

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN VE TAKIM
AŞINMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ersen HATİPOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAKKAL

EYLÜL 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN VE TAKIM
AŞINMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ersen HATİPOĞLU
503121306**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAKKAL
Eş Danışman: Prof. Dr. Erhan BUDAK**

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121306 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ersen HATİPOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN VE TAKIM AŞINMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mustafa BAKKAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof.Dr. Erhan BUDAK**
Sabancı Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ramazan Murat TABANLI
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 26 Ağustos 2015
Savunma Tarihi : 18 Eylül 2015

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında desteklerini ve rehberliklerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Erhan Budak ve Doç. Dr. Mustafa Bakkal'a, çalıştığım süre boyunca evim gibi olan Sabancı Üniversitesi Üretim Araştırma Laboratuvarı'nın bana sayısız yardımlar eden değerli ailesine, bugünlere gelmemin mimarları ve her daim en büyük destekçilerim olan annem Gülsüm Hatipoğlu, babam Fahri Hatipoğlu ve abim Sinan Hatipoğlu'na, bana desteklerini, sevgilerini eksik etmeyen değerli dostlarıma ve hayatıma anlam katan, mutluluk kaynağım Melis Yiğit'e sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2015

Ersen Hatipoğlu
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	25
1.1 Tezin Amacı	25
1.2 Literatür Araştırması	26
2. MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ	31
2.1 Amaç	31
2.2 1 mm Çapındaki Mikro Frezeleme Takımı ile Gerçekleştirilen Yüzey Oluşumu Deneyleri	32
2.2.1 Deney tasarımı	32
2.2.2 6061 Alüminyum malzemedeki gerçekleştirilen mikro frezelemede deneyi	34
2.2.3 15-5 PH Paslanmaz çelik malzemenin mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi	40
2.2.4 Ti6Al4V Titanyum malzemenin mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi	44
2.2.5 1 mm Çapındaki kesici takım ile gerçekleştirilen yüzey oluşumu deneylerinin sonuçları	47
2.3 0,5 mm Çapındaki Mikro Frezeleme Takımı ile Gerçekleştirilen Yüzey Oluşumu Deneyleri	47
2.3.1 Deney tasarımı	51
2.3.2 Ti6Al4V Titanyum malzemenin 0,5 mm çapındaki takım ile mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi	53
2.3.3 15-5 PH Paslanmaz çelik malzemenin 0,5 mm çapındaki takım ile mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi	55
2.3.4 0,5 mm Çapındaki kesici takım ile gerçekleştirilen deney sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi	57
2.4 Sonuçlar ve Değerlendirmeler	59
3. MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ	61
3.1 Amaç	62
3.2 Taban Yüzey Oluşumu Modeli	63
3.3 Geliştirilen Yüzey Modelinin Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması	69
3.4 Sonuçlar ve Değerlendirmeler	73

4. MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE TAKIM AŞINMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ	75
4.1 Amaç.....	75
4.2 Deney Tasarımı	76
4.3 Takım Aşınması Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi..	78
4.4 Sonuçlar ve Değerlendirmeler	84
5. SONUÇLAR	87
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

BUE	: Built up edge (Yığıntı Talaş Oluşumu)
CAM	: Computer aided manufacturing (Bilgisayar destekli imalat)
DLC	: Diamond like carbon (Elmas benzeri karbon)
AlTiN	: Alüminyum titanyum nitrür
ZrN	: Zirkonyum nitrür
HRC	: Rockwell C sertlik birimi

SEMBOLLER

f_t	: Diş Başına İlerleme
t_c	: Minimum talaş kalınlığı
r_c	: Takım köşe radyusu
d_0	: Kesici takım ilk çapı
d_i	: Operasyon sonrası kesici takım çapı
d/d	: Devir/dakika
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü, aritmetik ortalama sapma
Rt	: Ölçülen yüzey boyunca maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamı
Rz	: Ölçülen yüzeyde 5 adet en yüksek ve 5 adet en alçak noktanın ortalaması
L	: Yüzeydeki kalıntı malzemenin maksimum yüksekliği
nf_t	: Talaş oluşumunun gerçekleştiği ilerleme periyodu
α	: Kesici takım köşesi için minimum talaş kalınlığı sınır açısı
β	: Takım taban yüzeyi açısı
γ	: Kesici takım alt yüzeyi için minimum talaş kalınlığı sınır açısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Alüminyum malzemede gerçekleştirilen mikro frezeleme deneyinin kesme parametreleri.	34
Çizelge 2.2 : Paslanmaz çelik malzemede gerçekleştirilen mikro frezeleme deneyinin kesme parametreleri.	40
Çizelge 2.3 : Titanyum malzemede gerçekleştirilen mikro frezeleme deneyinin kesme parametreleri.	44
Çizelge 2.4 : 0,5 mm çaptaki mikro freze takımı ile gerçekleştirilen deneyler için kesme parametreleri.	51
Çizelge 2.5 : 0,5 mm çaptaki mikro freze takımı ile gerçekleştirilen deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.	52
Çizelge 3.1 : Kesme parametreleri.....	69
Çizelge 4.1 : Kesme parametreleri.....	76
Çizelge 4.2 : Kaplama malzemelerinin özellikleri.	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Mikro kesme işleminde talaş oluşumu [5].	27
Şekil 1.2 : Frezelemede talaş kalınlığının değişimi [6].	28
Şekil 1.3 : Mikro frezeleme işleminde oluşan yan yüzey profili [7].	28
Şekil 2.1 : 1 mm çapındaki mikro freze takımının kesici kenar yarıçapı ölçümü.	32
Şekil 2.2 : a) Kesme operasyonunun CAM programı görüntüsü, b) Kern Evo mikro frezeleme tezgahı.	33
Şekil 2.3 : Nanofocus ile alınmış yüzey görüntüsü ve yüzey pürüzlülüğü analizi. ...	34
Şekil 2.4 : 20 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	35
Şekil 2.5 : 60 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	35
Şekil 2.6 : 100 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	35
Şekil 2.7 : 20 µm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.	37
Şekil 2.8 : Kesme derinliğinin 60 µm'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.	38
Şekil 2.9 : 100 µm kesme derinliğinde oluşan aşırı çapaklanma görüntüleri.	38
Şekil 2.10 : 20 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	41
Şekil 2.11 : 50 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	41
Şekil 2.12 : 5000 d/d, 20 µm kesme derinliğinde sırasıyla 2,4,8, ve 10 µm ilerleme değerlerinde işlenen kanalların taban yüzey görüntüleri.	42
Şekil 2.13 : 20 µm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.	43
Şekil 2.14 : Kesme derinliğinin 50 µm'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.	43
Şekil 2.15 : 20 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	44
Şekil 2.16 : 50 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	45
Şekil 2.17 : 5000 d/d, 20 µm kesme derinliğinde sırasıyla 2, 4, 8 ve 10 µm ilerleme değerlerinde açılan kanalların taban yüzey görüntüleri.	45
Şekil 2.18 : 20 µm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.	46
Şekil 2.19 : Kesme derinliğinin 50 µm'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.	46
Şekil 2.20 : 0,5 mm çapındaki mikro frezeleme takımının ön ve yan mikroskop görüntüleri ve takım ölçümleri.	48
Şekil 2.21 : Mikro frezelemede kesme sürecinde yan yüzeyin oluşumu.	49
Şekil 2.22 : Mikro frezeleme işleminde taban yüzeyi oluşumu.	50
Şekil 2.23 : İlerleme yönünde oluşan kuvvetin etkisi ile takımın bükülmesi.	51
Şekil 2.24 : 5 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	53
Şekil 2.25 : 15 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	53
Şekil 2.26 : 5 µm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.	54
Şekil 2.27 : Kesme derinliğinin 15 µm'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.	54

