



**MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE TAKIM GEOMETRİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Safiye Gülbin ÇELİK

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2017

Bu tez çalışması, 213M572 no'lu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE TAKIM GEOMETRİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Safiye Gülbin ÇELİK

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2017

TEZ ONAY SAYFASI

Safiye Gülbin ÇELİK tarafından hazırlanan “Mikro Frezeleme İşleminde Takım Geometri Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 12.06.2017 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

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Makine
Mühendisliği Ana Bilim Dalı



Başkan

: Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Süleyman Demirel Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat
Mühendisliği Ana Bilim Dalı



Üye

: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Makine
Mühendisliği Ana Bilim Dalı



Üye

: Doç. Dr. Abdullah KURT

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat
Mühendisliği Ana Bilim Dalı



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

Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden 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.

12/06/2017

Safiye Gülbin ÇELİK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE TAKIM GEOMETRİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Safiye Gülbin ÇELİK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Bu çalışmada, mikro frezeleme işleminde takım geometrisinin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İşleme performansını etkileyebilecek üç farklı geometrik parametre (helis açısı, ağız sayısı ve eksenel talaş açısı) dikkate alınmıştır. İş parçası malzemesi olarak, Inconel 718 süper alaşımı kullanılmış olup, deneyler kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Ardışık kesme işlemleri yapılarak, mikro kanallardaki boyutsal değişim, çapak oluşumu ve kesme kuvvetlerindeki değişim araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; minimum kesme kuvvetleri 45° lik helis açısında elde edilmiştir. Helis açısı özellikle Fz yönündeki kuvvetlerin artmasına neden olmaktadır. Artan ağız sayısı, ise özellikle ilerleme yönündeki kesme kuvvetini (F_y) arttırmaktadır. Artan kesme mesafesiyle, takım çapında meydana gelen çevresel aşınma da artmaktadır. Bunun sonucunda kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu da artmaktadır. Negatif eksenel talaş açısına sahip kesici takımlarda (R_a) değerleri minimum olarak gerçekleşmiştir. Genellikle maksimum çapak genişliği zıt yönlü frezeleme yönünde elde edilmiştir ve artan kesme mesafesiyle de artmaktadır. Helis açısının, çapak genişliği üzerinde belirleyici bir etkisinin olmadığını söylemek mümkündür. Eksenel talaş açısının takım aşınmasına etkisi çok az olmakla birlikte pozitiften negatife doğru talaş açısının değişimi, takım ömrünü olumlu yönde etkilemiştir.

2017, xv + 105 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikro frezeleme, Inconel 718, Takım aşınması, Çapak Oluşumu, Yüzey Pürüzlülüğü, Eksenel Talaş Açısı

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**INVESTIGATION OF TOOL GEOMETRY EFFECT
IN MICRO-MILLING PROCESS**

Safiye Gülbin ÇELİK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Kubilay ASLANTAŞ

In this study, the effects of tool geometry on cutting forces, surface roughness and burr formation were investigated in micro-milling. Three different geometric parameters (helix angle, number of flute and axial rake angle) that may affect the machining performance were used. As workpiece material, Inconel 718 superalloy was used and the experiments were performed under dry cutting conditions. By consecutive cutting processes; changes in cutting forces, burr formation and change of slot geometry were investigated. According to the results obtained; minimum shear forces were obtained at a helix angle of 45°. The helix angle causes of the cutting forces in Fz direction to increase. Increasing number of flute causes in particular, increases the cutting force (Fy) in the feed direction. Increasing cutting distance also increases the environmental wear that is happening around the tool. As a result, cutting forces, surface roughness and burr formation also increase. Values of surface roughness (Ra) were found to be minimum in cutting tools with negative of axial rake angle. Generally, the maximum burr width is found in the direction up milling and is increased by increasing cutting distance. It is possible to say that the helix angle does not have a specific effect on the burr width. The change of axial rake angle from positive to negative effects of on tool life positively while the effect of axial rake angle is minimum on the tool wear.

2017, xv + 105 pages

Keywords: Micro-milling, Inconel 718, Tool wear, Burr formation, Surface Roughness, Axial Rake Angle

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tez çalışmasının yürütülmesi esnasında teknik bilgisi, tecrübesi, kişiliği ve öğrencilerine verdiği değer itibarıyla bana her konuda yardımcı olan çok değerli ve kıymetli danışmanım, Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ'a sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi bildiririm.

Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bize SEM görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Uzman Serhat TIKIZ Bey'e teşekkürlerimi bildiririm.

Yüksek Lisans Tez aşamasında fikir alışverişinde bulunduğum çok değerli arkadaşım Öğretim Görevlisi Muhammed ARSLAN'a teşekkürlerimi bildiririm.

Bugünlere gelmemde desteklerini esirgemeyen ve her zaman benim yanımda olan çok değerli ve kıymetli sevgili ailem Babam ve Annem'e sonsuz sevgi, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Değerli katkılarından dolayı tez jüri üyelerine de ayrıca teşekkürlerimi bildirmekten kıvanç duyarım.

Ayrıca bu tezi "213M572" numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK kurumuna teşekkürlerimi bildiririm.

Safiye Gülbin ÇELİK

AFYONKARAHİSAR, 2017

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
RESİMLER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Giriş	5
2.2 Mikro Mekanik İşleme	8
2.2.1 Mikro Frezeleme.....	9
2.2.2 Mikro İmalatta Kullanılan Takım Tezgâhları.....	10
2.2.3 Mikro Kesici Takımların Tasarımı ve İmalatı	12
2.3 Mikro Frezeleme İşleminin Mekanikliği	16
2.4 Takım Geometrisinin Etkisi.....	22
2.5 Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Kuvvetlerinin Değişimi.....	27
2.6 Takım Aşınması.....	33
2.7 Mikro Frezelemede Çapak Oluşumu	40
2.8 Mikro Frezeleme İşleminde Yüzey Pürüzlülüğü.....	44
3. MATERYAL ve METOD	49
3.1 İş Parçası Malzemesi ve Kesici Takım.....	49
3.2 Deney Düzeneği ve Kesme Parametreleri	51
3.3 İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğü Analizi	54
3.4 İş Parçası Çapak Oluşumu Analizi	55
3.5 Takım Aşınmasının Ölçülmesi ve Kanal Boyutlarındaki Değişim	56
4. BULGULAR	58
4.1 Kesme Kuvvetinin Değişimi	58

4.1.1 Helis Açısının Etkisi	58
4.1.2 Ağız Sayısının Etkisi	59
4.1.3 Eksenel Talaş Açısının Etkisi	61
4.1.4 Kesme Uzunluğu ile Kesme Kuvvetlerinin Değişimi	62
4.2 Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi	64
4.2.1 Helis Açısının Etkisi	64
4.2.2 Ağız Sayısının Etkisi	66
4.2.3 Eksenel Talaş Açısının Etkisi	68
4.3 Çapak Genişliğinin Değişimi	71
4.3.1 Helis Açısının Etkisi	71
4.3.2 Ağız Sayısının Etkisi	76
4.3.3 Eksenel Talaş Açısının Etkisi	79
4.4 Takım Aşınması	84
4.4.1 Kesme Zamanına Bağlı Takım Aşınması	84
4.4.2 Talaş Yapışması	91
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	93
6. KAYNAKLAR	96
6.1 İnternet Kaynakları	103
ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

n (dev/dk)	Tezgâh devri
V _c (m/dk)	Kesme hızı
f _z (µm/diş)	Diş başına düşen ilerleme
a _p (mm)	Talaş derinliği
h (µm)	Talaş kalınlığı
h _{min} (µm)	Minimum talaş kalınlığı
Re (µm)	Kesici takım kenar radüsü
Ra (µm)	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
HSS	Yüksek hız çeliği
WC	Tungsten karbür
Ti	Titanyum
Fe	Demir
Al	Alüminyum
C	Karbon
Co	Kobalt
Mn	Mangan
Si	Silisyum
Cu	Bakır
AlCrN	Alüminyum Krom Nitrür
TiN	Titanyum Nitrür
NCD	Nano kristal elmas
HRc	Rockwell sertlik
Hv	Vickers sertlik
MPa	Eğilme ve basma dayanımı, (Megapaskal)
N	Kesme kuvveti, Newton
W/mK	Termal iletkenlik, (Watt/metre.Kelvin)
g/cm ³	Yoğunluk, (Gram/cm ³)
D(mm)	Çap
L(mm)	Boy
L ₃ (mm)	Helis boyu
m	Metre
mm	Milimetre
mm ²	Alan
kW	(Kilowat), Motor gücü
z	Ağız sayısı
λ(°)	Helis Açısı
β (°)	Eksenel talaş açısı
φ (°)	Eksenel boşluk açısı
α (°)	Radyal boşluk açısı
γ (°)	Radyal talaş açısı

Kısaltmalar

TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
TUAM	Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi

Kısaltmalar (devam)

MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistem
MST	Mikro Sistem Teknolojisi
3D	Üç Boyutlu
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDX	Enerji Dağılımlı X ışınları Analizi
LIGA	Litografi
LBM	Mikro Lazer
EDM	Mikro Elektro Erozyon
ECM	Mikro Elektro Kimyasal
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayar destekli kontrol tezgâhı)
F _x	X ekseninde oluşan kesme kuvveti
F _y	Y ekseninde oluşan kesme kuvveti
F _z	Z ekseninde oluşan kesme kuvveti

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Mikro mekanik işleminin diğer yöntemlerle kıyaslanması	1
Şekil 2.1 Mikro Üretim Teknikleri.....	5
Şekil 2.2 Mikro elektro erozyon yöntemi.....	7
Şekil 2.3 Mikro elektro kimyasal işleme şematik gösterimi	7
Şekil 2.4 Mikro frezeleme işleminde kesici takım ve iş parçası malzemeleri	13
Şekil 2.5 Farklı geometrik tasarımlara sahip mikro freze takımları.....	14
Şekil 2.6 Mikro kesici takım ve SEM fotoğrafı	15
Şekil 2.7 Mikro kesici takımın mikro tel erozyon yöntemi ile üretimi	15
Şekil 2.8 Mikro tel erozyon yöntemi ile üretilmiş bir mikro kesici takımın mikro erozyon yöntemiyle bir mikro kalıp üretilmesi.....	16
Şekil 2.9 (a) Deforme olmamış talaş kalınlığının takım kenarı yarıçapına oranının küçük ve çok büyük olması durumlarının kıyaslanması, b) Mikro kesme işleminde iş parçası tane yapısının boyut etkisi	17
Şekil 2.10 Mikro ve geleneksel kesme işleminde kesici takım kenar radüsü (re) ile talaş kalınlığının (h) kıyaslanması.....	18
Şekil 2.11 Mikro frezeleme işleminde kazınma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve kesme işleminde kazınmanın meydana geldiği bölgenin şematik gösterimi	19
Şekil 2.12 Minimum talaş kalınlığının nümerik model yardımıyla belirlenmesi	20
Şekil 2.13 Farklı h/re oranları için kesme yüzeyinde oluşan Vonmises gerilme değerleri ve talaş oluşum şekilleri, Geleneksel frezeleme (a, c,e), Mikro frezeleme (b, d, f).....	21
Şekil 2.14 Dört kanallı bir mikro freze takımı ve geometrik tanımlamaları	22

Şekil 2.15 Konik kesici takımın ve yan kenar açısının çapak oluşumu üzerindeki etkisi	23
Şekil 2.16 Altıgen geometride üretilen mikro kesici takım.....	24
Şekil 2.17 Helis açısının takım ömrüne etkisi.....	25
Şekil 2.18 Helis açısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin ve takım aşınmasının değişimi.....	26
Şekil 2.19 Helisel bir freze takımında pozitif ve negatif talaş açıları	26
Şekil 2.20 Mikro ve geleneksel frezelemede oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi.....	28
Şekil 2.21 Mikro frezelemede oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi	29
Şekil 2.22 Aynı ve zıt yönlü frezeleme bölgelerinde kesilmemiş talaşın sonraki pasolarda kesilmesi	29
Şekil 2.23 Genel frezeleme işleminde meydana gelen kesme kuvvetleri değişimi a)Helis açısının etkisi, b) Eksenel Talaş Açısının Etkisi	30
Şekil 2.24 Mikro frezeleme işleminde farklı takım geometrilerinin ilerleme hızlarına bağlı olarak kesme kuvveti değişimine etkisi	31
Şekil 2.25 Mikro frezeleme işleminde meydana gelen kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi	32
Şekil 2.26 Kesici takımda meydana gelen abrasif aşınma ve talaş yapışması	34
Şekil 2.27 İki farklı helis açısı ve iki farklı kesme derinliğindeki kenar aşınma değişimleri.....	35
Şekil 2.28 Farklı kesme hızlarına bağlı olarak yan yüzey kenar aşınma değişimleri	36
Şekil 2.29 Kesici ağız başına düşen ilerleme miktarının ve kaplama faktörünün kesici takım çapındaki değişimine olan etkisi	37
Şekil 2.30 Mikro frezeleme sürecindeki takım kenar radüsünün değişimi	38

Şekil 2.31 Takım aşınmasına bağlı olarak kesici takım çapındaki değişim, kesici takım aşınmasına bağlı olarak kanal geometrisinin değişimi	39
Şekil 2.32 Farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak takım aşınma değişimi ve kaplamanın takım aşınma değişimine etkisi	39
Şekil 2.33 Mikro frezeleme işleminde karşılaşılan çapak tipleri	41
Şekil 2.34 Çapak genişliğinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi ve her kanaldaki çapak boyutu SEM görüntüleri	42
Şekil 2.35 Takım aşınmasının çapak oluşumuna ve işlenen kanal geometri değişimine etkisi	43
Şekil 2.36 Kesme parametrelerinin çapak yüksekliği ve çapak genişliği üzerindeki etkisi	44
Şekil 2.37 Kesme uzunluğu boyunca ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi.....	45
Şekil 2.38 Kanal genişliği boyunca aynı ve zıt yönlü frezeleme bölgesine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi	46
Şekil 2.39 Kesme uzunluğuna bağlı olarak yüzey kalitesi topografya ve SEM görüntüleri	46
Şekil 2.40 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün takım aşınma sürecine bağlı olarak değişimi	47
Şekil 2.41 a) Kesme hızı ve ilerleme hızlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değişimi, b) Kesici takım üzerine yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü değişimine etkisi	48
Şekil 2.42 Kesme mesafesine ve kaplama türüne bağlı olarak Ra değişimi	48
Şekil 3.1 Mikro freze takımlarının geometrik özellikleri.....	50
Şekil 3.2 Mikro freze takımlarının SEM görüntüleri	51
Şekil 3.3 Kesme kuvveti data alma sisteminin şematik gösterimi	52

Şekil 3.4 Mikro frezeleme işleminde kullanılan koordinat sistemi.....	52
Şekil 3.5 Yüzey profilometresinden alınan üç boyutlu yüzey şekli	55
Şekil 3.6 İşlenen kanal ve kesme yönlerine bağlı olarak çapak genişliğinin ölçüm noktaları	55
Şekil 3.7 USB Mikroskop yardımıyla kenar aşınmasının ve çap ölçümlerinin yapılması	57
Şekil 3.8 Takım aşınmasının kanal geometrisi değişimi üzerindeki etkisi (Rs:Kanala ait kenar radüsü, W:Kanal genişliği).	57
Şekil 4.1 a) Maksimum kesme kuvvetinin helis açısına ve b) Maksimum kesme kuvvetinin kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.....	59
Şekil 4.2 a) Maksimum kesme kuvvetinin ağız sayısına ve b) Maksimum kesme kuvvetinin kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.....	60
Şekil 4.3 a) Maksimum kesme kuvvetinin eksenel talaş açısına ve b) Maksimum kesme kuvvetinin kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.....	62
Şekil 4.4 Maksimum kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna ve ağız sayısına bağlı olarak değişimi.....	63
Şekil 4.5 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün helis açısına bağlı olarak hem kesme uzunluğu hemde kanal genişliği boyunca değişimi	65
Şekil 4.6 Her üç helis açısı için 4' ncü kanal (son kanal) sonunda elde edilen yüzey topografya görüntüleri	66
Şekil 4.7 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün ağız sayısına bağlı olarak kanal genişliği ve kesme uzunluğu boyunca değişimi	67
Şekil 4.8 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün eksenel talaş açısına bağlı olarak kanal genişliği ve kesme uzunluğu boyunca değişimi.....	69
Şekil 4.9 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün helis açısı, eksenel talaş açısı ve ağız sayına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca karşılaştırmalı olarak değişimi	71

Şekil 4.10 Çapak genişliğinin her üç helis açısı için kesme uzunluğuna ve frezeleme yönüne bağlı olarak değişimi	73
Şekil 4.11 Ortalama çapak genişliğinin helis açısına ve frezeleme yönüne bağlı olarak karşılaştırmalı değişimi	74
Şekil 4.12 Helis açısına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca meydana gelen çapak genişliği değişimi SEM fotoğrafları ($\beta = -5^\circ$, $z = 2$)	76
Şekil 4.13 Farklı ağız sayılarında kesme uzunluğuna bağlı olarak aynı ve zıt yönlü frezeleme bölgesinde meydana gelen çapak genişliği değişimleri	77
Şekil 4.14 Ağız sayısına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca meydana gelen çapak genişliği değişimi SEM fotoğrafları ($\lambda = 25^\circ$ $\beta = -5^\circ$)	78
Şekil 4.15 Ağız sayısına bağlı olarak hem zıt hem de aynı yönlü kesme bölgesinde elde edilen ortalama çapak genişliği değişimleri	79
Şekil 4.16 Eksenel talaş açısına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca hem zıt hem de aynı yönlü kesme bölgesinde elde edilen çapak genişliği değişimleri.....	80
Şekil 4.17 Eksenel talaş açısına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca elde edilen SEM fotoğrafları ($\lambda = 35^\circ$, $z = 3$)	81
Şekil 4.18 Eksenel talaş açısına bağlı olarak zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme bölgesinde meydana gelen ortalama çapak genişliği değişimi	82
Şekil 4.19 Kesme işlemi sonrasında her bir kanal sonrasındaki çıkış bölgesinde meydana gelen çapakların SEM fotoğrafları ($\lambda = 35^\circ$, $\beta = -5^\circ$, $z = 3$)	83
Şekil 4.20 a) Kenar aşınması ve b) takım çapı değişiminin helis açısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi	85
Şekil 4.21 Üç farklı helis açısı için aşınma deneyleri sonucunda elde edilen SEM fotoğrafları	87
Şekil 4.22 a)Kenar aşınma ve b) takım çapı değişimlerinin ağız sayısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi	88

Şekil 4.23 Üç farklı ağız sayısına sahip olan kesici takımlardaki aşınma deneyleri sonucunda alınan SEM fotoğrafları	89
Şekil 4.24 a) Kenar aşınma ve b) takım çapı değişimlerinin eksenel talaş açısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi	90
Şekil 4.25 Üç farklı eksenel talaş açısına sahip olan kesici takımlar için aşınma deneyleri sonucunda elde edilen SEM fotoğrafları.....	90
Şekil 4.26 a) -5° eksenel talaş açısına sahip b) 0° eksenel talaş açısına ve c) 5° eksenel talaş açısına sahip mikro takımlarda meydana gelen talaş yapışmaları	92



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 İnconel 718 Nikel alaşımının kimyasal kompozisyonu (%)	49
Çizelge 3.2 İnconel 718 Nikel alaşımına ait bazı mekanik özellikler (%)	49
Çizelge 3.3 Kullanılan kesici takıma ait bazı mekanik özellikler	50
Çizelge 3.4 Tek bir kesici takım için yapılan kesme deneyi sistematığı ve kesme parametreleri	53



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 1.1 Minyatür parça örnekleri.....	2
Resim 2.1 Çeşitli çaplarda üretilmiş mikro takımlar	9
Resim 2.2 Ticari olmayan portatif tip mikro işleme tezgâhları, a) Mikro torna, b) Çok fonksiyonlu mikro freze tezgâhı, c) CNC Mikro işleme tezgâhı	11
Resim 2.3 Ticari tip mikro tezgâhlar	12
Resim 3.1 Mikro frezeleme işleminde kullanılan deney düzeneği	52
Resim 3.2 Yüzey Analizlerinde kullanılan optik profilometre	54
Resim 3.3 Dino Lite USB 2.0 optik mikroskop ile takım çapının ölçümü	56

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızla gelişip endüstri ürünlerinin de çeşitlilik kazanmasıyla birlikte, yüksek hassasiyetteki minyatür parçaların üretilmesi de bir hayli önem kazanmıştır. Minyatür ürünler, az yer kaplama, kolay taşınabilme ve kullanılabilme, malzeme ve güç tasarrufu, yüksek ısı transferi, daha iyi süreç entegrasyonu ve otomasyonu sağlayabilmektedir (Jackson *et al.* 2006). Bir milimetre veya daha küçük parçaların imalatında geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemler kullanılırken, bu yöntemler içerisinde mikro mekanik işleme önemli bir yer tutmaktadır. Mikro mekanik işleme, 10 mikrometreden birkaç milimetreye kadar minyatür ürünleri üretmek için kullanılan bir imalat yöntemidir (Şekil 1.1). Diğer mikro imalat yöntemleriyle kıyaslandığında, yüksek hızda ve yüksek talaş kaldırma oranlarından dolayı mikro mekanik işleme imalat sanayinde önemli bir yer tutmaktadır (Kaplan ve Dölen 2003).



Şekil 1.1 Mikro mekanik işlemenin diğer yöntemlerle kıyaslanması (Chae *et al.* 2006).

Mikro mekanik işleme, yıllar önce kol saatindeki mikro parçaların üretilmesiyle başlamıştır (Masuzawa 2000). Daha sonraları 1959 yılında Dr. Richard Feynman tarafından mikro ölçekli manyetik devreler ortaya atılmış ve bunu takiben Dr. John Killby tarafından da mikro ölçekli manyetik devreler üretilerek mikro elektro mekanik sistemler (MEMS) teknolojideki yerini almıştır. Mikro elektro mekanik sistem ekipmanları; iletişim (optik anahtarlar, cep telefonları), uzay (küresel yer belirleme sistemi), biyoteknoloji (kimyasal analiz, hastalık tespiti), bilgisayar (yazıcı kafaları, soğutma sistemleri için basınç sensörleri), otomotiv (aktif süspansiyon, yön bulma muhtelif sensörleri), beyaz eşya (nem kontrol elemanları, soğutucular) gibi sektörlerde

yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, daha kaliteli bir yaşam ve ülke ekonomisinin büyümesinde aktif rol oynamaktadırlar. Örneğin biyoteknoloji alanında kullanılan mikro ekipmanlar, boyutlarının küçük olmasından dolayı biyolojik hücreler ve genlerin daha rahat ve kolaylıkla kontrol edilmesini sağlarlar. Benzer şekilde tıp endüstrisinde, özellikle robotik cerrahide, kullanılan mikro ekipmanlar sayesinde ağrısız, acısız ve daha az riskli operasyonların gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir (Chae *et al.* 2006). Resim 1.1’de mikro mekanik işleme yöntemi ile üretilmiş bazı parçalardan örnekler verilmiştir.



Resim 1.1 Minyatür parça örnekleri.

Günümüzde mikro ekipmanlara olan ihtiyacın artmasına paralel olarak, kullanılan yöntem ve teknikler de artmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları; fotolitografi, mikro lazer, ultrasonik, iyon demeti, mikro elektro erozyon şeklindedir. Fakat bu yöntemlerinde imalat hızı yavaş olup, yalnızca düzgün geometrili parçalar üretilmektedir (Masuzawa 2000, Alting *et al.* 2003). Mikro mekanik işleme yöntemlerinden olan mikro frezeleme yönteminde ise hem imalat hızı yüksektir hem de üç boyutlu karmaşık mühendislik parçalarının hassas olarak işlenmesi mümkündür. Mikro enjeksiyon kalıplarının üç boyutlu serbest yüzeyleri mikro frezeleme yöntemi ile üretilmektedir. İmalat hızının yüksek olması da mikro ürün başına düşen birim maliyetini de düşürmektedir (Chae *et*

al. 2006). Buna ilave olarak mikro frezeleme yöntemi ile hem homojen hem de homojen veya iletken olmayan kompozit, polimer ve seramik gibi farklı özellikteki malzemeler işlenebilmektedir.

Mikro frezeleme işleminin, yukarıda belirtilen avantajlarının yanı sıra bir de dezavantajları bulunmaktadır. Aslında mikro frezeleme, geleneksel frezeleme işlemine oldukça benzemekle beraber, takım çapının çok küçük olması, bir takım farklılıkları beraberinde getirmektedir. Geleneksel frezelemede önemli olmayan küçük titreşimler, kesme kuvvetleri, kesici takım kenar radüsü gibi faktörler mikro frezeleme işlemi için oldukça önemlidir. Bu faktörler, takım geometrisini dolayısıyla takım ömrü ve işleme performansını doğrudan etkilerler. Mikro frezeleme işlemi sırasında takımın büyük bir negatif talaş açısına sahip olması, takım ve iş parçası arasındaki sürtünmenin artmasına, eksenel kuvvetlerin büyümesine ve kesici takımın da hızlı aşınmasına sebep olmaktadır (Tönshoff 1988). Takım geometrisinde meydana gelen çok küçük bir hasar, takımın kesme kabiliyetini yitirmesine ve işlenen yüzeyin yüzey kalitesinin de bozulmasına neden olabilir. Dolayısıyla mikro frezeleme işleminde hem takım aşınmasını azaltmak hem de daha iyi bir yüzey kalitesi elde edebilmek için optimum kesme koşullarının belirlenmesi oldukça önemlidir.

Mikro frezelemede takım boyutlarının mikron çapında olmasından dolayı hızlı bir şekilde gerçekleşen takım aşınması; takım ömrünü, işlenen kanal geometrisini, çapak boyutunu ve iş parçası yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir (Chae *et al.* 2006). Maksimum takım ömrü açısından kesme parametreleri ne kadar önemli ise kullanılan takım geometrisi ve takım malzemesi de o derece önemlidir. Özellikle de takıma ait geometrik parametreler hem iş parçası kalitesini hem de takım ömrünü doğrudan etkilemektedir. Yapılan bu tez çalışmasında, endüstrinin çeşitli alanlarında (havacılık, uzay ve bilişim vs.) kullanılan işlenmesi zor ve ısıl direnci yüksek, nikel esaslı süper bir alaşım olan Inconel 718 ' in mikro şartlarda işlenebilirliği farklı takım geometrileri için araştırılmıştır. Bu amaçla kuru frezeleme şartlarında farklı takım geometrilerinin (ağız sayıları, eksenel talaş açıları ve helis açıları) sabit kesme parametrelerinde (talaş derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızı) kombinasyonlar oluşturularak, mikro frezeleme işlemi yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre farklı takım

geometrilerinin takım aşınmasına, yüzey kalitesine ve çapak oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Buna ilave olarak, aşağıdaki sıralanan unsurlara da cevap aranmıştır.

- Takım çapında meydana gelen çevresel aşınmanın kanal geometrisi ve işlenen yüzey kalitesine etkisi
- Artan veya azalan helis açısı kesme kuvvetlerini etkilemektedir. Fakat helis açısı değişiminin takım ömrü, yüzey kalitesi ve çapak boyutlarını nasıl etkilediği açık bir şekilde ortaya konulmaya çalışılmıştır.
- Artan kenar radüsünün işlenen kanal geometrisini ne derece etkilediği ve işlenen yüzeyde bırakmış olduğu izlerin kenar radüsü ile nasıl etkilendiği araştırılmıştır.
- Kesici takım etrafındaki ağız sayısı takım ömrünü ve yüzey kalitesini nasıl etkilediği tespit edilmeye çalışılmış olup, eksenel talaş açısının etkisi bu tez çalışması ile ilk defa ortaya konulmuştur.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Giriş

Günümüz teknolojisinde mikro ekipmanların üretiminde pek çok yöntemin kullanıldığı görülmektedir. Minyatür ürün imalat yöntemleri işlenecek parça boyutlarının yanı sıra parça üzerinden malzeme uzaklaştırmada kullandıkları mekanizmaya göre de sınıflandırılmaktadır. Bu imalat süreçlerinin genel olarak çalışma prensibi, uzaklaştırılmak istenen geometrinin kimyasal, elektriksel, ultrasonik ve mekanik etkilerle uzaklaştırılması esasına dayanır (Masuzawa 2000). Bu üretim yöntemlerini Mikro Elektro Mekanik Sistem (MEMS) ve alışılmamış MEMS olarak iki guruba ayırmak mümkündür (Şekil 2.1). MEMS yönteminde 1 ile 100 μm . ebatları arasındaki parçalar üretilirken, alışılmamış MEMS yönteminde 100 μm . ve üzerindeki ebatlarda parçalar üretilmektedir (Madou 2011, Venkatesh *et al.* 2016).



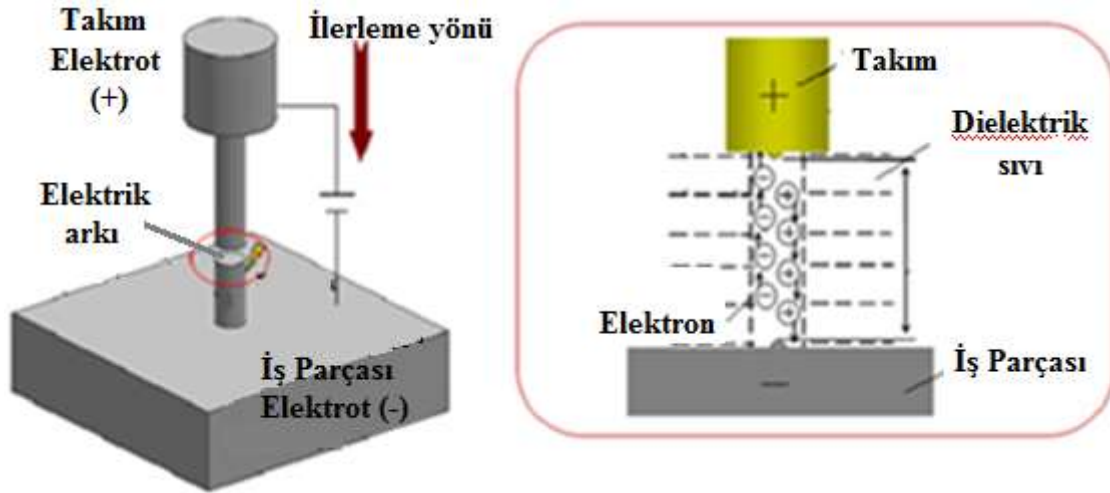
Şekil 2.1 Mikro Üretim Teknikleri (Venkatesh *et al.* 2016).

MEMS veya diğer bir adıyla mikro sistem teknolojisi (MST) son yirmi yılda önemli bir popülerite kazanmış konular arasındadır. Çoğunlukla silikon bazlı sayısız MEMS ürünü ki bunlar içerisinde mikro algılayıcılar ve mikro aktüatörler geniş yer tutmakta olup bu yöntem ile imal edilmiştir. Bu MEMS sensörleri ve aktüatörler, medikal, iletişim (yüksek frekanslı rezonatörler), atalet algılama (örn., ivme ölçerleri ve jiroskoplar) dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. MEMS cihazları ve

diğer mikroelettronik ürünleri imal etmek için kullanılan işlemler MEMS mikro imalat veya litografi tabanlı mikro imalat olarak tanımlanabilir. Yaygın teknikler, fotolitografi, kimyasal-aşındırma, kaplama ve LIGA'dır.

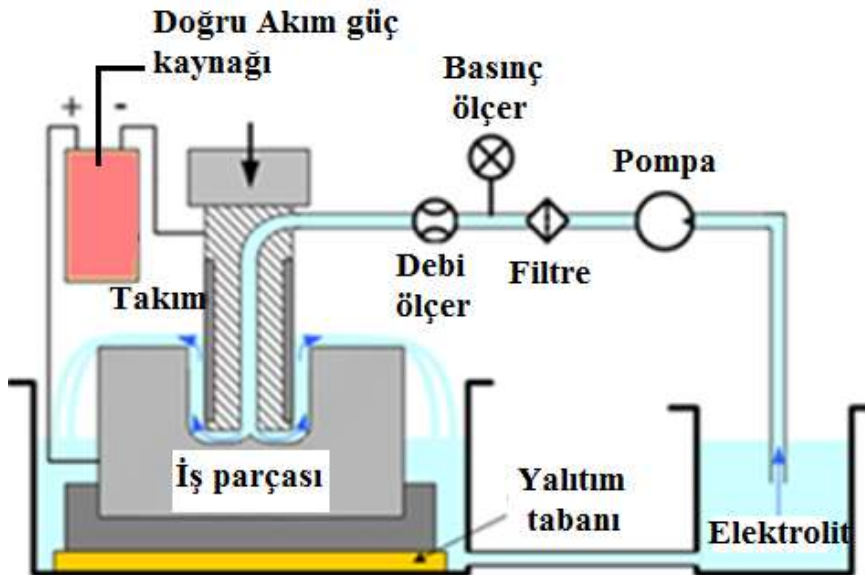
Alışılmamış yani geleneksel olmayan MEMS üretim tekniklerinde farklı enerji kaynaklarının meydana getirdiği yüksek yoğunluklu enerji, iş parçası üzerindeki hedef bölgeye gönderilir. Hedef bölgeye gönderilen yüksek ısı enerjisi yardımıyla malzemenin bir kısmı eritilerek ortamdan uzaklaştırılır (Masuzawa 2000). Alışılmamış MEMS üretim tekniklerinde genel olarak iş parçası ile takım arasında herhangi bir mekanik temas gerçekleşmediğinden dolayı takım aşınması, takım kırılması gibi mekanik problemlerle karşılaşmaz. Bu yöntemle geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan iş parçaları kolaylıkla işlenebilir. Alışılmamış imalat yöntemlerinden olan mikro lazer işleme (LBM), mikro bileşenleri birleştirme veya mikro iş parçası yüzeyinden lazer tekniği ile malzeme kaldırma işlemidir. Her türlü metal, cam, seramik, polimer ve yarı iletken mikro parçalar mikro lazer yöntemiyle üretilmektedir. Hedef bölgenin küçük bir alanına gönderilen lazer ışını, malzemenin sırasıyla ergitme, buharlaştırma ve kimyasal çözülme yöntemleriyle işlenmesini sağlamaktadır (Masuzawa 2000, Alting *et al.* 2003, Dubey and Yadava 2008).

Mikro elektro erozyon (EDM) yöntemi; anot ve katot (iş parçası ve takım) arasında oluşturulan elektrik akımı ile malzemelerin işlenmesi yöntemidir (Brousseau *et al.* 2010). Birbirine yakın iki elektrod olan takım ve iş parçası arasına elektrik gerilimi uygulanır. Gerilim sonucu ortaya çıkan elektrik arkı, iş parçasından malzeme aşındırır. Böylece iş parçası elektro erozyon yöntemi ile işlenmiş olur (Alting *et al.* 2003), (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Mikro elektro erozyon yöntemi (Zilong *et al.* 2014).

Mikro elektro kimyasal işleme yöntemi (ECM), iletken malzemelerin elektro kimyasal reaksiyonlarına bağlı olarak çözündürülmesi yolu ile oluşturulan üretim yöntemlerindendir. Mikro metalik malzemelerin işlenmesinde kullanılan bu yöntemde iş parçası ve takım arasında aşınma olmadığı için daha pürüzsüz yüzeyler elde edilir. Bu yöntemin dezavantajı, güç kaynağından verilen akımın işleme sırasında geniş bir alana yayılması ve takım ayarlarının çok zor yapılmasıdır (Masuzawa 2000), (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Mikro elektro kimyasal işleme şematik gösterimi (İnt. Kyn. 1).

Mikro ultrasonik işleme yönteminde ise iş parçası üzerine ultrasonik titreşim ve aşındırıcı partiküller gönderilir. Takımın dönme hareketi ve iş parçasında oluşturulan ultrasonik titreşim ile hareketlenen aşındırıcı partiküller, iş parçası yüzeyinden malzeme koparırlar. Hem titreşim hem de aşındırıcı partiküllerin kullanılmasından dolayı cam, seramik, silikon ve elmas gibi sert ve kırılğan olan malzemeler bu yöntemle daha kolay işlenmektedir. Mikro ultrasonik işlemin dezavantajı ise iş parçalarının ultrasonik titreşimden dolayı hassas işleme yapılamamasıdır. Bu nedenle daha hassas işleme yapılması için çözüm yöntemleri araştırılmaya devam edilmektedir (Masuzawa 2000).

2.2 Mikro Mekanik İşleme

Kendiliğinden ortaya çıkan bir konu alanı olarak mikro kesme, son yirmi yılda hem araştırmacıların hem de endüstrinin dikkatini çekmiştir. Mekanik kesme, iyi bilinen bir alan olduğundan, geleneksel veya makro kesme işleminden elde edilen bilgiler, mikro kesme proseslerini incelemek üzere uyarlanmıştır. Literatürde mikro kesme, iki farklı yaklaşımla ele alınmaktadır. Birinci yaklaşımda, geleneksel kesme işleminde kullanılan kesici takım ve ekipmanın, küçültülmesi prensibine vurgu yapılır. Diğer yaklaşımda ise, ultra hassas işlemede, tek noktada kesme işlemi yapan kesici takımdaki kenar boyutu etkisini dikkate alır. Aslında her iki yaklaşımda da, kesici takımın boyutu küçüldüğünden, aynı konulara vurgu yapılmaktadır.

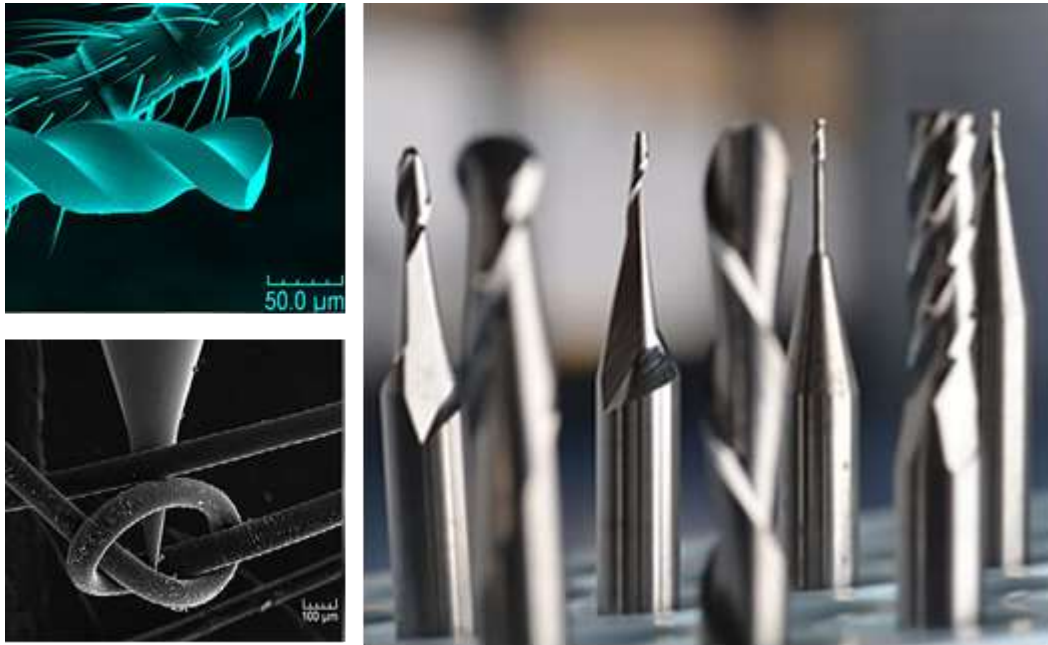
Günümüzde mikro ekipman üretiminde yaygın olarak tercih edilen mikro mekanik işleme temel olarak frezeleme, tornalama, delik delme ve taşlama işlemlerinin mikro ölçekte yapılmasına imkan sağlayan bir talaşlı imalat sürecidir (Madou 2011, Venkatesh *et al.* 2016, Aslantaş *et al.* 2016). Yüksek hassasiyetli mikro ekipmanların geleneksel olmayan elektro erozyon, elektro kimyasal, lazer, ultrasonik gibi işleme yöntemleriyle işlenmesi hem oldukça yavaş hem de karmaşık geometrili yapılarını üretmek zor olduğu için mikro mekanik işleme yöntemleri tercih edilir. Mikro mekanik işleme yöntemlerinden olan mikro frezeleme yönteminde diğer üretim yöntemlerinden farklı olarak imalat hızı yüksek ve üretim maliyeti de düşüktür (Dhanorker and Özel 2008). Geleneksel frezeleme yöntemi veya diğer yöntemlerle üretilemeyen karmaşık geometrili parçalar, her türlü metalik alaşım, kompozit, polimer ve seramik gibi birbirinden farklı

mikro yapılı malzemeler, mikro frezeleme yöntemiyle daha kolay, daha hassas ve daha iyi yüzey kalitesinde üretilirler (Lee and Dornfeld 2004, Ducobu *et al.* 2009).

