Kim, C. J., Mayor, J. R., Ni, J. (2004). A static model of chip formation in microscale milling. *Journal of manufacturing science and engineering*, **126**: 710-718.
- Koç, M., and Özel, T. (Eds.). (2011). Micro-manufacturing: design and manufacturing of micro-products. John Wiley and Sons.
- Kou, Z., Wan, Y., Cai, Y., Liang, X. and Liu, Z. (2015). Burr Controlling in Micro Milling with Supporting Material Method, *Procedia Manufacturing*, **1**: 501–511.
- Kuram, E., and Özçelik, B. (2013). Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill. *Measurement*, **46**: 1849-1864
- Kussul, E., Baidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Velasco, G., Kasatkina, L., (2002). Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **12**: 795-812.

- LaDelpha, A. D. P., Neubing, H., and Bishop, D. P. (2009). Metallurgical assessment of an emerging Al–Zn–Mg–Cu P/M alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **520**: 105-113.
- Lamikiz, A., de Lacalle, L. N. L., Celaya, A. (2009). Machine tool performance and precision. In *Machine tools for high performance machining*, Springer, London, 219-260.
- Lee, K., Stirn, B., and Dornfeld, D. A. (2002). Burr formation in micro-machining aluminum, 6061-T6. In *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium*, Springer, Boston, MA, 47-51.
- Lee, K., and Dornfeld, D. A. (2004). A study of surface roughness in the micro-end-milling process.
- Lee, K., and Dornfeld, D. A. (2005). Micro-burr formation and minimization through process control. *Precision Engineering*, **29**: 246-252.
- Lee, D.E., Hwang, I., Valente, C.M.O., Oliveira, J.F.G. and Dornfeld, D.A., (2006). Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**: 176-188.
- Lee, S.W., Mayor, R. and Ni, J., (2006). ‘Dynamic analysis of a mesoscale machine tool. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, **128**: 194-203.
- Li, C., Lai, X., Li, H., and Ni, J. (2007). Modeling of three-dimensional cutting forces in micro-end-milling. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **17**: 671.
- Li, H., Lai, X., Li, C., Lin, Z., Miao, J. and Ni, J., (2008). Development of meso-scale milling machine tool and its performance analysis. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, **3**: 59-65.
- Lin, S.C., Ting, C.J., 1996. Drill Wear Monitoring Using Neural Networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **36**: 465-475.

- Litwinski, K.M., Min, S., Lee, D.E., Dornfeld, D.A., Lee, N., (2006). Scalability of Tool Path Planning to Micro Machining. 1st. International Conference on Micromanufacturing, 13-15 September, Urbana-Champaign, Illinois, USA, 174-179.
- Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., Ehmann, K. F. (2004a). The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science. *Journal of manufacturing science and engineering*, **126**: 666-678.
- Liu, X., Jun, M. B., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G. (2004). Cutting mechanisms and their influence on dynamic forces, vibrations and stability in micro-endmilling. In ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 583-592.
- Liu, C. R., and Mittal, S. (1996). Single-step superfinish hard machining: feasibility and feasible cutting conditions. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, **12**: 15-27.
- Liu, X., DeVor, R. E., and 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.
- Liu, K., and Melkote, S. N. (2007). Finite element analysis of the influence of tool edge radyüs on size effect in orthogonal micro-cutting process. *International Journal of Mechanical Sciences*, **49**: 650-660.
- Lucca, D. A., Rhorer, R. L., Komanduri, R. (1991). Energy dissipation in the ultraprecision machining of copper. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **40**: 69-72.
- Masuzawa, T., Tönshoff, H.K., (1997). Three-Dimensional Micro-Machining by Machine Tools, *Annals of the CIRP*, **46**: 621–628.
- Masuzawa, T. (2000). State of the art of micromachining. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **49**: 473-488.
- May, P. W., Harvey, J. N., Smith, J. A., and Mankelevich, Y. A. (2006). Reevaluation of the mechanism for ultrananocrystalline diamond deposition from Ar/CH₄/H₂ gas mixtures. *Journal of applied physics*, **99**: 104907.