Şekil 2.28 : 5 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	55
Şekil 2.29 : 15 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.	55
Şekil 2.30 : 5 µm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.	56
Şekil 2.31 : Kesme derinliğinin 15 µm'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.	56
Şekil 3.1 : 0,5 mm Çapındaki Kesici Takımın Köşe ve Taban Profilinin Mikroskop Görüntüsü.	63
Şekil 3.2 : Kesici takım geometrisinin matematiksel ifadesi.	63
Şekil 3.3 : Takımın kesme sürecinde malzeme ile etkileşimi.	64
Şekil 3.4 : Minimum talaş kalınlığı sınırı ve açısı.	65
Şekil 3.5 : Model ile oluşturulan yüzey profili.	66
Şekil 3.6 : Dış başına ilerleme değerinin minimum talaş kalınlığı değerinden küçük olduğu kesme süreci.	67
Şekil 3.7 : Dış başına ilerlemenin takım köşe radyusu sınırlarından büyük olduğu kesme süreci.	68
Şekil 3.8 : Takımın kesici kenar radyusunun ölçülmesi.	69
Şekil 3.9 : Takımın köşe radyusunun ölçülmesi.	70
Şekil 3.10 : Taban alt kesici kenar açısının ölçülmesi.	70
Şekil 3.11 : Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri Ra.	71
Şekil 3.12 : Geliştirilen model ile oluşturulan yüzey profilleri (Yukarıdan aşağıya; 0,5 µm, 1,5 µm ve 2,5 µm dış başına ilerleme).	71
Şekil 3.13 : Yüzey pürüzlülüğü Ra değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.	72
Şekil 3.14 : Yüzey pürüzlülüğü Rz değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.	72
Şekil 4.1 : Kesici kenar radyusunun ölçülmesi.	77
Şekil 4.2 : Takım çapının ölçülmesi.	78
Şekil 4.3 : Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi.	79
Şekil 4.4 : Takım aşınması grafikleri.	80
Şekil 4.5 : 3 µm ilerleme değerinde gerçekleştirilen kesme operasyonlarında soldan sağa doğru, kullanılmamış, 16. ve 32. Operasyon sonu takım görüntüleri (Üstte AlTiN, altta ZrN kaplamalı takım).	81
Şekil 4.6 : ZrN kaplamalı takımlarda krater aşınmasının meydana gelmesi (Sol 1 µm dış başına ilerleme, sağ 3 µm dış başına ilerleme).	82
Şekil 4.7 : 5 µm ilerleme değerindeki operasyonlarda meydana gelen takım kırılması (Sol, AlTiN; sağ, ZrN kaplamalı takım).	82
Şekil 4.8 : Kesme kuvveti değişim grafikleri.	83
Şekil 4.9 : Yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri.	84

MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN VE TAKIM AŞINMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, mikro imalat yöntemlerine duyulan gereksinim de artmıştır. Minyatür cihaz ve makine elemanlarının kullanımının yaygınlaşması, bu ekipmaları üretiminde kullanılacak mikro imalat tekniklerinin gelişmesine ve kullanım alanlarının artmasına sebep olmuştur. Uzun ve havacılık, biomedikal, elektronik ve savunma gibi ileri teknoloji uygulama alanları mikro imalat yöntemlerine en çok ihtiyaç duyulan sektörler olarak göze çarpmaktadır.

Mikro talaşlı imalat, geniş malzeme yelpazesinde, hızlı, ekonomik, yüksek boyutsal ve geometrik toleranslarda, 3 boyutlu imalata imkan vermesi gibi özellikleri bakımından büyük önem taşımaktadır. Mikro talaşlı imalat yöntemlerinin getirdiği avantajlar, mikro imalat yöntemleri arasında çok önemli bir yer tutmasına neden olmaktadır. Boyutların önemli ölçüde küçülmesi, mikro talaşlı imalat yöntemlerinin geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla farklı karakteristik özellikler taşımasına neden olmaktadır. Bu farklı karakteristik özelliklerin belirlenmesi ve incelenmesi hususunda, mikro talaşlı imalat işlemleri ile ilgili çalışmalar yapılmakta, süreç temelleri incelenmekte ve süreç modelleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda, mikro frezeleme işleminde, yüzey oluşumunun ve takım aşınmasının deneysel incelemesi gerçekleştirilmiş, temellerinin anlaşılması ve geleneksel frezeleme işlemlerinden farklılıklarının belirlenmesi doğrultusunda, prosese etkiyen parametreler belirlenerek süreçteki etkilerinin incelenmesi yönünde çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, tez çalışmasının ilk bölümlerinde, mikro frezeleme işleminde, farklı malzeme, takım, kesme şartları ve kesme parametrelerinde deneyler gerçekleştirilerek, bahsedilen değişkenler ile proses çıktıları arasında ilişki kurularak incelenmiş, mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumuna etkiyen temel mekanizmalar araştırılmıştır. Bu çalışmalar ile elde edilen kazanımlar ile yüzey oluşum modeli geliştirilmiş ve geliştirilen model deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, geliştirilen modelin yüzey oluşumunu yakın bir şekilde öngörebildiği görülmüştür. Sonrasında, mikro frezelemede takım aşınmasının incelenmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek mikro frezeleme işleminde takım aşınmasına etkiyen temel mekanizmalar ve faktörler incelenmiştir. Bu amaçla çeşitli takım tipleri ve farklı kesme parametrelerinde, belirlenen kesme şartlarında operasyonlar gerçekleştirilerek, takım aşınması, kesme kuvvetlerinin değişimi ve yüzey oluşumu karşılaştırmalı olarak incelenerek, takım aşınması incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalarla, mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun ve takım aşınmasının temelleri ve karakteristik özellikleri belirlenmiş ve elde edilen bulgular ve çıkarımlar son bölümde derlenerek özetlenmiştir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SURFACE GENERATION AND TOOL WEAR IN MICRO MILLING