2.2.1 Mikro Frezeleme

Mikro frezeleme, mikro mekanik işleme yöntemleri içerisinde en çok kullanılan, en esnek ve çok yönlü mikro kesme işlemidir. Çok çeşitli karmaşık mikro bileşenler ve mikro geometriler bu yöntemle kolaylıkla üretilebilir. Son on yılda mikro frezeleme işlemine yönelik gerek deneysel ve gerekse modellemeye yönelik çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür.

Mikro frezelemede, takım boyutu (özellikle de kenar radüsü) ve geometrisi işlenen yüzey kalitesini doğrudan etkilediği için bir çok çalışmaya konu olmuştur. Ticari olarak bulunan mikro frezeleme takımlarının çapı 25-1000 μm aralığında değişmektedir (Resim 2.1). Küçük çaplı takımların sınırlı sertliği ve mikro takımın üretilme zorluğu nedeniyle, mikro frezeleme takımlarının çoğu yalnızca iki kanallı olarak üretilirler. Bunun dışında doğal elmas gibi çok sert malzemeden yapılan çok küçük (<100 μm) takımlar tek kanallı olarak üretilirler.



Resim 2.1 Çeşitli çaplarda üretilmiş mikro takımlar (İnt. Kyn. 2).

Mikro frezeleme, geleneksel bir CNC işleme merkezinde devri yükseltilmiş bir spindle ile gerçekleştirilebilmesine rağmen, mikro frezeleme için özel olarak tasarlanmış bir hassas freze tezgâhının kullanılması daha yerinde olacaktır. Kesici takım çapının küçülmesine paralel olarak yüksek devirlerde dönme kabiliyetine sahip fener milinin kullanılması kaçınılmazdır. Bu nedenle, 100 000 dev/dk üzerinde çalışma hızlarına sahip hassas yüksek hızlı fener milleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

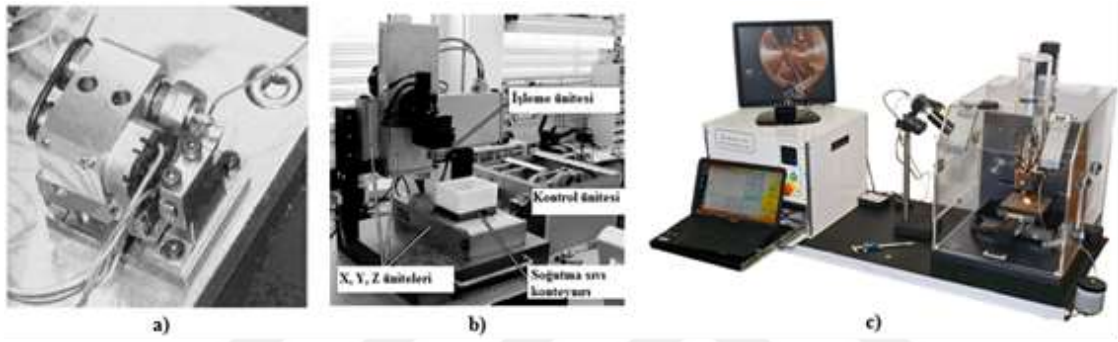
2.2.2 Mikro İmalatta Kullanılan Takım Tezgâhları

Küçük ölçekli ürünlerin geleneksel tezgâhlarda üretimi zor olmakla birlikte geometrik boyutların daha da küçülmesiyle, mikro mekanik işleme tezgâhları da daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Mikro işleme tezgâhlarının ana yapı malzemesinin kütlege az olması daha iyi ve daha kaliteli mühendislik özellikteki malzemelerin tercih edilmesini sağlamıştır (Chae *et al.* 2006). Bu tezgâhlar, işleme anında atık talaş oranını da azaltarak büyük oranda işlenecek malzemeden de kazanç sağlamaktadırlar.

Mikro mekanik işleme tezgâhları, geleneksel tezgâhlara göre yatırım ve işletme maliyetleri bakımından daha ucuz olup enerji sarfiyatları daha azdır. Taşınabilirlikleri kolay olduğu için herhangi bir binaya, siteye, araç içine nakil edilmeleri kolay olmakla birlikte mobil ve perakende satış mağazalarında dahi mikro üretim gerçekleştirilebilmektedir (Okazaki *et al.* 2004). Özellikle kolay taşınabilirliklerinden dolayı bu tezgâhlar, uzay araştırmalarında çok sık kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu tezgâhlar operatörlere de büyük ölçüde kolaylıklar getirip seri üretime de büyük katkı sağlamaktadır (Okazaki *et al.* 2004).

Mikro mekanik işleme tezgahları, teknik özellikler bakımından, geleneksel tezgahlardan farklı olan bazı özelliklere sahiptirler. Bu farklılıklar da statik, dinamik ve termal kararlılık, daha yüksek devir sayısına sahip fener mili ve daha hassas bir kontrol ünitesidir. Dinamik kararlılık işleme sırasında oluşan titreşim genliklerinin azalmasını sağlar. Küçük çaplı takımların işleme verimliliğini artırmak için son derece yüksek doğal frekanslara sahip olan fener milleri kullanılır. Bu motorlarla istenilen dönme hızlarına çok kısa sürede ulaşılır. Mikro frezeleme işlemlerinde yüksek güç üreten

elektrik motorları (maksimum 60000 dev/dk) da kullanılmaktadır. Fakat bu motorlarla fener milinin soğutulması ve seramik rulmanların kullanılması bir zorunluluktur. Lineer tahrik motorları ve kontrol mekanizmaları, motordaki sürtünme, aşınma problemleri ve tezgâh salgılarını ortadan kaldırmaktadır (Chae *et al.* 2006). Ayrıca bu tezgâhlar sahip oldukları esnek tasarımları ile termal deformasyonu azaltıp iş parçasının daha hassas ve daha kaliteli olarak işlenmesini gerçekleştirmektedirler (Okazaki *et al.* 2004, Chae *et al.* 2006). Ticari olmayan ve çeşitli araştırma gruplarınca tasarlanan ve laboratuvar ölçeğinde kullanılan bazı minyatür tezgâhlar, Resim 2.2’de verilmektedir.



Resim 2.2 Ticari olmayan portatif tip mikro işleme tezgâhları, a) Mikro torna (Tanaka 2001), b) Çok fonksiyonlu mikro freze tezgâhı (Okazaki *et al.* 2004), c) CNC Mikro işleme tezgâhı (İnt. Kyn. 3).

Hassas parçaların üretimi için geliştirilmiş endüstriyel ultra hassas torna ve freze tezgâhlarına rastlamak mümkündür. Bu tezgâhların bir çoğunluğu optik sektörüne hitap etmekle birlikte, kuyumculuk ve implant sektöründe de yer alan tezgâhlar bulunmaktadır. Resim 2.3’te mikro kesme özelliğine sahip endüstriyel ultra hassas tezgâhlara ait bazı örnekler verilmiştir. Bu tezgâhların birçok avantajları dolayısıyla on yılı aşkın bir süredir Japonya’daki araştırma enstitüleri, araştırma konsorsiyumları ve özel sektör tarafından araştırma ve geliştirme faaliyetleriyle yeni tezgâhlar hem üretilmeye hem de rekabetçi piyasada hızla yerini almaya devam etmektedir (Tanaka 2001). Araştırma ve geliştirme faaliyetleri sonucunda ticari tipte üretilen mikro tezgâhlar, Resim 2.3’te verilmektedir.



Resim 2.3 Ticari tip mikro tezgâhlar, a) (İnt. Kyn. 4), b) (İnt. Kyn. 5), c) (İnt. Kyn. 6), d) (İnt. Kyn. 7), e) (İnt. Kyn. 8).

2.2.3 Mikro Kesici Takımların Tasarımı ve İmalatı

Mikro kesici takımlar, mikro kesme işleminin en önemli unsuru ve mikro teknolojiyle üretim yapılan başka bir teknolojik alandır. Genellikle mikro kesici takımların geometrisi, işlenecek mikro bileşenin özellikleriyle aynı veya benzerdir. Kesici takım geometrisi ve takım malzemesi özellikleri talaş oluşumu, ısı üretimi, takım aşınması, yüzey kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle mikro ölçekli ürünlerin istenilen geometrik boyut ve yüzey kalitesinde üretilmesi, mikro kesici takımların işleme performansına bağlıdır. İşleme performansı ve takım ömrü, kesici takımın rijitliğine, kesici takımı oluşturan malzemenin cinsine, kaplama malzemesi gibi faktörlere göre değişmektedir (Chae *et al.* 2006, Okazaki *et al.* 2004). Mikro takımlar, yüksek devirlerde kesme işlemi yapması nedeniyle aşınma hızı yüksektir. Bu nedenle kesme sırasında meydana gelen sıcaklığa ve sürtünme kuvvetlerine dayanabilecek rijitliğe sahip olması istenir. Takım rijitliğini ve sıcak sertliğini etkileyen en önemli unsurlar ise takım malzemesi içeriği, bağlayıcı oranı ve kaplama malzemesinin türü gelmektedir. Bu yüzden mikro kesici takımlar genellikle tungsten karbür, elmas, kübik bor nitrür (CBN), çok kristalli elmas (PCD) gibi malzemelerden üretilirler (Chae *et al.* 2006). Şekil 2.4’de mikro mekanik işleme sektöründe kullanılan iş parçası malzemesi ve takım malzemesinin yüzde dağılım değerleri verilmiştir. Şekil 2.4’de görüldüğü

üzere kesici takım malzemesi olarak en çok kullanılan malzeme grubu kaplanmış ve kaplanmamış tungsten karbürdür.

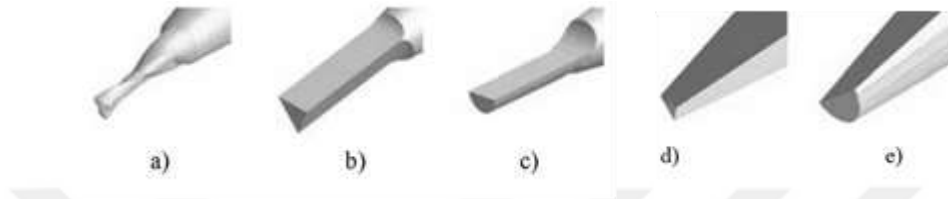


Şekil 2.4 Mikro frezeleme işleminde kesici takım ve iş parçası malzemeleri (Camara *et al.* 2012).

Tungsten karbür kesici takımlar yüksek sıcaklıklarda daha yüksek sertliğe, daha yüksek mukavemete sahiptirler. Yapısında bulunan kobalt elementi, mikro yapı taneleri arasındaki bağ kuvvetlerini artırarak tungsten karbürün sertlik özelliğini kazandırmaktadır. Ayrıca kimyasal reaksiyona girme ihtimalleri de zayıf olduğu için diğer malzemelere göre daha çok tercih edilmektedirler. Çok kristalli elmas takımlar ise daha çok demir dışı metallerin işlenmesinde ve hassas işlemlerde kullanılırlar. Ancak bu elmas takımlar, demir esaslı malzemelerle kimyasal reaksiyona girme yatkınlıklarının fazla olması nedeniyle pek tercih edilmezler (Chae *et al.* 2006).

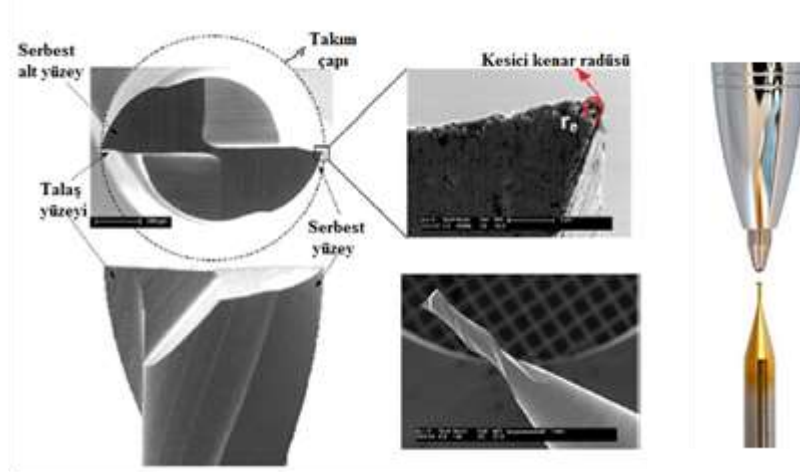
Mikro işleme takımların tasarımı ve imalatı, ürün kalitesini doğrudan etkilediği için hem araştırmacılar hem de imalatçı firmalar için çok önemli bir araştırma konusu olmuştur (Venkatesh *et al.* 2016). Mikro kesici takım tasarımı üzerine yapılan çalışmalarda takım rijitliğini ve takım ömrünü artırmak amaçlanmıştır. Yapılan bir araştırmada kesici takıma ait tüm kenarların kesme işlemine dahil olmadığı ve dolayısıyla takımın kolayca aşındığı tespit edilmiş, tek kesme kenarlı mikro kesici takımlar geliştirilmiştir (Fleischer *et al.* 2008). Diğer bir çalışmada ise 50 µm. ve daha küçük çaplı olan takımlardaki kuvvet artışlarının fazla olması sonucu kırılma risklerinin meydana gelmesi karmaşık olan helis geometrisinin yerine daha basit geometrilere sahip mikro kesici takımlar kullanılmıştır (Chae *et al.* 2006). Takım geometrisinin takım ömrü

üzerindeki etkisini araştırmak adına, düz ve konik gövdeli üçgen ve yarım daire tip kesici takımlar, iki ağızlı helisel freze takımları ile kıyaslanmıştır (Şekil 2.5), (Fang *et al.* 2003). Elde edilen sonuçlara göre helisel iki ağızlı freze takım rijitliğinin yarım daire ve üçgen tipindeki konik gövdeli freze takımlarına göre 8, 12 kat daha zayıf olduğu belirtilmiştir. Ayrıca üçgen ve yarım daire tipindeki düz gövdeli freze takımlarının da mikro frezeleme işlemine uygun olmadığı tespit edilmiştir.



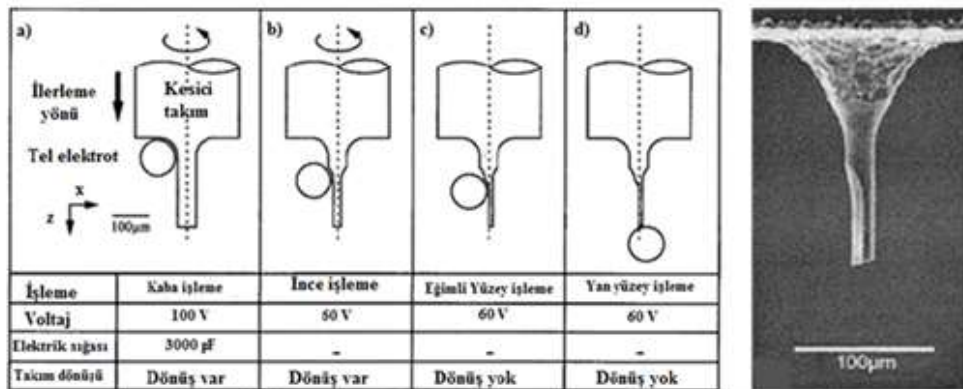
Şekil 2.5 Farklı geometrik tasarımlara sahip mikro freze takımları (Fang *et al.* 2003).

Kesici takımın rijitliğine etki eden bir diğer önemli faktörde takım çapı ve farklı şekillerde tasarlanmış gövde tipleridir. Aynı helis boyunda, iki ağızlı, 0,1 mm. ve 0,2 mm çaplı farklı kesici takımlarla yapılan sonlu elemanlar analizinde; 0,1 mm.' lik kesici takımın 0,2 mm.' lik kesici takıma göre daha kolay kırıldığı belirtilmiştir. Gövde rijitliği üzerine yapılan aynı boyda, 0,1 mm. çaplı iki ağızlı; helis açılı, üçgen ve yarım daireli düz, üçgen ve yarım daire konik gövdeli takımlarla yapılan kesme işleminde üçgen ve yarım daire konik gövdeli takımlarda yalnızca küçük kenar kırılmalarının meydana geldiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada bir diğer önemli sonucun helis kanalı olmayan takımların işleme sırasında oluşan talaşların kesme bölgesinde birikme yapıp işlenen yüzey kalitesini kötü etkilediği belirtilmektedir (Fang *et al.* 2003). Ayrıca mikro takımlarda rijitliği arttırmak ve ani kırılmaların önüne geçmek için kesici takım ile shaft kısmı arasında konik bir geçiş yapılır (Şekil 2.6).

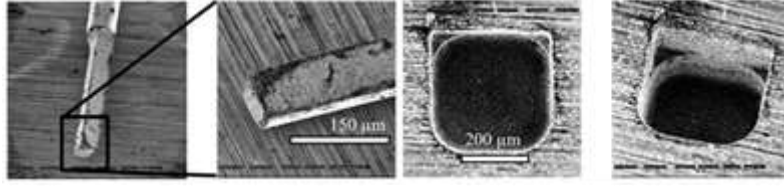


Şekil 2.6 Mikro kesici takım ve SEM fotoğrafı (Mativenga *et al.* 2013).

Helis açıları, eksenel talaş açıları ve mikro ağız yapısı itibariyle hassas olan mikro takımları geleneksel imalat yöntemleriyle imal etmek oldukça zordur (Fleischer *et al.* 2008). Günümüzde karbür mikro kesici takımlar çok ince taneli bir karbür çubuktan mekanik taşlama tekniği ile üretilmektedir. Buna karşın mekanik taşlama yöntemiyle yüksek hassasiyette ve yeterince küçük çaplı takımlar üretilmemektedir. Mikro tel erozyon (WEDGE), ultrasonik taşlama, mikro elektro erozyon (EDM), mikro elektrokimyasal aşınma (ECM) mikro kesici takımların imalatında çok sık kullanılan yöntemlerdendir. Mikro tel erozyon yöntemi; çoklu kristal yapılu elmas (PCD) takımların üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde yalıtkan sıvı içinde bulunan tel erozyon ve iş parçası arasında oluşturulan elektrik akımı yardımıyla sırasıyla kesici takım çapında küçültme, keskinleştirme, eğimli ve yan yüzeyleri işleme gerçekleştirilerek mikro takımlar imal edilir (Şekil 2.7 ve Şekil 2.8).



Şekil 2.7 Mikro kesici takımın mikro tel erozyon yöntemi ile üretimi.



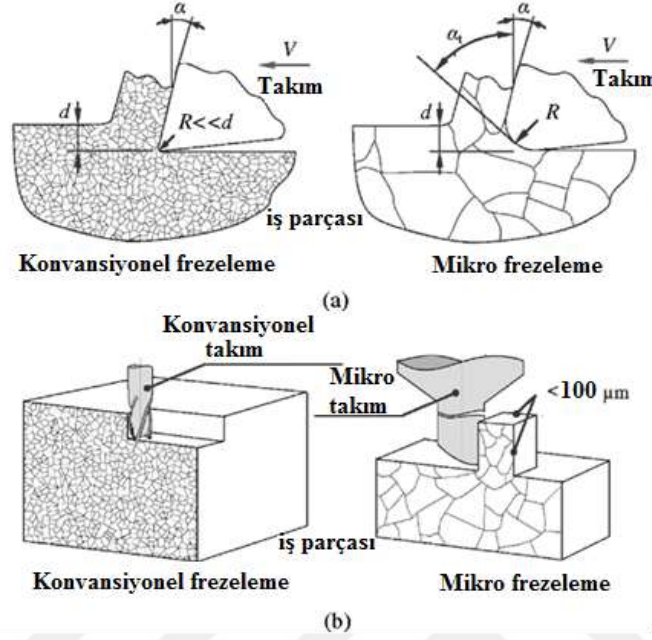
Şekil 2.8 Mikro tel erozyon yöntemi ile üretilmiş bir mikro kesici takımın mikro erozyon yöntemiyle bir mikro kalıp üretilmesi (Okazaki *et al.* 2004).

Silindirik mikro takımların üretilmesinde ultrasonik taşlama teknikleri de kullanılmaktadır. Ultrasonik taşlama yöntemi diğer geleneksel taşlama yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir (Onikura *et al.* 2000). Ultrasonik taşlama sırasında takıma etki eden gerilmeler de bir hayli azalmaktadır. Mikro tel erozyon ve mikro elektro erozyon yönteminde yüksek sıcaklıklarda mikro takımda meydana gelen yüksek gerilmeler nedeniyle kesici takımda aşınmalar meydana gelmektedir. Bunun üzerine kesici takım aşınmalarını azaltmak için mikro elektrokimyasal aşınma yöntemi kullanılmaktadır. Mikro elektrokimyasal aşınma yönteminde mikro takım malzemesinin korozyon direncinin, elektrik ve termal iletkenliğinin yüksek olması istenir. Dolayısıyla mikro takımlar tungsten karbür, platin, titanyum ve bakır alaşımlarından seçilir.

2.3 Mikro Frezeleme İşleminin Mekaniği

Konvansiyonel kesme mekaniği son 20-30 yılda birçok araştırmaya konu olmuştur ve hali hazırda da olmaya devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda, çeşitli kesme deneyleri gerçekleştirilerek kesme işleminin mekaniğini anlamak için çeşitli modeller de geliştirilmiştir. Geliştirilen ve doğruluğu deneysel çalışmalarla desteklenen çoğu analitik, mekanik ve sayısal model, kesme kuvveti tahmini ve talaş oluşum prosesine odaklanmıştır. Basitleştirilmiş takım geometrisi ve homojen malzemeler gibi varsayımlara dayanan çoğu geleneksel kesme modelleri, mikro kesme işlemine doğrudan uygulanamaz. Mikro kesme, kinematik açıdan benzer olmasına rağmen geleneksel kesme işleminin basitçe küçültülmüş hali değildir (Li *et al.* 2007, Heamawatanachai and Bamberg 2009). Mikro kesme şartlarında ortaya çıkan ve geleneksel işlemeden farklı olan bir takım unsurlar vardır. Bunlar; malzemenin mikro yapısı (Şekil 2.9), yüzey altı tane yapısı ve işlenen yüzeyin elastik geri esnemesidir.

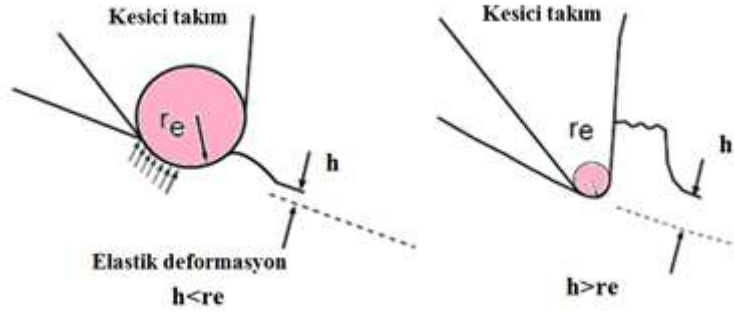
Boyut etkisi, bu farklı olguyu açıklamada ve mikro kesme mekaniğini araştırmada önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2.9 (a) Deforme olmamış talaş kalınlığının takım kenarı yarıçapına oranının küçük ve çok büyük olması durumlarının kıyaslanması, b) Mikro kesme işleminde iş parçası tane yapısının boyut etkisi (Ikawa *et al.*1992).

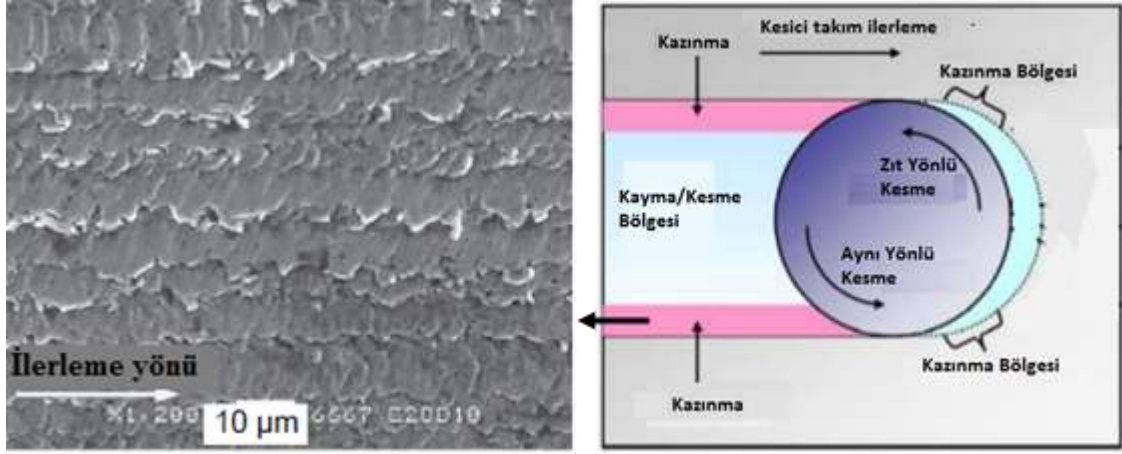
Eksenel kesme talaş derinliği ve deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radüsü ile kıyaslanabilecek olması nedeniyle, mikro kesme işleminde boyut etkisi olarak isimlendirilen bir kavram ortaya atılmıştır. Kesilmemiş talaş kalınlığının diş başına düşen ilerleme değerinin takım kenar yarıçapına oranı kesme işleminin sağlıklı gerçekleşip gerçekleşmemesi noktasında belirleyici bir unsur olacaktır. Bu oran aynı zamanda iş parçası yüzeyinde elastik geri esnemenin oluşmasına ve takıma ilave kuvvetlerin etki etmesine de neden olacaktır (Şekil 2.10). Geleneksel frezeleme işleminde kesme derinliği, genellikle kesici takım kenar radüsünden çok büyük olduğu için kesici takım daha rahat kesme yaptığından dolayı düzgün bir talaş akışı da sağlanır (Vogler *et al.* 2004, Chae *et al.* 2006). Mikro frezeleme işleminde ise bu durum her zaman geçerli değildir. Çünkü mikro frezelemede talaş kalınlığı veya diş başına düşen ilerleme miktarının kesici takım kenar radüsünden küçüktür (Bao and Tansel, 2000, Kang *et al.* 2007). Böyle bir durumda kesici takım kenar radüsünün de etkisiyle kesici takım kenarı negatif bir talaş açısı şeklinde davranmaktadır. Negatif talaş açısı sebebiyle

mikro kesme işleminde kararsızlıklar meydana gelmekte düzgün bir talaş akışı da sağlanamamaktadır (Shimada *et al.* 1993, Yuan *et al.* 1996, Chae *et al.* 2006).



Şekil 2.10 Mikro ve geleneksel kesme işleminde kesici takım kenar radüsü (r_e) ile talaş kalınlığının (h) kıyaslanması (Dhanorker and Özel 2008).

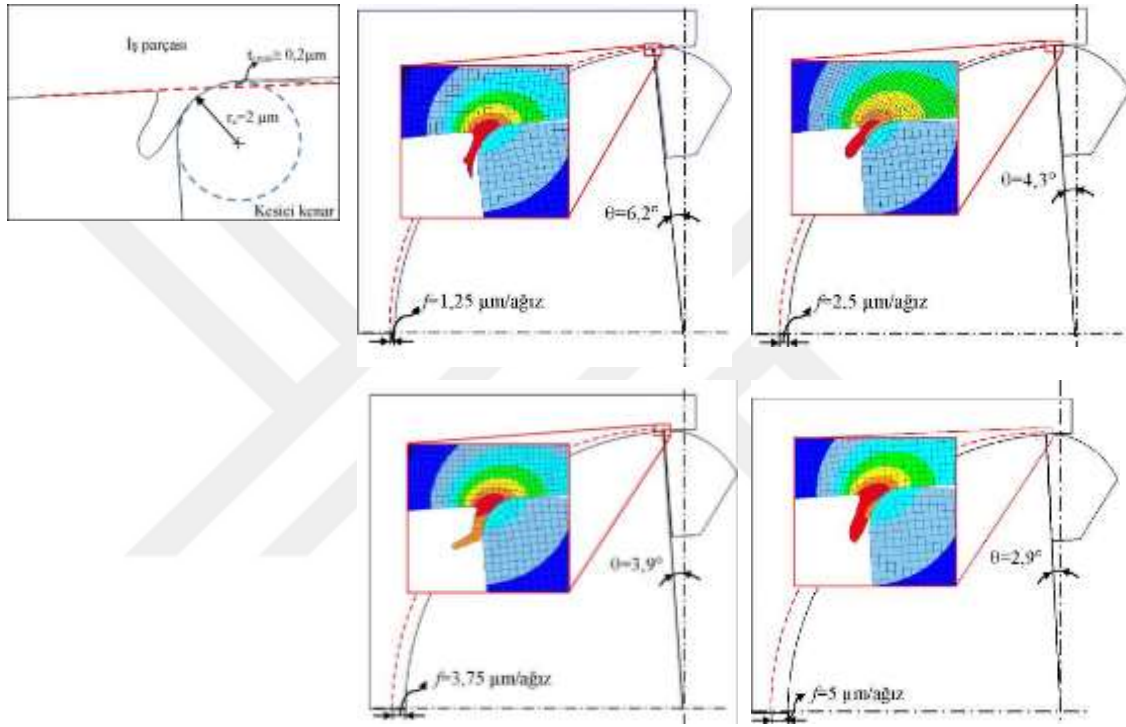
Kesme işlemi esnasında negatif talaş açısı karakteri gösteren kesici takım, iş parçasına dalmakta zorlanacağından iş parçası yüzeyini adeta ovalama / kazıma hareketine benzer şekilde işler (Şekil 2.11). Bunun sonucu olarak kesme işlemi sırasında çapak oluşumu gibi istenmeyen durumlar da meydana gelebilmektedir (Shaller *et al.* 1999, Fang and Liu 2004). Şekil 2.11'deki şematik çizimde kazınma bölgesi olarak tanımlanan kısımlar, kesici kenarın talaşa girdiği ve talaştan çıktığı bölgelere denk gelmektedir. Bu bölgelerde ki deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radüsüne oranı kritik değerden düşüktür. Hatta ilk kesmeye başladığı noktada bu değer sıfıra eşittir. Tam kanal işleme operasyonu dikkate alındığında, kanalın ortasındaki talaş kalınlığı, dış başına düşen ilerleme değerine eşittir ve kesme işlemi kayma mekanizmasının bir sonucu olarak gerçekleşir. Kanalın her iki tarafındaki kazınma bölgesinin genişliği, azalan ilerleme değerine bağlı olarak artarken, ilerleme değerinin artmasıyla birlikte azalır, fakat mikro işleme şartlarında tamamen sıfıra indirmek mümkün değildir.



Şekil 2.11 Mikro frezeleme işleminde kazınma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve kesme işleminde kazınmanın meydana geldiği bölgenin şematik gösterimi (Bissacco *et al.* 2006).

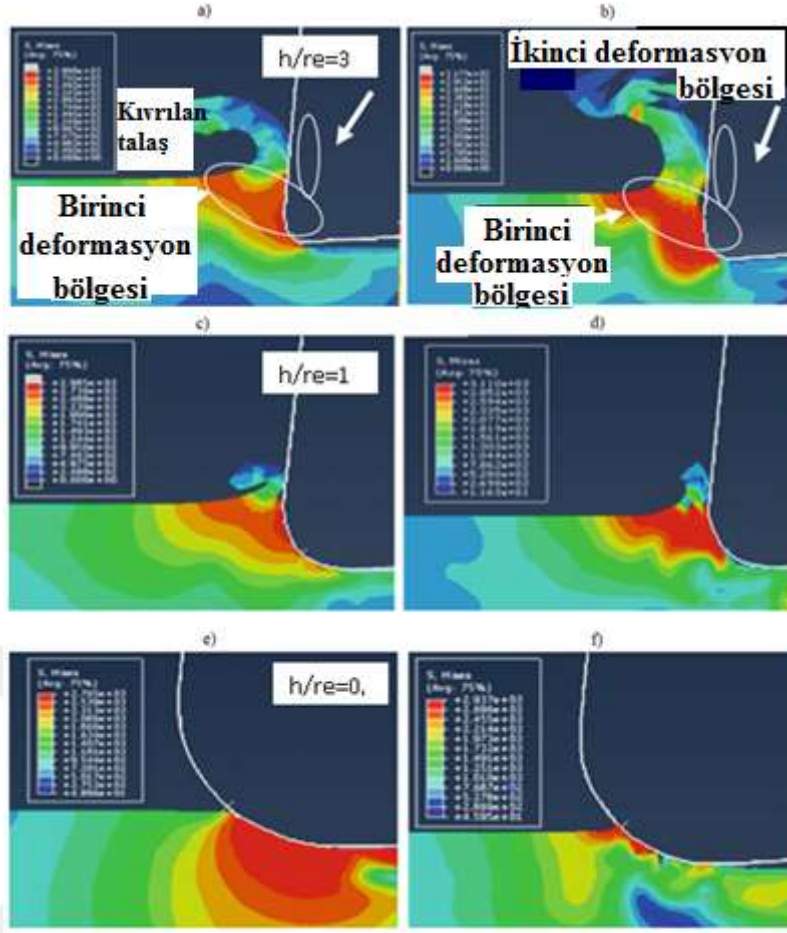
Deforme olmamış talaş kalınlığı, kritik talaş kalınlığından küçük olduğu durumlarda talaş oluşumu gerçekleşmeyebilir ve işlenen yüzey kalitesi de bozulur. Minimum talaş kalınlığı, iş parçası malzemesi özelliklerine de bağlıdır. Bu konuda yapılan bir çalışmada Liu vd. (2006), AISI 1040 ve Al6082-T6 malzemeleri üzerinde yapılan deneysel ve analitik çalışmada, AISI 1040 çeliği için minimum talaş kalınlığının kenar radüsüne oranı (h_{min}/r_e) 0,2-0,4 arasında, Al6082-T6 malzemesi için ise; 0,4 olan bir oran elde etmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise; Yuan vd. (1996), alüminyum alaşımının mikro işlenmesinde minimum talaş kalınlığı değerini deneysel olarak tanımlamışlardır. Yaptıkları çalışma neticesinde, minimum talaş derinliğinin kesici takım kenar radiusunun % 20'si ile %40'ı arasında olduğunu tahmin etmişlerdir. Elmas takımlar üzerinde yapılan başka bir çalışmada ise minimum talaş kalınlığının kesici takım kenar radüsünün % 10'u olduğu ve kesici takım kenar keskinliğinin minimum talaş kalınlığını belirlemede sürtünme faktöründen daha etkili olduğu önerilmiştir (Ikawa *et al.* 1991). Kritik talaş kalınlığının altında yapılan kesme işlemlerinde takım aşınması ve kenar radüsünün değişimi de hız kazanmaktadır. Takımdaki artan aşınma sonucu işlenen kanal kenarlarında çapak oluşumu artıp işlenen yüzey kalitesi de bozulmaktadır (Yuan *et al.* 1996, Schaller *et al.* 1999, Xiao *et al.* 2003, Fang *et al.* 2004, Chae *et al.* 2006, Liu *et al.* 2006, Filiz *et al.* 2007). Bu yüzden mikro frezeleme işleminde düzgün bir talaş akışının meydana gelmesi ve takım aşınmasını en aza indirmek için minimum talaş kalınlığı oranının belirlenmesi çok önemlidir (Aramcharoen and Mativenga 2009, Ucin 2013). Yapılan çalışmalarda minimum talaş kalınlığını belirlemek için deneylerden ve nümerik

modellemelerden faydalanılmıştır. Sonlu elemanlar analiziyle yapılan nümerik modellemede kesici takımın farklı ilerleme hızlarındaki farklı açısall pozisyonlarında düzgün talaş akışının meydana geldiği andaki talaş kalınlıkları ölçülmüştür. Uçun (2013) yaptığı çalışmada Şekil 2.12’ de verilen analiz sonuçlarını elde etmiş olup, minimum talaş kalınlığının kesici takım kenar radüsünün 0,1 katı olduğu durumda elde edildiğini rapor etmektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Minimum talaş kalınlığının nümerik model yardımıyla belirlenmesi (Uçun 2013).

Mikro frezeleme işleminde eğer talaş kalınlığının kesici takım kenar radüsüne oranı minimum talaş kalınlığından küçük ise kesici takım negatif talaş açısı özelliği gösterir. Bu durumda kesme kuvvetleri artar ve kesici takımın talaşa dalması zorlaşır (Aramcharoen and Mativenga 2008). Kenar radüsünün etkisini oraya koymak adına AISI D2 çeliğinin mikro frezelenmesi iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir (Saedon 2016). Şekil 2.13’te kesici takım her iki frezeleme işleminde birinci deformasyon bölgesinde kesme işlemi yapar ve kesme kuvvetlerinden dolayı bu bölgede yüksek gerilmeler meydana gelir.



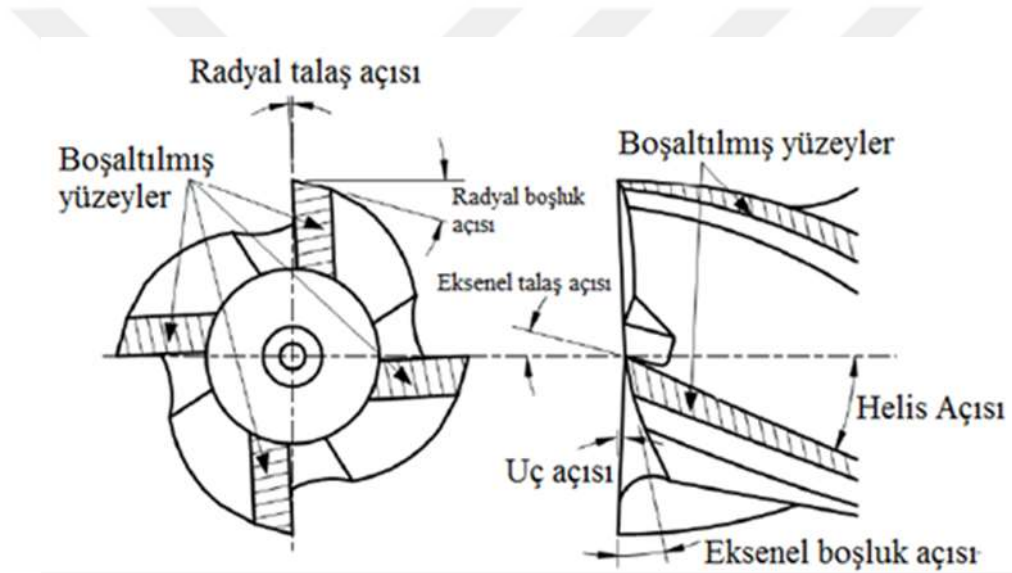
Şekil 2.13 Farklı h/re oranları için kesme yüzeyinde oluşan Vonmises gerilme değerleri ve talaş oluşum şekilleri, Geleneksel frezeleme (a, c,e), Mikro frezeleme (b, d, f). (Saedon *et al.* 2016).

Mikro frezeleme işlemindeki oluşan gerilme değerleri geleneksel frezelemede oluşan gerilme değerlerinden daha büyüktür. İkinci bölgede ise kesici takım, kesip önüne kattığı talaşı sürtünme kuvvetiyle sürükleyip düzgün bir akışla bu bölgeden uzaklaştırır. Düzgün bir talaş akışının meydana gelmesi h/re oranının 1' den büyük olması durumunda gerçekleşir ($h/re > 1$). İkinci bölgede meydana gelen gerilme değeri ise birinci bölgede meydana gelen gerilme değerinden daha azdır (Saedon *et al.* 2016). $h/re=1$ olduğunda her iki frezeleme işleminde yine birinci deformasyon bölgesinde gerilme artarken ikinci deformasyon bölgesinde gerilme değeri azalmıştır. Her iki bölgede mikro frezeleme işleminde elde edilen gerilme değeri, geleneksel frezeleme işlemindeki elde edilen gerilme değerinden daha büyüktür (Saedon *et al.* 2016). $h/re < 1$ olduğunda geleneksel frezeleme işleminde birinci deformasyon bölgesinde gerilme artıp

talaş kesilirken mikro frezeleme işleminde ise gerilme değeri çok düşüktür, hiç talaş kesilmez.