- Min, S., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ohmori, H., Lee, D., Deichmueller, M., Yasuda, T., and Niwa, K. (2006). Variation in Machinability of Single Crystal Materials in Micromachining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **55**: 103–106.
- Muharrem, P., (2017). 7075, 6061 ve 2024 Alüminyum Alaşımlarının Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınmasının Karşılaştırılması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, **9**: 65-75.
- Nam, S. W., and Lee, D. H. (2000). The effect of Mn on the mechanical behavior of Al alloys. *Metals and materials*, **6**: 13.
- Ng, C. K., Melkote, S. N., Rahman, M., and Kumar, A. S. (2006). Experimental study of micro-and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**: 929-936.
- Noori-Khajavi, A., and Komanduri, R. (1995). Frequency and time domain analyses of sensor signals in drilling—II. Investigation on some problems associated with sensor integration. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **35**: 795-815.
- Okazaki, Y., Mori, T. and Morita, N., (2001). Desk-top NC milling machine with 200 krpm spindle. ASPE Annual Meeting Proceedings of 2001 ASPE Annual Meeting, 192-195.
- Okazaki, Y., Mishima, N. and Ashida, K., (2004). Microfactory- Concept, History, and Developments. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, **126**: 837-844.
- Özyürek, D., Yılmaz, R., ve Kibar, E. (2012). RRA İşleminde Yeniden Çözeltiye Alma Parametrelerin 7075 Alüminyum Alaşımlarının Çekme Dayanımına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **27**: 193-203.
- Pham, D. T., Dimov, S. S., and Petkov, P. V. (2007). Laser milling of ceramic components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47**: 618-626.

- Pham, D., Elkaseer, A., Popov, K., Dimov, S., Olejnik, L., and Rosochowski, A. (2009). Micromilling of Coarse-Grained and Ultrafine-Grained Cu99.9E: Effects of Material Microstructure on Machining Conditions and Surface Quality, The Global Conference on Micro Manufacture, 241–244.
- Popov, K.B., Dimov, S.S., Pham, D.T., Minev, R.M., Rosochowski, A., and Olejnik, L. (2006). Micromilling: Material Microstructure Effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **220**:1807–1813.
- Prakash, J.R.S., Senthil Kumar, A., Rahman, M., Lim, S.C., (2001). A Model for Predicting Tool Life for Coated Micro End Mill. 4th. International Machining and Grinding, 4-7 May, Troy, Michigan, USA, 149-158.
- Qin, Y. (2010). Overview on Micromanufacturing. *Micromanufacturing Engineering and Technology*, Elsevier Science, Oxford, UK, 1-23.
- Rahman, M., Kumar, A. S., and Prakash, J. R. S. (2001). Micro milling of pure copper. *Journal of Materials Processing Technology*, **116**: 39-43.
- Rajurkar, K. P., Levy, G., Malshe, A., Sundaram, M. M., McGeough, J., Hu, X., DeSilva, A., (2006). Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **55**: 643-666.
- Rendigs, K. H. (1997). Aluminium structures used in aerospace-status and prospects. *In Materials Science Forum*, **242**: 11-24. Trans Tech Publications.
- Richter, R., Ristuccia, C. A., Tooze, J. A., (2006), *The Global History of Machine Tools. Knowledge, Narratives and Fiction*, Centre for History and Economics, University of Cambridge.
- Rusnaldy, Ko, T.J. and Kim, H.S., (2008). An experimental study on microcutting of silicon using a micromilling machine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **39**: 85-91.
- Rusnaldy, Ko, T.J. and Kim, H.S., (2007). Micro-end-milling of single-crystal silicon. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47**: 2111-2119.

- Savaşkan, T., (2018) Malzeme Bilimi ve Muayenesi Kitabı, Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul, 289-291.
- 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., Spath, D., Elsner, J., Huentrup, V., and Tritschler, H. (2002). Requirements of an industrially applicable microcutting process for steel micro-structures. *Microsystem Technologies*, **8**: 402-408.
- Schmidt, J., and Tritschler, H. (2004). Micro cutting of steel. *Microsystem Technologies*, **10**: 167-174.
- Schmidt, J., Spath, D., Elsner, J., Huentrup, V., and Tritschler, H. (2002). Requirements of an industrially applicable microcutting process for steel micro-structures. *Microsystem Technologies*, **8**: 402-408.
- Simoneau, A., Ng, E., and Elbestawi, M. A. (2006). Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**: 467-481.
- Simoneau, A., Ng, E., and Elbestawi, M.A. (2007) Grain Size and Orientation Effects when Microcutting AISI 1045 Steel. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **56**: 57–60.
- Son, S. M., Lim, H. S., and Ahn, J. H. (2005). Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45**: 529-535.
- Sriyotha, P., Nakamoto, K., Sugai, M., Yamazaki, K. (2006). Development of 5-axis linear motor driven super-precision machine. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **55**: 381-384.
- Sun, X., and Cheng, K. (2010). Micro/nano-machining through mechanical cutting. *Manufacturing Engineering and Technology*, Editör: Qin, Y., Elsevier, 24-38.
- Tao, W., Yin, Z. M., Kai, S., and Jie, L. I. (2007). Single-aging characteristics of 7055 aluminum alloy. *Transactions of nonferrous metals society of China*, **17**: 548-552.