SUMMARY

With the effect of technological developments, demand for the micro manufacturing processes increased substantially. The popularization of the miniature devices and components gave rise to the improvement and widespread use of micro manufacturing methods that could be utilized in the process of manufacturing these equipments. Leading-edge technology industries such as aerospace, biomedical, electronics and defence systems stand out as the fields of application that need micro components produced by micro manufacturing processes to a considerable extent.

Micro milling is one of the most important manufacturing processes which enable fast and cost-effective manufacturing of 3D shaped micro parts with high geometrical and dimensional accuracy and wide range of materials. The advantages provided by micromachining processes enable it to occupy an important position among micro manufacturing processes.

Due to the scaled down processes geometry, micro milling processes show major characteristic differences from conventional milling processes. Production of miniature parts requires small diameter cutting tools. When the tool diameter is reduced, uncut chip thickness values decrease. As a result of this, uncut chip thickness values become comparable with cutting edge radius value. This leads to high negative rake angle effect on cutting process. When the uncut chip thickness is smaller than cutting edge radius, chip formation may not occur due to elastic deformation of the work piece material. This phenomenon is called ploughing. When the uncut chip thickness is increased to a certain value, chip formation starts. This limit uncut chip thickness value is defined as minimum chip thickness. Ploughing and minimum chip thickness are fundamental principles of the micro milling process and have a serious effect on chip formation, surface generation and cutting forces.

With regard to the definition and inspection of these characteristic differences and process mechanism of micro milling, micro milling process fundamentals are investigated and process models are developed by researchers.

The aim of this study is to investigate the surface generation and tool wear in micro milling. In line with this objective, the parameters that act on processes and their effects are identified in order to understand the fundamentals and specify the differences compared to traditional milling operations. Within this scope, in the initial phases of the thesis study, experiments at various cutting parameters, workpiece materials, cutting conditions and process geometries are performed in micro milling. Basic mechanisms affecting surface generation in micro milling are investigated conducting a relative analysis of process outputs and aforementioned variables.

First stage cutting experiments are conducted with 1 mm diameter micro end mill on various materials which are 6061 Aluminium alloy, Ti6Al4V Titanium alloy and 15-5 PH Stainless steel. Investigation of the cutting parameter effects on surface generation in consideration of workpiece material properties is the main objective of the first stage cutting experiments. Evaluation of the first stage cutting experiments shows that feed rate has the greatest effect on surface generation when compared to the other cutting parameters in micro milling. The reason for this is the fact that the effect of the ploughing and minimum chip thickness on micro cutting process is associated with feed rate. Variation of cutting speed does not have as much effect on surface roughness as feed rate; however, chip formation is distinctly affected by the change in cutting speed. As the cutting speed increases, burr formation diminishes. On the other hand, cutting depth does not have a significant effect on surface roughness; however, increase of cutting depth causes excessive burr formation.

Based on the obtained results from first stage cutting experiments, second stage cutting experiments are conducted in order to make further investigation of the relation between feed rate and surface generation. Besides, cutting process geometry is investigated in detail. For this purpose, cutting experiments are conducted with a greater number of feed per tooth values and various cutting depth and cutting speed levels on Ti6Al4V titanium alloy and 15-5 PH stainless steel. In spite of having similar mechanical strength characteristics, chosen workpiece materials have different characteristics in terms of modulus of elasticity and elongation at break. Thus, the effect of workpiece material ductility on surface generation is investigated. Furthermore, cutting tool geometry is examined with microscope and associated with cutting process. Evaluation of the experiments shows that feed rate is the significative parameter of the surface generation. Due to minimum chip thickness effect and ploughing, surface roughness and burr formation increase in low feed rates. With the increased level of feed rate, cutting process becomes normalized and surface quality improves. On the other hand, ductility of workpiece material has a significant effect on surface generation. Comparision of the obtained results with both workpiece materials shows that increased surface roughness and chip formation are obtained with Ti6Al4V titanium alloy. This is caused by the fact that minimum chip thickness and ploughing are more effective in micro cutting process of ductile materials. Moreover, alteration of the feed rate induces significant change in surface roughness in ductile materials. This is also related to the increased effect of minimum chip thickness and ploughing in ductile materials. With scaled up cutting speeds, better surface roughness values are obtained and burr formation is reduced. Higher cutting speed provides better chip formation process; therefore, better surface quality is obtained. On the other hand, increase of cutting depth causes excessive burr formation as in first cutting experiments. Futhermore, investigation of machined surface geometry shows that surface profile is highly influenced by tool geometry, minimum chip thickness and ploughing principles. Cutter geometry and minimum chip thickness effect defines the residual material geometry on machined surface As it is observed in microscope images, surface profile has excessive peaks as a result of residual material due to ploughing effect. Besides, deep scratch marks are detected.