2.4 Takım Geometrisinin Etkisi

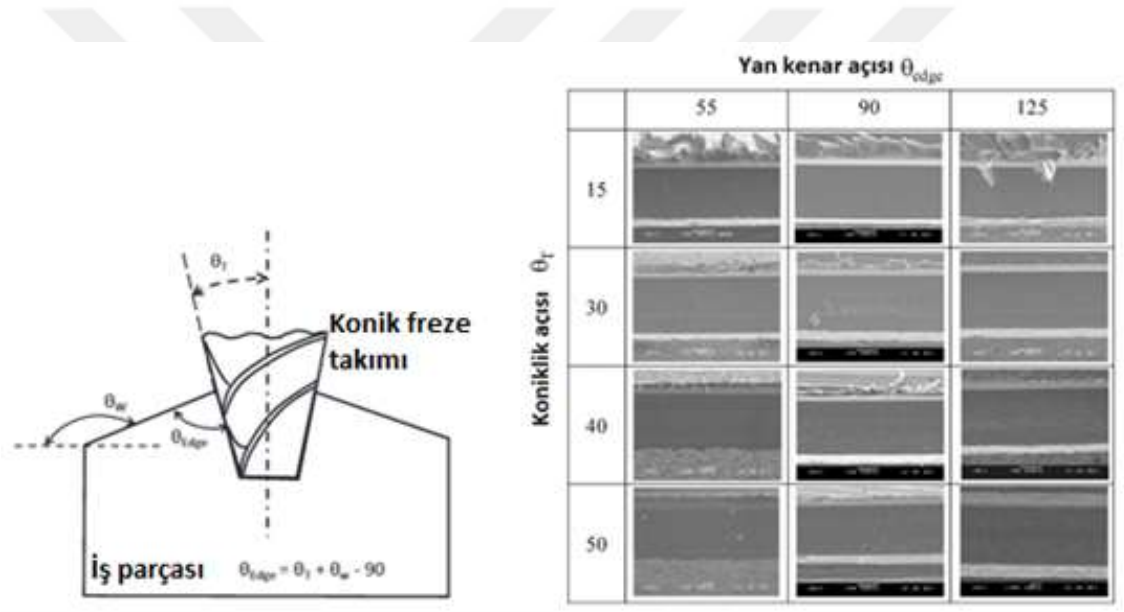
Mikro frezelemede kullanılan takımlar geleneksel frezeleme takımları ile büyük oranda benzerlik gösterir (Şekil 2.14). Mikro takımlar ile geleneksel kesici takımlarda kullanılan geometrik tanımlar ve isimlendirmeler de birbiri ile benzerdir denilebilir. Fakat mikro frezelemede takıma etki eden kesme kuvvetleri geleneksel frezelemeye nazaran daha büyük önem taşır.



Şekil 2.14 Dört kanallı bir mikro freze takımı ve geometrik tanımlamaları.

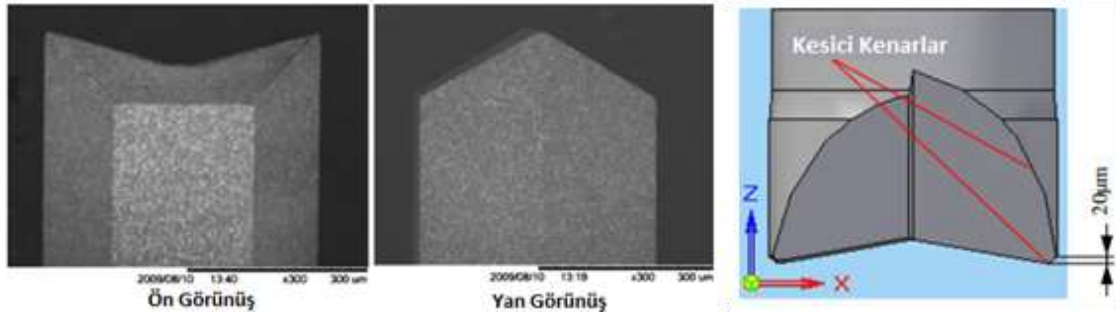
Kesici takım çapının çok küçük olması ve kesit geometrisinin zayıf olması nedeniyle takım kırılma riski mikro frezelemede daha yüksektir. Bu nedenle bir mikro takımda beklenen en önemli özellikler; yüksek rijitlik, tokluk ve yüksek aşınma direncidir. Tüm bu özelliklerin tek bir takımda toplanması her zaman mümkün olmayabilir. Ayrıca bu özellikler sadece takım malzemesi ve içeriği ile ilgili değil aynı zamanda takım geometrisi ile de ilgilidir. Bu nedenle mikro işleme sektöründe en uygun geometrinin elde edilmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya da devam etmektedir.

Mikro frezeleme işleminde, kesici takımların performansının artırılması amacıyla takım geometrileri üzerinde yapılan revizyonlar veya yeni takım geometrilerinin temel amacı takım ömrünü arttırmak ve en az çapakla daha iyi bir yüzey kalitesi elde etmektir. Yapılan bir çalışmada (Li 2009), klasik geometrinin yerine yine iki ve dört ağızlı yeni geometriler tasarlayarak, kesme performansları karşılaştırılmıştır. Takım geometrisinin çapak oluşumuna etkisini incelemek üzere konik mikro takımlar üretilen bir çalışmada üç farklı koniklik açısı dikkate alınmıştır (Saptaji *et al.* 2012). Elde edilen sonuçlara göre; azalan koniklik açısı çapak oluşumunun artmasına neden olmaktadır. Ayrıca iş parçasına verilen kenar açısının da çapak boyutuna etkisi araştırılmış olup, artan kenar açısının çapak oluşumunu kısmen de olsa arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Konik kesici takımın ve yan kenar açısının çapak oluşumu üzerindeki etkisi (Saptaji *et al.* 2012).

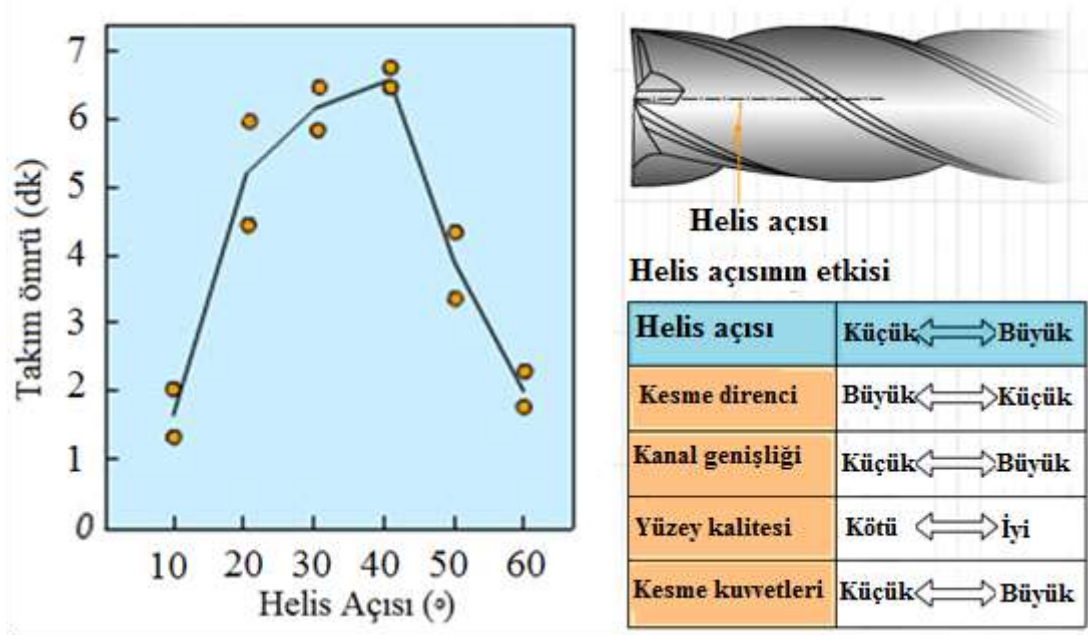
Yeni bir takım geometrisinin performansının araştırıldığı bir çalışmada da EDM tekniği ile üretilen 30 μm .’ den 300 μm .’ ye kadar farklı çaplardaki mikro takımların kesme performansı test edilmiştir (Fleischer *et al.* 2008). Yapılan sonlu elemanlar analizi ile tasarlanan kesici takımların geometrik olarak optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Cheng vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada da altıgen şeklinde bir kesici takım tasarlanmış ve kesme performansı test edilmiştir (Şekil 2.16). Elde edilen sonuçlara göre yeni tasarlanan kesici takım ile yapılan kesme işlemlerinde yüzey kalitesinin daha iyi olduğu saptanmıştır.



Şekil 2.16 Altıgen geometride üretilen mikro kesici takım (Cheng *et al.* 2011).

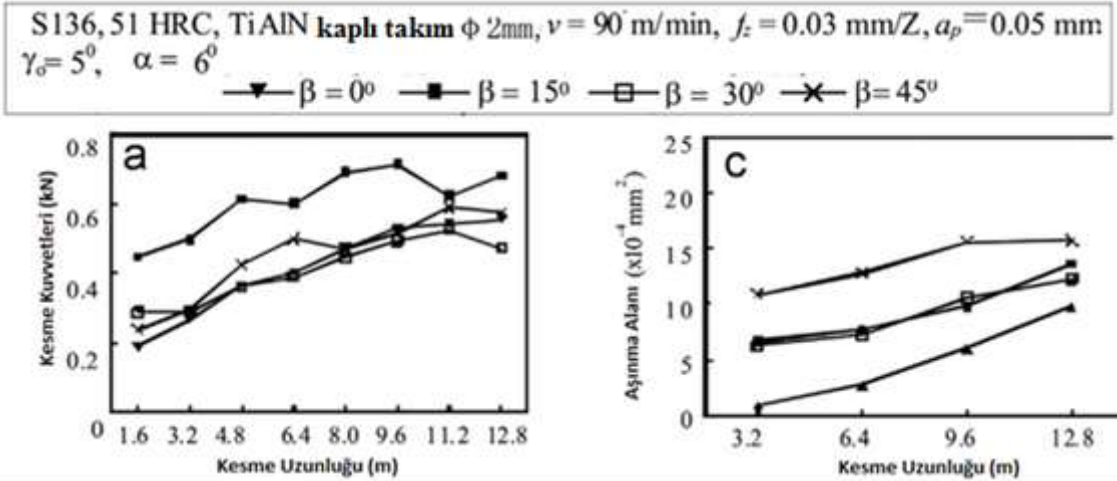
Yukarıda bahsi geçen takım tasarımı örnekleri bireysel girişimler şeklinde kalmış olup bu takımları ticari olarak tedarik etmek neredeyse imkânsızdır. Ticari anlamda kullanılan kesici takımlara ait geometrilerde de bir takım araştırmalar yapmak suretiyle takımın kesme performansının artırılması hedeflenmiştir. Bir mikro freze takımında öne çıkan geometrik parametreler; Helis açısı, ağız sayısı, radyal talaş açısı, eksenel talaş açısı ve kesici kenar radüsüdür. Bu parametreler içerisinde takım ömrünü ve kesme performansını en çok etkileyen unsurlar ise helis açısı ve ağız sayısıdır.

Helis açısı; kesici ağızın veya zırhının takım eksenine ile yapmış olduğu açı olarak tanımlanmaktadır. Ticari olarak kullanılan kesici takımlarda bu açı genellikle 30° civarındadır. Bu açının artması veya azalması takımın iş parçası ile yaptığı temas uzunluğunu etkilemektedir. Artan helis açısı, takım talaş temas uzunluğunun da artmasına neden olacaktır. Bu da takımın aşınmaya zorlanan kenar uzunluğunun veya alanının artmasına dolayısıyla da takım ömrünün artmasına neden olacaktır (İnt. Kyn. 9). Mitsubishi takım üreticisinin geleneksel frezelemeye yönelik yapmış olduğu bir çalışmada bir karbon çeliğini iki ağızlı bir HSS kesici takımla işlemiştir. Altı farklı helis açısı için yapılan deneyde takım ömrünün karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 2.17), (İnt. Kyn. 9). Elde edilen sonuçlara göre helis açısının çok düşük ($<20^\circ$) veya çok yüksek ($>40^\circ$) alınması takım ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Şekil 2.17’ de verilen tabloda, geleneksel frezelemede en uygun helis açısının 20° ile 40° arasında değiştiğini söylemek mümkündür. Bu tabloda verilen helis açısının da çeşitli unsurlar üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



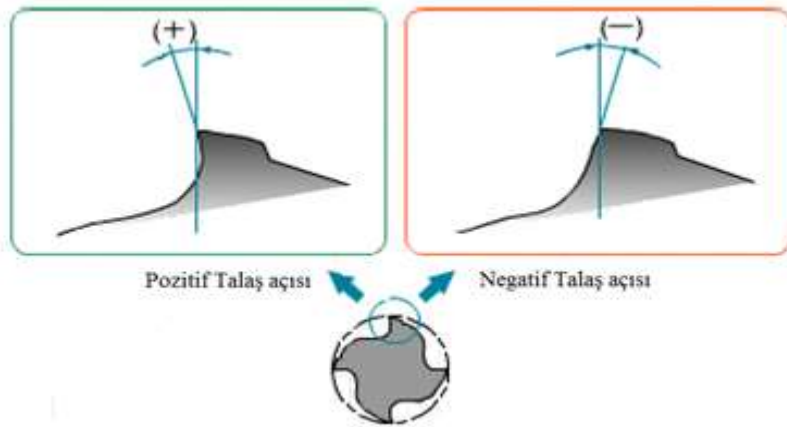
Şekil 2.17 Helis açısının takım ömrüne etkisi (İnt. Kyn. 9).

Wang vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada da, yüksek hızda yapılan frezeleme işleminde çeşitli geometrik unsurların etkisi araştırılmıştır. Çalışmada dört farklı helis açısı, boşluk açısı ve radyal talaş açısı dikkate alınmıştır. Her bir takım için yapılan aşınma ve kesme kuvveti deneyleri sonrasında bu geometrik unsurların etkisi ortaya konmuştur. Buna göre; artan kesme uzunluğuna bağlı olarak pozitif talaş açısında elde edilen kesme kuvvetlerinin bir miktar daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca radyal talaş açısının negatif olduğu durumda takım aşınmasının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte boşluk açısının artmasıyla yine kesme kuvvetleri de azalmaktadır. Çalışmada elde edilen diğer bir sonuç da helis açısının etkisidir. Yazarlar, helis açısının 30° olması durumunda kesme kuvvetlerinin minimum olarak gerçekleştiğini göstermişlerdir. Ayrıca takım aşınmasının, helis açısının 45° olduğu durumda maksimum olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Helis açısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin ve takım aşınmasının değişimi (Wang *et al.* 2015).

Radyal talaş açısı; iş parçası yüzeyine çizilen dikeyle, talaş yüzeyi arasındaki açıdır. Pozitif veya negatif olabilir ve talaş kaldırma işlemini etkileyen en önemli geometrik faktörlerden biridir. Frezeleme işleminde radyal talaş açısının pozitif ve negatif olma durumlarına örnek Şekil 2.19’da verilmiştir. Radyal talaş açısı aynı zamanda kesici kenar mukavemetini ve kesici kenarın keskinliğini belirleyen bir geometrik parametredir. Pozitif olması durumunda kesici takım daha keskin olacak ve iş parçasına dalması kolaylaşacaktır. Bu da kesme kuvvetlerinin azalmasına katkıda bulunacaktır. Negatif talaş açısı, takım kenarının rijitliğinin artmasına neden olurken, takımın talaş kırıcı özelliği kazanmasına neden olur. Genel amaçlı frezeleme operasyonlarında radyal talaş açısı pozitif alınır. Fakat sertleştirilmiş çeliklerin, işlenmesi zor ve süper alaşım malzemelerin işlenmesinde radyal talaş açısının negatif alınması kenar kırılmalarının en aza indirgemesine yardımcı olur (İnt. Kyn. 10).



Şekil 2.19 Helisel bir freze takımında pozitif ve negatif talaş açıları (İnt. Kyn. 10).

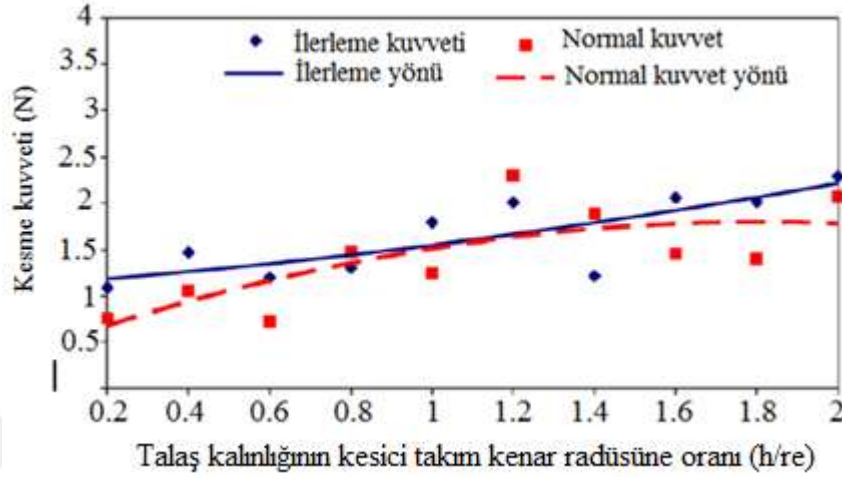
Geleneksel frezelemede pozitif talaş açısı, kesme kuvvetlerini azaltıp kesme işleminin daha rahat olmasını sağlar. Negatif talaş açılı kesici takımlar ise çok yüksek sertlikteki malzemelerin kesilme işlemi esnasında kesici kenar kırılmalarını önlemek için kullanılırlar. Eksenel talaş açısı pasif kesme kuvvetinin (F_z) yönünü ve talaş akışını etkiler. Eksenel boşluk açısı ise kesici takımın iş parçasına sürtünmesini önler.

Kesici takımdaki ağız sayısı, takım geometrisi parametrelerindendir. Ağız sayısı arttıkça ağızlar arasındaki açı daralacağı için aynı anda kesme yapan ağız sayısı artar. Böylece kesici ağızlardaki takım aşınmaları azalır kesme mukavemetleri de artar. Fakat kesici ağız sayısının artışı ile talaşın sıkışma, yapışma gibi talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılmasını önleyen faktörler olabilir. Bu faktörler, kesici ağızların kolaylıkla deforme olmasına, kırılmasına hatta işlenen yüzey kalitesinin de bozulmasına sebep olmaktadır (İnt. Kyn. 11).

2.5 Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Kuvvetlerinin Değişimi

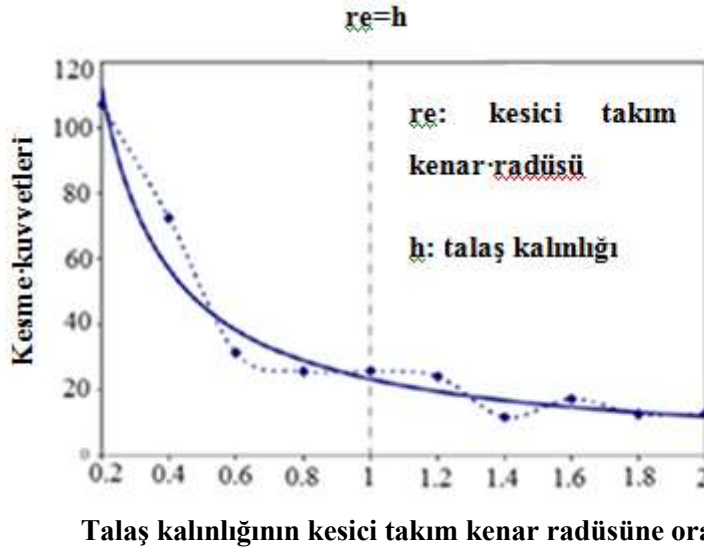
Mikro frezeleme işleminde meydana gelen kesme kuvvetlerinin en önemli olumsuz etkisi takım kırılmalarıdır. Kesme kuvvetlerinin anlık değişiminin yanı sıra iş parçasında meydana gelen elastik geri esneme de takıma ilave kuvvetlerin etki etmesine neden olur. Mikro frezeleme işleminde, kesme kuvvetlerinin etkilendiği diğer bir geometrik parametre ise kesici takıma ait kenar radüsüdür. Artan kenar radüsü takımın iş parçasına dalmasını zorlaştırmakla beraber kesme kuvvetlerinin de artmasına neden olur. Abrasiv aşınma mekanizmasının etkisiyle takım kenar radüsü büyür ve kesme kuvvetleri ile kazınma kuvvetleri artar. Artan kesme kuvvetleri ise takımın elastik olarak eğilmesine neden olur ki buda takım kırılmalarının en önemli nedenidir. Mikro ve geleneksel frezelemede kesme kuvvetleri üzerine yapılan bir çalışmada, kesme derinliğinin kesici takım kenar radüsüne oranı arttığı zaman ilerleme ve normal yönde olan kuvvetlerin de arttığı gözlenmiştir. Hatta ilerleme yönünde olan kuvvetin normal kuvvete göre biraz daha fazla artışına da dikkat çekilmiştir. Talaş kalınlığının kesici takım kenar radüsüne oranının (minimum talaş kalınlığı) 1 ve 1' den büyük olması durumunda normal kuvvetin daha kararlı bir durum sergilediği gözlemlenmiştir. Minimum talaş kalınlığının 1 ve 1' den büyük olması durumlarında kesici takım talaşa

daha kolay dalmakta ve kesme hareketi gerçekleşmektedir (Aramcharoen and Mativenga 2009), (Şekil 2.20).



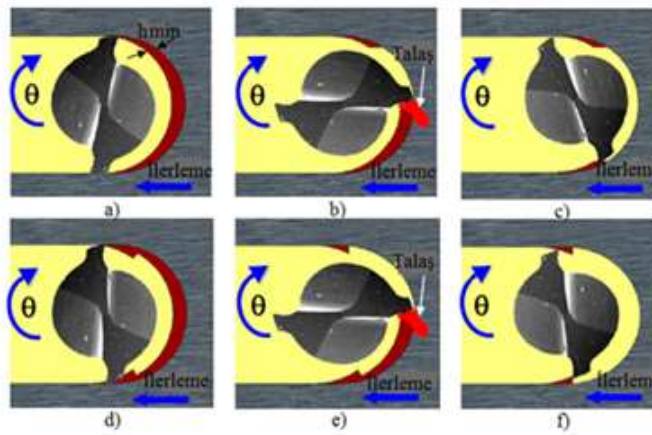
Şekil 2.20 Mikro ve geleneksel frezelemede oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi (Aramcharoen and Mativenga 2009).

Mikro frezeleme işleminde kesme kuvvetinin en büyük değeri, talaş kalınlığının kesici takım kenar radiusüne oranının en küçük olduğu noktada elde edilir. Bu nokta aynı zamanda kesici takımın iş parçasını kesmeye tam başladığı noktadır. Bu etkinin nedeninin kesici kenar radiusünün talaş kalınlığından yüksek olmasına yani h/re oranının azalmasına bağlı olarak kazıma mekanizmasından kaynaklandığı belirtilmektedir. Daha sonra h/re oranının artışına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin kararlı bir durum sergilediği belirtilmiştir. Talaş kalınlığının kenar radiusüne eşit olduğu durumdan sonraki h/re oranlarında kesme kuvvetleri daha kararlı bir durum sergilemektedir. Bu noktadaki talaş kalınlığının diğer bir adı da kritik talaş kalınlığıdır (Aramcharoen and Mativenga 2009), (Şekil 2.21).



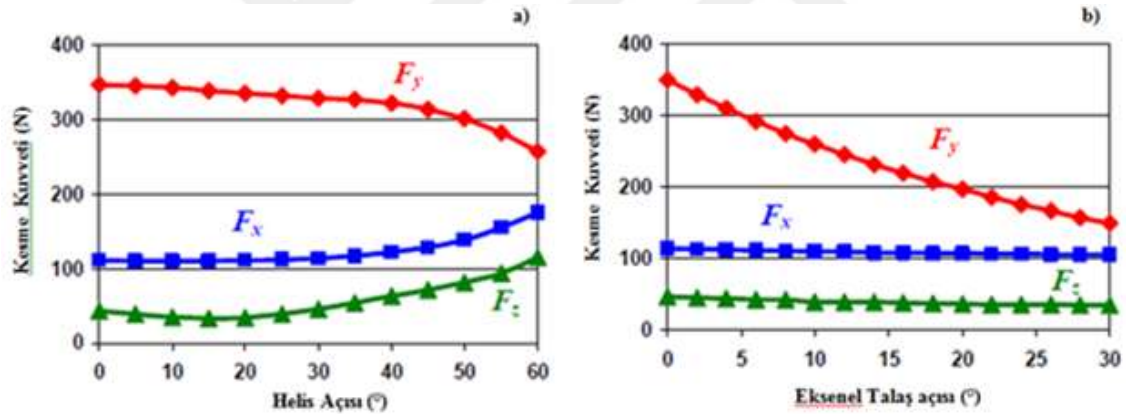
Şekil 2.21 Mikro frezelemede oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi (Aramcharoen and Mativenga 2009).

Düşük ilerleme hızlarında kesme işlemi yapan kesici ağızların kanala giriş ve çıkış yaptığı kısımlarda bir miktar kesilmemiş talaş kalacaktır. Bunun sebebi; kesici ağzın iş parçası ile temasında, talaş kalınlığının kritik olan derinlikten daha küçük olması nedeniyle kesme işleminin gerçekleşmemesidir. İlk kesici ağızdan kesilmeden kalan bu talaş, sırasıyla diğer ağzın temas uzunluğunun artışı ve kesme derinliğinin minimum talaş kalınlığından büyük olması nedeniyle de daha büyük bir talaş kesiti ile kesilecektir. Sonuç itibarıyla kesilmeden kalan talaşların sırasıyla diğer ağızlar tarafından büyüyen talaş kesiti ile kesilmesi kesme kuvvetinde kararsızlıklar meydana getirecektir (Filiz *et al.* 2007), (Şekil 2.22).



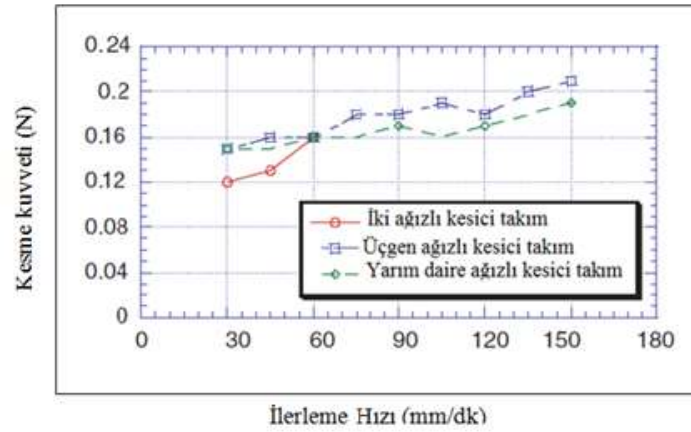
Şekil 2.22 Aynı ve zıt yönlü frezeleme bölgelerinde kesilmemiş talaşın sonraki pasolarda kesilmesi (Filiz *et al.* 2007).

Mikro frezeleme işleminde kesici takım geometrisinin kesme kuvvetlerine olan etkisi üzerine literatürde çok fazla bir çalışma olmayıp genellikle geleneksel frezeleme işlemi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Şekil 2.23’ te yapılan bir çalışmaya göre farklı helis açısı ve eksenel talaş açılarının kesme kuvvetlerine olan etkisi incelendiğinde; iki ağızlı, 30°’ nin altındaki helis açısına sahip olan kesici takımların kesme kuvvetlerine bir etkisinin olmadığı fakat helis açısı 30°’ nin üzerindeki kesici takımların ise F_x ve F_z kuvvetlerinde artış; F_y kuvvetinde ise belirgin bir azalış meydana getirdiği belirtilmektedir. Eksenel talaş açısının kesme kuvvetleri değişimine olan etkisi incelendiğinde ise yine F_y kuvvetinde belirgin bir azalma gözlenirken F_x ve F_z kuvvetlerinde ise belirgin bir değişim görülmemektedir. Şekil 2.23’ te görüleceği üzere talaş açısının artması ile kesici takım kenar keskinliği de artmakta ve kesici takımın daha rahat kesme yapabilmesidir. Dolayısıyla F_y kesme kuvveti de azalmaktadır (Fontaine *et al.* 2007), (Şekil 2.23).



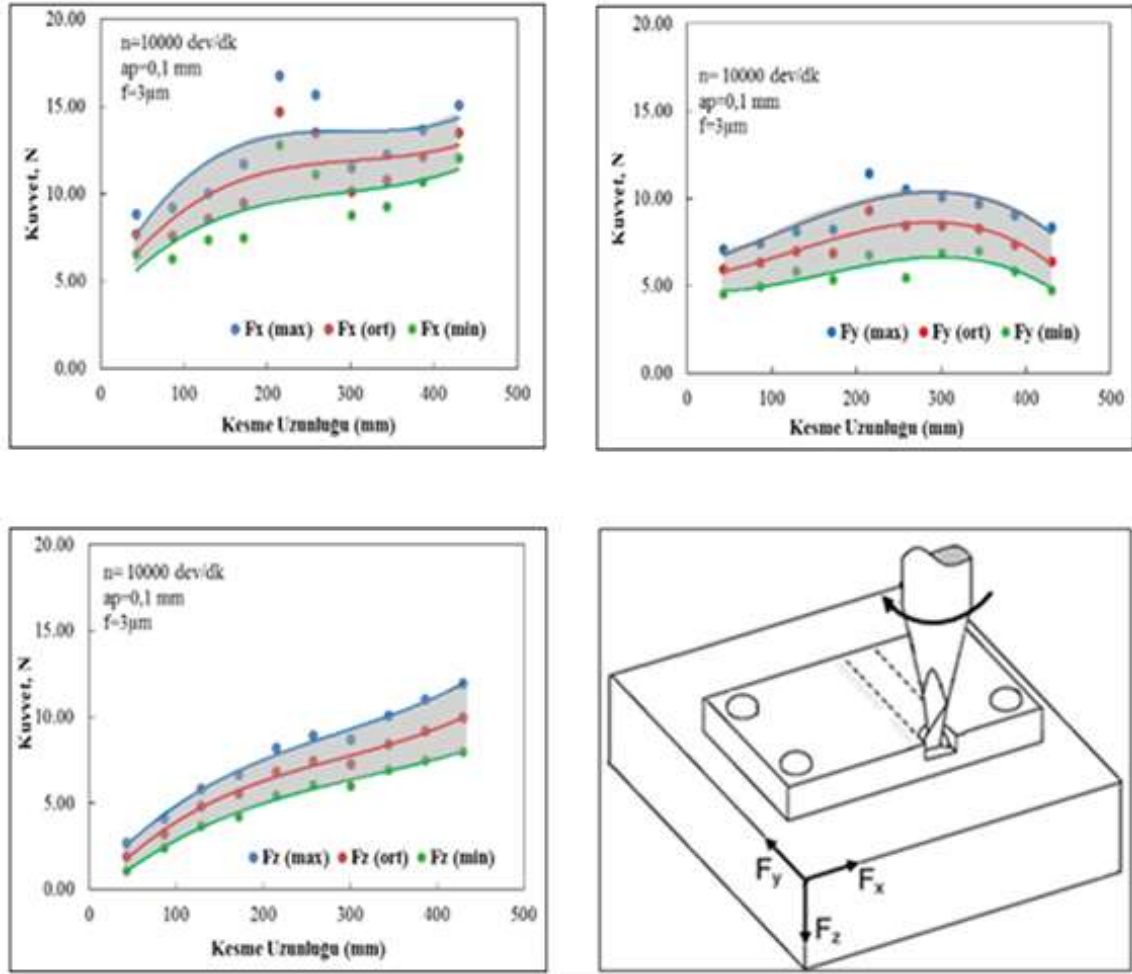
Şekil 2.23 Genel frezeleme işleminde meydana gelen kesme kuvvetleri değişimi a) Helis açısının etkisi, b) Eksenel Talaş Açısının Etkisi (Fontaine *et al.* 2007).

Mikro frezeleme işleminde takım geometrisinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini ortaya koymak adına yapılan bir çalışmada, iki ağızlı helisel, üçgen ve yarım daire şeklindeki ağza sahip düz gövdeli kesici takımlar kullanılmıştır. Farklı ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerinin değişimi üzerine yapılan çalışmada; üçgen ağza sahip kesici takımdaki kesme kuvvetlerinin diğer kesici takım geometrisine sahip kesici takımlardaki kesme kuvvetlerinden daha fazla arttığı tespit edilmiştir. Üçgen ağızlı düz gövdeli kesici takımdaki kenar kırılmaları kesme kuvvetlerini artırmıştır (Fang *et al.* 2003), (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 Mikro frezeleme işleminde farklı takım geometrilerinin ilerleme hızlarına bağlı olarak kesme kuvveti değişimine etkisi(Fang *et al.*2003).

Abrasiv aşınma, kesme uzunluğunun artmasıyla birlikte kenar radüsünün artmasına sebep olur. Kenar radüsünün artışı da kesici takımın negatif talaş açısı etkisi gösterip iş parçasına dalmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, kesici takımın kesilen yüzeyi kayma mekanizması yerine kazıma mekanizması şeklinde işlemesine neden olur. Tüm bu unsurların bir araya gelmesiyle birlikte kesme kuvvetleri de artmaktadır. Ayrıca abrasif aşınma etkisiyle kesici takımdaki eksenel ve radyal boşluk açıları azalarak takım-iş parçası arası temas yüzeyinin artması sonucu F_z kuvvetlerinin de arttığı belirtilmiştir (Aslantaş *et al.* 2016a), (Şekil 2.25). Ayrıca F_z kuvvetinin artışının bir nedeninin de takıma yapışan talaşların sebep olduğu da belirtilmektedir (Aslantaş *et al.* 2016a).



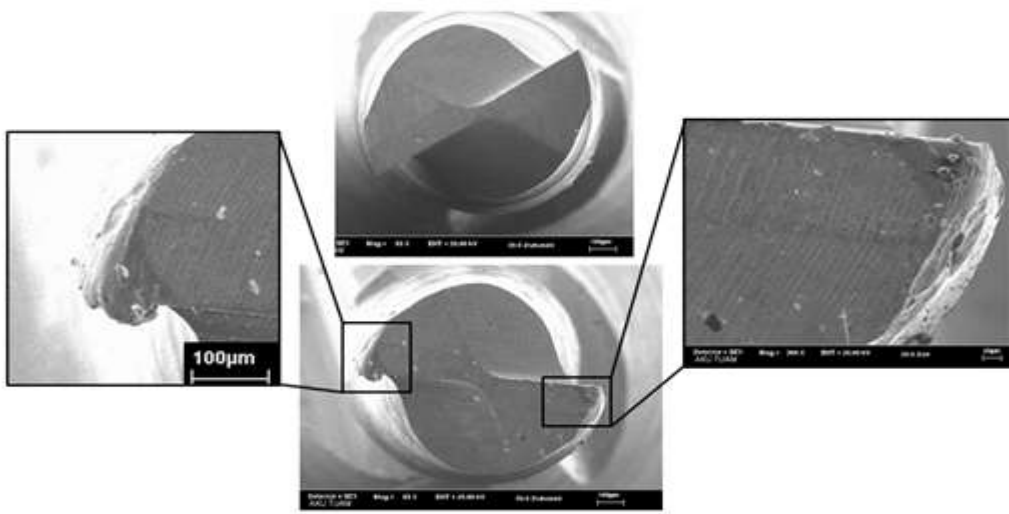
Şekil 2.25 Mikro frezeleme işleminde meydana gelen kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi (Aslantaş *et al.* 2016a).

2.6 Takım Aşınması

Genel olarak ürün imalatında kullanılan kesici takımlar, ürün kalitesini ve maliyetini direkt etkiledikleri için takım ömrü oldukça önemli bir konudur. Kesici takımların kullanım ömürlerinin uzun olması, yüksek sıcaklıklarda sertliğini ve kimyasal kararlılığını koruyarak iyi bir aşınma direnci göstermelerine bağlıdır (Ezugwu *et al.* 1999). Mikro frezeleme işleminde kesici takım ömrü, geleneksel frezeleme ve diğer imalat yöntemlerinden oldukça farklı özellikler gösterir. Mikro frezelemede kullanılan mikro kesici takımlar, ebatlarının küçük olması ve kesme sırasında yüksek kesme kuvvetlerine maruz kalması nedeniyle kolayca aşınırlar. Özellikle işlenebilirliği zor olan sert malzemelerin işlenmesinde mikro kesici takımlara gelen kesme kuvvetleri çok yüksek olacağı için kesici takım aşınmaları kaçınılmaz olur (Vogler *et al.* 2004, Fang *et al.* 2004, Filiz *et al.* 2007). Takımların sertliği de takım aşınma davranışlarına önemli ölçüde etki eder (Ucun 2013). Ayrıca mikro frezelemede kesici takım ağızları aralıklı olarak talaş kaldırdığından dolayı tekrarlı yüklemelere maruz kalırlar. Tekrarlı yüklemeler, kesici takımda şok yüklemelere neden olur bu da kesme kenarlarının daha hızlı aşınmasına ve hatta kenar kırılmalarına sebep olurlar (Li and Guan 2004). Kesici takımda meydana gelen aşınmalar talaş kaldırma işlemini ve yüzey kalitesini olumsuz etkileyeceği için mikro frezeleme işleminde takım aşınması oldukça önemli bir problemdir (Tansel *et al.* 1998, Rahman *et al.* 2001). Mikro frezeleme de genellikle en çok karşılaşılan hasar tipleri; abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve kırılmadır. (Aramcharoen and Mativenga 2008). Takımda meydana gelen bu hasar tipleri, kesici takımın geometrik özelliklerine, takım malzemesine, takım rijitliğine ve iş parçasının mekanik özelliklerine bağlıdır (Fang *et al.* 2004, Ucun 2013). Ayrıca kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme hızı, kesme kuvvetleri, kesme zamanı gibi kesme parametreleri de kesici takım aşınmasında büyük ölçüde önemli rol oynarlar.

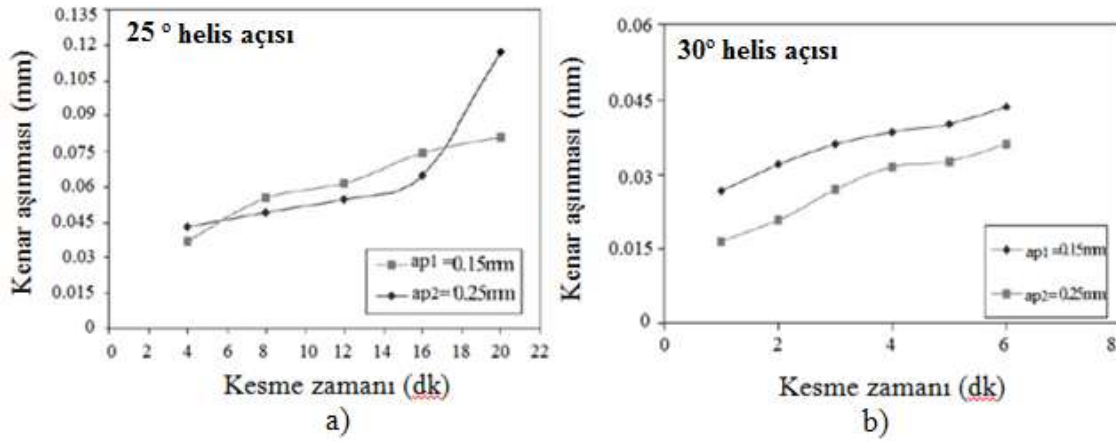
Mikro frezeleme işleminde meydana gelen aşınmanın en önemli etkisi, kesici takım çapı ve kenar radüsündeki değişimdir. Kesici takımda meydana gelen çevresel ve eksenel aşınmalar sonucunda kesici takım geometrisinde değişimler gözlenir. Takım çevresinde meydana gelen çevresel aşınma, kenar radüsünde bir artış ve takım çapında ise azalma meydana getirmektedir (Xiao *et al.* 2003, Liu *et al.* 2006, Filiz *et al.* 2007, Aslantaş *et*

al. 2016a). Çevresel aşınma, takım çapının azalıp kenar radüsünün artmasına neden olur. Çevresel aşınmanın yanı sıra takımda meydana gelen aksel aşınma, kenar radüsünün zamanla değişmesine neden olmaktadır. Özellikle çevresel aşınma sonucu kenar radüsünün artması nedeniyle talaş oluşum mekanizmasını etkileyen minimum talaş kalınlığı değerinin de değişmesine neden olacaktır. Özellikle talaş kalınlığının kesici takım kenar radüsüne oranla çok küçük olması durumunda kesici takım, negatif talaş açısı etkisi göstererek kesici takımın talaşa dalması zorlaşmakta ve kesme işleminde kararsızlıklar meydana getirmektedir (Aramcharoen and Mativenga 2008). Bu durum beraberinde kayma mekanizması yerine ovalama/kazınma mekanizmasının baskın olduğu kesme işlemine yol açmaktadır. Takım adeta iş parçasını ovalama/kazıma hareketine benzer şekilde işlemektedir. Sonuç olarak takım çapındaki azalma ve kesici takım kenar radüsündeki değişime bağlı olarak kesici takım aşınması artmaktadır (Xiao *et al.* 2003, Dutzinski *et al.* 2004, Friedrich and Kulkarni, 2004, Aslantaş *et al.* 2016a). Kesme işleminde en zayıf noktaların kesme kenarlarında olduğu ve bu bölgelerde meydana gelen aşınmanın daha hızlı gerçekleştiği belirtilmektedir (Ucun 2013). Abrasiv aşınmanın etkisiyle kesici takımdaki aksel ve radyal boşluk açılarının azalması, takım-iş parçası temas uzunluğunun artmasına dolayısıyla kesici takımın sürtünme kazıma etkisi oluşturmaya neden olacaktır. Ayrıca kesici takıma yapışan talaşın da kesme kuvvetlerinin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Aslantaş *et al.* 2016a), (Şekil 2.26).