- Tanaka, M., (2001). 'Development of desktop machining microfactory'. *Riken Review*, **34**: 46-49.
- Tansel, I., 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.
- Tansel, I. N., Arkan, T. T., Bao, W. Y., Mahendrakar, N., Shisler, B., Smith, D., and McCool, M. (2000). Tool wear estimation in micro-machining.: Part I: tool usage–cutting force relationship. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**: 599-608.
- Taniguchi, N., (1974). On the Basic Concept of NanoTechnology, *Proceeding of International Conference on Production Engineering, JSPE 2*: 18-23.
- Takeuchi, Y., Suzukawa, H., Kawai, T. and Sakaida, Y., (2006). 'Creation of ultraprecision microstructures with high aspect ratios'. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **55**: 107-110.
- Thoe, T. B., Aspinwall, D. K., Wise, M. L. H. (1998). Review on ultrasonic machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **38**: 239-255.
- Thusty, J., and Macneil, P. (1975). Dynamics of Cutting Forces in End Milling. *Annals of CIRP*, **24**: 21–25.
- Torres, C. D., Heaney, P. J., Sumant, A. V., Hamilton, M. A., Carpick, R. W., and Pfeifferkorn, F. E. (2009). Analyzing the performance of diamond-coated micro end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **49**: 599-612.
- Tönshoff, H.K., Von Alvensleben, F., Ostendorf, A., Kamlage, G., Nolte, S., (1999). Micromachining of Metals Using Ultrashort Laser Pulses. *International Journal of Electrical Machining*, **4**: 1-6.
- Uhlmann, E., Rohner, M., Langmack, M., (2010). Micro-EDM. Qin, Y. (Ed), *Manufacturing Engineering and Technology*, Oxford, Elsevier, **414**: 39- 58.

- Ucun, İ. (2013). İncel 718 Malzemesinin Mikro işlenebilirliği ve Kaplama malzemesinin Etkisinin Araştırılması, Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta.
- Vasile, M. J., Friedrich, C. R., Kikkeri, B., and McElhannon, R. (1996). Micrometer-scale machining: tool fabrication and initial results. *Precision Engineering*, **19**: 180-186.
- Venkatesh, V., Swain, N., Srinivas, G., Kumar, P. and Barshilia, H.C. (2016). Review on the machining characteristics and research prospects of conventional micro scale machining operations. *Materials and Manufacturing Process*, **32**: 235-262.
- Vogler, M.P., DeVor, R.E. and Kapoor, S.G., (2003). Microstructure-level force prediction model for micro-milling of multi-phase materials. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, **125**: 202-209.
- Vogler, M. P., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. (2004). On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part I: Surface generation. *Journal of manufacturing science and engineering*, **126**: 685-694.
- Vogler, M. P., Kapoor, S. G., DeVor, R. E. (2004). On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part II: Cutting force prediction. *Journal of manufacturing science and engineering*, **126**: 695-705.
- Wang, W., Kweon, S. H., Yang, S. H. (2005). A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool. *Journal of Materials Processing Technology*, **162**: 702-708.
- Watner, C., (1996). Businessmen versus neocheaters, Black and White publishing company, Las Vegas, USA.
- Weck, M., Hennig, J. and Hilbing, R., (2001). Precision cutting processes for manufacturing of optical components. Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering, **4440**: 145-151.
- Weule, H., Hüntrup, V. and Tritschle, H., (2001). Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, **50**: 61-64.