Subsequently, the results of the surface generation experiments are utilized in the development of a surface generation model with regards to micro cutting process fundamentals and process geometry and the model is paralleled with experimental results. For this purpose, detailed investigations are carried out on tool geometry and process geometry. Different tool and workpiece material interaction conditions in

cutting process are investigated with regards to feed rate, minimum chip thickness and ploughing effect. Based on investigation results, a mathematical model is developed. The developed model is intended to predict surface roughness on the centerline of the floor surface of machined slot via micro end mill. Subsequently, simulated surface roughness values with proposed model are compared with cutting experiment results which are conducted at various feed rates on Ti6Al4V workpiece material. Comparison of results shows that simulated surface roughness values are consistent with experimental results. In this regard, calibration of the minimum chip thickness coefficient is crucial for model accuracy.

Additionally, with the aim of comprehending the tool wear mechanism in micro milling, basic mechanisms and factors affecting tool wear are experimentally investigated. For this purpose, operations under certain cutting conditions with ZrN and AlTiN coated micro end mills and cutting parameters are performed investigating tool wear, cutting force alterations and surface generation comparatively. Tool wear experiments are conducted in order to define the effect of cutting parameters and tool coatings on tool wear rate. Cutting forces, machined surface roughness and reduction of the tool diameter are measured in order to investigate tool wear rate. Obtained results for both surface generation and tool wear behavior are associated with micro milling process fundamentals and evaluated comparatively. Experimental results show that tool wear rate is significantly influenced by feed rate. Higher feed rates lead to increased tool wear. As a result of increased chip loads in high feed rates, cutting zone temperature rises and this leads to crater wear. As a result of crater wear, tool wedge weakens which leads to chipping of tool wedge. In low feed rates, ploughing dominant cutting regime does not cause excessive tool wear. On the other hand, greater tool wear rates are observed in ZrN coated tools since ZrN coating has a lower maximum operating temperature compared to the AlTiN coating. As a result of progressing tool wear, surface roughness and cutting forces increase.

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin ilerlemesi ile birlikte, tasarlanan ve imal edilen cihazların, makine parçalarının, boyutları da gittikçe küçülmektedir. Özellikle uzay ve havacılık, elektronik, medikal gibi endüstriyel alanlarda daha küçük boyutlu daha hassas ve karmaşık parçaların üretim gereksinimi artmıştır. Bu sebeple mikro işleme yöntemlerinin önemi gittikçe artmaktadır. Mikro frezeleme yöntemi 1 mm ve daha küçük çaptaki takımlar ile mekanik talaş kaldırma prensibine dayalı imalat tekniğidir. Diğer birçok mikro imalat yöntemine göre 3 boyutlu imalata elverişli olması, hızlı ve ekonomik olması gibi birçok avantajı vardır.

Geleneksel makro boyuttaki talaş kaldırma işleminden farklı olarak mikro talaşlı imalat, boyutların büyük ölçüde küçülmesinden dolayı farklı özellikler gösterir. İş parçalarının boyutları standart uygulamalarla karşılaştırıldığında çok küçük olmasından dolayı kesici takımların çapları da genellikle 1 mm'nin altındadır. Takımların boyutlarının küçülmesi ile işlem sırasında etkileşime girilen malzeme boyutları da küçülecek, bu durumda da makro seviyede ihmal edilebilecek geometrik ve boyutsal etkiler süreçte önemli hale gelecektir. Bu ve bunun gibi sebeplerle geleneksel frezeleme süreçleri için geliştirilen süreç modelleri mikro frezeleme için geçerliliğini yitirmektedir. Buna ek olarak klasik frezeleme uygulamalarının birçoğunda önemsiz sayılabilecek takım eksantritesi (salgısı), takım kesici kenar yarıçapı, mikro titreşimler vb. faktörlerin mikro frezeleme uygulamalarında sürece ve parça kalitesine önemli etkileri olmaktadır. Bu gibi nedenlerden ötürü, mikro frezeleme işleminin deneysel çalışmalar ile kapsamlı bir şekilde incelenmesi, bu incelemelerden edinilecek kazanımlar ile modelleme çalışmalarının gerçekleştirilmesi, mikro frezeleme işleminin temellerinin anlaşılması ve imalat sürecinin geliştirilebilmesi için çok önemli olacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, mikro frezeleme işleminde, yüzey oluşumunun ve takım aşınmasının deneysel incelemesini gerçekleştirerek, mikro frezeleme işleminin temel

mekanizmaları anlayarak geleneksel frezeleme işlemi ile arasındaki farklılıkları belirlemek ve sürece etki eden değişkenleri belirleyerek etki mekanizmalarını incelemek, bu çalışmalardan elde edilecek kazanımlar ile yüzey oluşumu ile ilgili modelleme çalışmaları gerçekleştirmektir.

Bu amaç doğrultusunda, tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar 3 ana bölüme ayrılmaktadır. Çalışmaların ilk bölümünde, mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi, sürece etki eden parametrelerin belirlenmesi ve süreç temelleri ile ilişkilendirilerek yorumlanması ve geleneksel frezeleme ile farklılıklarının belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, farklı malzeme tipleri, farklı takım, kesme parametreleri ve kesme koşullarında deneyler gerçekleştirilmiş sonuçlar incelenmiştir.

Bu kısımda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile elde edinilen kazanımlar ile çalışmanın ikinci bölümünde mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumu modeli geliştirilmiştir. Mikro kesme süreci ve proses geometrisi göz önüne alınarak geliştirilen model üzerine, gerçekleştirilen deneyler ile doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

Çalışmanın bir sonraki kısmında ise, takım aşınmasının deneysel incelemesi gerçekleştirilerek, mikro frezeleme işleminde takım aşınma mekanizmasının temelleri ve geleneksel frezelemede takım aşınması mekanizmasından farklılıkları incelenmiş, sürece etki eden faktörler belirlenip, mikro frezeleme işleminde yüzey ve talaş oluşumuna etki eden mekanizmalar baz alınarak yorumlanmıştır. Bu kapsamda farklı kaplama tipinde kesici takımlar ile, farklı kesme parametrelerinde takım aşınması deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel incelemeler ve modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar tezin son bölümünde özetlenerek incelenmiş ve yorumlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