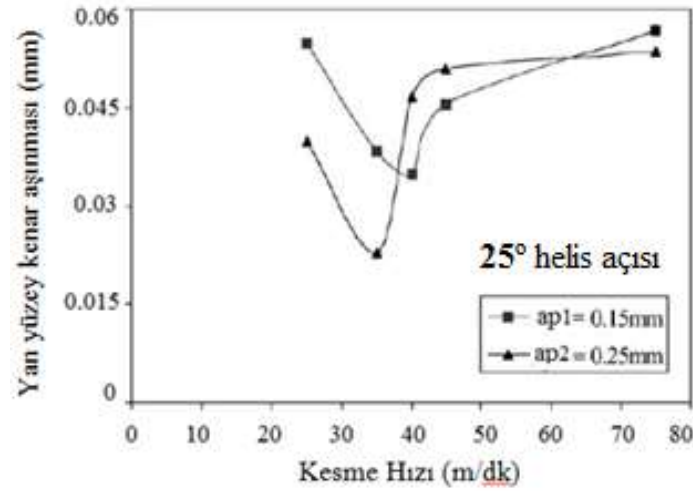
Şekil 2.26 Kesici takımda meydana gelen abrasif aşınma ve talaş yapışması (Aslantaş *et al.* 2016a)

Geleneksel frezeleme işleminde takım aşınması üzerine yapılan çalışmalar oldukça fazla olup, mikro frezeleme işleminde ise yapılan çalışmalar sınırlıdır (Chae *et al.* 2006). Saf bakırın 25° ve 30° olan iki farklı helis açısıyla 40 m/dk kesme hızı ile işlenmesinde kesme derinliğinin azalmasıyla birlikte takım aşınması da artmaktadır. Kesici takımın yan yüzey kenarlarında aşınmaların olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 25° helis açısına sahip olan kesici takımın 30° helis açısına sahip olan kesici takıma göre 3 kat daha fazla uzun ömürlü olduğu tespit edilmiştir (Rahman *et al.* 2001), (Şekil 2.27).



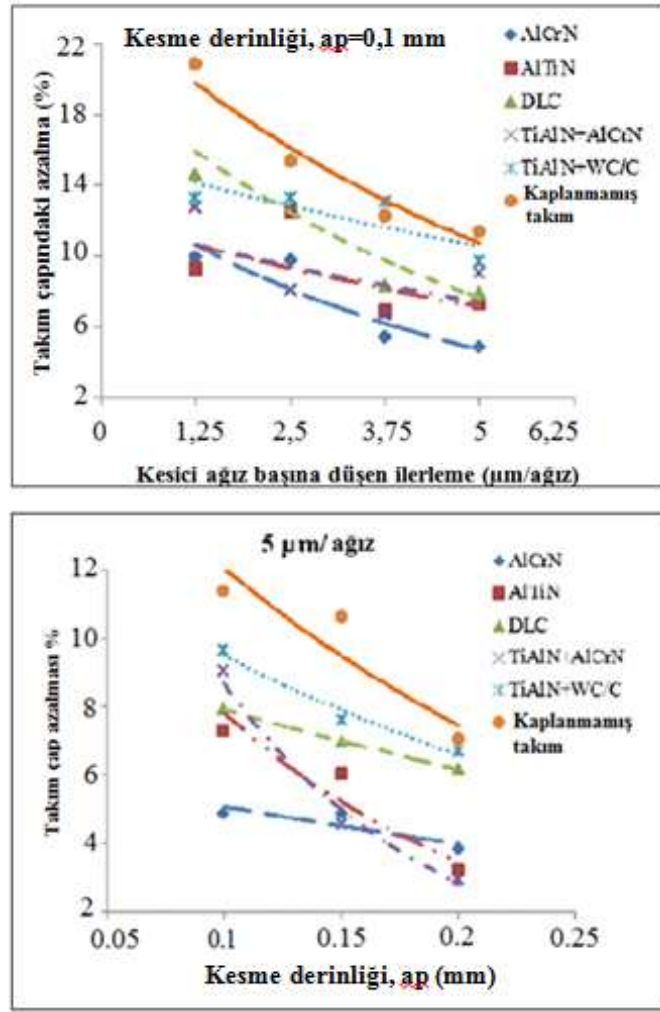
Şekil 2.27 İki farklı helis açısı ve iki farklı kesme derinliğindeki kenar aşınma değişimleri (Rahman *et al.* 2001).

Yine aynı yazar grubu tarafından yapılan çalışmada, saf bakır malzemenin 25° helis açısına sahip kesici takım kullanılarak, farklı kesme hızlarındaki takım aşınma davranışları araştırılmıştır. Bununla birlikte iki farklı talaş derinliği de dikkate alınarak talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi ortaya konmuştur (Şekil 2.28). Bu çalışmada elde edilen ilginç sonuç, 35 m/dk. da elde edilen takım aşınmasının minimum düzeyde kalmasıdır. Daha düşük ve daha yüksek kesme hızlarında takım aşınmasının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Rahman *et al.* 2001).



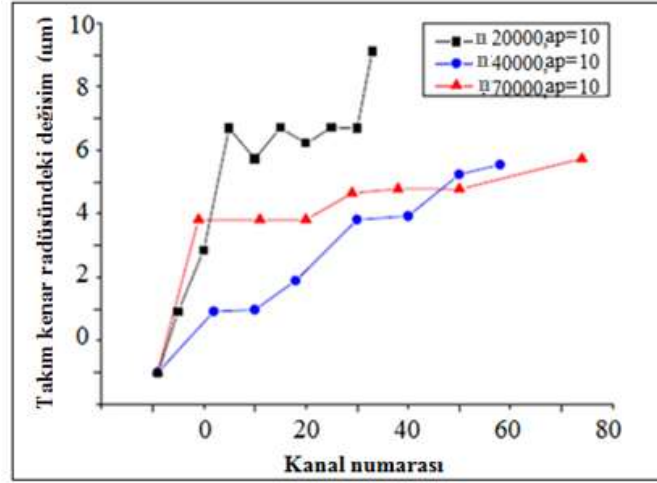
Şekil 2.28 Farklı kesme hızlarına bağlı olarak yan yüzey kenar aşınma değişimleri (Rahman *et al.* 2001).

Kesme parametreleri ve iş parçası malzemesi kadar mikro takıma uygulanan kaplama da takım aşınmasını etkilemektedir. Kullanılan kaplama malzemesinin takım çapındaki değişimi üzerindeki etkisi üzerine yapılan bir çalışma da beş farklı kaplama malzemesi kullanılmıştır (Ucun 2013). Çalışmada aynı zamanda farklı diş başına düşen ilerleme değerleri Şekil 2.29’da dikkate alınmak suretiyle kritik talaş kalınlığının takım aşınması üzerindeki etkisi elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, azalan diş başına düşen ilerleme değeri ve kesme derinliği takım aşınmasını arttırmaktadır (Şekil 2.29). Özellikle de diş başına düşen ilerleme değerinin azalmasıyla, takım çapı %20 leri aşan bir değişime uğramaktadır. Bu değişim, kullanılan kaplama malzemesi ile yarı yarıya kadar azaltılmıştır.



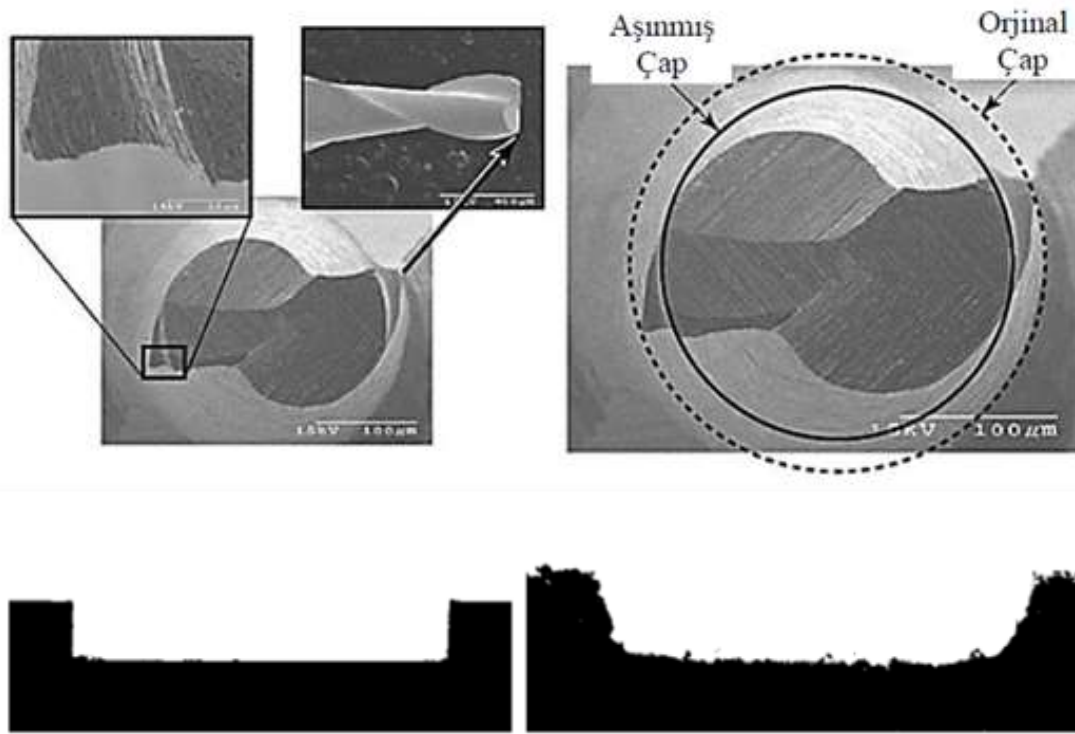
Şekil 2.29 Kesici ağız başına düşen ilerleme miktarının ve kaplama faktörünün kesici takım çapındaki değişimine olan etkisi (Ucun 2013).

Aynı talaş derinliğinin ve farklı devir sayılarının dikkate alındığı bir çalışmada da takımın kenar radüsündeki değişim araştırılmıştır (Li *et al.* 2008). Artan kesme uzunluğuna bağlı olarak tüm devir sayılarında da kenar radüsü artmaktadır. Bununla birlikte, en düşük devir sayısında ($n=20000$ dev/dk.) takım kenar radüsündeki değişim maksimum olduğu sonucuna varılmıştır. İlginç olan diğer bir sonuç ise, kenar radüsündeki değişimin minimum olduğu bir devir aralığının olmasıdır (Şekil 2.30).



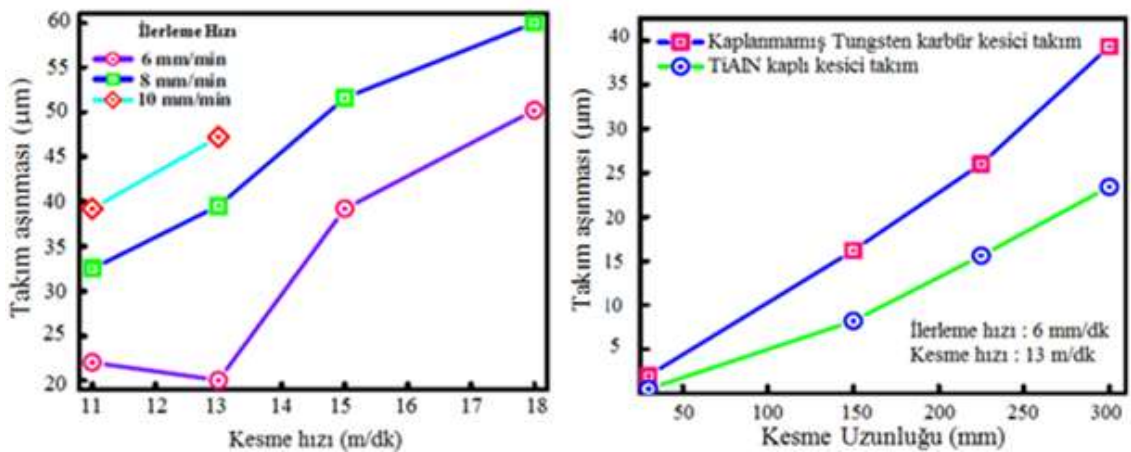
Şekil 2.30 Mikro frezeleme sürecindeki takım kenar radüsünün değişimi (Li *et al.* 2008).

Mikro frezeleme işleminde yüksek kesme hızları, işleme sırasında kesici takım ile iş parçası arasındaki sert partiküllerin birbirine sürtünmesi sonucu kesici takımda abrasif aşınmalar meydana getirmektedir (Swain *et al.* 2016). Abrasif aşınma sonucu kesici takım kenar radüsünde değişim başlayarak yan yüzeylerde aşınmalar meydana gelir. Abrasif aşınma mekanizmasının artışı iş parçasının hem geometrik boyutu hem de yüzey kalitesinin bozulmasına sebep olur (Ucun 2013). Ayrıca yüksek kesme hızlarından dolayı oluşan yüksek sıcaklığın etkisiyle de iş parçası ve kesici takımda talaş yapışması meydana gelmektedir (Ulutan and Özel 2011). Takım aşınmaları nedeniyle imalatı gerçekleştirilen ürünlerin hem boyutsal hem de geometrik olarak hassasiyetlerinin kaybetmesine neden olmaktadır (Aramcharoen *et al.* 2008, Li *et al.* 2008, Li 2009), (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 Takım aşınmasına bağlı olarak kesici takım çapındaki değişim (Filiz *et al.* 2007), kesici takım aşınmasına bağlı olarak kanal geometrisinin değişimi (Li, 2009).

Bu aşınmaları azaltmak için farklı kesme ve ilerleme hızları kullanılmaktadır. Yüksek ilerleme hızlarında meydana gelen yan yüzey takım aşınması yüksek kesme hızlarında meydana gelen takım aşınmasından daha azdır (Swain *et al.* 2016), (Şekil 2.32).



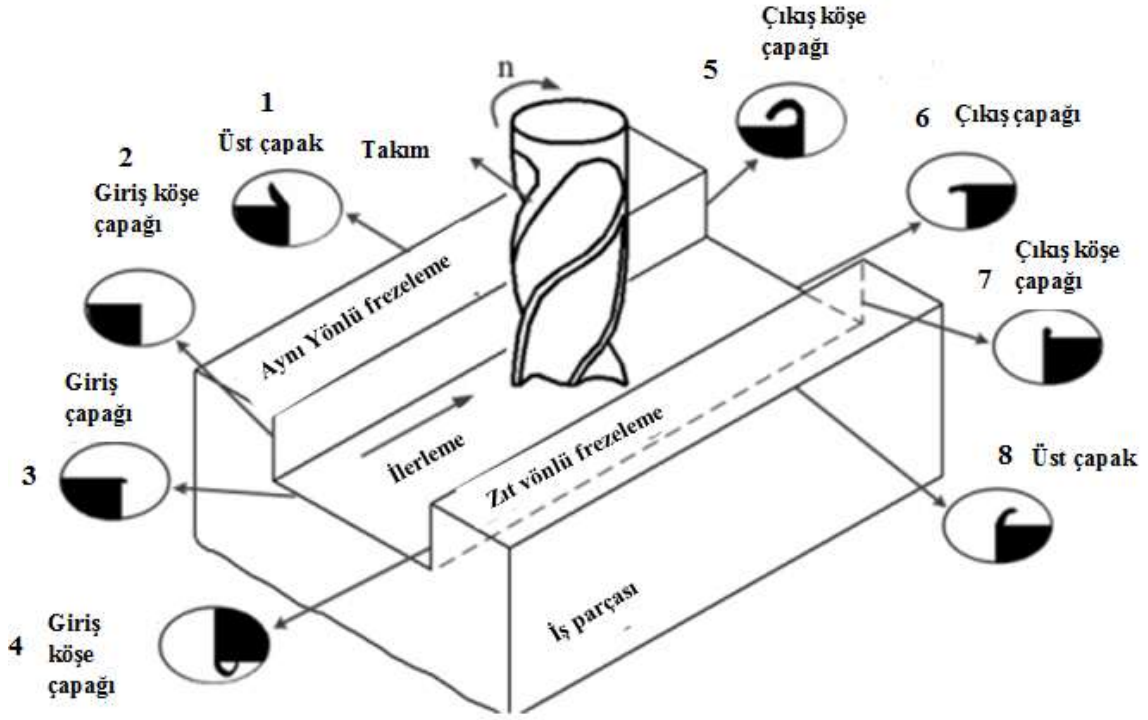
Şekil 2.32 Farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak takım aşınma değişimi ve kaplamanın takım aşınma değişimine etkisi (Swain *et al.* 2016).

Hem kaplamanın hem de kesme parametrelerinin takım aşınması üzerindeki etkisine yönelik bir çalışma da Swain vd. (2016) tarafından yapılmıştır. Şekil 2.30 da verilen ve Li vd. (2008)'nin elde ettiği sonuçların aksine artan kesme hızına bağlı olarak takım aşınması artmaktadır (Şekil 2.32). Bununla birlikte artan ilerleme değeri de takım aşınmasının artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte TiAlN kaplı mikro kesici takımın takım ömrünün kaplanmamış takıma nazaran daha uzun ömürlü olduğu da çalışmada elde edilen diğer bir sonuçtur (Swain *et al.* 2016).

2.7 Mikro Frezelemede Çapak Oluşumu

Talaşlı imalat sonrasında oluşan çapak oluşumu, ilave proseslerle temizliğinin yapılması ve yüksek maliyetler içermesi bakımından istenmeyen bir durumdur. Geleneksel frezelemede imalat sonrası oluşan çapaklar, son paso alma veya lebleme ile temizlenir. Mikro frezelemedeki çapaklar, geleneksel frezeleme ile karşılaştırıldığında boyutları daha küçük olmasına rağmen çapak temizliği geleneksel frezeleme işleminden daha zor olmaktadır (Venkatesh *et al.* 2016, Lee and Dornfeld, 2005, Chae *et al.* 2006, Filiz *et al.* 2007). Dolayısıyla mikro frezeleme işleminde çapak oluşumunda oldukça dikkatli olmak ve çapak oluşumunu en az seviyeye indirmek gereklidir (Lee and Dornfeld, 2005). Bunun için de özellikle takım aşınmasını tetikleyici faktörlerin ve artık gerilmelerin önlenmeye çalışılması gerekir (Venkatesh *et al.* 2016). Bunun üzerine çapak oluşumu ve çapak oluşumunu önleyici faktörler üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

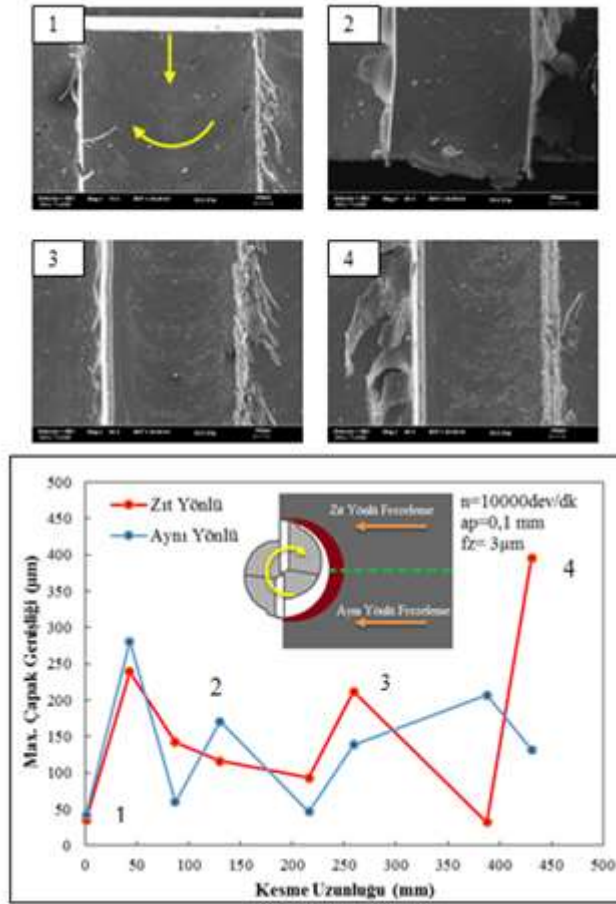
Mikro frezeleme işleminde çapağın şekli ve boyutu, kesme yönüne, takımın giriş ve çıkış noktalarına bağlı olarak değişebilmektedir. Genellikle takımda meydana gelen aşınmaya bağlı olarak çapak boyutu ve şekli değişkenlik gösterse de en çok çapak genişliği ve yüksekliği çalışmalarda dikkate alınmıştır. Çapak yükseklik ve genişliği ise işlenen kanal kenarında meydana gelen bir çapak şekillenmesidir. Bunun dışında kanalın giriş ve çıkış noktalarında da çapak oluşumu meydana gelebilmektedir (Şekil 2.33). Özellikle de takımın çıkış noktasında meydana gelen çapak boyutlarının daha büyük olduğu ifade edilmektedir.



Şekil 2.33 Mikro frezeleme işleminde karşılaşılan çapak tipleri (Kou *et al.* 2015).

Genellikle mikro frezeleme ile ilgili yapılan çalışmalarda takımda meydana gelen çevresel aşınma dikkate alınmış ve bu aşınmanın sonucunda kenar radüsündeki değişimin sonuçları araştırılmıştır. Oysaki takımın sadece çevresel aşınma değil aynı zamanda aksel aşınma da meydana gelir. Özellikle kesme işleminin başlangıcında pozitif olan talaş açısı, kenar radüsündeki büyümeyle birlikte negatif bir görünüm kazanmaktadır. Bunun sonucu olarak da kesme işlemi sırasında çapak oluşumu gibi istenmeyen durumlarla karşılaşılabilir (Schaller *et al.* 1999, Fang *et al.* 2004). Mikro frezelemede devir sayısının çok yüksek olması takım aşınma hızını da olumsuz etkilemektedir. Özellikle artan kesme mesafesiyle takım aşınması da artmakta ve bu da çapak oluşumunu beraberinde getirmektedir. Abrasif aşınma sonucunda, kesici takımın kenar radüsü büyür, dolayısıyla kesme kabiliyetini yitirir. Bunun üzerine kesici takım, sağlıklı bir kesme işlemi yerine kazınma şeklinde talaş kaldırmaya çalışır. Bu durum da kesici takımın iş parçası kanal kenarlarında çapak oluşumunu artırmasına neden olmaktadır. Aslantaş vd. (2016a) tarafından yapılan bir çalışmada Inconel 718 malzemesi kullanılmış ve kesme uzunluğuna bağlı olarak ta çapak genişliğinin dalgalı bir değişim gösterdiği ifade edilmiştir (Şekil 2.34). Bunun da nedeni; takımın çevresel

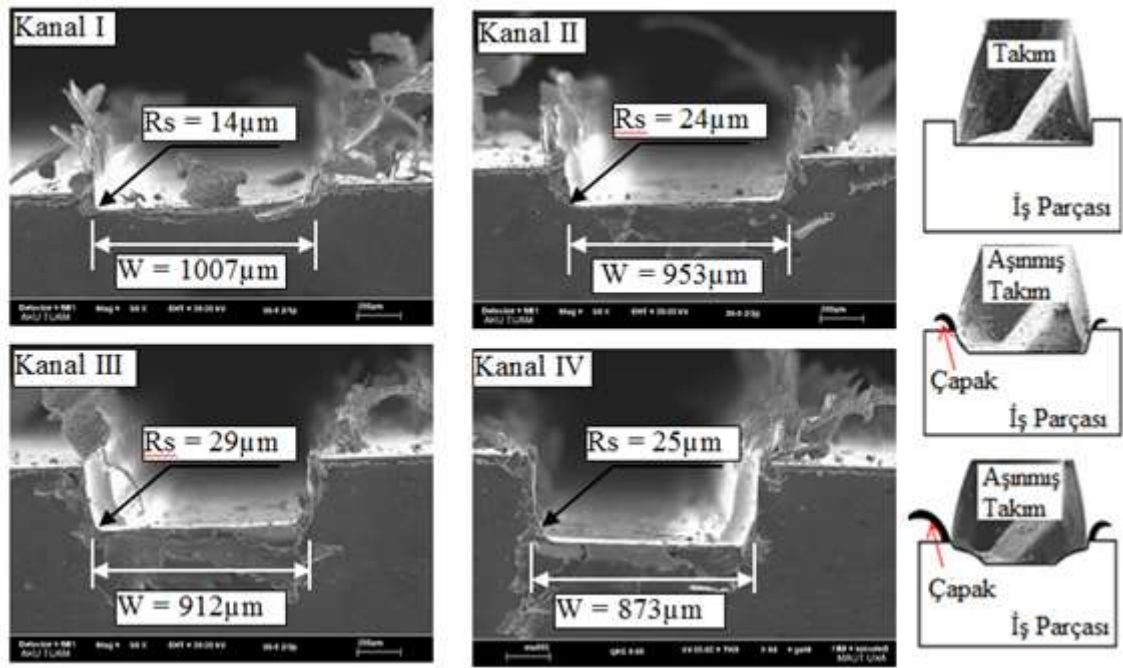
olduğu kadar aksel aşınmaya da maruz kalması şeklinde yorumlanmıştır. Aksel aşınma, takım kenar radüsünün azalmasına ve dolayısıyla çapak boyutunun da azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmada maksimum çapak boyutunun zıt yönlü frezeleme bölgesinde meydana geldiği ifade edilmiştir (Şekil 2.34).



Şekil 2.34 Çapak genişliğinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi ve her kanaldaki çapak boyutu SEM görüntüleri (Aslantaş *et al.* 2016a).

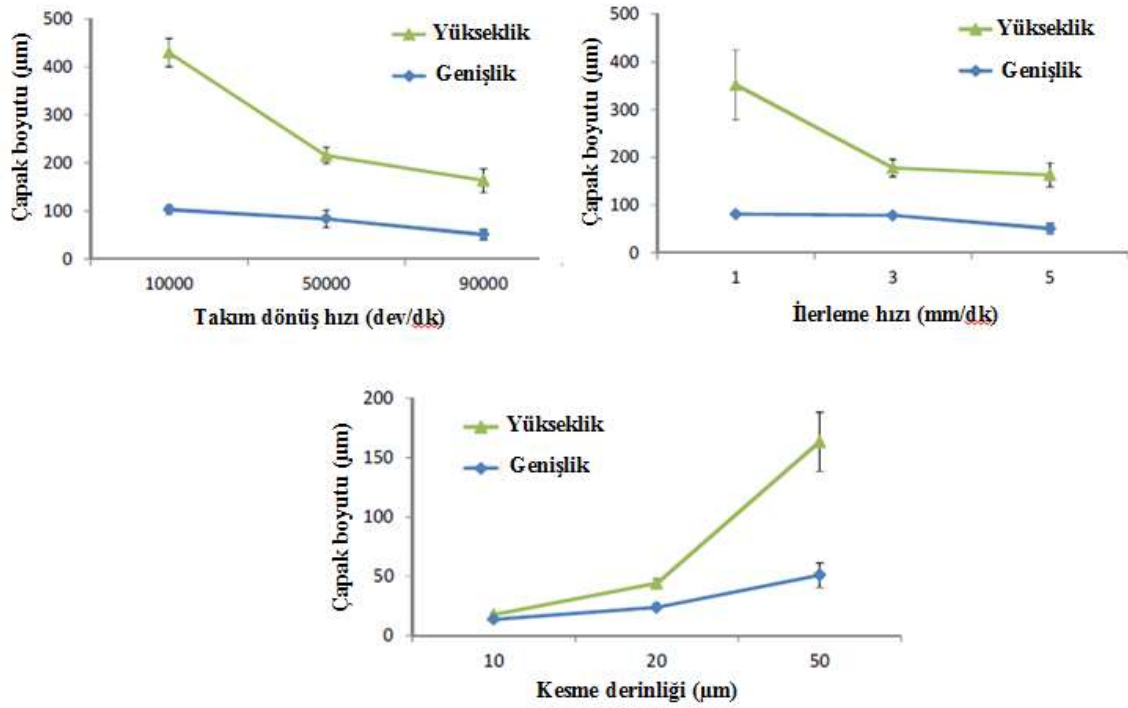
Kesme parametrelerinden olan yüksek kesme ve ilerleme hızlarının da artan takım aşınmasıyla birlikte çapak oluşumunu artırdığı tespit edilmiştir (Lee and Dornfeld 2005). Farklı sertliklere sahip malzemeler için yapılmış olan bir çalışmada sert olan malzemelerde hızlı takım aşınmasından dolayı daha fazla çapak oluşumunun meydana geldiği tespit edilmiştir (Weule *et al.* 2001). Abrasif aşınma sonucu takımın aksel ve radyal boşluk açılarının değişmesine paralel olarak kenar radüsünün artışı çapak genişliklerinin de artmasına sebep olmaktadır (Aslantaş *et al.* 2016a). Çapak genişliğinin artışı, iş parçası geometrisinin bozulmasına neden olmaktadır. Takımda meydana gelen

çevresel aşınma sonucu takım çapının azalması, işlenen kanal genişlik boyutunun da azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca kesici takım kenar radüsünün artışı işlenen kanal kenar radüslerinin de artmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.35'te Aslantaş vd. (2016a) tarafından yapılan bir çalışmada, artan kesme uzunluğuna bağlı olarak kanal radüsünün de arttığı gösterilmiştir. Fakat belirli bir kesme uzunluğu sonrasında eksenel aşınmanın etkisiyle takım kenar radüsündeki azalma, kanal radüsünün de azalmasına neden olmuştur (Aslantaş *et al.* 2016a).



Şekil 2.35 Takım aşınmasının çapak oluşumuna ve işlenen kanal geometri değişimine etkisi (Aslantaş *et al.* 2016a).

Kesme parametrelerinin çapak oluşumu üzerindeki etkisini ortaya koymak adına Bajpai vd (2013) tarafından bir çalışmada, artan devir sayısının ve ilerleme değerinin çapak boyutunda azalmaya neden olduğu ifade edilmiştir. Buna karşın, artan talaş derinliği de çapak boyutunu arttırmaktadır (Şekil 2.36). Çalışmada Ti6Al4V malzemesi kullanılmış olup, bazı kesme koşullarında maksimum çapak aynı yönlü frezeleme yönünde bazı koşullarda da zıt yönlü frezeleme yönünde gerçekleşmiştir. Şekil 2.36'da görüldüğü üzere çapak yükseklikleri çapak genişliklerinden daima daha büyük olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.36 Kesme parametrelerinin çapak yüksekliği ve çapak genişliği üzerindeki etkisi (Bajpai *et al.* 2013).

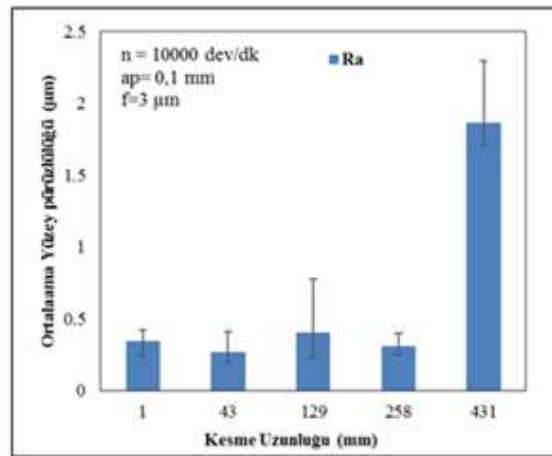
2.8 Mikro Frezeleme İşleminde Yüzey Pürüzlülüğü

Mikro frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğü, mikro parçaların mekanizma içinde hassas ve sorunsuz bir şekilde çalışması açısından oldukça büyük bir önem taşımaktadır. Geleneksel frezeleme işleminde iş parçasının yüzey kalitesi, ek işlemlerle çapak oluşumundaki gibi kolaylıkla iyileştiriliyorken, mikro frezeleme işleminde ise ek işlemlerle yüzey kalitesi iyileştirilemeyebilir. Bunun sebebi de hem iş parçasının hem de takım boyutlarının küçük boyutta olması ve ek işlem sonrası iş parçasının geometrik yapı yüzey kalitesi hassaslığını kaybetmesi riski taşınmasıdır. Bu yüzden mikro frezeleme süreç optimizasyonlarının çok iyi belirlenmesi ve ortalama yüzey pürüzlülük değerinin seçilerek ürün kalitesinden maksimum verim almak hedeflenmiştir.

Yapılan araştırmalarda takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediği ileri sürülmüştür (Babin *et al.* 1986). Bununla birlikte kesme parametreleri de (özellikle de diş başına düşen ilerleme) yüzey kalitesini etkilemektedir.

Yapılan bir çalışmada kesici ağız başına düşen ilerleme miktarının kesici takım kenar radüsünden küçük olduğu durumlarda yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden faktörün minimum talaş kalınlığı olduğu tespit edilmiştir (Yuan *et al.* 1996, Vogler *et al.* 2004, Aramcharoen and Mativenga 2008). Saf bakırın mikro frezelenmesi işleminde kesme derinliğinin artışıyla takım aşınmasının azaltılarak yüzey kalitesine olumlu yönde etki edeceği belirtilir (Rahman *et al.* 2001).

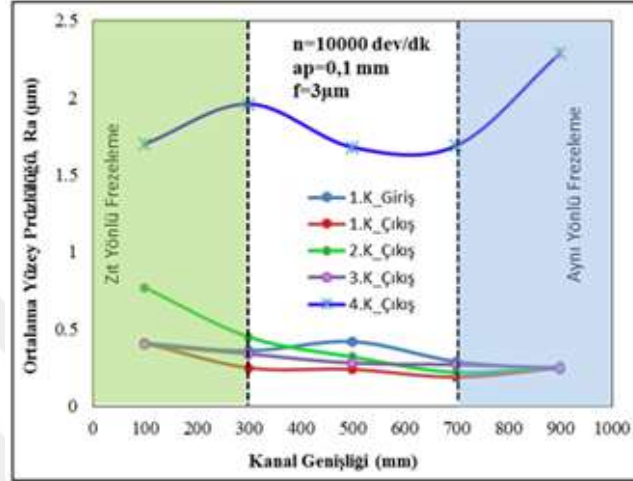
Mikro frezelemede takımda meydana gelen aşınma çok küçük boyutlarda olsa da işlenen parçanın yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Sağlıksız bir kesme işleminde kazınma mekanizması etkisiyle iş parçası yüzeyinde talaş yapışmaları görülmesi işlenen yüzeyi pürüzlü yapar. Kesme uzunluğunun artmasıyla takım aşınmasının artışıyla ilgili olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır (Aslantas *et al.* 2016a), (Şekil 2.37).



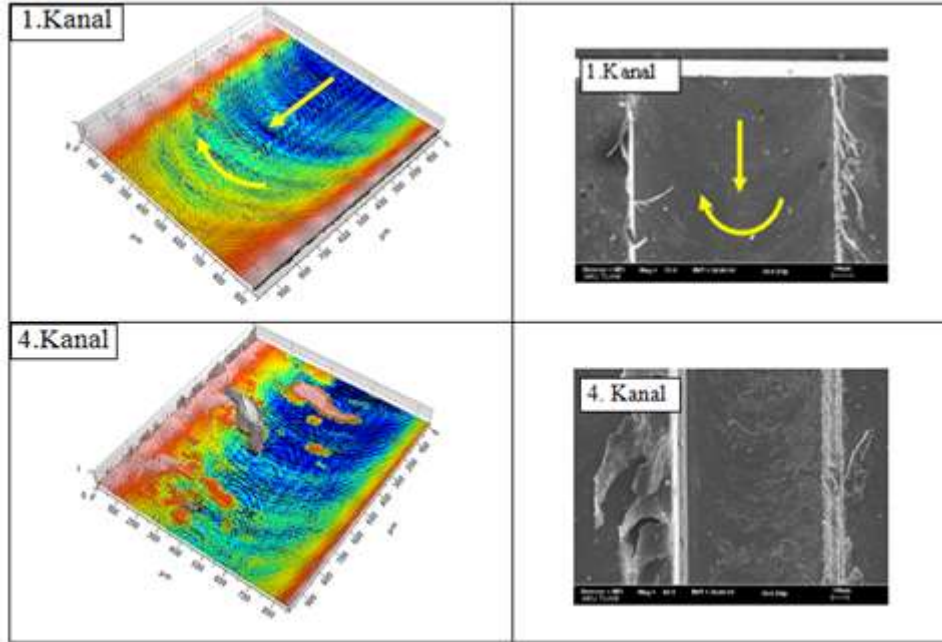
Şekil 2.37 Kesme uzunluğu boyunca ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi (Aslantas *et al.* 2016a).

Ayrıca kesme uzunluğuna bağlı olarak takımda meydana gelen aşınma minimum düzeyde olduğunda ortalama yüzey pürüzlülüğünün daha düşük ve yüzeyin daha kaliteli olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.38, 2.39). Takımda meydana gelen çevresel aşınma kenar radüsünü artırıp yüzey pürüzlülüğünün de artışına sebep olurken, eksenel aşınma ise kenar radüsünün azalmasına ve daha kaliteli bir yüzeyin elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişkenlik göstermesinin nedenin de çevresel ve eksenel aşınmalardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca ortalama yüzey

pürüzlülüğünün frezeleme kesme yönüne göre artış göstermesinin yine (son işlenilen 4. kanalın çıkış noktasındaki ortalama yüzey pürüzlülüğünün zıt yönlü frezeleme bölgesini bırakıp aynı yönlü frezeleme bölgesinde artış göstermesi) takım aşınmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Aslantaş *et al.* 2016a).

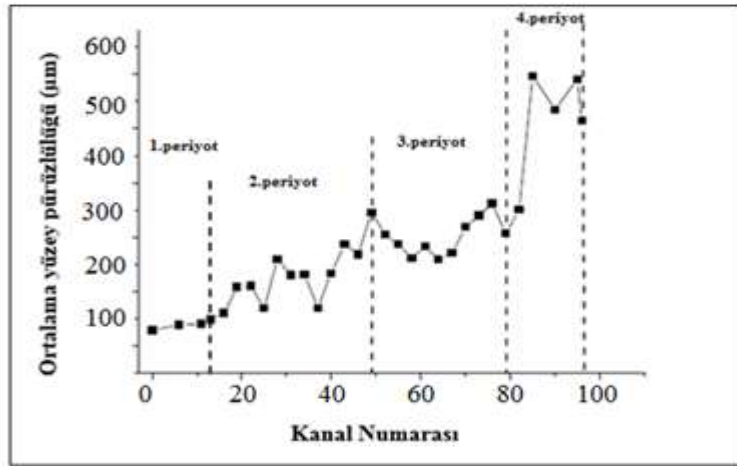


Şekil 2.38 Kanal genişliği boyunca aynı ve zıt yönlü frezeleme bölgesine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi (Aslantaş *et al.* 2016a).