- Williams, J. C., and Starke Jr, E. A. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*, **51**: 5775-5799.
- Woodbury, R.S., (1972). History of the Milling Machine, Studies in the History of Machine Tools, M.I.T. Press, 48-49.
- Wu, T. (2012). Tooling performance in micro milling: Modelling, simulation and experimental study (Doctoral dissertation, Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses).
- Wu, T., Cheng, K. (2013). Micro Milling: The State of the art Approach Towards Applications. *Micro Cutting: Fundamentals and Applications*, 185-226.
- Xiao, M., Sato, K., Karube, S., Soutone, T., 2003. The Effect of Tool Nose Radius in Ultrasonic Vibration Cutting of Hard Metal. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **43**: 1375–1382.
- Yıldırım, M., Özyürek, D., and Gürü, M. (2016). The effects of precipitate size on the hardness and wear behaviors of aged 7075 aluminum alloys produced by powder metallurgy route. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**: 4273-4281.
- Yu, Z. Y., Rajurkar, K. P., and Tandon, A. (2004). Study of 3D micro-ultrasonic machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126**: 727-732.
- Yu, Z., Hu, X., and Rajurkar, K. P. (2006). Influence of debris accumulation on material removal and surface roughness in micro ultrasonic machining of silicon. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **55**: 201-204.
- Yuan, Z.J., Lee, W.B., Yao, Y.X., and Zhou, M. (1994). Effect of Crystallographic Orientation on Cutting Forces and Surface Quality in Diamond Cutting of Single Crystal. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **43**: 39-42.
- Yuan, Z. J., Zhou, M., Dong, S. (1996). Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **62**: 327-330.
- Zaman, M.T., Kumar, A.S., Rahman, M., and Sreeram, S. (2006). A Three-Dimensional Analytical Cutting Force Model for Micro End Milling Operation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**: 353–366.

Zhao T., Jiang Y., (2008). “Fatigue of 7075-T651 Aluminum Alloy”, *International journal of fatigue*, **30**: 834-849.

Zhong, Z., Ai, X., Liu, Z., Liu, J., and Xu, Q. (2015). Surface morphology and microcrack formation for 7050-T7451 aluminum alloy in high speed milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **78**: 281-296.

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.

6.1 İnternet Kaynakları

1-<https://www.scienceandsociety.co.uk/results.asp?image=10305600&itemw=4&itemf=0011&itemstep=1&itemx=59>, 30.10.2018

2-<https://www.scienceandsociety.co.uk/results.asp?image=10316918&itemw=4&itemf=0015&itemstep=1&itemx=2>, 30.10.2018

3- <http://www.willemin-macodel.com>, 03.11.2018

4- <https://www.datron.com>, 03.11.2018

5- <http://www.cimatron.com>, 03.11.2018

6- <https://www.inventables.com>, 03.11.2018

7- <http://www.kaleido-technology.com>, 03.11.2018

8- <https://www.designnews.com>, 03.11.2018

9-<https://www.shopmetaltech.com/machining-technology/cutting-tools/mini-mills.html>
06.11.2018

10- <http://www.kern-microtechnic.com>, 03.11.2018

11- <https://www.fanuc.co.jp>, 03.11.2018

12- <http://www.sodick.com>, 03.11.2018

13- <http://www.kuglerofamerica.com>, 03.11.2018

14- <http://www.nanotechsys.com>, 03.11.2018

15- <http://www.makino.com>, 03.11.2018

16-<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma7075t6>,
01.04.2019

17-<https://web.archive.org/web/20151102061658/http://www.ncdtechnologies.com/Project/tetragrade-cvd>, 06.04.2019

18- http://www.th-photo.net/photo_blog/, 12.04.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdullah Sadık TAZEGÜL
Doğum Yeri ve Tarihi : Konak/İZMİR, 29.05.1990
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 05537343249, astazegul@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise : İZMİR Mithatpaşa Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi
(2004-2008)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,
Makine Resmi ve Konstrüksiyonu Öğretmenliği
(2009-2013)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İş Güvenliği Anabilim Dalı(Tezsiz YL.), (2014-2016)
Yüksek Lisans 2 : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2014-2019)
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Tüfekçioğulları Mak. Gıda İml. San. Ve
Tic. Ltd. Şti., Ar-Ge Merkezi
(2018-Devam)