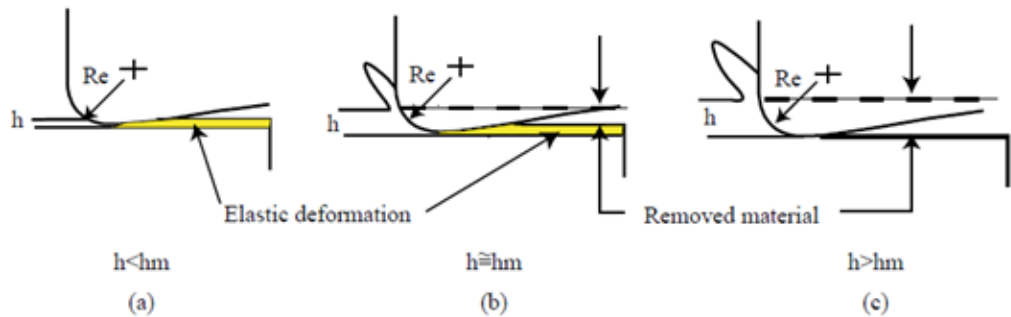
Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte mikro ölçekte imalat yöntemlerine duyulan ihtiyaç artmaktadır. Sunduğu avantajlar ile mikro frezeleme işlemi mikro imalat yöntemleri arasında ön plana çıkmaktadır. Yeni gelişen bir teknoloji olmasından ötürü, konu ile ilgili literatür çalışmaları az sayıda olup, mikro frezelemenin

temellerinin incelenmesi, modellenmesi ve proses iyileştirmesi yönünde çalışmalar devam etmektedir.

Mikro frezeleme işleminde 1 mm ve daha küçük çaplarda takımlar kullanıldığından, kesilmemiş talaş kalınlığı da çok küçük olmakta, hatta kesici takımın kenar radyusu ölçüsü ile yakın değerlerde olmaktadır. Bu durum negatif talaş açısı oluşturmakta ve mikro frezelemenin kesme mekaniğinde ciddi etki oluşturmaktadır [1]. Kesilmemiş talaş kalınlığı kesici takımın kenar radyusundan küçük olduğu durumlarda, negatif talaş açısı oluşmakta ve bu durum kazınma (ploughing) durumunun oluşmasına sebebiyet vermektedir [2]. Kazınma (ploughing), malzemede talaş oluşumunun gerçekleşmeyip elastik-plastik şekil değişimine uğradığı durumdur. Bu durumun önüne geçebilmek için mikro frezeleme işleminde kullanılacak takımların çok keskin kesici ağıza sahip olması gerekmektedir [3]. Bu sayede kesilmemiş talaş kalınlığı ile etkileşime girecek takımın kesici kenar radyusu küçülerek negative talaş açısı etkisi azalacaktır. Ancak günümüz taşlama teknolojisi ve takımın üretildiği karbür tane boyutları, takıma kaplama uygulanması daha keskin kenarlı takım üretimini sınırlamaktadır.

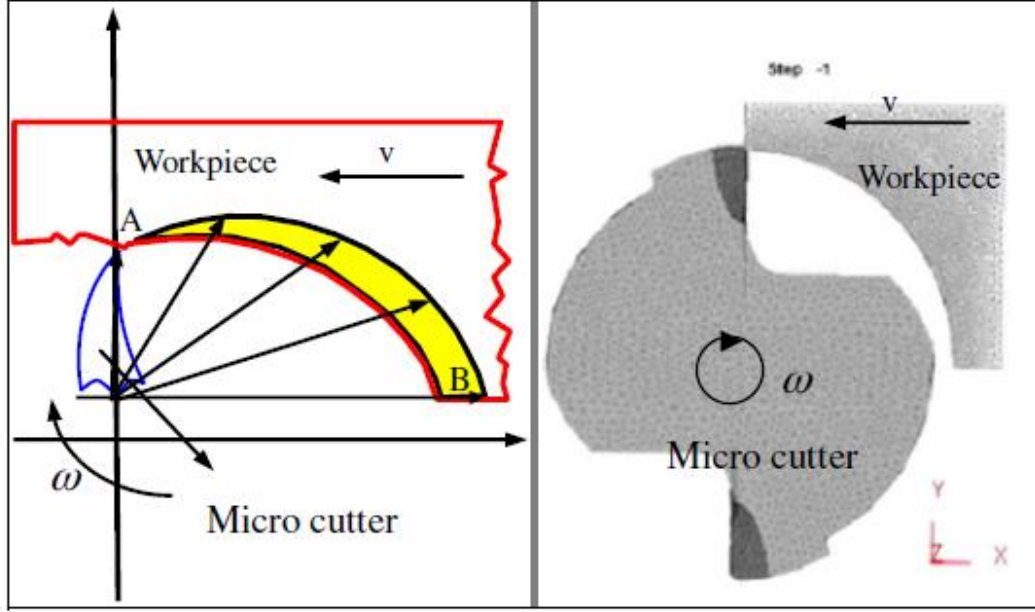
Bu durumlardan ötürü mikro işlemede minimum talaş kalınlığı tanımı ortaya çıkmıştır.

Minimum talaş kalınlığı kavramı talaşın oluştuğu ya da oluşmadığı durumu belirlemektedir. Minimum talaş kalınlığının altında, kesme işlemi kazınma (ploughing) dominant hale gelmektedir. Bu durumda malzeme elastik-plastik deformasyona uğrayarak, kesici kenarın altından kaymakta ve talaş oluşumu gerçekleşmemektedir [4].



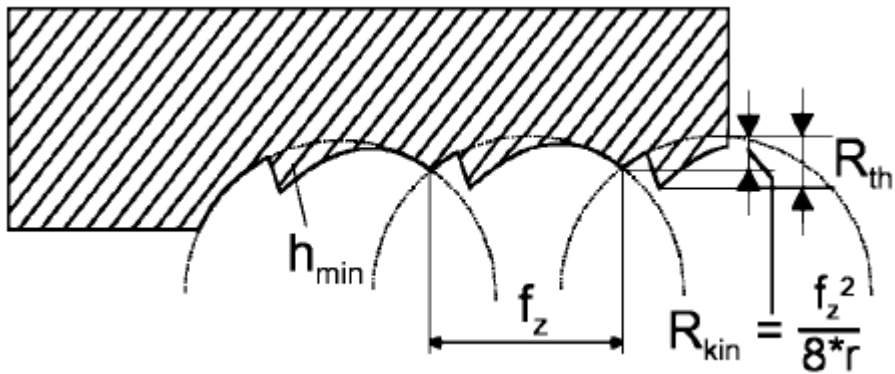
Şekil 1.1 : Mikro kesme işleminde talaş oluşumu [5].