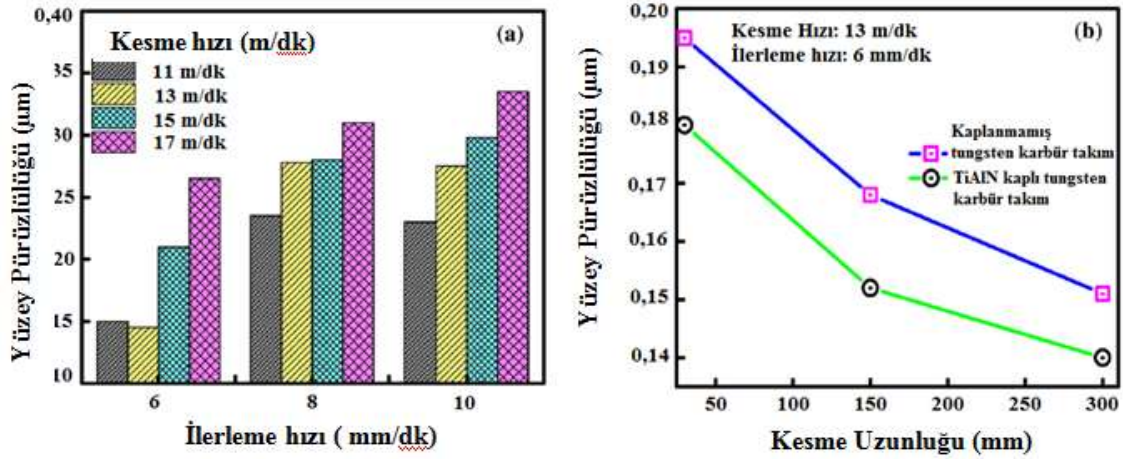
Şekil 2.39 Kesme uzunluğuna bağlı olarak yüzey kalitesi topografya ve SEM görüntüleri (Aslantaş *et al.* 2016a).

Yine yüzey pürüzlülüğünün takım aşınmasına bağlı bir süreç eğiliminden geçtiği tespit edilmiştir (Li *et al.* 2008). Li ve arkadaşları tarafından yüzey pürüzlülükleri 4 ayrı periyotta incelenmiştir. İlk periyot, ikinci ve özellikle dördüncü periyotta ortalama yüzey pürüzlülüğünün dikkat çekici bir şekilde arttığı fakat üçüncü periyot da kesici takımın kararlı bir yapıya dönüştüğü varsayılarak ortalama yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir artış gözlenmediği belirtilmiştir (Şekil 2.40).



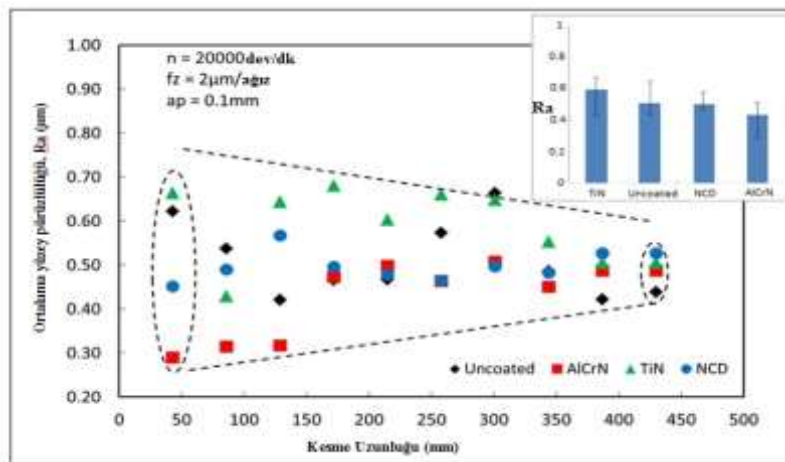
Şekil 2.40 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün takım aşınma sürecine bağlı olarak değişimi (Li *et al.* 2008).

Bilindiği üzere geleneksel frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen unsurlar üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Mikro frezeleme işleminde ise ortalama yüzey pürüzlülüğü geleneksel frezelemede olduğu gibi her zaman lineer bir ilişki sergileyemeyebilir. Şekil 2.41'de kesme hızı ve ilerleme değerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi verilmiştir (Swain *et al.* 2016). Ayrıca kaplanmış ve kaplanmamış takımın da ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri üzerindeki etkisi de ortaya konmuştur. Şekil 2.41'den de görüldüğü üzere artan kesme hızı Ra değerlerinin artmasına neden olurken, ilerleme değerindeki artış ta yüzey kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca kesme uzunluğuna bağlı olarak Ra değerleri azalma göstermiş olup kaplanmış olan kesici takım ile yapılan kesme işleminde yüzey kalitesinin daha iyi olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 2.41 a) Kesme hızı ve ilerleme hızlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değişimi, b) Kesici takım üzerine yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü değişimine etkisi (Swain *et al.* 2016).

Hem kaplama türüne hem de kesme mesafesine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi Aslantaş vd. (2016b) tarafından araştırılmıştır. Artan kesme mesafesiyle birlikte Ra değerleri dalgalı bir değişim sergilemektedir (Şekil 2.42). İlk kanal sonunda kaplamasız ve TiN kaplı kesici takımda elde edilen Ra değerleri maksimumdur. Fakat ikinci kanal sonunda elde edilen Ra değerleri daha küçüktür. Artan kesme mesafesi ile Ra değerleri tekrar artmıştır. AlCrN ve NCD kaplı kesici takımlar farklı bir davranış sergilemektedir. 4. kanal sonunda elde edilen Ra değeri 10'ncü kanal sonuna kadar sabit kaldığı ifade edilmiştir.



Şekil 2.42 Kesme mesafesine ve kaplama türüne bağlı olarak Ra değişimi (Aslantaş *et al.* 2016b).

3. MATERYAL ve METOD

3.1 İş Parçası Malzemesi ve Kesici Takım

Yapılan çalışmada, endüstrinin çeşitli alanlarında (havacılık, uzay ve bilişim vs.) kullanılan işlenmesi zor ve ısıl direnci yüksek nikel esaslı süper alaşım olan Inconel 718'in mikro şartlarda işlenebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla kuru frezeleme şartlarında farklı takım geometrilerinin (helis açısı, eksenel talaş açısı ve ağız sayısı) kombinasyonları oluşturularak sabit kesme parametrelerinde (talaş derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızı), mikro frezeleme işlemi yapılmıştır. Bu kapsamda üstün mekanik özellikleriyle dikkat çeken Inconel 718 nikel alaşımı, iş parçası malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve bazı mekanik özellikleri Çizelge 3.1 ve 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Inconel 718 Nikel alaşımının kimyasal kompozisyonu (%), (İnt. Kyn. 12).

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Fe	Al	Co	C	Mn	Si	Cu
50	17	4,75	2,8	0,65	17	0,2	1	0,08	0,35	0,35	0,3
55	21	5,5	3,3	1,15		0,8					

Çizelge 3.2 Inconel 718 Nikel alaşımına ait bazı mekanik özellikler (%), (İnt. Kyn. 12).

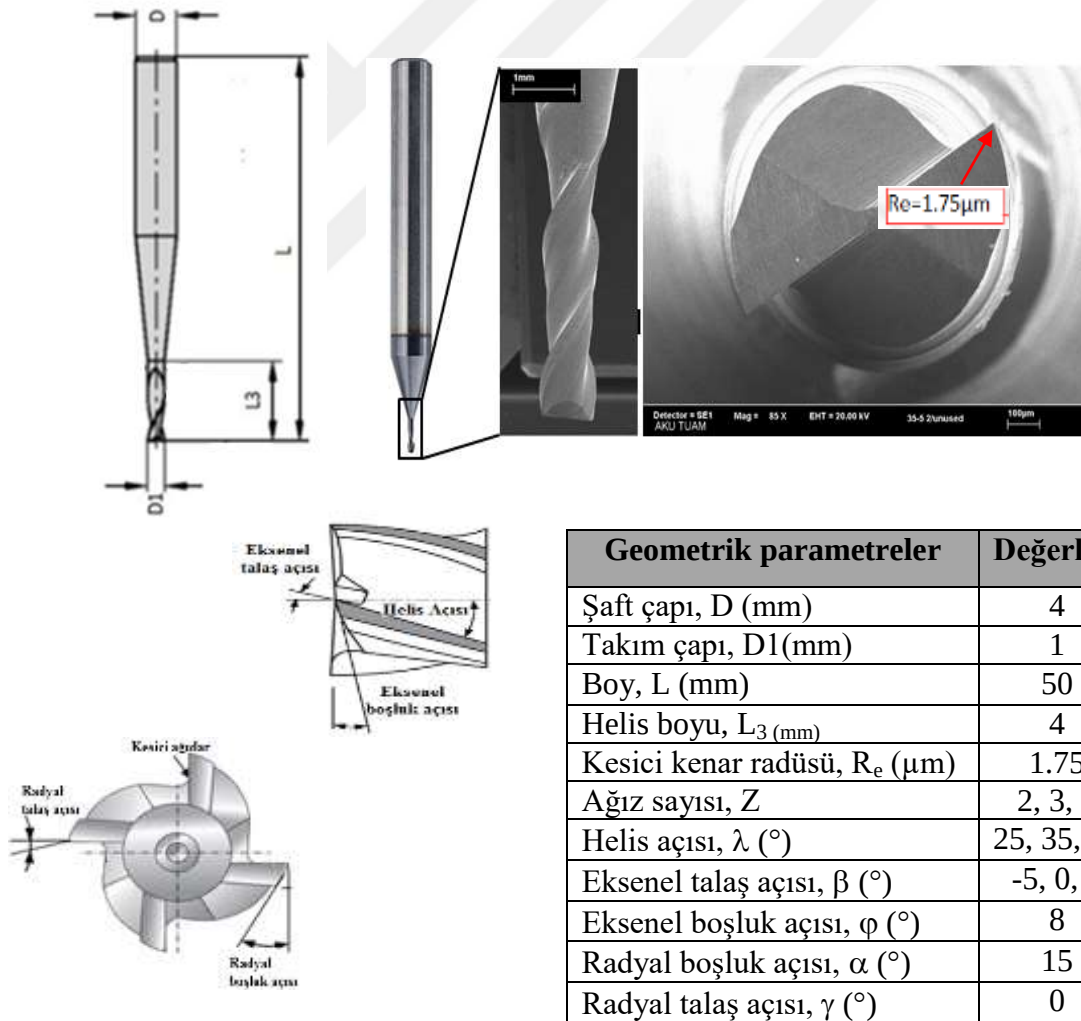
Sertlik (HRc)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama %	Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (g/cm ³)
46	1344	1137	21	11,4	8,22

Bununla birlikte, kesme deneylerinde 1 mm. çapa sahip iki, üç, dört ağızlı, farklı helis (25°, 35°, 45°) ve eksenel talaş açılarında (-5°, 0°, 5°) kesici takımlar kullanılmıştır. Maraton Hole firmasından tedarik edilen kesici takımlar, %90 WC ve %10 Co bileşiminden oluşup kaplamasızdır. Kullanılan takımlar, oldukça ince bir kesite sahip olmasından dolayı, kesme sırasında kesici uca etki eden kesme kuvvetlerinin, takımda eğilmeye ve ani kırılmalara neden olabileceği düşünülerek K10-K20 kalitesinde yüksek eğilme dayanımına sahip ultra ince tane boyutuna sahip karbür malzemeler tercih edilmiştir. Takım için tercih edilen tungsten karbür' e ait bazı mekanik özellikler Çizelge 3.3' te görülmektedir.

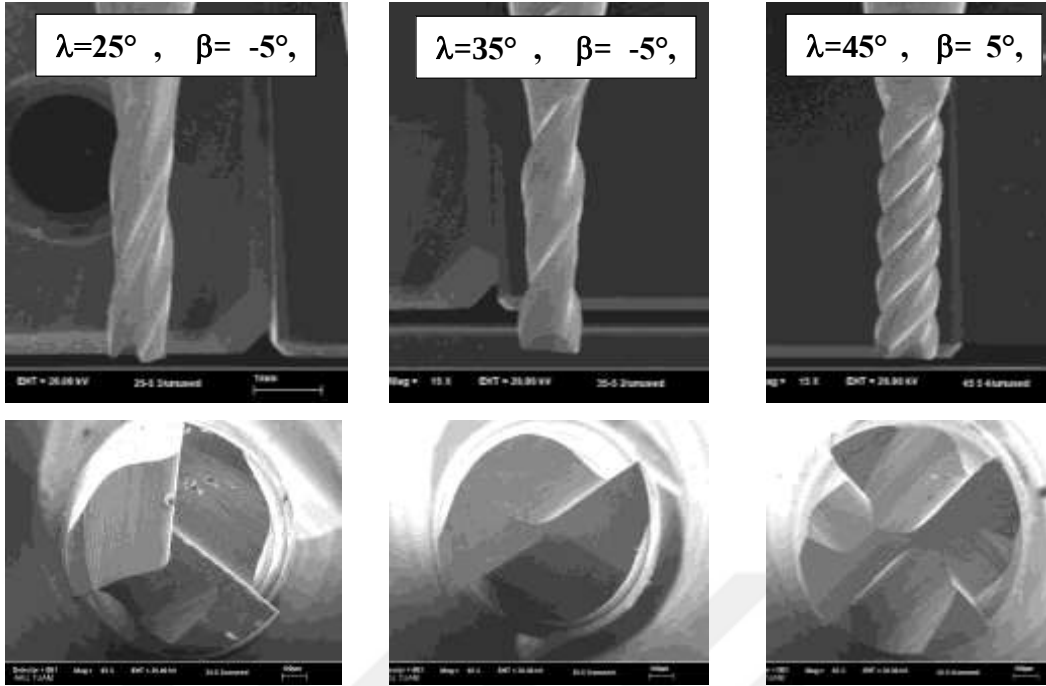
Çizelge 3.3 Kullanılan kesici takıma ait bazı mekanik özellikler (İnt. Kyn.13).

Tip	Tane Boyutu (μm)	Yoğunluk g/cm^3	Sertlik (HV_{30})	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basma Dayanımı (MPa)
K10-K20	0,2-0,5	14,1	1680	4600	6500

Mikro kesme işleminde kesici takıma ait kenar radüsü önemli bir faktördür ve kesme performansını ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkiler. Bu nedenle kesme işlemi öncesinden kesici takıma ait kenar radüsü tespit edilmiş olup bu değer ortalama $1,75 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Kesici takıma ait geometrik özellikleri ve SEM görüntüleri, Şekil 3.1 ve 3.2’ de verilmektedir.



Şekil 3.1 Mikro freze takımlarının geometrik özellikleri



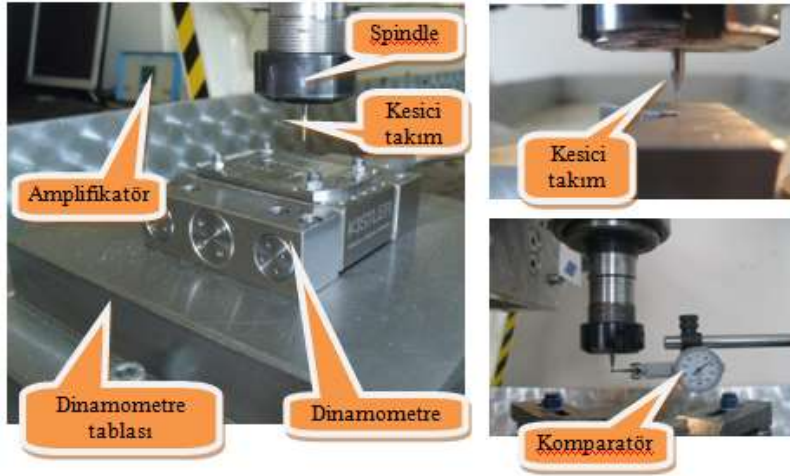
Şekil 3.2 Mikro freze takımlarının SEM görüntüleri.

3.2 Deney Düzeneği ve Kesme Parametreleri

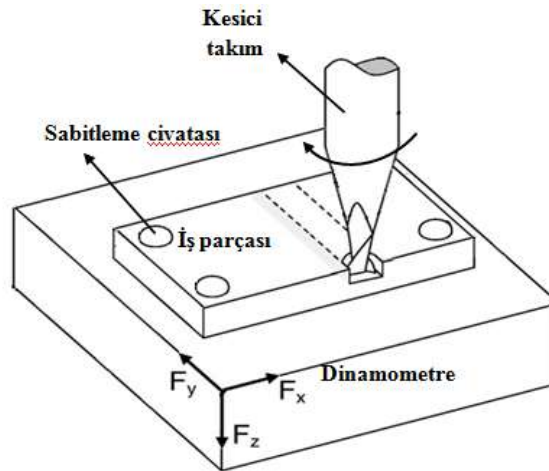
Bu çalışmada kullanılan iş parçası malzemesi, 70x43x4 mm ebatlarındadır. Deneyler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki CNC dik işleme merkezi ile gerçekleştirilmiştir. CNC tezgâh, 3 eksenli olup, 2,2 kW motor gücüne, 24000 dev/dk. iş mili hızına sahiptir. Dinamometrenin ölçtüğü kuvvet verileri dinamometre üzerinden amplifikatörde bulunan sinyal işleme kartına gönderilir Bu veriler sinyal işleme kartından bilgisayar ekranına grafiksel olarak yazdırılır (Şekil 3.3) Kullanılan deney düzeneği Resim 3.1’ de ayrıntılı olarak verilmiş olup kullanılan koordinat sistemi de Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Kesme kuvveti data alma sisteminin şematik gösterimi.



Resim 3. 1 Mikro frezeleme işleminde kullanılan deney düzeneği



Şekil 3.4 Mikro frezeleme işleminde kullanılan koordinat sistemi.

Deneyle, kuru kesme şartlarında sabit kesme parametrelerinde (talaş derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızı) gerçekleştirilmiş olup farklı takım geometrilerinin (helis, eksenel ve ağız sayıları) kombinasyonları oluşturularak İconel 718 süper alaşımının mikro frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir kesme deneyinde toplam 4 adet kanal işlenmiş olup, 1' nci kanaldan 1 paso, 2' nci kanaldan 2 paso, 3' ncü kanaldan 3 paso, 4'ncü kanaldan da 4 paso talaş kaldırma işlemi yapılmıştır. Böylece her bir kesici takım için toplam kesme uzunluğu 431 mm. olmuştur (Çizelge 3.4).

Çizelge 3. 4 Tek bir kesici takım için yapılan kesme deneyi sistematığı ve kesme parametreleri

Devir, N (dev/dk)	Ağız başına düşen ilerleme fz $\mu\text{m}/\text{diş}$	Talaş derinliği, ap (mm)	Toplam Kesme Mesafesi Lc (mm)
10000	3	0,1	 I.Kanal Lc=43 mm II.Kanal Lc=129 mm III.Kanal Lc=258 mm IV.Kanal Lc=430 mm ap=0,1 mm

Kesme parametreleri kesici takım katalog değerlerine uygun seçilmiştir. Tüm kesme şartlarının kombinasyonu ve her pasodaki talaş kaldırma işlemleri için kuvvet ölçümleri Kistler 9119AA1 tipi mini bir dinamometre ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre farklı takım geometrilerinin kesme kuvvetleri, takım aşınması, yüzey kalitesi ve çapak oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Buna ilave olarak, takım da meydana gelen aşınmanın kanal geometrisine etkisi de tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu tür bir kesme işleminin tercih edilmesindeki amaç; ardışık kesme işlemlerinde hem kesme kuvvetlerinin hem de çapak oluşumu değişiminin elde edilmek istenmesidir. Aynı zamanda farklı takım geometrilerinin kesme mesafesine göre değişen kuvvet ölçümleri, kesme kuvvetlerinin (F_x , F_y , F_z) maksimum değerleri baz alınarak tespit edilmiştir. Her kanal işlemi sonunda kesici takımda meydana gelen aşınma, optik

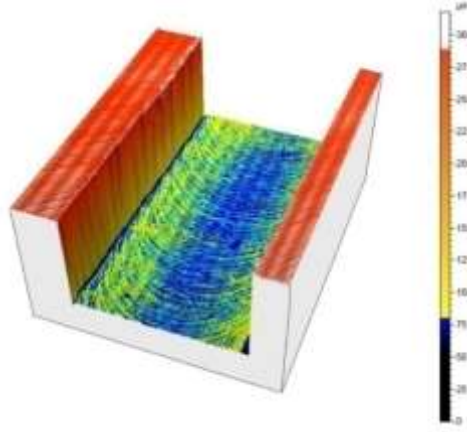
mikroskop ile ölçülmüş olup, ayrıca aşınmış olan takımlar için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işınları analizleri (EDX) gerçekleştirilmiştir. Çapak yüksekliği ölçümleri için de taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri kullanılmıştır.

3.3 İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğü Analizi

İnconel 718 alaşımının mikro frezelenmesinde farklı takım geometrisi kombinasyonlarının yüzey kalitesine etkisini araştırmak için işlenen kanallara ait ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki Nanovea 3D ST400 marka optik yüzey profilometresi kullanılarak yapılmıştır (Resim 3.2). Kullanılan profilometre nanometre hassasiyetinde, olup optik zoomu sayesinde temassız, ve üç boyutta ölçüm yapabilen bir yapıya sahiptir. Yapılan bir ölçüm sonucunda elde edilen yüzeye ait 3 boyutlu topografik görüntü Şekil 3.5’ te verilmiştir. Kesme işlemi sonrasında, her bir kanalın giriş ve çıkış noktalarında kanal genişliği, kanal derinliği ve kesme mesafesi boyunca ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



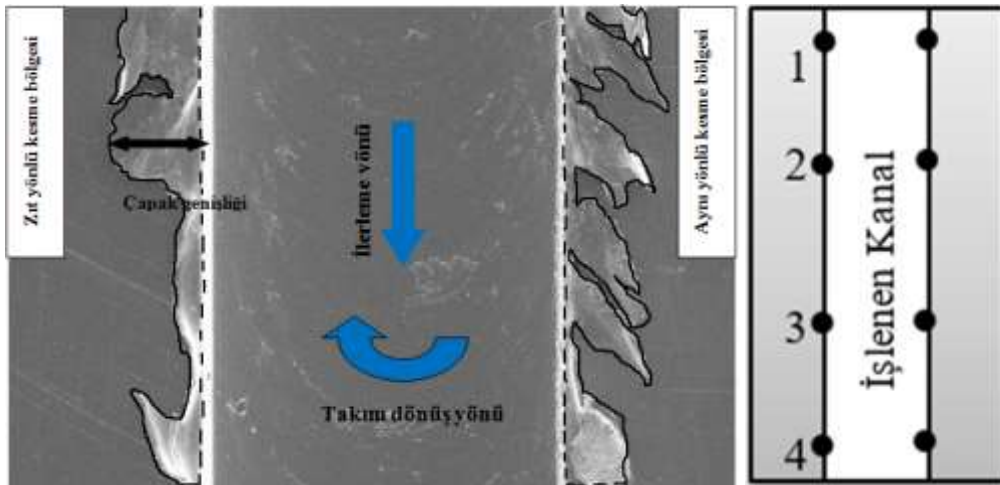
Resim 3.2 Yüzey Analizlerinde kullanılan optik profilometre.



Şekil 3.5 Yüzey profilometresinden alınan üç boyutlu yüzey şekli.

3.4 İş Parçası Çapak Oluşumu Analizi

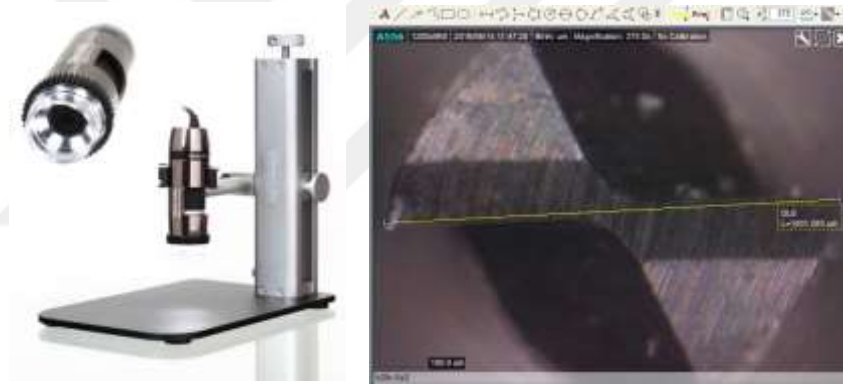
Takımda meydana gelen çevresel aşınma ve takım kenar radüsündeki değişimin hem çapak boyutu hem de kanal geometrisi üzerindeki etkilerini görmek amacıyla ölçümler, SEM fotoğrafları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Screen Caliper yazılımı kullanılarak tespit edilmiştir. Kesme uzunluğu boyunca işlenen her bir kanalın giriş ve çıkış noktalarındaki üst yüzeylerindeki dört farklı noktadan aynı ve zıt yönlü frezeleme bölgesi için tek tek çapak genişliği ölçümleri yapılmıştır. Mikro frezeleme işlemi sonucu takım aşınmalarının işlenen kanal üst yüzeylerinde meydana getirdiği çapak analizleri, kesme uzunluğu boyunca 4 farklı noktadan ölçülen ortalama çapak genişlikleri ve maksimum çapak genişliğine göre yapılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 İşlenen kanal ve kesme yönlerine bağlı olarak çapak genişliğinin ölçüm noktaları

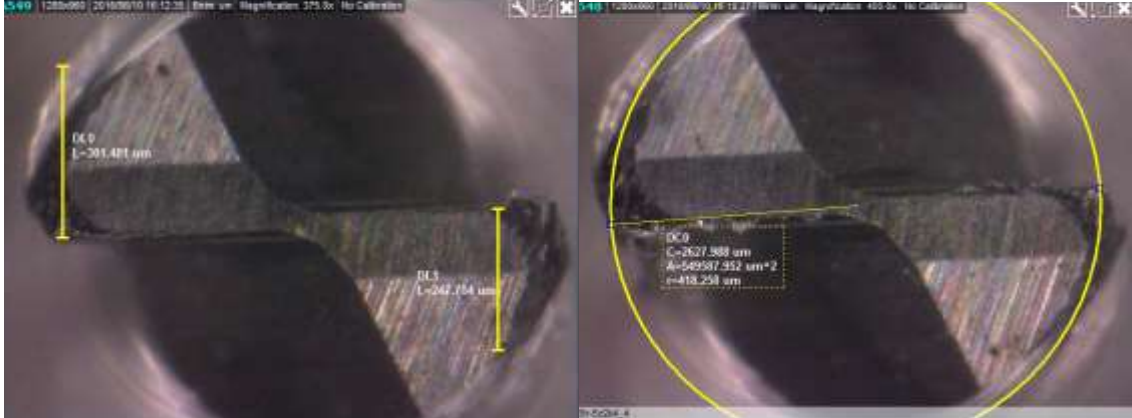
3.5 Takım Aşınmasının Ölçülmesi ve Kanal Boyutlarındaki Değişim

Mikro frezeleme işleminde kullanılan kesici takımların kenar radüsü oldukça küçük olup kesme esnasında takımda meydana gelen çevresel aşınmanın etkisiyle kesici kenar radüsü büyümekte ve bunu takiben takım çapı da azalmaktadır. Aşınma sonucu takım çaplarındaki değişim, Dino-Lite USB 2.0 marka optik dijital mikroskop ve Dino-Lite yazılımı kullanılarak ölçülmüştür (Resim 3.3). Kesici takım çap ölçümleri kesme işleminden önce ve kesme işleminden sonraki her kanal için ayrı ayrı Dino-Lite USB 2.0 optik mikroskop ile ölçülerek kesici takımdaki aşınma miktarı belirlenmiştir. (Şekil 3.7) Deney öncesinde kesici takım çapları 1 mm (1000 μ m) olarak tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada hem takım çapındaki değişim hem de kesici kenar aşınma miktarı artışı dikkate alınmıştır.



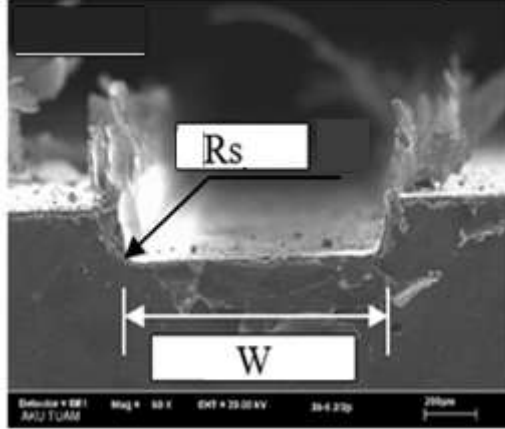
Resim 3.3 Dino Lite USB 2.0 optik mikroskop ile takım çapının ölçümü.

Kesme esnasında takımda meydana gelen hasar öncelikle kesici kenar radüsünün büyümesine yol açmaktadır. Kenar radüsünün büyümesini takım çapındaki azalma takip etmektedir. Bu nedenle, kesme deneyleri sırasında belirli aralıklarla deney durdurulmuş ve takım aşınması ölçülmüştür. Çalışmada, hem takım çapındaki değişim hem de kesici kenar aşınma miktarı artışı dikkate alınmıştır. Şekil 3.7’ de 35° helis açısına sahip kesici takımın deney sonrasındaki kenar aşınmalarının ve çap ölçümlerinin nasıl yapıldığına dair bir örnek verilmiştir. Ölçümler öncesinde büyütme ölçeği dikkate alınarak mikroskop kalibre edilmiş ve ölçümler mikron cinsinden yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin hassasiyeti ise $\pm 1\mu$ m dir.



Şekil 3.7 USB Mikroskop yardımıyla kenar aşınmasının ve çap ölçümlerinin yapılması

Mikro işlemede, kesici takımda meydana gelen aşınma ve talaşın takıma yapışması, iş parçası kanal geometrisini de doğrudan etkilemektedir. Özellikle abrasiv aşınma mekanizması sonucu takım çapında meydana gelen azalma ve kesici takım kenar radüsünün artışı aynı doğrultuda kanal geometrisinin de değişmesine neden olacaktır. Kanal genişliği ve kanal kenar radüs ölçümleri, SEM analizlerinden alınan görüntüler ile yapılmıştır (Şekil 3.8)



Şekil 3.8 Takım aşınmasının kanal geometrisi değişimi üzerindeki etkisi (Rs:Kanala ait kenar radüsü, W:Kanal genişliği).

4. BULGULAR

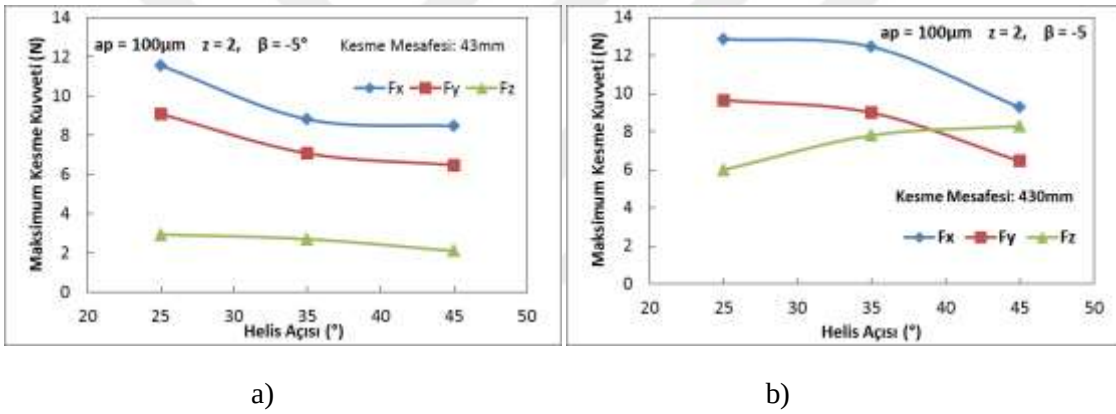
4.1 Kesme Kuvvetinin Değişimi

Kesme kuvvetini etkileyen önemli parametrelerin başında takıma ait olan geometrik özellikler gelmektedir. Kesme kuvvetine etki eden en önemli kesme parametreleri; kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğidir. Bununla birlikte ağız sayısı, helis açısı, talaş açısı, eksenel talaş açısı, kesici takıma ait olan kenar radüsü takıma ait olan geometrik parametreler arasında yer alır. Yapılan bu çalışma ile bu geometrik parametreler arasında önemli yer tutan helis açısı ve ağız sayısının x,y ve z yönlerindeki her üç kuvvet bileşeni içinde kesme kuvvetlerini nasıl etkilediği ele alınmış ve kuvvet değişimleri de tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar alt başlık halinde sırasıyla sunulmuştur.

4.1.1 Helis Açısının Etkisi

Yapılan çalışma sonucunda kesmeye ilk başlanıldığı kanal sonu itibarıyla (43 mm. lik mesafe sonrasında) F_x , F_y ve F_z olan her üç kuvvetin değişimi Şekil 4.1a' da verilmiştir. Bununla birlikte 10'ncü kanal sonunda 430 mm. lik mesafe sonrasında her üç kuvvetin değişimi de verilmektedir. Elde edilen grafikler; 25°, 35°, 45° helis açılarında, ağız sayısı, 2 ve eksenel talaş açısı da -5° olan kesici takımlar için geçerlidir. Şekil 4.1a ve Şekil 4.1b' de her iki grafikte de dikkati çeken ilk unsur, F_x kuvvetinin F_y ve F_z kuvvetinden daha büyük olduğudur. Bununla birlikte kesme kuvvetlerinin artan helis açısına bağlı olarak küçük de olsa bir azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle ilk kesme mesafesi sonrasında yani ilk kanal sonrasında (43 mm.) ve son kesme mesafesi sonrasında yani son kanal sonrasında (430 mm.) F_x ve F_y benzer bir seyir izlemektedir. Buna karşın F_z kuvveti takımda meydana gelen aşınmaya bağlı olarak artan helis açısıyla birlikte artmaktadır. Şekil 4.1a ve b' de aynı ölçekli verilen her iki grafikte de kesme kuvvetlerinin büyümesi dikkat edilecek bir diğer önemli sonuçtur. Şekil 4.1b' de 10'ncü kanal sonundaki özellikle F_y kuvvetindeki büyüme bir miktar daha öne çıkmaktadır. Fakat kesici takım kenar radüsünün ve takım çapında meydana gelen aşınmanın etkisiyle F_z kuvvetindeki artış, diğer her iki kuvvette

meydana gelen artışa nazaran oldukça büyük oranlarda gerçekleşmiştir. Burada hem 1'nci hem de 10'ncu kanal sonrasında her üç kuvvetin maksimum olarak yüzde artışı belirtilecek olursa; ilk kanal sonunda Fz kuvveti, 3 N. civarında iken 10'ncu kanal sonunda 8 N. civarına çıkmış olup Fz kuvveti yaklaşık % 63 oranında artmıştır. İlk kanal sonunda Fy kuvveti, 9 N. civarında iken 10'ncu kanal sonunda 10 N. civarına çıkmış olup Fy kuvveti % 10 oranında artmıştır. Yine ilk kanal sonunda Fx kuvveti 12 N. civarında iken 10'ncu kanal sonunda 13 N. civarına çıkmış olup Fx kuvveti de yaklaşık % 7 oranında artmıştır. Kesme mesafesine bağlı olarak Fz kuvvetindeki artışın takımdaki çevresel ve eksenel aşınmadan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca helis açısının artışı ile özellikle 35° helis açısından sonra Fx ve Fy kesme kuvvetlerinin azaldığı da dikkat çeken unsurlardandır.

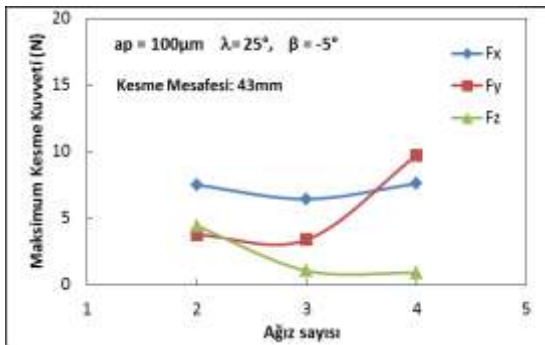


Şekil 4.1 a) Maksimum kesme kuvvetinin helis açısına ve b) Maksimum kesme kuvvetinin kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.

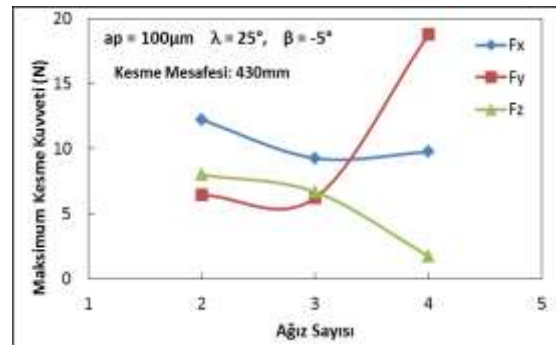
4.1.2 Ağız Sayısının Etkisi

Mikro frezeleme işlemi sonunda elde edilen kesme kuvvetlerinin ağız sayısı ile değişimi Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b' de verilmektedir. Elde edilen grafikler; 2, 3 ve 4 ağız sayılarında, helis açısı 25° ve eksenel talaş açısı da -5° olan kesici takımlar için geçerlidir. Şekil 4.2a, ilk kanalın sonunda olan kesme mesafesi 43 mm. de elde edilen kesme kuvveti değerlerini ifade etmektedir. Şekil 4.2b'de 10'ncu kanal sonunda kesme mesafesi 430 mm. de elde edilen kesme kuvveti değerlerini göstermektedir. Şekil 4.2b' de dikkati çeken ilk unsur ağız sayısının artmasıyla ilerleme yönünde olan Fy kuvvetinin yaklaşık % 100 oranında önemli oranda artmasıdır. Buna karşın Fx

kuvvetindeki artışın da % 45 oranında önemli miktarda olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.2a' da ilk kanal için elde edilen grafikte ağız sayısının artmasıyla birlikte Fz kuvveti küçük de olsa bir azalma eğilimi göstermiştir. Yine benzer bir durumda Şekil 4.2b' de yani 10'ncu kanal sonunda artan ağız sayısına bağlı olarak Fz kuvvetinin bir miktar azaldığını da söylemek mümkündür. İlerleme yönünde olan Fy kuvvetlerinin artışının; abrasif aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak artan kesici takım kenar radüsünden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kenar radüsünün artması özellikle kesici takımın iş parçasına dalmasını zorlaştırmış, bunun sonucunda da her üç kuvvet te artışlar meydana gelmiştir. Fakat Fy yönünde meydana gelen artışın daha ön plana çıktığı belirtilmelidir. Burada Fy yönündeki kuvvetin artmasının bir diğer nedeni de ağız sayısının artmasına bağlı olarak birim zamanda kesme yapan ağız sayısının artmasıdır. Tüm kesme işlemlerinde diş başına düşen ilerleme değerinin aynı alındığı ve kesici ağız sayısının 4 olması durumunda; aynı anda kesme yapan ağız sayısı, kesici ağız sayısı 2 olan duruma göre daha fazladır. Ayrıca ağız sayısının artışı ile diş başına düşen talaş miktarının da artması, kesme esnasında meydana gelen kuvvetlerin özellikle Fy yönünde meydana gelen kuvvetlerin de artmasına neden olmuştur (Kanlı 2014) Fy yönündeki kuvvetlerin artmasına neden teşkil edecek bir diğer durum ise; kopartılan talaşların bölgeden uzaklaştırma ihtimalinin zayıflamasıdır. Kesme işlemiyle birlikte kesme bölgesindeki talaşın uzaklaştırılması özellikle artan ağız sayısı ile biraz daha zorlaşmaktadır. Bu durum, kesme esnasında meydana gelen gerek talaş yapışmasını (built up edge) gerekse de talaşın işlenen yüzeye sıvanması gibi durumları beraberinde getirmektedir.



a)

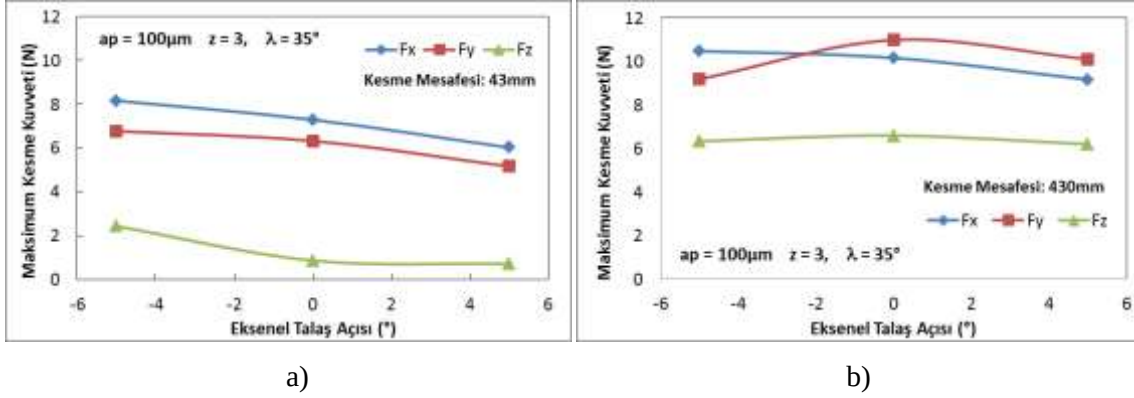


b)

Şekil 4.2 a) Maksimum kesme kuvvetinin ağız sayısına ve b) Maksimum kesme kuvvetinin kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.

4.1.3 Eksenel Talaş Açısının Etkisi

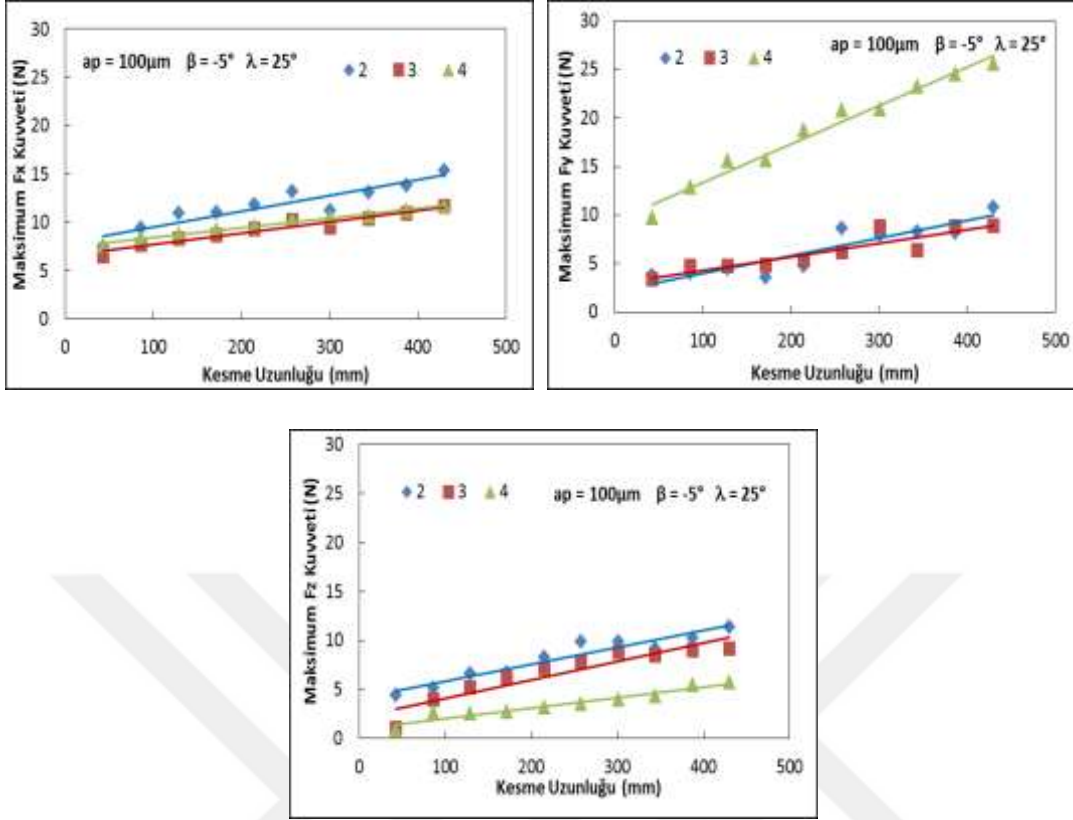
Eksenel talaş açısı literatürde çok dikkate alınmayan bir geometrik parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle mikro frezeleme işleminde eksenel talaş açısının etkisi hemen hemen hiç çalışılmamıştır. Talaş açısı, radyal talaş açısına dair yapılan çalışmalar olsa da eksenel talaş açısına yönelik yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bu nedenle kesici takım için -5° ; 0° ve 5° olmak üzere üç farklı eksenel talaş açısı kullanılmış olup, elde edilen grafikler; helis açısı 35° ve ağız sayısı 3 olan kesici takımlar için geçerlidir. Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b' de eksenel talaş açısının değişimine bağlı olarak her üç kesme kuvvetinin değişimi verilmiştir. Her iki grafik de birlikte değerlendirilecek olursa ilk kanal ve son kanal sonrasında yapılan kesme işlemine göre kesici takımda meydana gelen aşınmanın önemli miktarda olduğu ve aşınma sonucunda da F_x , F_y ve F_z kuvvetlerinin arttığını görmek mümkündür. Özellikle F_z kuvvetinin 2 N. civarındayken 6 N. lara kadar çıktığını ve 3 kat arttığı görülmektedir. Buna karşın F_x ve F_y kuvvetlerinde de kısmen bir artış olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.3a' da verilen ilk grafikte, ilk kanal sonrasında takımın aşınması da çok az bir düzeyde olduğu dikkate alınarak; eksenel talaş açısının artışı elde edilen F_x ve F_y kesme kuvvetlerinin kısmen de olsa azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte F_z kuvvetinde küçük de olsa bir azalmanın olduğu görülmektedir. Fakat bu azalmanın ciddi bir oranda olmadığını söylemekte yarar vardır. Şekil 4.3b' de verilen ve 10'ncü kanal sonrasında elde edilen kesme kuvvetlerine bakıldığında F_y ' nin izlemiş olduğu seyir kısmen değişmiştir. Artan eksenel talaş açısı etkisiyle F_y kuvveti belirli miktarda artış göstermektedir. Buna karşın F_x ve F_z kuvvetlerinin hemen hemen artmadan sabit bir eğilim gösterdiğini de söylemek mümkündür.



Şekil 4.3 a) Maksimum kesme kuvvetinin eksenel talaş açısına ve b) Maksimum kesme kuvvetinin kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.

4.1.4 Kesme Uzunluğu ile Kesme Kuvvetlerinin Değişimi

Bilindiği üzere mikro frezeleme işleminin en önemli dezavantajlarından bir tanesi de hızlı takım aşınmasıdır. Hızlı takım aşınmasının nedenlerinden biri de kullanılan yüksek devir sayısı ve kesici takıma ait mikron ölçülerindeki geometrik parametrelerdir. Şekil 4.4' te kesme uzunluğuna bağlı olarak ağız sayısının her üç kesme kuvveti üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekil 4.4' te F_x kuvvetinin değişimine bakıldığında kesme uzunluğuna bağlı olarak F_x kuvvetinin arttığını ve bu artışın lineer bir seyir izlediğini söylemek mümkündür. Bununla birlikte 2 kesici ağıza sahip olan kesici takımdaki F_x kesme kuvvetlerinin biraz daha büyük olduğu görülmektedir. F_y kuvvetinin değişimine bakıldığında ise, kesme uzunluğunun artmasına bağlı olarak özellikle 4 ağızlı kesici takımda elde edilen F_y kuvvetlerinin önemli oranda arttığı görülmektedir. Bunun en önemli nedeni F_y ' nin ilerleme yönünde olması ve ağız sayısının artmasıyla birlikte aynı anda kesme yapan ağız sayısının artmış olmasıdır. Aynı anda kesme yapan ağız sayısının artması, kesici takıma etki eden kuvvet miktarının da artmasına neden olur. Bununla birlikte 2 ve 3 ağızlı olan kesici takımlarda F_y kesme kuvveti kesme uzunluğuyla artmaktadır. Aynı zamanda bu artışın F_x kesme kuvvetiyle benzer bir seyir izlediğini söylemek mümkündür. Kesme uzunluğuna bağlı olarak F_z kesme kuvvetinin değişimi de yine Şekil 4.4' te verilmektedir. Her üç kesici takım içinde dikkat edilecek olursa ağız sayısının minimum olduğu durumda F_z kesme kuvvetinin maksimum olduğu ve artan ağız sayısı ile birlikte F_z kesme kuvvetinin de bir miktar azaldığını söylemek mümkündür.



Şekil 4.4 Maksimum kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna ve ağız sayısına bağlı olarak değişimi.

4.2 Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi

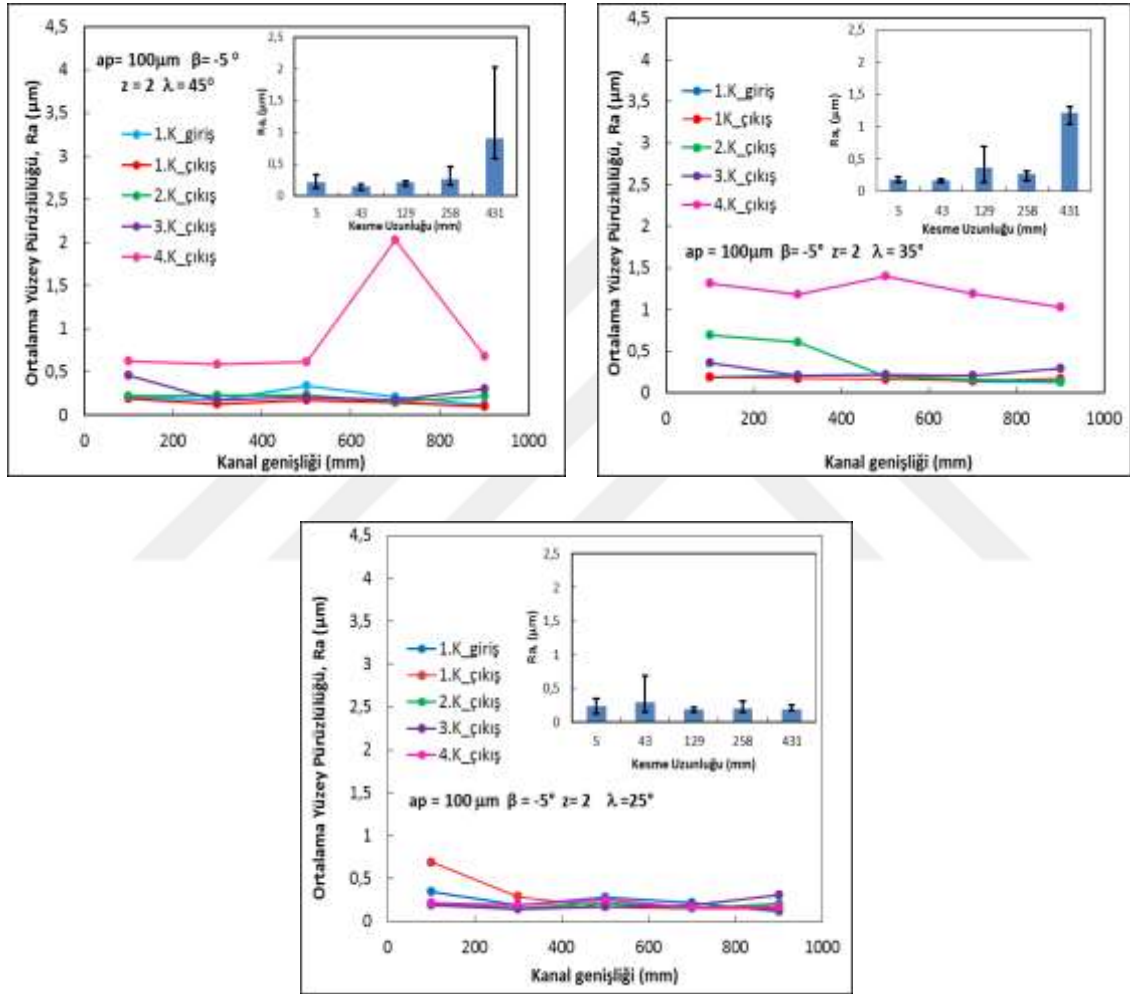
4.2.1 Helis Açısının Etkisi

Mikro işlemede özellikle işlenen yüzey kalitesi ve meydana gelen çapak, en önemli iki problem olarak ifade edilmektedir. Bu amaçla kesme işlemi sonrasında kanal yüzeylerinden hem giriş hem de çıkış noktalarından ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin değişimi, kanal genişliği boyunca Şekil 4.5' te verilmiştir. Şekil 4.5' te ilk kanalın girişini ifade eden 1'nci kanal ve son kanalın çıkışını ifade eden 4'ncü kanal ifadeleri yer almaktadır. Bununla birlikte kesme uzunluğuna bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin değişimi yine Şekil 4.5' te bulunan grafiklerin içerisinde küçük bir grafik olarak sunulmuştur. Şekil 4.5' de helis açısının 45° olduğu durumda kanal genişliği boyunca ortalama yüzey pürüzlülük değerinin hemen hemen sabit kaldığı, çok önemli bir değişim göstermediğini söylemek mümkündür. Fakat 4'ncü kanalda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin ilk üç kanalda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinden daha büyük olduğunu söylemek mümkündür. Bu durum, kesme uzunluğu-ortalama yüzey pürüzlülüğü ilişkisini gösteren küçük grafikte de net olarak görülmektedir.

Helis açısının 35° olduğu durumda ise yine 4'ncü kanalda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin maksimum olduğunu söylemek mümkündür. Bununla birlikte 2'nci kanalda özellikle kanal genişliğinin yarısına kadar (400 mm. mesafeye kadar) yüzey pürüzlülüğünün 4'ncü kanal haricindeki diğer kanallardaki yüzey pürüzlülüğünden bir miktar daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Helis Açısının 25° olduğu durumda ise elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin özellikle 4'ncü kanalda buna dahil olmak üzere önemli oranda azaldığını söylemekte fayda vardır. Bu üç grafikten ortaya çıkan genel bir sonuç ise helis açısının küçülmesiyle daha iyi bir yüzey kalitesinin elde edilmesidir. Kesme zamanına bağlı olarak kesici takımında meydana gelen hem çevresel aşınma hem de kenar radüsünde meydana gelen büyüme, kesici takımın kesme yapma kabiliyetini azaltır. Bununla

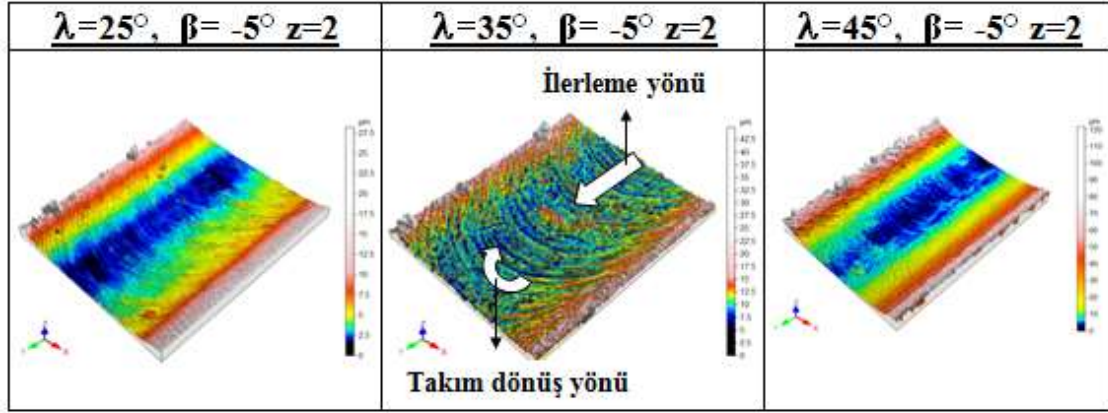
birlikte kesici takım kenar radüsünün büyümesi, kesici takımın iş parçasına dalmasını zorlaştırarak işlenen yüzey kalitesinin de bozulmasına neden olur. Şekil 4.5’ te verilen bu üç grafik birlikte değerlendirildiğinde, özellikle 4’ncü kanal sonunda elde edilen yüzey kalitesinin önemli oranda bozulmasının temel nedeni takım aşınmasıdır. Artan helis açısı her ne kadar F_x ve F_y kesme kuvvetlerinin bir miktar düşmesine neden olsa da takım ömrünü de olumsuz etkileyerek elde edilen yüzey kalitesini de düşürmüştür.



Şekil 4.5 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün helis açısına bağlı olarak hem kesme uzunluğu hemde kanal genişliği boyunca değişimi.

Şekil 4.6’ da her üç helis açısı için 4’ncü kanal sonunda elde edilen yüzey topografya görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.6’ da takım aşınmasına bağlı olarak 45° helis açısında derinlik farkı, diğer helis açılarından daha fazladır. 25° helis açısındaki yüzey

pürüzlülüğünün 35° ve 45° helis açısındaki yüzey pürüzlülüğünden de daha iyi olduğu da tespit edilmiştir.



Şekil 4.6 Her üç helis açısı için 4' ncü kanal (son kanal) sonunda elde edilen yüzey topografya görüntüleri.

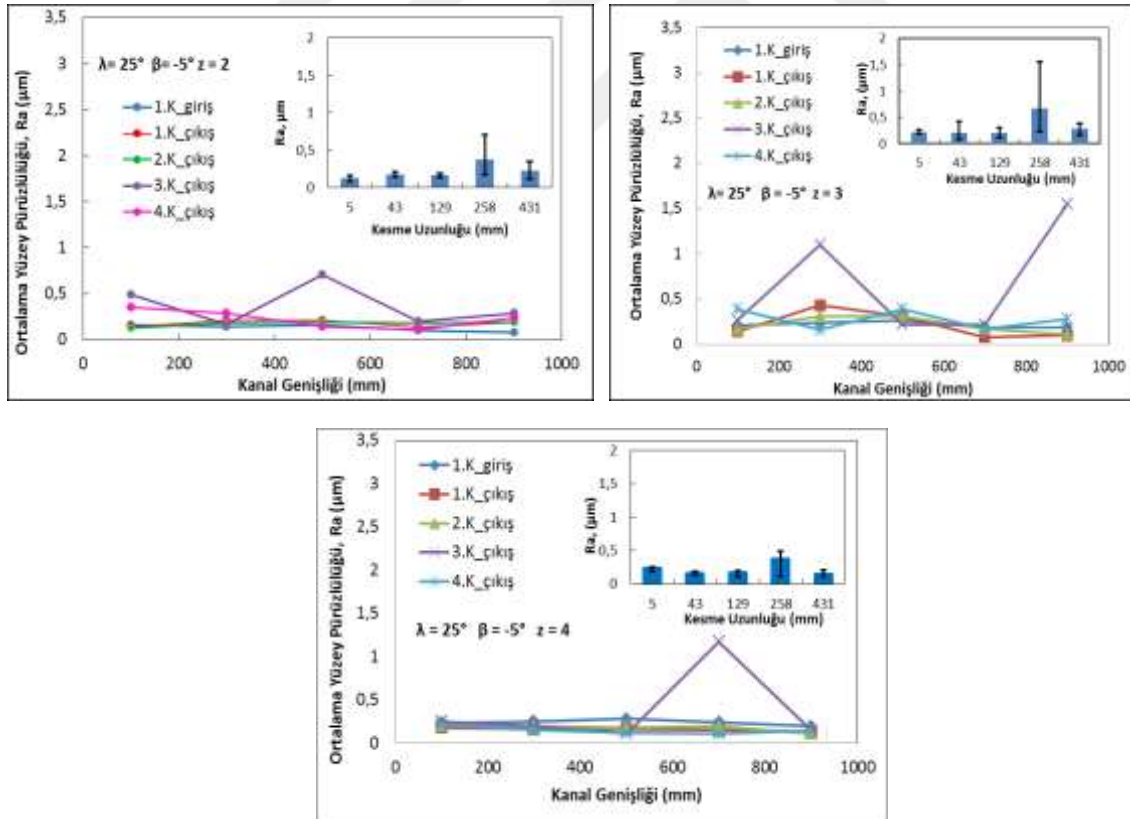
4.2.2 Ağız Sayısının Etkisi

Deneyler sonrasında ağız sayısının etkisini ortaya koymak için işlenen yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin değişimi, kanal genişliği boyunca Şekil 4.7' de verilmiştir. Şekil 4.7' de ilk kanalın girişini ifade eden 1' nci kanal ve son kanalın çıkışını ifade eden 4' ncü kanal ifadeleri yer almaktadır. Bununla birlikte kesme uzunluğuna bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi de küçük bir grafik olarak Şekil 4.7' de bulunan grafiklerin içerisinde sunulmuştur. Şekil 4.7' de ağız sayısının 2 olduğu durum için kanal genişliği boyunca ortalama yüzey pürüzlülüğünün hemen hemen sabit kaldığı, çok önemli bir değişim göstermediğini söylemek mümkündür. Fakat 3' ncü kanalda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin diğer kanallarda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum kesme uzunluğu-ortalama yüzey pürüzlülüğü ilişkisini gösteren küçük grafikte de net olarak görülmektedir.

Ağız sayısının 3 olduğu durumda 3' ncü kanalda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin diğer kanallarda elde edilen yüzey pürüzlülüğünden daha büyük olduğu görülmektedir. Üçüncü kanaldaki kanal genişliği boyunca elde edilen yüzey pürüzlülüğü değişimini de gözönünde bulunduracak olursak, 3' ncü kanal girişinden

hemen sonraki 300 mm.'de ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin yaklaşık 1 μm .' nun biraz üzerinde artış gösterdiğini ve yine 3'ncü kanal çıkışındaki 900 mm.' de ise ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin yaklaşık 1,5 μm 'nun biraz üzerinde artış gösterdiği ve diğer kanallardaki kanal genişliği boyunca ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüklerinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Ağız sayısının 4 olduğu durumdaki kanal genişliği boyunca elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiğinin diğer ağız sayılarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü grafikleriyle benzer bir seyir izlediği görülmektedir. Fakat bu üç grafikten genel bir değerlendirme yapılacak olursa, ağız sayısının artışı, ortalama yüzey pürüzlülüğünü azalmakta ve daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmektedir. Bunun sebebi ise artan ağız sayısı ile hem kesici takımındaki kenar aşınmaları hem de kesici takım çapındaki değişimin minimum düzeyde kalmasıdır. Şekil 4.7'de R_a değerlerindeki ani değişimin bir diğer nedeni de işlenen kanal yüzeyine yapışan talaşlardır.



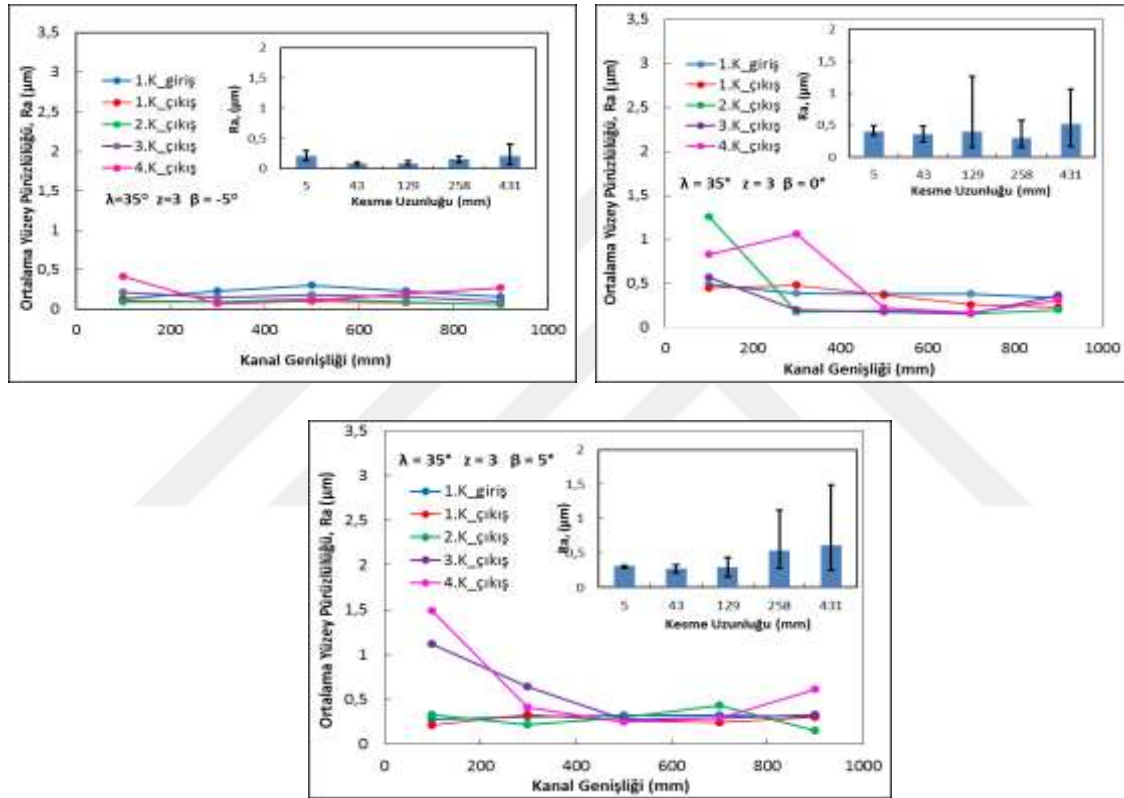
Şekil 4.7 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün ağız sayısına bağlı olarak kanal genişliği ve kesme uzunluğu boyunca değişimi.

4.2.3 Eksenel Talaş Açısının Etkisi

Şekil 4.8’ de eksenel talaş açısının ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi üzerindeki etkisi verilmiştir. Bu değişim, kanal genişliği boyunca elde edilmiş olup her üç grafik içerisinde de kesme uzunluğuna bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin değişimi verilmiştir. Şekilde ilk dikkati çeken unsur eksenel talaş açısının -5° olduğu durumda kanal genişliği boyunca yüzey pürüzlülüğünün hemen hemen sabit kaldığıdır. İlk kanaldaki ve son kanaldaki elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğunu gösteren bu durum, ortalama yüzey pürüzlülüğünün kesme uzunluğuna bağlı değişimini içeren grafikte de tespit edilmiştir. Bununla birlikte eksenel talaş açısının 0° olduğu durumda özellikle kanal genişliğinin ilk 500 mm. lik kısmında ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin değişkenlik gösterdiğini görmek mümkündür. Burada yine 4’ncü kanalın çıkışında elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin biraz daha büyük olduğu bununla birlikte 2’nci kanalın çıkışında elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin özellikle kanal genişliğinin ilk 100 mm. lik kısmında da büyük olduğu göze çarpmaktadır. Eksenel talaş açısının 0° olduğu durum ile -5° olduğu durum birbiriyle kıyaslanacak olursa; 0° olduğu durumda kanal genişliği boyunca elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin ortalama 0,5 civarında olduğunu söylemek mümkün iken eksenel talaş açısının -5° olduğu durumda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin 0,5’ in altında olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte eksenel talaş açısının 0° olduğu durumda kesme uzunluğuna bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin de değişkenlik gösterdiği yine grafikten görülmektedir. Ayrıca eksenel talaş açısının 0° olduğu durumdaki ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin eksenel talaş açısının -5° olduğu durumdaki değeriyle kıyaslanacak olursa özellikle kesme uzunluğunun 129 mm. ile sonuncu kanal olan 431 mm. de ortalama yüzey pürüzlülük değerinin daha büyük olduğunu söylemek mümkündür. Buna karşın eksenel talaş açısının -5° olduğu durumdaki ortalama yüzey pürüzlülüğünün minimum düzeylerde kaldığı görülmektedir. Eksenel talaş açısının pozitif olduğu durumda yani 5° olduğu durumda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin özellikle kanal genişliği boyunca ilk 200 mm. lik kısım ile son 200 mm. lik kısımda bir değişkenlik olduğu göze çarpmaktadır. Yine 5° lik eksenel talaş açısında kesme uzunluğunun artmasıyla birlikte ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin de hemen hemen

lineer bir artış gösterdiği ve 4'ncü kanalda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.8' de verilen her üç eksenel talaş açısı için elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilecek olursa mikro frezeleme işleminde eksenel talaş açısının negatif bir değer alması yani 0° den daha küçük bir değer alması özellikle işlenen kanal genişliği boyunca yüzey kalitesi açısından önemli avantajlar sağlayabilir.

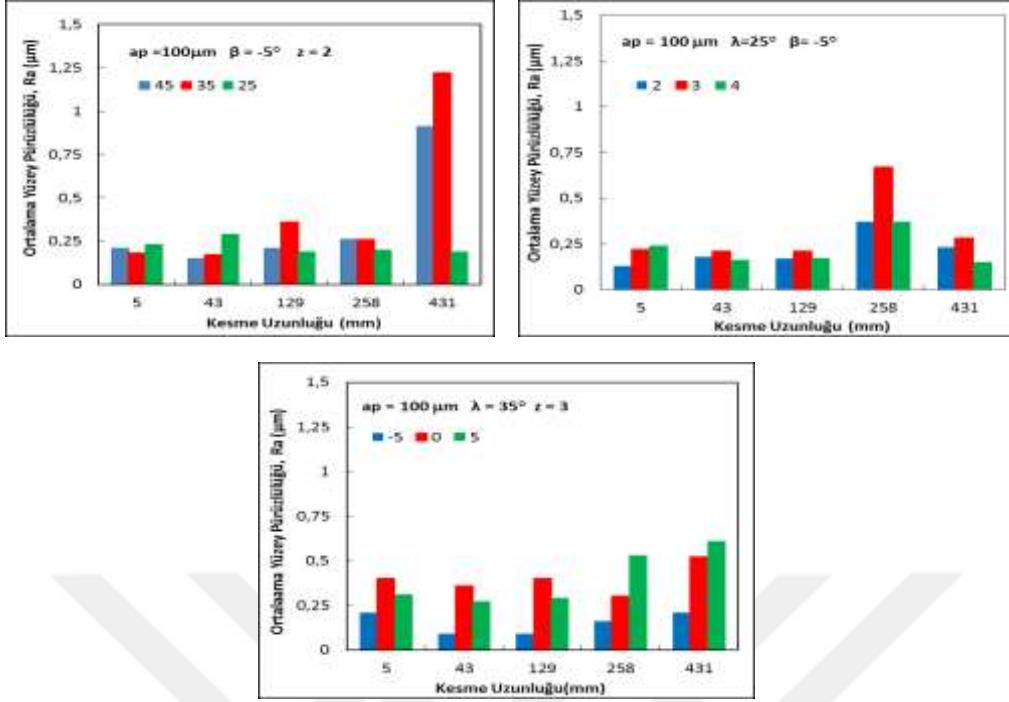


Şekil 4.8 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün eksenel talaş açısına bağlı olarak kanal genişliği ve kesme uzunluğu boyunca değişimi.

Şekil 4.9' da ise kesme uzunluğuna bağlı olarak hem helis açısının hem ağız sayısının hem de eksenel talaş açısının ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki karşılaştırmalı değişimi verilmiştir. İlk şekilde helis açısının etkisi verilmiş olup özellikle 4' ncu kanala karşılık gelen 431 mm.lik kesme mesafesi sonrasında hem 45° hem de 35° lik helis açısına sahip olan kesici takımlarda ortalama yüzey pürüzlülüğünün maksimum değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte tüm kesme mesafesi boyunca 25°

helis açısına sahip kesici takım için elde edilen Ra değerinin önemli bir değişim göstermediği de tespit edilmiştir.

Ağız sayısının etkisine bakıldığında artan kesme uzunluğuna bağlı olarak özellikle 258 mm. lik mesafede yüzey pürüzlülüğünün bir miktar arttığını söylemek mümkündür. Buna karşın ilk 129 mm. lik kesme mesafesinde Ra değerinin her 3 çeşit ağıza sahip kesici takım için de benzer bir seyir izlediği görülmektedir. Bununla birlikte son kanal olan 431 mm. lik mesafede yüzey pürüzlülüğünün tekrar azalması kesici kenar radüsünün artışıyla kaynaklandığı düşünülmektedir. Ağız sayısının etkisine yönelik elde edilen sonuçlara bakıldığında 3 ağızlı kesici takımında elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin diğer ağızlara göre bir miktar büyük olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.9’ da eksenel talaş açısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi verilmiş olup dikkat edilecek olursa negatif talaş açısına sahip kesici takımında ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin hemen hemen sabit kaldığını buna rağmen 5° eksenel talaş açısı için kesme uzunluğunun artmasıyla birlikte ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı görülmektedir. Buna karşın 0° eksenel talaş açısı için ilk 258 mm. lik kesme mesafesinde ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin sabit kaldığını ve son kanal olan 431 mm. lik kesme mesafesinde ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin bir miktar artış gösterdiği ifade edilebilir.



Şekil 4.9 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün helis açısı, eksenel talaş açısı ve ağız sayına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca karşılaştırmalı olarak değişimi.

Şekil 4.9’ da verilen her üç grafik birlikte değerlendirilecek olursa öncelikli olarak artan kesme uzunluğuna bağlı olarak kesici takımında meydana gelen abrasiv aşınma hem takım çapını hem de takım kenar radüsünü etkilemektedir. Bu da yüzey pürüzlülüğünün zaman zaman artmasına bazen de azalmasına neden olmaktadır. Fakat kesici takım geometrisi açısından ele alındığında; helis açısı 25° , iki ve dört ağızlı ve eksenel talaş açısının -5° olduğu kesici takımlarda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin minimum değerde olduğu ve daha iyi bir yüzey kalitesi elde edildiğini söylemek mümkündür.

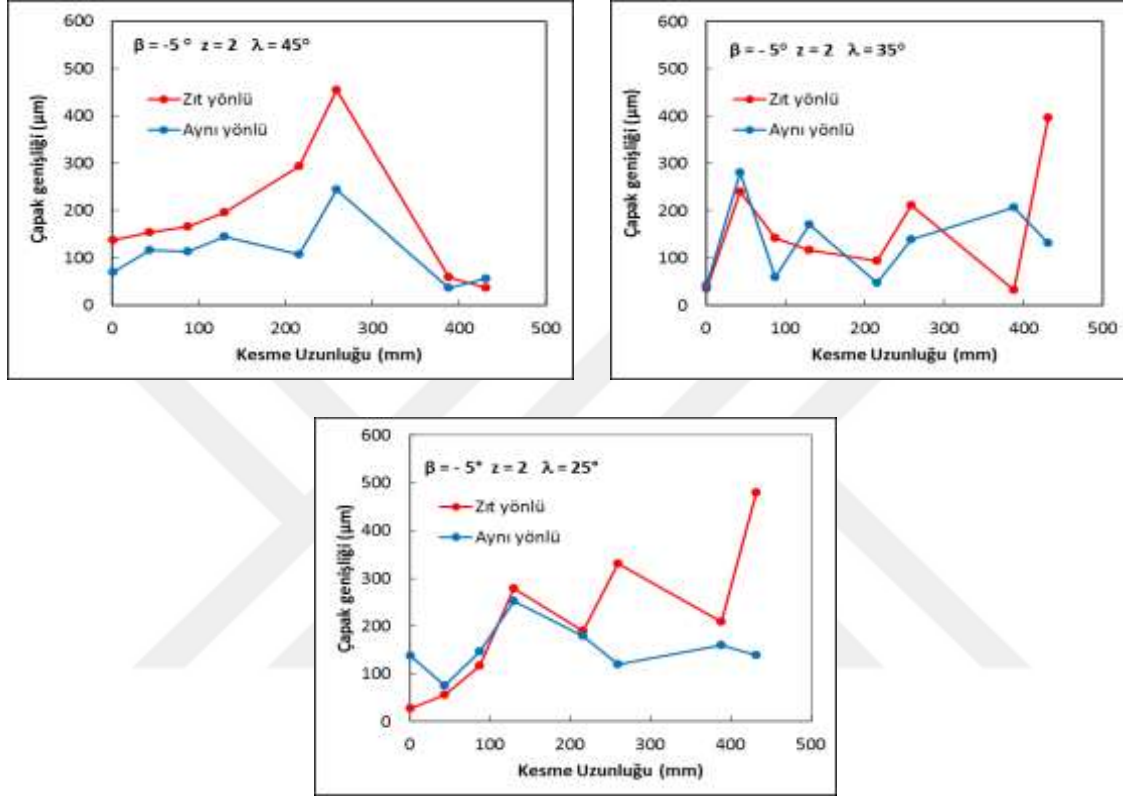
4.3 Çapak Genişliğinin Değişimi

4.3.1 Helis Açısının Etkisi

Şekil 4.10’ da çapak genişliğinin üç farklı helis açısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi verilmiştir. Öncelikli olarak hem zıt hem de aynı yönlü çapak genişliği değişimine bakıldığında genellikle zıt yönlü kesimde çapak genişliğinin biraz daha büyük olduğunu söylemek mümkündür. Özellikle helis açısının 25° ve 45° olduğu

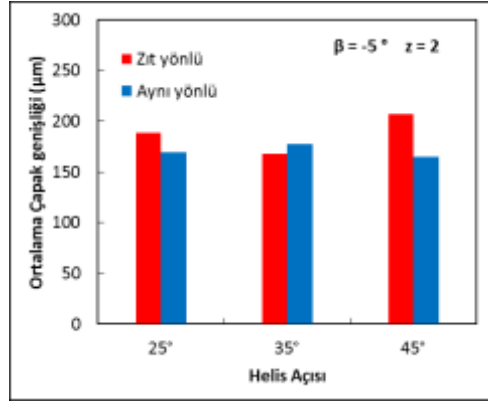
durumlarda ve kesme uzunluğunun artmasına bağlı olarak ϕ apak genişliği artmaktadır. Fakat helis açısının 45° olduğu durumda son iki kanal boyunca meydana gelen ϕ apak genişliğinin her iki yönde de aynı seyir izlediği görölmektedir. Kesme uzunluğuna bağlı olarak ϕ apak genişliğinin artmasının kesici takım kenar radüsünde meydana gelen değişimle bağlantılı olduğu düşünölmektedir. Kesici takım kenar radüsünde meydana gelen artış, kesme işleminde takımın iş parçasına dalmasını zorlaştıırarak hem zıt hem de aynı yönde ϕ apak oluşumunun artmasına neden olacaktır. Fakat kesme uzunluğuna bağlı olarak ϕ apak genişliği bazı durumlarda artma gösterirken bazı durumlarda ise azalma eğilimi göstermektedir. Örneğin helis açısının 25° olduğu durumda ϕ apak genişliği ilk kesme boylarında minimum seviyede iken belirli bir kesme uzunluğuna bağlı olarak artmış ve sonra tekrar azalma eğilimi göstermiştir. Benzer bir durumu yine helis açısı 45° olan kesme işleminde de görmek mümkündür. Kesme uzunluğunun 200 mm. olduğu duruma kadar ϕ apak genişliği özellikle aynı yönde sabit kalmış fakat bir sonraki kesme uzunluğunda hem zıt yönlü hem de aynı yönlü frezelemede ϕ apak genişliği artış göstermiştir. Helis Açısının 35° olduğu durumda ise kesme uzunluğunun 250 mm. lik kısmına kadar hem zıt yönlü hem de aynı yönlü frezelemede ϕ apak genişliği birbiriyle benzerlik göstermektedir. Fakat artan kesme uzunluğuna bağlı olarak maksimum ϕ apak genişliği zıt yönlü frezelemede meydana gelirken özellikle 400 mm. lik kesme uzunluğunun olduğu durumda minimum ϕ apak genişliği zıt yönlü frezelemede meydana gelmiştir. Kesme uzunluğuna bağlı olarak kimi zaman artan ve kimi zaman azalan ϕ apak genişliğinin kesici takımdaki hem çevresel hem de eksenel aşınma sonucu meydana gelen durumdan kaynaklandığı düşünölmektedir. Nitekim daha önceki yapılan bir çalışmada da meydana gelen çevresel aşınma, kenar radüsünün büyümesine bu da ϕ apak genişliğinin artmasına neden olmaktadır (Ucun 2013). Oysa takımda meydana gelen eksenel aşınma ise kenar radüsünün azalmasına bu da kesici takımın tekrar kesme kabiliyeti kazanmasına neden olmaktadır. Böylece takımda meydana gelen çevresel ve eksenel aşınma sonucu kenar radüsünün kesme zamanı boyunca belirli aralıklarla değişmesi ϕ apak genişliğinin de değişmesine yol açmaktadır. Fakat Şekil 4.10' da her üç helis açısı için maksimum kesme uzunluğunun meydana geldiği 431 mm. baz alınacak olursa; 25° helis açısında elde edilen ϕ apak genişliği 500 μ m. civarında iken 35° helis açısına sahip olan kesici takımdaki bu değer 400 μ m. nin biraz üzerindedir. Buna karşın helis açısının 45° olduğu durumda maksimum kesme uzunluğunda ϕ apak

genişliği zıt yönlü kesme bölgesinde minimum seviyede iken kesme uzunluğunun 250 mm. olduğu durumda ise maksimum çapak genişliğinin yine zıt yönlü frezelemede 500 μm . olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu değerlendirmeler ışığında helis açısının 35° olduğu durumda çapak genişliğinin en az olduğu bir durum görülmektedir.