Frezelemede takım malzeme de kesme işlemi gerçekleştirirken talaş kalınlığı değişkenlik göstermektedir. Talaş kalınlığı freze takımının dönmesi ile 0'dan başlayarak f_t , diş başı ilerleme değerine doğru değişmektedir.



Şekil 1.2 : Frezelemede talaş kalınlığının değişimi [6].

Değişken talaş kalınlığı ve minimum talaş kalınlığı etkisi birleştiğinde, takımın kesici ağzı malzeme ile etkileşime geçtiğinde talaş kalınlığı 0'dan t_c minimum talaş kalınlığı değerine kadar olan süreçte kazınma (ploughing) oluşmakta, minimum talaş kalınlığından maksimum talaş kalınlığı değeri olan diş başına ilerleme değerine kadar olan süreçte malzeme yüzeyinden talaş kaldırılmaktadır. Bu durum yan yüzeyde şekildeki gibi bir yüzey profili oluşturmaktadır.



Şekil 1.3 : Mikro frezeleme işleminde oluşan yan yüzey profili [7].

Minimum talaş kalınlığı, takımın kesici kenar yarıçapı değeri ile ilişkilidir. Yapılan literatür incelemelerinde; alüminyum ve bakırın mikro işlenmesinde minimum talaş kalınlığının; takımın kesici kenar yarıçapının 1/20'si kadar olduğunu belirlenmiştir [10]. Diğer bir çalışmada daha büyük kesici kenar yarıçapına sahip takımların daha kaba yüzeyler oluşturduğu gözlemlenmiş ve minimum talaş kalınlığının kesici kenar yarıçapının %20-%40 arasında değer aldığı saptanmıştır [11]. Araştırmacılar minimum talaş kalınlığı ile ilgili kapsamlı modelleme çalışmaları yapmışlardır [12]. Alüminyumun mikro frezelenmesi ile ilgili çalışmada, minimum talaş kalınlığının, takım kesici kenar yarıçapının yaklaşık %30'u olduğunu saptanmıştır.

Buradan yola çıkarak söylenebilir ki, mikro frezeleme işleminde düşük ilerleme değerlerinde, takımın kesme hareketi sırasında etkileşime gireceği talaş kalınlığı değeri çok düşük olacak ve minimum talaş kalınlığı etkisinden ötürü kazınma (ploughing) mekanizmasının etkin olduğu bir kesme gerçekleşecektir. Geleneksel frezeleme işlemlerinde ilerlemenin düşürülmesi ile elde edilen yüzeyin ve geometrinin kalitesinin iyileşmesi durumu beklenirken, mikro frezelemede minimum talaş kalınlığı etkisinden dolayı aksi durumlar oluşmaktadır. Düşük ilerleme oranlarında minimum talaş kalınlığı ve malzemenin elastik davranışının etkisi, kesme kuvvetlerinin artmasına ve yüzey pürüzlülüğüne neden olur [4-9].

Mikro frezeleme işleminde minimum talaş kalınlığı ve kazınma (ploughing) etkisi, yüzey pürüzlülüğünü arttırmanın yanında, işlenmiş yüzeylerde çapak oluşumunun artmasına neden olmaktadır. Düşük ilerleme değerlerinde minimum talaş kalınlığı etkisinden ötürü, kazınmanın etkin olduğu bir kesme süreci gerçekleştiğinden çapak oluşumu artmakta, ilerlemenin artması ile birlikte daha az çapak oluşumu gözlemlenmektedir [26]. Mikro frezeleme işleminde diş başına ilerleme değerinin, takımın kesici kenar yarıçapına oranı büyüdükçe çapak oluşumunda artış meydana gelmektedir [27]. Bu durum ilerlemenin kesici kenar yarıçapına olan oranının artması ile minimum talaş kalınlığı ve kazınma etkisinin artması sonucu meydana gelmektedir. İlerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması, alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerin mikro frezelenmesi ile ilgili yapılan çalışmada da gözlenmiştir [14].

Mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun sürece özgü karakteristik özelliklerden ötürü geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine göre farklılıklar göstermesi, araştırmacıları mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun

modellenmesi ile ilgili çalışmalara yöneltmiştir. Bu bağlamda, kesme süreci, mikro frezelemede talaş oluşum prensipleri, takım ve süreç geometrisi, minimum talaş kalınlığı ve kazınma etkisi göz önünde bulundurularak, yüzey oluşumu ile ilgili modelleme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan modelleme çalışmalarında, minimum talaş kalınlığı ve kazınma mekanizması modelin doğruluğu açısından en önemli parametreler olarak göze çarpmaktadır. Geliştirilen modeller sonucu olarak da, kesme parametrelerinden ilerlemenin, yüzey oluşumuna en etkili parametre olduğu görülmektedir. Bu durum, ilerlemenin minimum talaş kalınlığı ve kazınma mekanizması ile doğrudan ilintili olmasından kaynaklanmaktadır [17,19,20].

Talaşlı imalatda en önemli problemlerden biri olan takım aşınması, küçük çaplı takımların kullanıldığı mikro frezeleme işleminde de önemli konulardan biridir. Mikro frezeleme işleminin karakteristik özelliklerinin kesme sürecine olan etkileri, küçük çaplı takımların çabuk aşınmasına hatta kırılmasına neden olmaktadır. Mikro takımlardaki aşınma, geleneksel talaşlı imalatda olduğu gibi gözle tespit edilemeyecek boyutlarda olduğundan, işlem sırasında farkedilemeyerek, proses kalitesinde kötü sonuçlar alınmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle mikro frezeleme işlemlerinde, aşınma sürecinin incelenip temellerinin araştırılması, takım aşınmasının olabildiğince azaltılabilmesi, proses kalitesinin arttırılabilmesi açısından çok önemlidir. Yapılan çalışmalarda, kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklara erişilmesinden ötürü, mikro takımlarda yüksek aşınma ve kırılma meydana geldiği görülmüştür [28]. Bunun yanında mikro frezeleme işleminde kesme kuvvetlerinin artmasının, takım aşınmasının artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir [29]. Sinterlenmiş tungsten bakır kompozit malzemenin mikro frezelenmesi ile ilgili çalışmadaki ilerlemenin artışı ile takımda abrasiv aşınmanın meydana geldiği bunun sonucu olarak da takım kesici kenar yarıusunun büyüdüğü ve süreçteki kazınma etkisinin arttığı sonucuna varılmıştır [30]. Bir diğer çalışmada, mikro frezelemede takım aşınması ile kesme kuvvetleri ilişkisi incelenmiş, aşınma sonucu takımın kesici kenar yarıusunun büyüyerek takımın krlendiği ve kesme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir [31].