Şekil 4. 10 Çapak genişliğinin her üç helis açısı için kesme uzunluğuna ve frezeleme yönüne bağlı olarak değişimi.

Aynı zamanda hem zıt hem de aynı yönlü kesme bölgelerinde oluşan çapak genişliklerinin de birbirine benzerlik gösterdiğini söylemek mümkündür. Şekil 4.11' de ortalama çapak genişliğinin helis açısına bağlı olarak ayrıca değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada ağız sayısı 2 ve eksenel talaş açısı da -5° olan kesici takım kullanılmıştır. Dikkat edilecek olursa özellikle 25° ve 45° helis açısına sahip kesici takımlarda zıt yönlü kesme bölgesinde çapak genişliğinin daha büyük olduğu görülmektedir. Helis açısının 35° olduğu durumda ise zıt yönlü kesme bölgesinde çapak genişliği daha az ise de her iki zıt ve aynı yönlü kesme bölgesinde çapak genişliğinin birbirine yakın seyir izlediği görülmektedir.

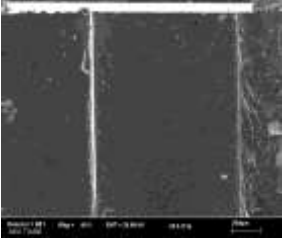
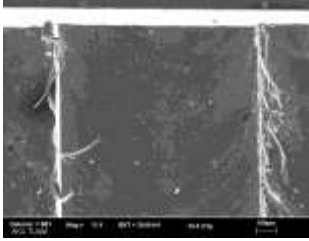
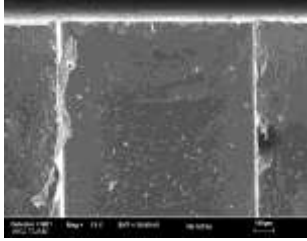
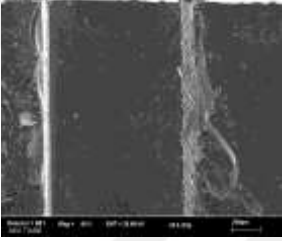
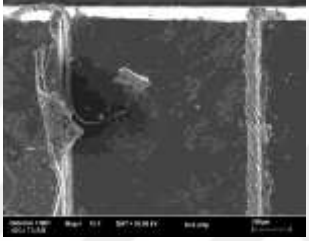
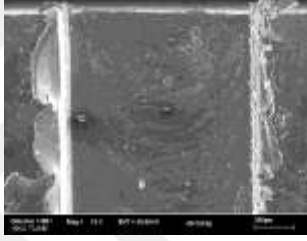
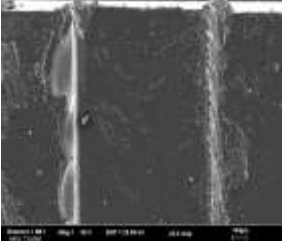
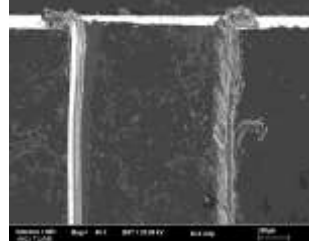
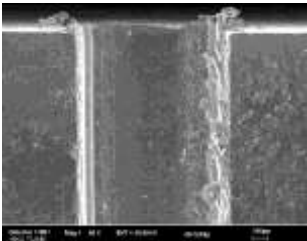


Şekil 4.11 Ortalama çapak genişliğinin helis açısına ve frezeleme yönüne bağlı olarak karşılaştırmalı değışimi.

Şekil 4.12' de ise farklı helis açılarının kesme uzunluğuna bağlı olarak çapak oluşumuna etkisi SEM fotoğraflarıyla da verilmiştir. Kesme uzunluğu, L_c ifadesi ile sembolize edilmektedir. $L_c = 1$ mm. ilk kanalın ilk 1 mm. lik kesme mesafesini göstermektedir. 85 mm. ve 360 mm. kesme mesafesinde kesme işleminin sonrasındaki kanal girişlerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Kesme mesafesinin 1 mm. ve helis açısının 25° olduğu durumda aynı yönlü kesme bölgesinde çapak oluşumunun bir miktar daha fazla olduğunu; 45° helis açısına sahip olan kesici takımında ise zıt yönlü bölgede meydana gelen çapak genişliğinin biraz daha büyük olduğunu söylemek mümkündür. Bununla birlikte helis açısının 35° olduğu kesici takımında ise her iki yönde de meydana gelen çapak genişliğinin birbirine yakın olduğu söylenilebilir. Artan kesme mesafesiyle birlikte $L_c = 1$ mm. de gördüğümüz durum 85 mm. de de görülmektedir. 85 mm. de helis açısının 25° olduğu durumda kanal girişinde aynı yönde meydana gelen çapak genişliğinin daha büyük ve zıt yöne göre daha geniş olduğu görülürken helis açısının 45° olduğu durumda da zıt yönde meydana gelen çapağın daha geniş olduğu görülmektedir. Bununla birlikte helis açısının 35° olduğu durumda zıt yönde meydana gelen çapak genişliği, aynı yönlüde meydana gelen çapak genişliğine göre bir miktar daha büyüktür. Kesme mesafesinin 360 mm. olduğu durumda zıt yöndeki çapak genişliği, helis açısının 25° olduğu durumda daha fazla iken 35° ve 45° helis açısına sahip kesici takımlarda zıt yönde meydana gelen çapak genişliği yaklaşık sıfır düzeyindedir. Fakat buna karşın aynı yönlü kesme bölgesinde talaşın kararsız kesilmesi durumu söz konusudur. Özellikle kesici takımın talaşa girdiği bölgede kararsız bir durumun yaşandığı bunun neticesinde kesmenin sağlıklı gerçekleşmediği ve kısmen de

kazınma mekanizmasının bir sonucu olarak aynı yönlü kesme bölgesinde yırtılma türü bir kesme işleminin meydana geldiği görülmektedir. Bu iki durumun bir sonucu olarak kesici takımın hem köşe radüsü ciddi oranda değişmiş ve abrasif aşınma mekanizması sonucunda da kesici takım kesme kabiliyetini yitirmiştir. Dolayısıyla talaşa girme noktasında kesici takım negatif talaş açısı etkisi oluşturarak talaşa dalması zorlaşmış, biraz daha baskın olan kazınma etkisi nedeniyle de sağlıklı bir kesme işlemi gerçekleşmemiştir.



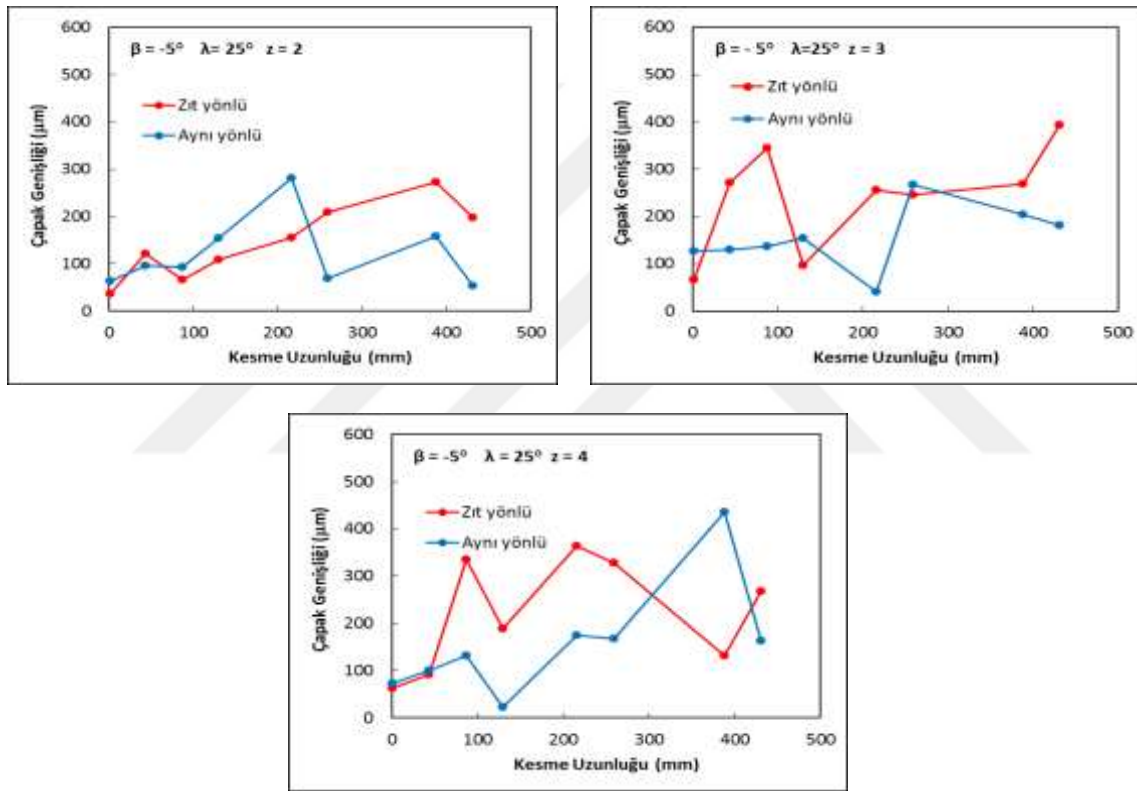
Lc (mm)	$\lambda = 25^\circ$	$\lambda = 35^\circ$	$\lambda = 45^\circ$
1			
85			
360			

Şekil 4.12 Helis açısına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca meydana gelen çapak genişliği değişimi SEM fotoğrafları ($\beta = -5^\circ$, $z = 2$)

4.3.2 Ağız Sayısının Etkisi

Şekil 4.13' te ağız sayısının kesme uzunluğuna bağlı olarak meydana gelen çapak genişliğinin değişimi verilmiştir. Burada zıt yönde meydana gelen çapak boyutlarının daha büyük olduğunu söylemek mümkündür. Genel bir ifade ile artan kesme uzunluğu yine çapak genişliğinin de başlangıca göre yani ilk kesme noktasına göre artmasına neden olmuştur. Ağız sayısının 2 olduğu durumda hem zıt yönlü hem de aynı yönlü

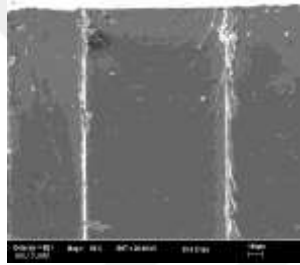
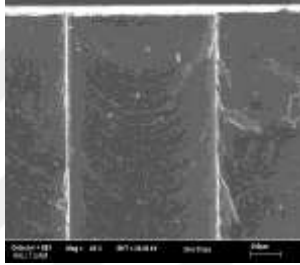
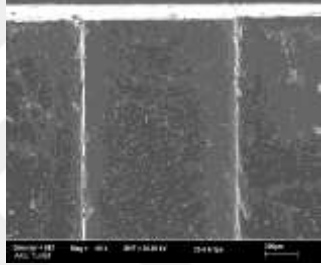
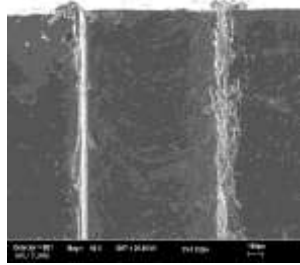
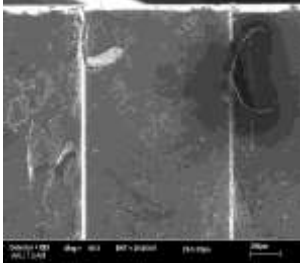
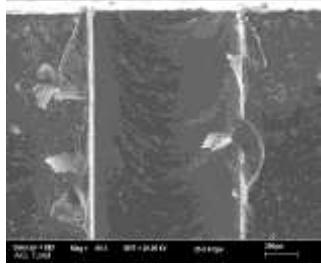
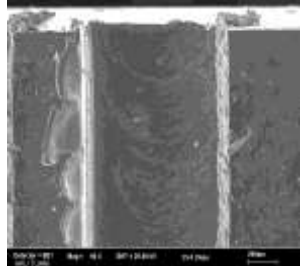
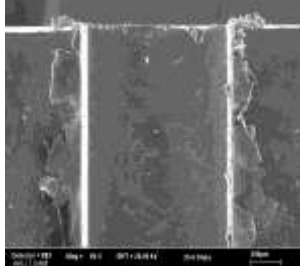
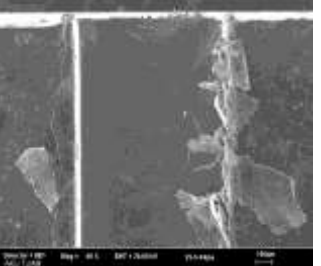
kesme işlemi için elde edilen maksimum çapak genişliği 300 μm . civarında iken hem 3 hem de 4 ağızlı kesici takımda elde edilen çapak genişliğinin 400 μm ve biraz üzerinde olduğunu görmek mümkündür. Buradan yola çıkarak ağız sayısının artması çapak genişliğini kısmen de olsa artırmaktadır. Daha önce helis açısında ifade edilen çapak genişliğinin zamanla azalma ve artması burada da gözlenmektedir. Belirli bir kesme uzunluğuna kadar çapak genişliği artarken ani bir azalma gösterip tekrar bir artış eğilimi göstermektedir. Bu durum, takımda meydana gelen hem çevresel hem de eksenel aşınmanın bir sonucu olduğu olgusunu kuvvetlendirmektedir.



Şekil 4.13 Farklı ağız sayılarında kesme uzunluğuna bağlı olarak aynı ve zıt yönlü frezeleme bölgesinde meydana gelen çapak genişliği değişimleri.

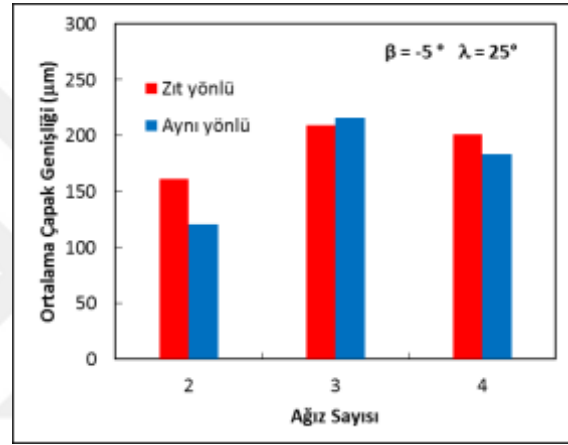
Şekil 4.14' de ağız sayısının etkisinin elde edilen SEM fotoğraflarıyla da görüntüsü verilmiştir. Kesme uzunluğunun 1 mm. ve ağız sayısının 4 olduğu durumda çapak genişliği minimum seviyede gibi görünmektedir. Bununla birlikte ağız sayısının 3 olduğu durumda ise çapak genişliğinin biraz daha büyük olduğunu söylemek yerinde olacaktır. Kesme uzunluğunun artmasıyla birlikte kenarlarda meydana gelen çapak boyutları da artmaktadır. Ağız sayısının 2 olduğu durumda artan kesme mesafesiyle

birlikte zıt yönde meydana gelen çapak oluşumu artarken aynı yönlü kesme bölgesinde ise bir kenar yırtılması şeklinde ortaya çıkan kenar oluşumunu görmek mümkündür. Fakat 3 ağızlı ve 4 ağızlı kesme işlemlerinde benzer bir durum olmadığını söylemek mümkündür. Özellikle 3 ve 4 ağızlı kesme işlemlerinde aynı yönlü kesme bölgesinde herhangi bir kararsızlığın yaşanmadığını buna mukabil kimi zaman aynı yönlü kesme bölgesinde meydana gelen çapağın daha yüksek olduğunu fakat kararsız bir kesmenin olmadığını söylemek mümkündür.

Lc (mm)	z = 2	z = 3	z = 4
1			
85			
360			

Şekil 4.14 Ağız sayısına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca meydana gelen çapak genişliği değişimi SEM fotoğrafları ($\lambda = 25^\circ$ $\beta = -5^\circ$).

Şekil 4.15’ te ise ağız sayısının etkisini ortaya koymak adına hem zıt hem de aynı yönlü frezelemede elde edilen ortalama çapak genişliği verilmiştir. Tüm kanal boyunca aynı ve zıt yönlü farklı bölgelerden ayrı ayrı yapılan ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Buradan çıkan sonuca göre 2 ağızlı kesme işleminde çapak genişliğinin minimum düzeyde olduğunu fakat 3 ağızlı ve 4 ağızlı kesici takımlarda elde edilen ortalama çapak genişliğinin ise daha fazla ve birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte 2 ve 4 ağızlı kesme işlemlerinde zıt yönlü kesme bölgesinde elde edilen ortalama çapak genişliğinin aynı yönlü kesme bölgesine göre bir miktar daha büyük olduğu da görülmektedir.

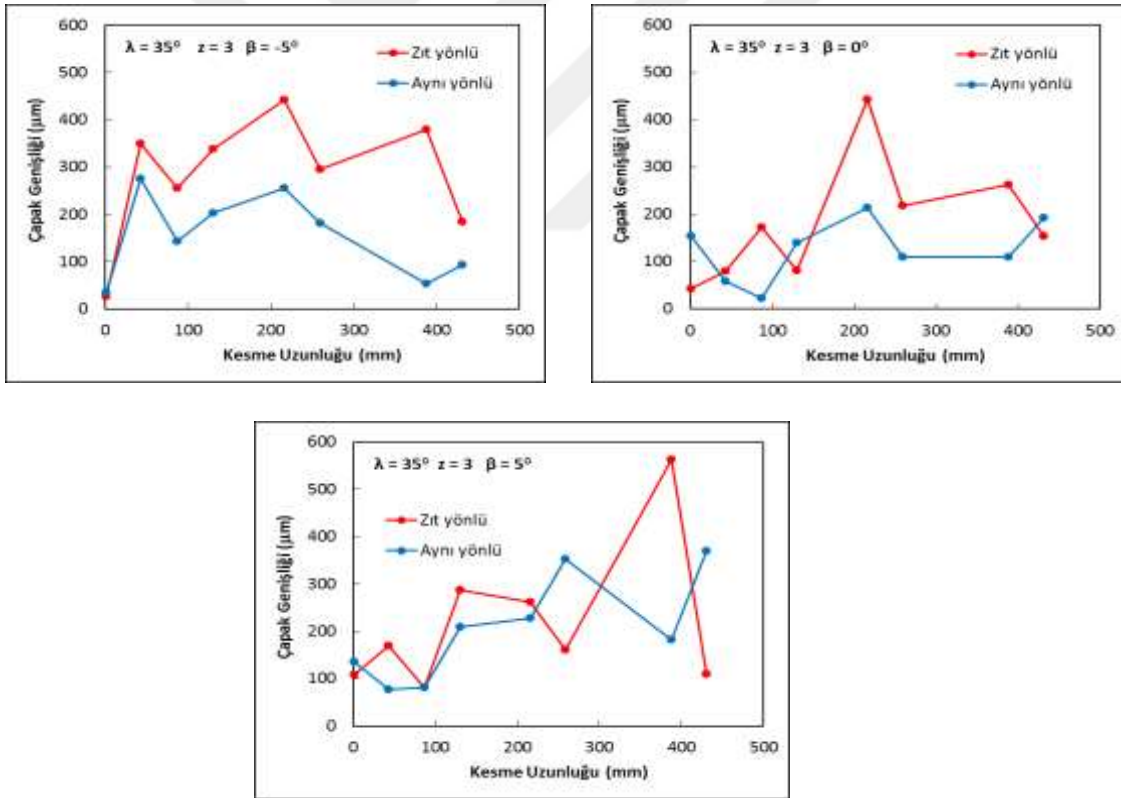


Şekil 4.15 Ağız sayısına bağlı olarak hem zıt hem de aynı yönlü kesme bölgesinde elde edilen ortalama çapak genişliği değişimleri.

4.3.3 Eksenel Talaş Açısının Etkisi

Şekil 4.16’ da farklı eksenel talaş açıları ve kesme uzunluğuna bağlı olarak çapak genişliğinin değişimi verilmiştir. Burada eksenel talaş açısının negatif olduğu durumda zıt yönlü kesme işleminde elde edilen çapak genişliğinin daha büyük olduğu görülmektedir. Yine eksenel talaş açısının 0° olduğu durumda da artan kesme uzunluğuna bağlı olarak zıt yönlü kesme bölgesinde çapak boyutunun biraz daha büyük olduğunu görmek mümkündür. Eksenel talaş açısının pozitif 5° olduğu durum için aslında 300 mm. ye kadar her iki yönde de meydana gelen çapak genişliği birbiriyle benzerlik gösterirken bundan sonraki kesme uzunluklarında yine maksimum çapak genişliği zıt yönde gerçekleşmektedir. Fakat artan kesme uzunluğunda yani 400 mm. kesme mesafesi sonrasında zıt yönlü ile aynı yönlü kesme bölgesinde çapak genişliği

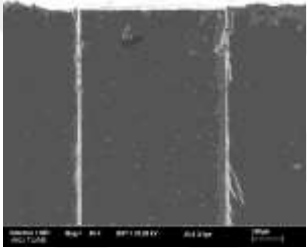
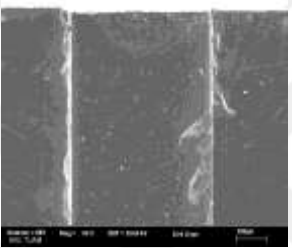
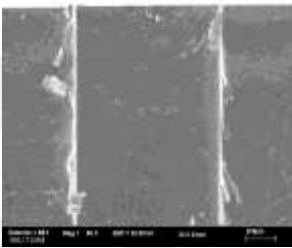
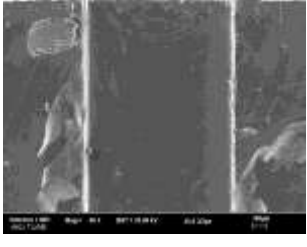
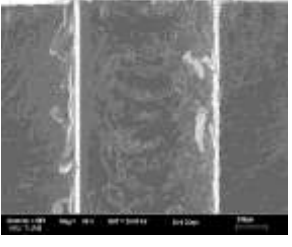
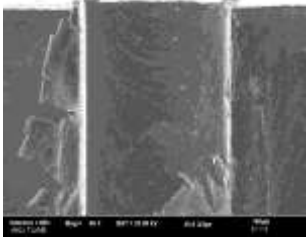
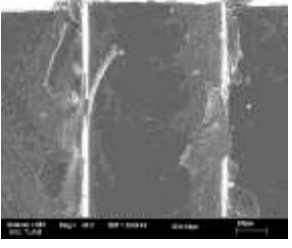
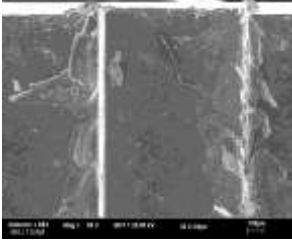
boyutları değişkenlik göstermektedir. Elde edilen maksimum çapak genişliği açısından bakıldığında aksel talaş açısının hem 5° hem de 0° olduğu durumda meydana gelen çapak genişliği $500 \mu\text{m}$. ye yaklaşmaktadır. Buna karşılık aksel talaş açısının negatif olduğu durumda zıt yönde meydana gelen çapak genişliğinin biraz daha düşük seviyede kaldığı görülmektedir. Ayrıca özellikle aksel talaş açısının 5° olduğu durumda 200 mm . ye kadar olan kesme işlemlerinde dikkat edilecek olursa çapak genişliği $300 \mu\text{m}$. civarında kalmış yine benzer bir durum olan 0° aksel talaş açısı içinde yaklaşık 120 mm . lik kesme mesafesine kadar olan yerde çapak genişliği minimumken ani bir artış göstermiştir. Bu ani artış ve azalmaların sebebinin kesici kenar radüsünde meydana gelen değişim veya küçük çaplı kenar kırılmalarından dolayı değişimden olabildiğini söylemek mümkündür. Bunun için takımların detaylı SEM analizinin yapılmasını gerektirir ki bu da takım aşınması bölümünde detaylı olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16 Aksel talaş açısına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca hem zıt hem de aynı yönlü kesme bölgesinde elde edilen çapak genişliği değişimleri.

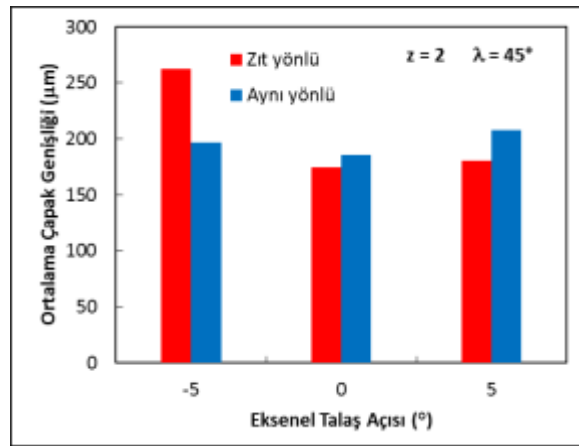
Yine aksel talaş açısının değişimine bağlı olarak farklı kesme mesafeleri için elde edilen SEM fotoğrafları Şekil 4.17' de verilmektedir. İlk kesmeye başlandığı kesme

mesafesinin 1 mm. olduğu durum için bakıldığında -5° eksenel talaş açısına sahip olan kesici takımda çapak genişliğinin minimum seviyede olduğu görülmektedir. Buna karşılık artan kesme mesafesine bağlı olarak çapak genişliği de artmaktadır. Özellikle 360 mm. kesme mesafesi sonrasında her üç eksenel talaş açısına sahip kesici takımda meydana gelen çapak genişliklerinin de maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir. Eksenel talaş açısı -5° olan takımda maksimum çapak genişliği zıt yönlü frezeleme bölgesinde gerçekleşirken 5° eksenel talaş açısına sahip takımda ise hem zıt yönlü hem de aynı yönlü kesme bölgesinde çapak genişliğinin birbirine benzerlik gösterdiğini söylemek mümkündür.

Lc (mm)	$\beta = -5^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 5^\circ$
1			
85			
360			

Şekil 4.17 Eksenel talaş açısına bağlı olarak kesme uzunluğu boyunca elde edilen SEM fotoğrafları ($\lambda = 35^\circ$, $z = 3$)

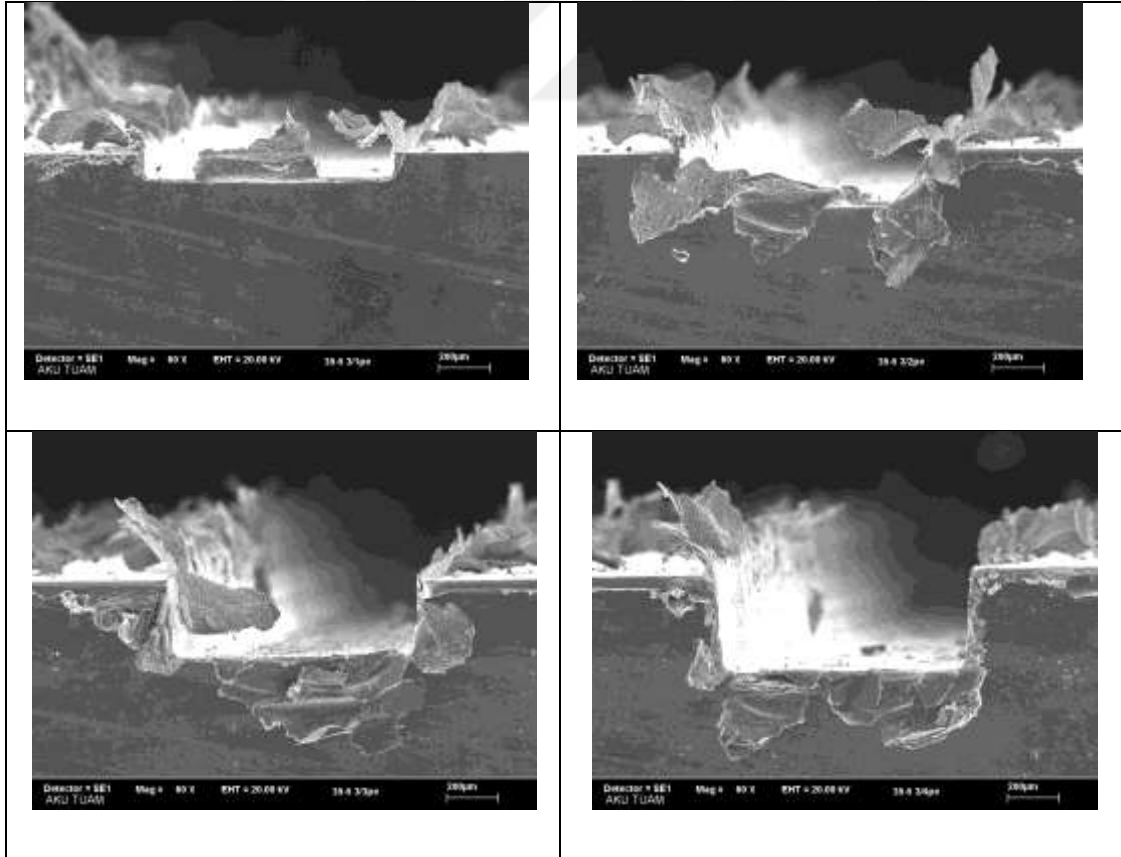
Şekil 4.18’ de ise yine eksenel talaş açısına bağlı olarak ortalama çapak genişliği değişimi verilmiştir. Eksenel talaş açısı -5° ye sahip olan kesici takımında özellikle zıt yönlü frezeleme bölgesinde çapak genişliğinin maksimum düzeyde kaldığı buna karşılık 0° ve 5° eksenel talaş açısına sahip olan kesici takımlarda ise çapak genişliğinin birbirine benzerlik gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.18 birlikte incelendiğinde -5° lik eksenel talaş açısına sahip kesici takımında çapak genişliğinin daha düşük bir seviyede kaldığı izlenimi oluşsa da tüm elde edilen çapak genişliklerinin ortalaması alınırsa -5° eksenel talaş açısına sahip kesici takımındaki çapak genişliğinin daha büyük bir değere sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.16’ da bunu doğrulamaktadır. Çünkü hem eksenel talaş açısının 0° olduğu hem de 5° olduğu durumda ilk kesme mesafelerinde çapak genişliği minimum seyrederken artan kesme uzunluğuyla kısmen bir artış göstermesine rağmen -5° eksenel talaş açısına sahip kesici takımında ilk kesme işlemi sonrasındaki kesme işlemlerinde çapak genişliği $400\ \mu\text{m}$. ye kadar yükselmiş ve bu civarda seyretmiştir. Ortalaması ele alındığında da -5° eksenel talaş açısına sahip kesici takımın özellikle zıt yönlü frezeleme bölgesinde kısmen daha büyük bir çapak genişliği meydana getirdiği tespit edilmiştir. Negatif talaş açısı için her iki yönlü frezeleme bölgesinde de ortalama çapak genişliklerinin fazla olması dolayısıyla negatif talaş açısı önerilmemektedir.



Şekil 4.18 Eksenel talaş açısına bağlı olarak zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme bölgesinde meydana gelen ortalama çapak genişliği değişimi.

Şekil 4.19’ da 35° helis açılı, -5° eksenel talaş açısındaki 3 ağızlı kesici takım ile yapılan kesme işlemi sonrasında her bir kanal sonrasında çıkış bölgesinde meydana gelen

çapakların SEM fotoğrafları verilmiştir. Birinci kanalın sonunda dikkat edecek olursak her ne kadar hem aynı yönlü hem de zıt yönlü kesme bölgesinde bir çapak meydana gelmiş olsa da takımın ilerleme yönünde çıkış bölgesinde de bir çapağın meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte artan kesme mesafesiyle birlikte 2' nci kanalın sonunda hem aynı yönlü hem zıt yönlü kesme bölgesinde meydana gelen çapak genişlikleri artarken çıkış bölgesindeki çapak genişliğinin de önemli oranda artış gösterdiği görülmektedir. Yine 3'ncü kanal sonunda ise çapak genişliklerinin belirli bir miktar daha arttığı fakat buna karşılık çıkış bölgesinin sağ ve sol kenarlarında da çapak yığılmalarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Son olarak 4' ncü kanalın çıkış noktasında hem aynı yönlü hem de zıt yönlü kesme bölgelerinde çapak genişliği bir miktar azalma gösterirken çıkış bölgesindeki çapak, kısmen de olsa bir azalma göstermiş fakat buna karşılık işlenen kenarların kenar radüsünde de bir miktar artışın olduğu da görülmektedir. Bu da takımda meydana gelen kenar radüsünün arttığı olgusunu güçlendirmektedir.



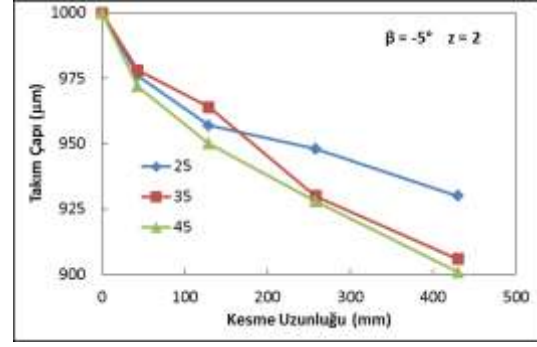
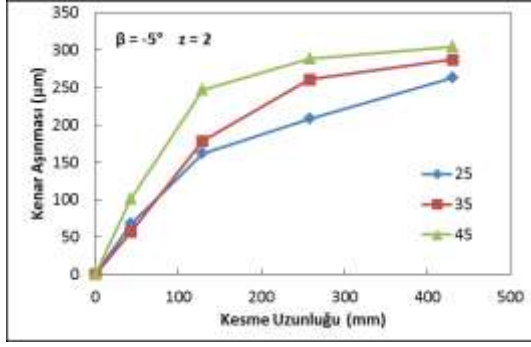
Şekil 4.19 Kesme işlemi sonrasında her bir kanal sonrasındaki çıkış bölgesinde meydana gelen çapakların SEM fotoğrafları ($\lambda = 35^\circ$, $\beta = -5^\circ$, $z = 3$)

4.4 Takım Aşınması

Yapılan çalışmada takım aşınması hem kesme uzunluğu hem de takım geometri parametreleri açısından dikkate alınarak farklı başlıklar altında değerlendirilmiştir. Özellikle en önemli parametre olan helis açısı ve ağız sayısının kesme uzunluğuna bağlı olarak takım aşınmasına etkisi ve elde edilen sonuçlar ayrı başlıklar altında aşağıda tespit edilmiştir.

4.4.1 Kesme Zamanına Bağlı Takım Aşınması

Kesme uzunluğunun artmasıyla birlikte takımda hem çevresel hem de eksenel aşınmanın meydana gelmesi kaçınılmazdır. Özellikle takım çevresinde meydana gelen aşınma hem kenar radüsünün hem de takım çapının geometrik olarak değişmesine neden olur. Yapılan çalışmada özellikle takım çevresinde meydana gelen aşınmanın abrasif aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak ortaya çıktığı tespit edilmiş olup abrasif aşınmanın yanı sıra takım çevresinde küçük çaplı kenar kırılmalarının da (chipping) olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.20a ve Şekil 4.20b’ de hem kesme uzunluğuna hem de farklı helis açısına bağlı olarak kenar aşınması ve takım çapındaki değişim verilmektedir. Şekil 4.20a’ ya bakıldığında minimum kenar aşınmasının 25° helis açısına sahip olan kesici takımda elde edildiği buna bağlı olarak maksimum aşınmanın ise 45° helis açısına sahip olan kesici takımda olduğu tespit edilmiştir. İlk 100 mm. lik kesme mesafesine kadar olan süreçte 25° ile 35 ° helis açısına sahip olan kesici takımlarda kenar aşınmasının birbirine yakın seyrettiği elde edilen sonuçlar arasındadır. Fakat artan kesme uzunluğuna bağlı olarak 25° ile 35° helis açısındaki kenar aşınmaları farkının arttığı görülmüştür. Buna karşın 45° helis açısına sahip olan kesici takımda kesme zamanının başlangıcından sonuna kadar kenar aşınmasının daha ileri bir boyutta gerçekleştiği görülmektedir. Helis açısının takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki çalışmalara literatürden de ulaşmak mümkündür.



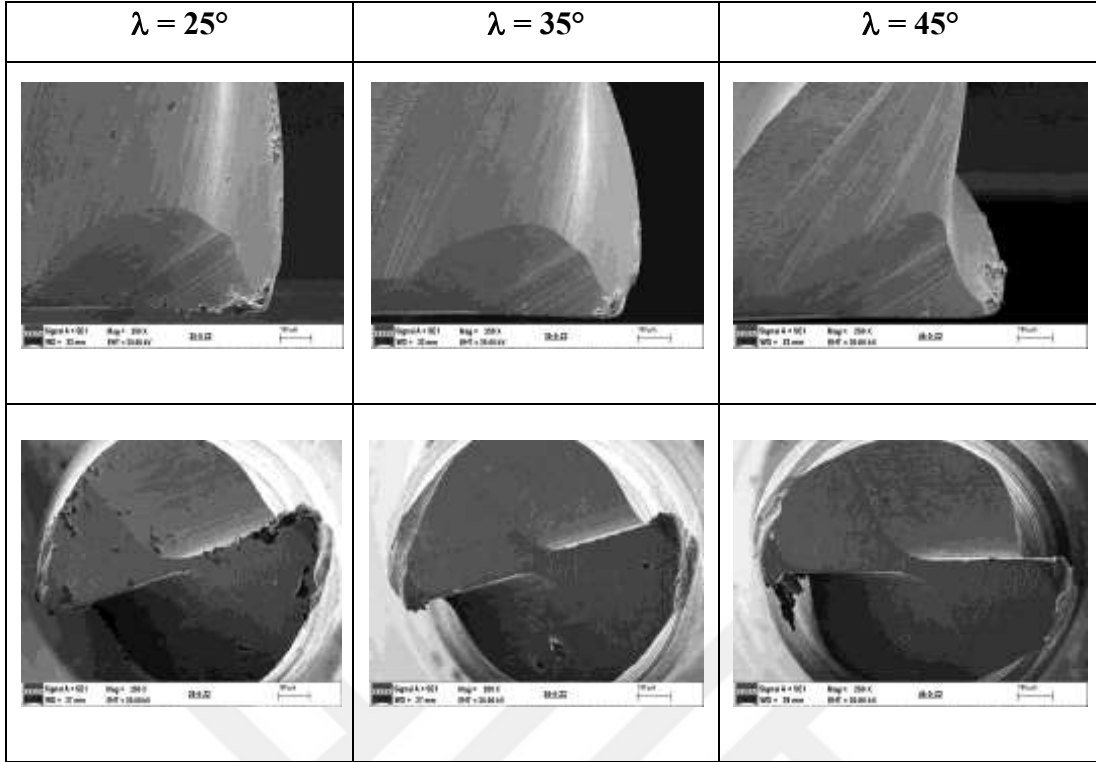
Şekil 4.20 a) Kenar aşınması ve b) takım çapı değişiminin helis açısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

Şekil 2.17' de Mitsubishi tarafından yapılan ve bir karbon çeliğinin işlenmesi sırasında elde edilen takım ömrünün helis açısıyla değişimi verilmişti. Görüldüğü üzere maksimum takım ömrünün 20° ile 30° helis açısına sahip olan takımlarda elde edildiği buna karşın 30° ile 40° arasındaki helis açılarında ise takım ömrünün önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 2.17' de elde edilen sonuçlar bir geleneksel frezeleme işlemine aittir. Dolayısıyla kısmen de olsa helis açısından bakıldığında mikro frezeleme ile benzerlik gösterdiği söylenebilir. Bu açıdan bakıldığında bu çalışmada da elde edilen sonuçların Şekil 4.20b' de verilen sonuçlarla benzerlik gösterdiğini söylemek mümkündür. Buradan çıkan diğer önemli bir sonuç ise helis açısının takım ömrüne önemli ölçüde etki etmesidir. Helis açısı arttıkça kesici kenarın temas uzunluğu da artar ve bunun sonucunda takım aşınması azalır. Fakat belirli bir helis açısı sonrasında kesici kenarın kesme mukavemeti azalır ve takım ömrü de kısalmaya başlar. Dolayısıyla 30°' nin üzerinde helis açısına sahip kesici takımlarda kesici takımın kesme yapan kenar mukavemeti azalır bu mukavemetin azalması da takım ömrünün kısalmaya neden olur. Ayrıca 30°'den daha büyük olan helis açılarında yapılan mikro kesme işleminde de takım ömrü olumsuz etkileneceğinden 30°' den büyük olan helis açıları mikro kesme işleminde önerilmemektedir.

Şekil 4.20b' de verilen bir diğer sonuç ise takım çapının kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimidir. Farklı helis açıları için elde edilen sonuçlar incelendiğinde ilk 50 mm. lik kesme mesafesinde helis açısının bir etkisi olmadığı söylenebilir. Fakat kesme mesafesinin artmasıyla birlikte helis açısının etkisi görülmektedir. Özellikle 35° ve 45°

helis açısına sahip olan kesici takımlarda takım çapındaki azalma, 25° helis açısına sahip olan kesici takımdan daha büyüktür. Aslında burada elde edilen sonuç kenar aşınması ile elde edilen sonuç ile de benzerlik göstermektedir. Çünkü belirli bir değere kadar artan helis açısı her ne kadar temas uzunluğunu artırıp takım ömrünü artırsa da belirli bir değer sonrasında artan helis açısı kesici kenarın kesme mukavemetini yani kesmeye karşı gösterdiği direncin azalmasına neden olmaktadır. Özellikle 35°'nin üzerindeki helis açılarında kesici kenarın kesmeye karşı gösterdiği direncin azalmasına bu da takım çapının daha da küçülmesine, takım ömrünün azalmasına sebep olmuştur.

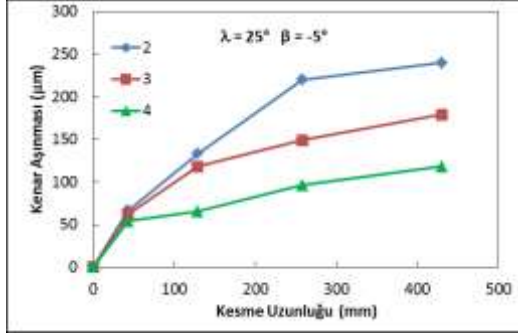
Şekil 4.21'de aşınma deneyleri sonrasında her üç helis açısına sahip olan kesici takımın SEM fotoğrafları verilmiştir. Helis açısının 25° ile helis açısının 35° olduğu takımlar birbiriyle kıyaslanacak olursa 35° helis açısına sahip kesici takımda kenar aşınmasının ve çap küçülmesinin daha net olarak ortaya çıktığını görmek mümkündür. 45° için elde edilen SEM fotoğrafında ise takımın alın yüzeyinden bakıldığında abrasiv aşınmanın daha büyük bir alanda etkili olduğunu bununla birlikte kenar kısımlarında kırılma hasarlarının (chipping) meydana geldiği görülmektedir. Benzer kırılma hasarlarını da (chipping) hem 25° hem de 35° helis açılarında da görmekteyiz. 45° helis açısına sahip olan kesici takımda helis açısının artması, takım-talaş temas boyunu arttırdığından kesme esnasında talaşın takıma sıvanma riskini de artırmıştır. Alın yüzeyden çekilen SEM fotoğraflar incelendiğinde 45° helis açısına sahip olan kesici takımda ciddi bir talaş yapışmasının (BUE) olduğu da görülmektedir.



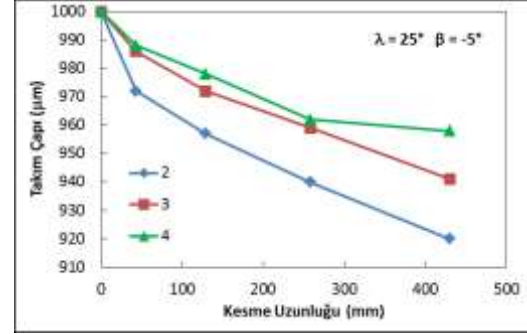
Şekil 4. 21 Üç farklı helis açısı için aşınma deneyleri sonucunda elde edilen SEM fotoğrafları.

Şekil 4.22a ve Şekil 4.22b’ de ise farklı ağız sayısına sahip olan kesici takımların kesme uzunluğuna bağlı olarak hem kenar aşınma değerleri hem de takım çapındaki değişim verilmiştir. Kesici takımda ağız sayısının artmasıyla birlikte aynı anda kesme yapan ağız sayısı da artacaktır. Örneğin 2 ağızlı bir kesici takımda ağızlar arasındaki açı 180° olacağı için ağzın biri kesme yaparken diğer ağız kesme yapmayacaktır. Oysa ağız sayısı 3 olduğunda her bir kesici ağız arasındaki açı 120° olacaktır. Dolayısıyla ağzın birisi kesme işlemini tamamlarken diğeri talaşa yeni giriş veya kesme işlemine yeni başlamış olacaktır. Ağız sayısı 4 olduğu durumda ise her bir kesici ağız arasında 90° ’ lik bir fark olacak ve bunun neticesinde aynı anda kesme yapan ağız sayısı artacaktır. Şekil 4.22a’ da ağız sayısının artması özellikle ağızlarda meydana gelen kenar aşınmasını olumlu etkilemiş dolayısıyla ağız sayısının artmasıyla birlikte her bir kenarda meydana gelen kenar aşınması da azalmıştır. Benzer bir durumu Şekil 4.22b’de takım çapındaki değişimde de görmek mümkündür. 2 ağızlı kesici takımda takım çapının % 8 azaldığı, 3 ağızlıda % 6 ve 4 ağızlı kesici takımda ise % 4 oranında azalma elde edilmiştir. Şekil 4.22b’ den elde edilen sonuçlara göre değerlendirme yapıldığında mikro işlemede kesici takıma ait ağız sayısının artması takım ömrü açısından olumlu bir sonuç

oluşturmaktadır. Özellikle de ağız sayısının 3 veya daha fazla olması takım çapındaki değişimin % 5 azalmasına neden olmuştur.



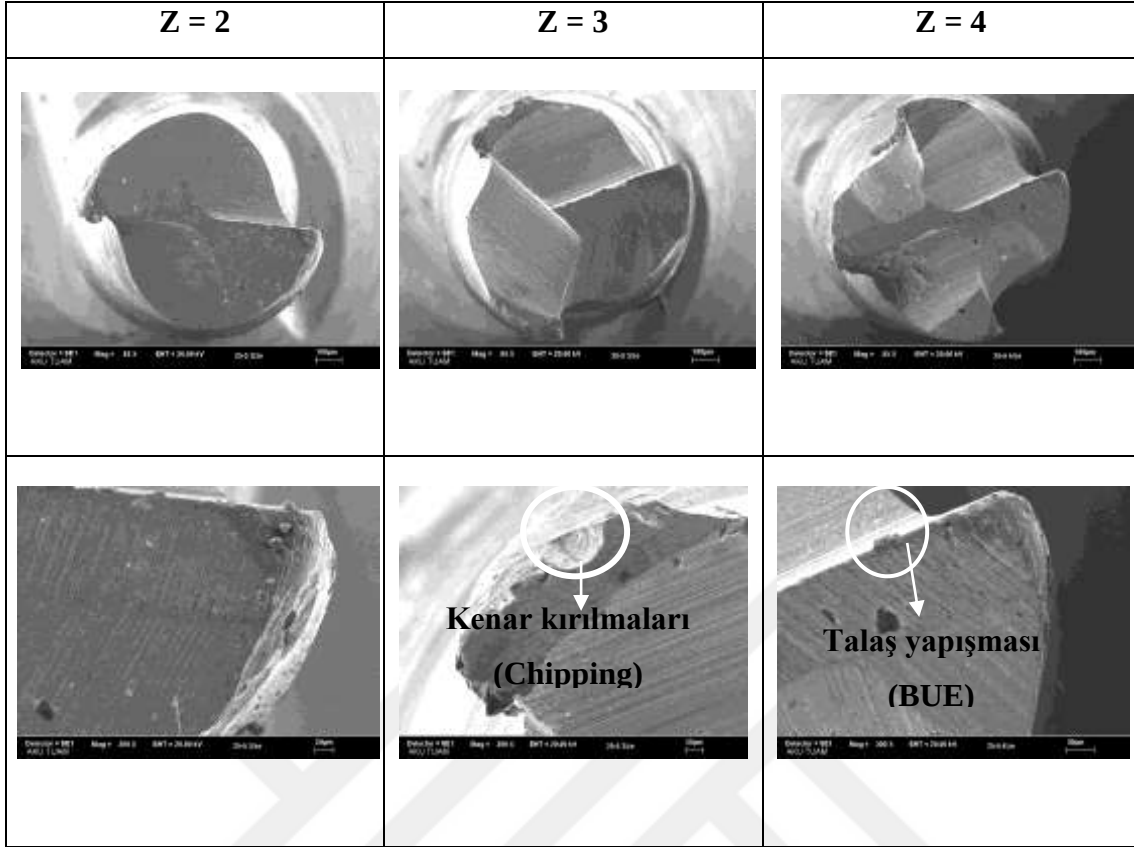
a)



b)

Şekil 4.22 a) Kenar aşınma ve b) takım çapı değişimlerinin ağız sayısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

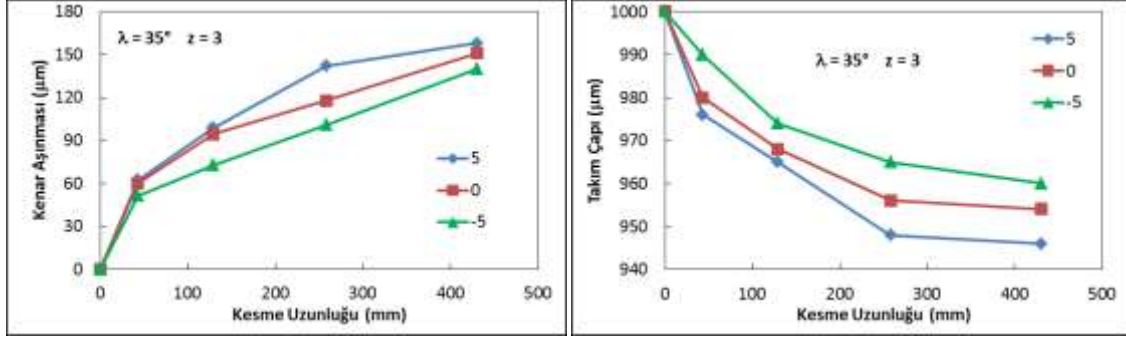
Şekil 4.23’ de farklı ağız sayısına sahip olan kesici takımlar için aşınma deneyleri sonrasında alınan SEM fotoğrafları verilmiştir. Özellikle 2 ağızlı kesici takımında elde edilen abrasif aşınmaya (kenar aşınması) bakıldığında aşınma bölgesinin daha büyük bir alanda etkili olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 3 ve 4 ağızlı kesici takımlarda meydana gelen abrasif aşınma daha küçük düzeylerde gerçekleştirilmiştir. Ağız sayısının artmasıyla kenar aşınması her ne kadar azalmış olsa da takıma yapışan talaş miktarının da arttığını söylemek mümkündür. Örneğin 2 ağızlı kesici takımında talaş yapışması minimum düzeyde iken 4 ağızlı kesici takımında talaş yapışmasının daha yoğun bir şekilde gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Kenar kırılmaları ise (chipping), tüm kesici ağız sayılarında gözlemlenmiş olup 3 ağızlı kesici takımında daha net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.23 Üç farklı ağız sayısına sahip olan kesici takımlardaki aşınma deneyleri sonucunda alınan SEM fotoğrafları.

Şekil 4.24a ve Şekil 4.24b’ de farklı eksenel talaş açısına sahip kesici takımların kesme uzunluğuna bağlı olarak kenar aşınması ve takım çapındaki değişim değerleri verilmektedir. Şekil 4.24, 4.22 ve 4.20 birlikte değerlendirilecek olursa eksenel talaş açısının takım aşınması üzerindeki etkisinin daha az olduğu görülmektedir. Çünkü gerek ağız sayısı gerekse helis açısının değişimine bağlı olarak takımlarda meydana gelen kenar aşınması 300 μm . yi bulurken ve takım çapındaki küçülme 100 μm . ye ulaşırken eksenel talaş aşınmasının değişmesiyle bu değer, kenar aşınmasında 150 μm . civarında, takım çapındaki değişim de ise 50 μm . civarında kalmıştır. Buna bağlı olarak eksenel talaş açısının negatiften pozitifte doğru değişmesinin kenar aşınmasının artmasına aynı zamanda takım çapının da küçülmesine neden olduğu görülmektedir. Fakat -5° ile 5° arasındaki bu farkın çok da önemli olmadığını hem kenar aşınması grafiğinde hem de takım çapı grafiğinde görmek mümkündür. Genel bir değerlendirme yapıldığında negatif talaş açısı, kesici takıma ait kenarın kesmeye karşı göstermiş olduğu direncin yani kesme dayanımının artmasına katkıda bulunmuş bu da takım ömrünü olumlu yönde

etkilemiştir. Dolayısıyla hem kenar aşınması hem de takım çapındaki küçülme de minimum düzeyde kalmıştır.

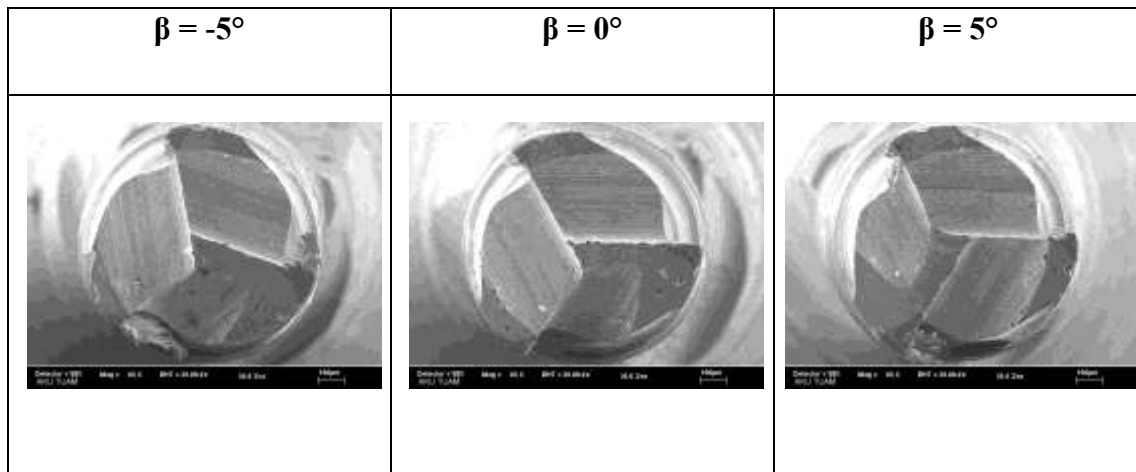


a)

b)

Şekil 4.24 a) Kenar aşınma ve b) takım çapı değişimlerinin eksenel talaş açısına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

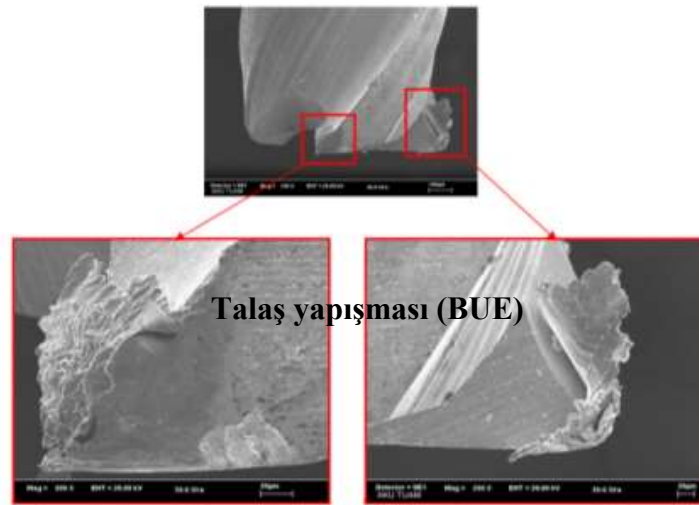
Şekil 4.25' de ise farklı eksenel talaş açısına sahip olan kesici takımlar için aşınma deneyleri sonrasında elde edilen SEM fotoğrafları verilmiştir. Özellikle -5° eksenel talaş açısına sahip olan kesici takımın iki ağzında da ciddi bir talaş yapışmasının olduğu net olarak görülmektedir. Aynı zamanda benzer talaş yapışmasına 5° lik eksenel talaş açısına sahip olan kesici takımda da rastlanmıştır. Buna karşın 0° eksenel talaş açısına sahip olan kesici takımda talaş yapışması minimum düzeyde gerçekleşmiştir.



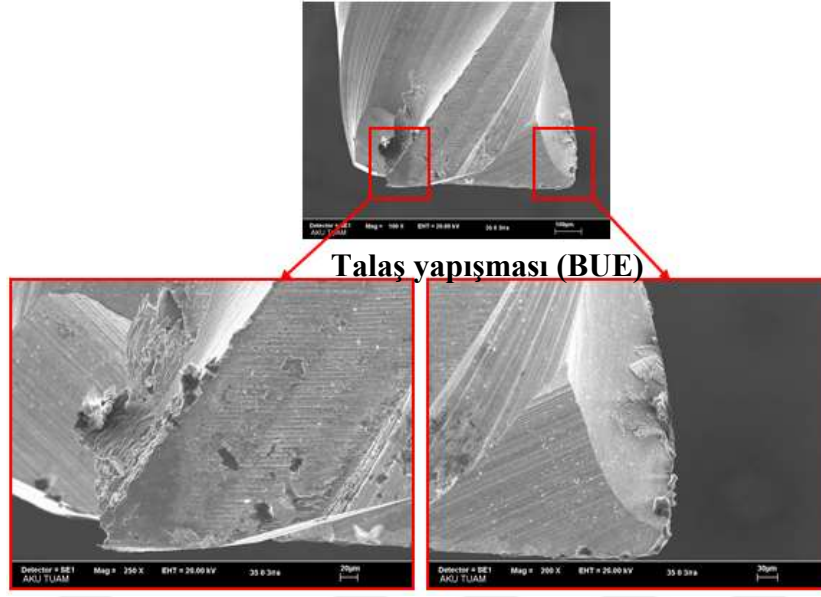
Şekil 4.25 Üç farklı eksenel talaş açısına sahip olan kesici takımlar için aşınma deneyleri sonucunda elde edilen SEM fotoğrafları.

4.4.2 Talaş Yapışması

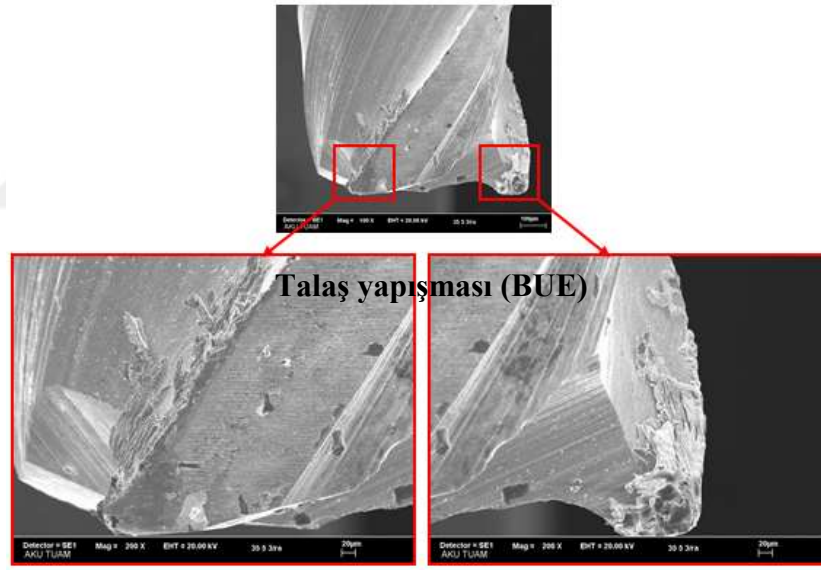
Literatürden de bilindiği üzere, Nikel bazlı alaşımların kesilmesi sırasında karşılaşılan en önemli hasar mekanizmaların başında adhesiv aşınma gelmektedir. Nikel bazlı alaşımların gerek mekanik ve gerekse termal özellikleri nedeniyle takıma yapışması kaçınılmaz hale gelebilmektedir. Bu durum hem geleneksel hem de mikro frezeleme işlemlerinde ortak bir olgudur [Ucun, 2013]. Takım geometrisi açısından bakıldığında talaş yapışmasına zemin hazırlayan unsur ise talaş açısıdır. Bu açı, frezeleme takımlarında eksenel ve radyal talaş açısı olmak üzere iki farklı şekilde oluşur. Bu çalışmada özellikle talaşın helisel kanal boyunca kesme bölgesinden uzaklaşmasında etkili olan eksenel talaş açısı dikkate alınmıştır. Şekil 4.26 a,b ve c' de farklı eksenel talaş açısına sahip kesici takımlara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Eksenel talaş açının sıfır veya pozitif olması durumunda takıma yapışan talaş miktarının da azaldığı net olarak görülmektedir. (Şekil 4.26b ve Şekil 4.26c) Eksenel talaş açısının sıfır veya pozitif olması durumunda talaş daha az deforme olmaya zorlanacaktır. Ayrıca talaşın helis kanalı boyunca tahliyesi de kolaylaşmaktadır. Bunun sonucu olarak talaşın takıma yapışma olasılığı da azalmaktadır. Bu durum, geleneksel talaş kaldırma işleminde negatif talaş açılı kesici takımda da gözlemlenmektedir. Negatif talaş açısına sahip kesici takımlarda talaş, takım yüzeyine daha fazla yapışmaktadır (BUE), (Şekil 4.26a).



a)



b)



c)

Şekil 4. 26 a) -5° eksenel talaş açısına sahip b) 0° eksenel talaş açısına ve c) 5° eksenel talaş açısına sahip mikro takımlarda meydana gelen talaş yapışmaları.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, İnconel 718 Nikel alaşımının mikro frezeleme işlemi sonucunda farklı takım geometrilerinin kesme kuvvetleri, takım aşınması, çapak boyutu, kanal geometrisi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen ve öne çıkan sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Helis açısının büyümesi kesme kuvveti değerlerinde küçük te olsa bir azalmaya neden olmaktadır. Fakat kesme mesafesinin artmasıyla birlikte, takımdaki çevresel ve eksenel aşınmaya bağlı olarak, kesme kuvvetleri, özellikle de Fz kuvvetinde artış görülmüştür.
- 30° nin üzerindeki helis açılarında takım aşınmasının artış gösterdiği ve maksimum takım aşınmasının 45° helis açısında meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin helis açısının artışı ile takım talaş temas boyunun artmasıdır. Bu da çevresel aşınmanın artmasına ve takım ömrünün kışalmasına neden olmaktadır. Bu durum geleneksel frezelemede elde edilen bulgularla da örtüşmektedir.
- Kesici takım kenar radüsünün büyümesi kesici takımın talaşa dalmasını zorlaştırmakta ve takımın kazınma hareketi etkisiyle de kesme kuvvetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla aşınma performansı açısından 25° helis açısının daha uygun olduğunu söylemek mümkündür.
- Artan kesme uzunluğuna bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Bunun nedeni ise takım kenar radüsünde meydana gelen abrasiv aşınmadır. Helis açısının 25° olduğu durumda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri minimum olarak elde edilmiştir.
- Ağız sayısının artışı, Fz kuvvetinde azalmaya neden olurken, ilerleme yönündeki Fy kuvvetinin de artmasına neden olmaktadır. Bunun nedeni ise abrasiv aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak, kesici takım kenar radüsünün büyümesidir.

Böylece takım kesme kabiliyetini yitirmekte ve iş parçasına dalması zorlaşmaktadır. Bu da ilerleme yönündeki kuvvetin artmasına neden olmaktadır. Diğer bir neden ise; birim zamanda kesme yapan ağız sayısının daha fazla olmasıdır.

- Ağız sayısının artışı ile kenar aşınmaları ve takım çap değişimi azalmaktadır. Bunun sebebi de birim zamanda kesme yapan ağız sayısının artmasıdır. Bir anlamda kaldırılacak toplam talaş kesitinin daha fazla kesici ağız tarafından paylaşılması, aşınmayı azaltmaktadır.
- Ağız sayısının artışı da yüzey pürüzlülüğünü kısmen etkilemiş olup, özellikle 2 ve 4 ağızlı kesici takımda ortalama yüzey pürüzlülüğünün minimum olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın ağız sayısının 3 olduğu durumda ise ortalama yüzey pürüzlülüğünün bir miktar daha büyük olduğu ve artan kesme mesafesiyle de daha çok etkilendiği tespit edilmiştir.
- Mikro frezeleme işleminde eksenel talaş açısı literatürde çok dikkate alınmayan bir geometrik parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapmış olduğumuz çalışmada eksenel talaş açısının artışı, kesme kuvvetlerini kısmen etkilemektedir. Kesme mesafesinin artışı ile birlikte F_x ve F_z kuvvetlerinin artmadan sabit bir eğilim gösterdiği tespit edilmiştir.
- Eksenel talaş açısının negatiften pozitif doğru değişimi hem kenar aşınmasının artmasına hem de takım çapının küçülmesine neden olmaktadır. Bu noktadan hareketle eksenel talaş açısının -5° seçilmesi takım ömrünü olumlu yönde etkilemiştir.
- Eksenel talaş açısının -5° olduğu durumda elde edilen yüzey kalitesinin daha iyi olduğu söylenebilir.

- Genel olarak kesici takımlardaki aşınma mekanizması abrasiv aşınmadır. Ayrıca kesici takımın kesici uç ve kenar bölgelerinde kenar kırılmalarının meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Kesici takım çapında meydana gelen çevresel aşınma ve eksenel aşınma, kesici takım kenar radüsünün kesme zamanı boyunca belirli aralıklarla değişmesi aynı ve zıt yönlü kesme bölgelerinde elde edilen çapak genişliklerinin de değişmesine neden olmaktadır. Helis açısının 35° , ağız sayısının 2 ve eksenel talaş açısının 0° olduğu durumda ortalama çapak genişliği minimum olarak gerçekleşmiştir.
- Abrasiv aşınma sonucu, takım çapındaki küçülme ve takım kenar radüsündeki artış, iş parçası kanal geometrisinin de değişmesine neden olmaktadır. Takım çapındaki azalma kanal genişliğinin azalmasına ve kenar radüsünün artışı da kanal kenar radüsünün artmasına neden olmaktadır. Kesme mesafesinin artmasına bağlı olarak kesici takımda eksenel aşınma meydana gelmektedir. Bu da takımın kenar radüsünün tekrar küçülmesine ve işlenen kanalın kenar radüsünün de küçülmesine neden olmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Alting, L., Kimura, F., Hansen, H.N., Bissacco, G. (2003). Micro Engineering. *Annals of CIRP, Manufacturing Technology*, **52(2)**: 635-657.
- Aramcharoen, A. and Mativenga, P.T. (2008). Tool Wear Modes in Micro/Meso Scale Milling of Hardened Die Steel. 3rd Cirp International Conference High Performance Cutting, 12-13 June, Dublin, Ireland, 179-188.
- Aramcharoen, A. and Mativenga, P.T. (2009). Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, **33(4)**: 402-407.
- 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.
- Aslantaş, K., Hopa, H.E., Percin, M., Uçun, İ., Çiçek, A. (2016b). Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Precision Engineering*, **63(38)**: 12
- Babin, T.S., Sutherland, J.W. and Kapoor, S.G. (1986). On The Geometry of end milled surfaces. SME Manufacturing Technology Review, 14 th MAMRC North American Manufacturing Research Conference Proceedings.
- 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.
- Bajpai V, Kushwaha A.K., Singh R.K. (2013). Burr Formation and Surface Quality in High Speed Micro milling of Titanium Alloy (Ti6Al4V). ASME .International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2:Systems; Micro and Nano Technologies, Sustainable Manufacturing, V002T03A017, Doi:10.1115/MSEC201-1216.
- Bissacco, G., Hansen, H.N., De Chiffre, L. (2006). Size effect on surface generation in

micro milling of hardened tool steel. *Annals of the CIRP*, **55(1)**: 593-596.

Brousseau, E.B., Dimov, S.S., Pham, D.T. (2010). Some recent advances in multimaterial 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. *Machine Tools & Manufacture*, **46**: 313–332.

Cheng, X., Wang,Z., Nakamoto,K., Yamazaki K. (2011). A study on the micro tooling for micro/nano milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **53**: 523–533.

Camara, M.A., Campos Rubio, J.C., Abrao, A.M. and Davim, J.P. (2012). State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. *Journal Material Science and Technology*, **28(8)**: 673-685.

Chen, C.H., Wang, Y.C., Lee, B.Y. (2013). The Effect of Surface Roughness of End-Mills on Optimal Cutting Performance for High-Speed Machining **59(2)**: 124-134.

Datta, M., Shenoy, R.V., Romankiw, L.T. (1996). Recent Advances in the study of Electrochemical Micromachining, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, **118(1)**: 29-36.

Dudzinski, D., Devillez, A., Moufki, A., Larrouquere, D., Zerrouki, V., Vigneau, J. (2004). A Review of Developments Towards Dry and High Speed Machining of Inconel 718 Alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**: 439-456.

Dubey, A. K. and Yadava, V. (2008). Laser Beam Machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **48**: 609-628.

Dhanorker, A. and Özel, T. (2008). Meso/ Micro Scale Milling for Micro-Manufacturing. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, **1(1)**: 23-42.

- Ducobu, F., Filippi, E., Riviere-Larphevre, E. (2009). Chip Formation in Micro Milling. Proceedings of the 8th.National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Brussels, Belgium, May 28-29.
- Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., Okeke, C.J. (1999). Tool Life and Surface Finish When Machining Inconel 718 with PVD and CVD Coated Tools. *Tribology Transaction*, **42(2)**: 353-360.
- Fang, F.Z., Wu, H., Liu, X.D., Liu, Y.C. and Ng, S.T. (2003). Tool Geometry Study in Micromachining. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **13**: 726-731.
- Friedrich, C.R. and Kulkarni, V.P. (2004). Effect of Workpiece Springback on Micromilling Forces. *Microsystem Technologies*, **10**: 472-477.
- 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. and Özdoğanlar, O.B. (2007). An Experimental Investigation of Micro Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro end Mill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47**: 1088-1100.
- Fontaine , M., Devillez, A., Dudzinski, D. (2007). Analytical Simulation of Milling : Influence of Tool Design on Cutting Forces. 12 th IF To MM Wold Congress, Besancon (France), June 18-21.
- Fleischer, J., Deuchert M., Ruhs, C., Kühlewein C., Halvadjisky G., Schmidt, C. (2008). Design and Manufacturing of Micro milling tools. *Microsystem Technologies*, **14(9)**: 1771-1775.
- Heamawatanachai, S. and Bamberg, E. (2009). Design and Characterization of a PZT Driven Micromachining Tool Based on Single-Point Tool Tip Geometry. *Precision Engineering*, **33**: 387-394.
- Ikawa, N., Donaldson, R.R., Kormanduri, R., König, W., Aachen, T.H., Mckeown,

- P.A., Moriwaki, T., Stowers, I.F. (1991). Ultraprecision Metal Cutting the Past, The Present and The Future, *Annals of CIRP*, **40(2)**: 587-594.
- Ikawa, N., Shimada, S. and Tanaka, H. (1992). Minimum chip thickness of cut in micromachining, *Nanotechnology*, **3(1)**: 6-9.
- Imani, M., Sadeghi, M.H., Nasrabadi, M.K. (2008). Effects of Helix Angle Variations on Stability of Low Immersion Milling. *IUST International Journal of Engineering Science*, **19(5-1)**: 115-122.
- Jackson, M.J., Robinson, G.M., Ahmed, W. (2006). Micromachining selected metals using diamond coated cutting tools. *International Journal of Nanomanufacturing*, **1**: 304-317.
- Kaplan, H. ve Dölen, M. (2003). Mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS), Üretim teknikleri. 11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Ankara, 4-6 Eylül.
- Kang, I.S., Kim, J.S., Kim, J.H., Kang, M.C., Seo, Y.W. (2007). A Mechanistic Model of Cutting Force in the Micro End Milling Process. *Journal of Materials Processing Technology*, **187–188**: 250-255.
- Kanlı, M. (2014). Modelling of Cutting Forces in Micro Milling Including Run-out. M. Sc. Thesis, Bilkent University, Mechanical Engineering, Ankara.
- 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
- Lee, K. and Dornfeld, D.A. (2004). A Study of Surface Roughness in the Micro-End-Milling Process. Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability University of California, Berkeley, 31 Mayıs.
- Li, X. and Guan, X.P. (2004). Time Frequency Analysis Based Minor Cutting Edge Fracture Detection During End Milling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**: 1485-1496.

- Lee, K., Dornfeld, D.A. (2005). Micro-Burr Formation and Minimization Through Process Control. *Precision Engineering*, **29**: 246-252.
- Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. (2006). An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **128**: 474-481.
- Li, C., Lai, X., Li, J.N. (2007). Modeling of Three-Dimensional Cutting Forces in Micro-End-Milling. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **17**: 671-678.
- Li, H., Lai, X., Li, C., Feng, J., Ni, J. (2008). Modelling and experimental Analysis of the effects of tool wear, Minimum Chip Thickness and Micro Tool Geometry on the Surface Roughness in Micro end Milling, *Journal of Micromechanical and Microengineering*. **18(2)**: 1-12.
- Li, P. (2009). Micromilling of Hardened Tool Steels. Technical University of Delft, PhD Thesis, 160p, Delft.
- Masuzawa, T. (2000). State of the Art of Micromachining. *Annals of CIRP*, **49(2)**: 473–488.
- Madou, M.J. (2011). Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology Volume III from MEMS to Bio MEMS and Bio-NEMS. Manufacturing Techniques and Applications. CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN 9781420055160, Boca Raton, London, Newyork.
- Mativenga, P.T., Aramcharoen, A., Huo, D. (2013). Micro Tooling Design and Manufacturing. Micro-Cutting: Fundamentals and Applications, First Edition, pages 46, John Willey & Sons, Ltd.
- Onikura, H., Ohnishi, O., Take, Y. (2000). Fabrication of Micro Carbide Tools by Ultrasonic Vibration Grinding. *CIRP Annals of Manufacturing Technology*, **49(1)**: 257-260.

- Okazaki, Y., Mishima, N., Ashida, K. (2004). Microfactory-Concept, History, and Developments. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126**: 837-844.
- Rahman, M., Senthil Kumar, A., Prakash, J.R.S. (2001). Micro-Milling of Pure Copper. *Journal of Materials Processing Technology*, **116**: 39-43.
- Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmori, G., Uchikoshi, J. (1993). Molecular Dynamics Analysis of Cutting Force and Chip Formation Process in Micro cutting. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **59(12)**: 2015–2021.
- 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.
- Swain, N., Venkatesh, V., Kumar, P., Sinivas, G., Ravishankar, S., Barshilla, H.C. (2016). An Experimental investigation on the machining characteristics of Nimonic 75 using uncoated and TiAlN coated tungsten carbide micro-end mills. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Doi: 10.1016/j.cirpj.2016.07.005.
- Saedon, J., Norrdin, N.A., Yahaya, M.A., Kasim, M.S., Mohamad Nor, N. (2016). Investigation of Cutting Edge Radius Effect in Macro-machining and Micro-machining. In: Yacob N.A., Mohamed M., Hanafiah, M.A.K.M. (2014). Regional Conference on Science, Technology and Social Sciences, Singapore.
- Saptaji, K., Subbiah, S., Dhupia, J.S. (2012). Effect of side edge angle and effective rake angle on top burs in micro-milling. *Precision Engineering*, **36(3)**: 444-450.
- Tönshoff, H.K., Wulfsberg, J.P., Kals, H.J.J., König, W., Luttermann, C.A. (1988). Developments and trends in monitoring and control of machining process. *CIRP Annals of Manufacturing Technology*, **37(2)**: 611-622.
- Tansel, I.N., Rodriguez, O., Trujillo, M., Paz, E., Li, W. (1998). Micro-End-Milling I. Wear and breakage. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,

38: 1419–1436.

Tanaka, M. (2001). Development of Desktop Machining Microfactory. *Riken Review*, **34:** 46-49.

Ulutan, D. and Özel, T. (2011). Machining Induced Surface Integrity in Titanium and Nickel Alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **51(3):** 250-280.

Ucun, İ. (2013). İnconel 718 Malzemesinin Mikro işlenebilirliği ve Kaplama malzemesinin Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta.

Weule, H., Huntrup, V., Tritschle, H. (2001). Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization. *Annals of the CIRP*, **50(1):** 61-64.

Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G. (2004). On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro End milling Part I: Surface generation. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126:** 685-694.

Wang, C.Y., Xie, Y.X., Qin, Z., Lin, H.S., Yuan, Y.H., Wang, Q.M. (2015). Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel, **336-337:** 29–42

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(3):** 235-262.

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.

Yuan, Z.J., Zhou, M., Dong, S. (1996). Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultra Precision Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **62(4):** 327–330.

Zilong, P., Yonghong, L., Yinan, L., Yiyao, Z. and Liping, W. (2014). Design of a Magnetic Field Generator for Compression Plasma Discharge Channel of Micro EDM Deposition. *International Journal of Control and Automation*, **6,7**: 339-350.

6.1 İnternet Kaynakları

- 1-<http://novelmech.com/2016/05/electrochemical-machining.html>, 05.02.2017
- 2-<http://www.pmt.now.com>, 03.04.2017
- 3- <http://cameronmicrodrillpress.com>, 03.04.2017
- 4-<https://www.kugler-precision.com/index.php?micromaster--3-5X-EN>), 05.02.2017
- 5-<https://www.kern-microtechnik.com/en/machinetoolmanufacture/products/kernmicro>, 05.02.2017
- 6-<http://www.sodick.com/products/highspeedmilling/uh430l.htm>, 04.04.2017
- 7-<http://www.yenadent.com/machines/>, 04.04.2017
- 8-<http://www.kuyumcumakinalari.org/sayfalar.311.3eksen.html>, 04.04.2017
- 9-<http://mmc-permanent.learnways.com/courses/70/helix-angle.htm>, 07.04.2017
- 10-<http://mmc-permanent.learnways.com/courses/70/radial-rake-angle.html>, 07.04.2017
- 11-<http://mmc-permanent.learnways.com/courses/70/number-of-cutting-edges.html>, 07.04.2017
- 12-<http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>, 05.01.2017
- 13-<http://www.hartmetalluk.com/downloads/grades.pdf>, 05.01.2017

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Safiye Gülbin ÇELİK
Doğum Yeri ve Tarihi : Dinar / AFYONKARAHİSAR, 16.09.1979
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : celik.s.gulbin@gmail.com, Tel: 0 545 962 55 89,

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise : Sandıklı Lisesi-(1993-1996)
Lisans : Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, (2003)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2014-2017)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

Özbay Metal Endüstriyel Tasarım San. Tic. Ltd. Şti, Kalite Kontrol Mühendisi, 2003-2006, İstanbul

Ekol Karasör San.Tic. Ltd. Şti, Araç Projelendirme Mühendisi, 2006-2010, Sandıklı

Huzur Doğalgaz , Doğalgaz Proje Mühendisi, 2011-2013, Burdur

Yayınları (SCI ve diğer) : Aslantaş, K., Çiçek, A., Çelik, S.G. (2017) Mikro işlemede Takım Aşınması – Kanal Geometrisi İlişkisi Üzerine Deneysel Bir Çalışma. Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, (Kabul Edildi).

Aslantaş, K., Çiçek, A., Çelik, S.G. (2017). Mikro Frezeleme işleminde Takım Geometrisinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Çapak Oluşumu Üzerindeki Etkisi. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknoloji Konferansı (IMSTEC 2017), Kapodokya (Kabul Edildi).

Aslantaş, K., Çiçek, A., Çelik, S.G. (2017) Inconel 718 Alaşımının Mikro Frezelenmesindeki Takım Geometrisinin Kesme Kuvveti ve Takım Aşınma Davranışı Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. International Conference on Advanced Materials and Manufacturing Technologies (ICAMT 17), Karabük (Kabul Edildi).