Bu bölümde, mikro frezeleme işleminin temelleri ile ilgili genel bir inceleme yapılmış olup, konu ile ilgili literatür çalışmalarında elde edilmiş sonuçlar paylaşılmıştır. Bundan sonraki kısımlarda yapılacak detaylı incelemelerde, konu başlığı ile ilgili literatür araştırmalarından sonuçlara yer verilecektir.

2. MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ

2.1 Amaç

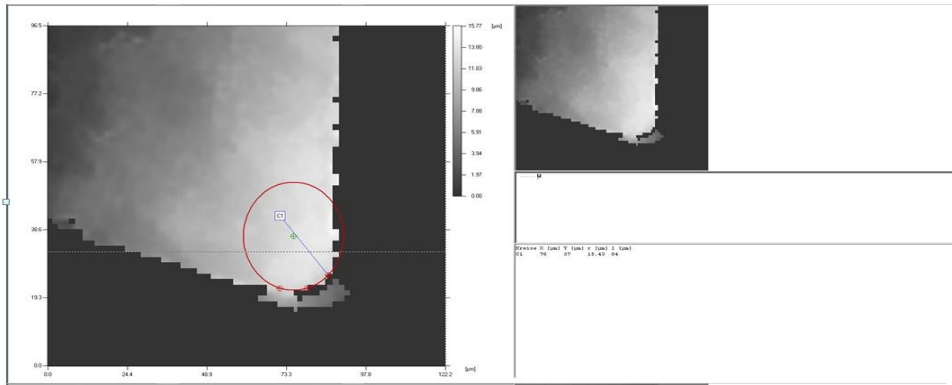
Tez çalışmasının bu bölümünde, mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun temelleri, geleneksel frezeleme işlemi ile olan farklılıkları ve kesme parametrelerinin yüzey oluşumuna etkileri deneysel olarak incelenektir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen kazanımlar ile mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun modellenmesi çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu amaç doğrultusunda, çeşitli iş parçası malzemelerinde farklı kesme parametreleri ve kesme koşullarında, çeşitli çapta takımlar ile kesme deneyleri gerçekleştirilerek sonuçlar incelenektir.

Bu bölüm kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar, 3 alt bölüme ayrılmaktadır. 1. Bölümde özetle, 1 mm çaptaki takımlar ile farklı kesme parametrelerinde, farklı tipte malzemeler üzerinde mikro frezeleme işlemi ile kanal açma işlemi gerçekleştirilmiş olup, yüzey oluşumu incelenmiştir. Burada amaç kesme parametrelerinin yüzey oluşumuna etkilerinin incelenmesi, literature özetinde bahsedilen minimum talaş kalınlığı, kazınma (ploughing) gibi etkenlerin işlem üzerinde etkilerini gözlemleyebilmek olarak sıralanabilir. Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmaların, tez kapsamında gerçekleştirilen ilk deneyler oluşu, kesme işlemi, sonuçların alınması, elde edilen yüzeyin görüntülenmesi ve kesici takımın incelenmesi gibi hususların mikro frezeleme işlemindeki zorlukları ve tecrübe eksiklikleri göz önünde bulundurularak, mikro frezeleme için üst limit sayılacak 1 mm çapında kesici takımlar seçilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen kazanımlar ile, 2. bölümde 0,5 mm çapındaki kesici takımlar ile kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 2. bölüm kapsamındaki çalışmalarda, bir önceki çalışmanın sonuçlarına istinaden, prosete daha etkili olduğu düşünülen kesme parametreleri daha detaylı incelenmiştir. 3. bölümde ise yüzey oluşumu ile ilgili modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

2.2 1 mm Çapındaki Mikro Frezeleme Takımı ile Gerçekleştirilen Yüzey Oluşumu Deneyleri

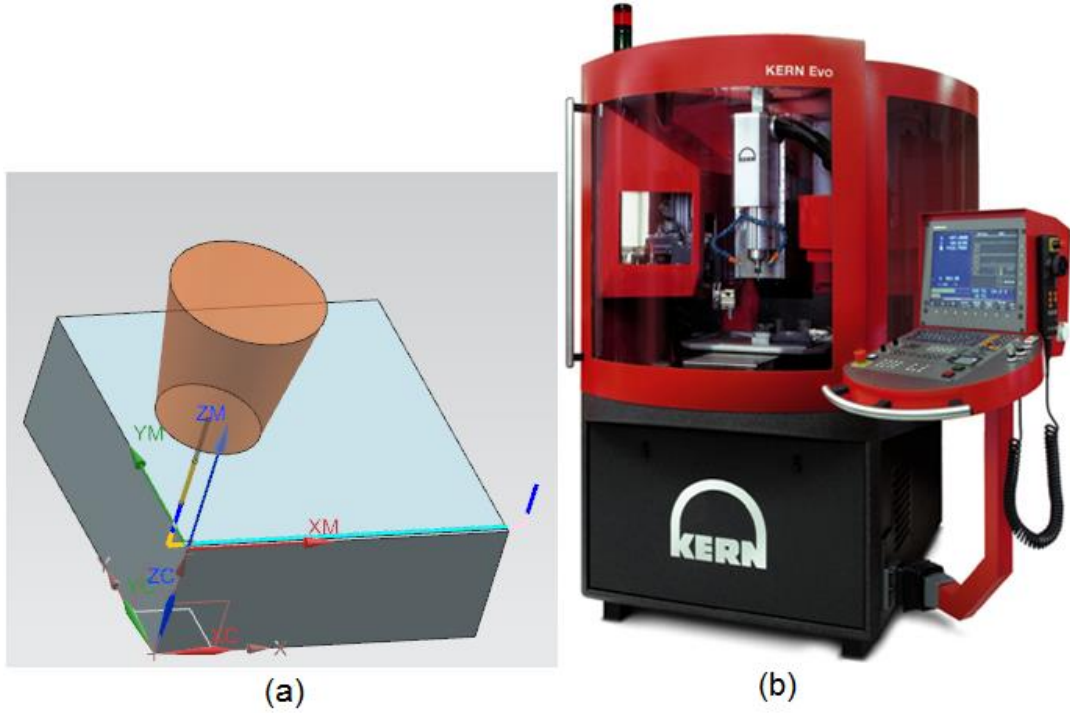
2.2.1 Deney tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde, 1 mm çapındaki mikro frezeleme takımları ile, 6061 Alüminyum, 15-5 PH paslanmaz çelik ve Ti6Al4V titanium alaşımı malzemesinde; belirlenen kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametrelerinde mikro frezeleme işlemi gerçekleştirilerek parametrelerin sürece etkisi ve farklı malzemelerde yüzey oluşumu incelenmiştir. Alüminyum malzeme düşük dayanımlı sünek bir malzeme olduğundan deneysel araştırmada parametrelerin denenmesi ve operasyonu tanıyabilmek adına başlangıç malzemesi olarak düşünülmüştür. Bunun yanında düşük dayanımlı sünek bir malzeme olmasına karşın, metal kesme işleminde çok fazla çapak oluşturması alüminyumun iyi yüzey kalitesi ile işlenmesini zorlaştıran etkenlerdendir. Daha sonra alüminyum malzemede elde edilen deneyimler ışığında, yüksek teknoloji uygulamalarında ihtiyaç duyulan, titanyum ve paslanmaz çelik malzemelerin kesme operasyonları gerçekleştirilecektir. Literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında ve mikro operasyonlarda daha fazla kullanılacağı düşünüldüğünden, kesme deneylerinde kanal frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlerlemenin, dolayısıyla kesilmemiş talaş kalınlığı ve buna bağlı olarak mikro frezelemede en belirgin süreç etkenlerinden biri olan minimum talaş kalınlığının işlemdeki etkisinin büyük olduğu düşünülerek, deneylerde kullanılacak kesici takımların kesici kenar radyusları ölçülmüş ve bu değerler ile literatürdeki kesici kenar radyusu – minimum talaş kalınlığı ilişkisi ile ilgili olarak ileri sürülen yaklaşımlar göz önüne alınarak ilerleme değerleri seçilmiştir.



Şekil 2.1 : 1 mm çapındaki mikro freze takımının kesici kenar radyusu ölçümü.

Yapılan ölçümler sonucu 1 mm'lik takımların kesici kenar yarıçapı değerlerinin yaklaşık 7 μm olduğu görülmüştür. Yapılan literatür araştırmalarında minimum talaş kalınlığının, takımın kesici kenar yarıçapının %20-%40'si arasında değiştiğini düşündüğümüzde, deneylerde kullanılacak takımlar için minimum talaş kalınlığı değerinin 3-6 μm arasında olacağı söylenebilir. Buradan hareketle, iş parçası malzemesi göz önünde bulundurularak ve takım üreticisinin kataloğunda yer alan önerilen kesme parametreleri incelenerek; kazınma (ploughing) dominant kesme rejimini oluşturmak adına düşük ilerleme değerlerinden başlanarak seçilen maksimum ilerleme değerine kademeli artış oluşturacak şekilde ilerleme değerleri seçilmiştir. Kesme hızı ve kesme derinliği değerleri de üretici firmanın kataloğundan alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2.2 : a) Kesme operasyonunun CAM programı görüntüsü, b) Kern Evo mikro frezeleme tezgahı.

Mikro frezeleme deneyleri, 65x65 mm boyutlarında hazırlanmış kare prizma iş parçalarında, Kern Evo marka mikro frezeleme tezgahında gerçekleştirilmiştir. İşlenen kanal yüzeyleri, Nanofocus yüzey analiz mikroskobunda incelenmiş ve analiz edilmiştir. Çapak oluşumu incelemeleri Dinolite mikroskobu ile görüntülenmiştir.

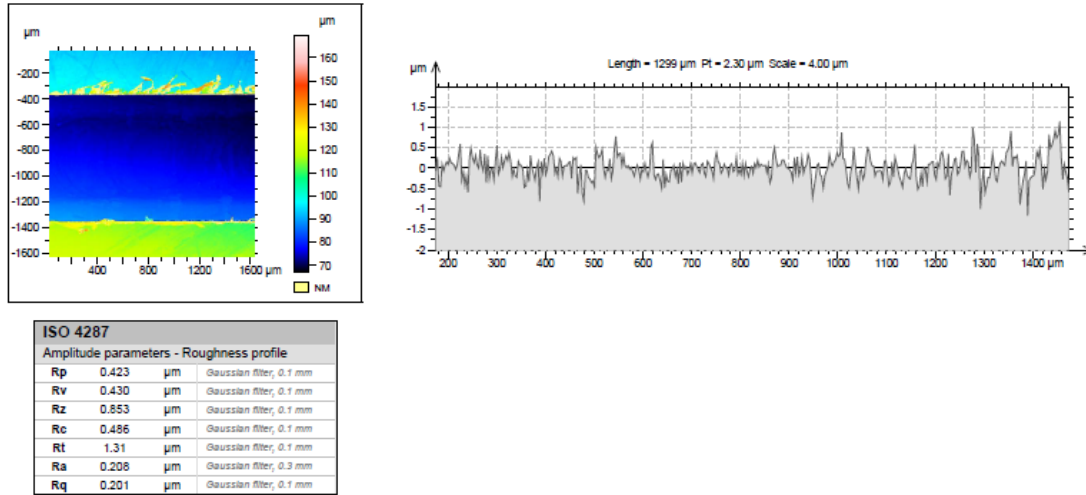
2.2.2 6061 Alüminyum malzemede gerçekleştirilen mikro frezelemede deneyi

Yapılan çalışmada, 1 mm çapındaki takım ile 6061 Alüminyum malzemede, kuru kesme şartında aşağıdaki tabloda belirtilen kesme parametrelerinde toplam 36 kanal frezeleme operasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.1 : Alüminyum malzemede gerçekleştirilen mikro frezeleme deneyinin kesme parametreleri.

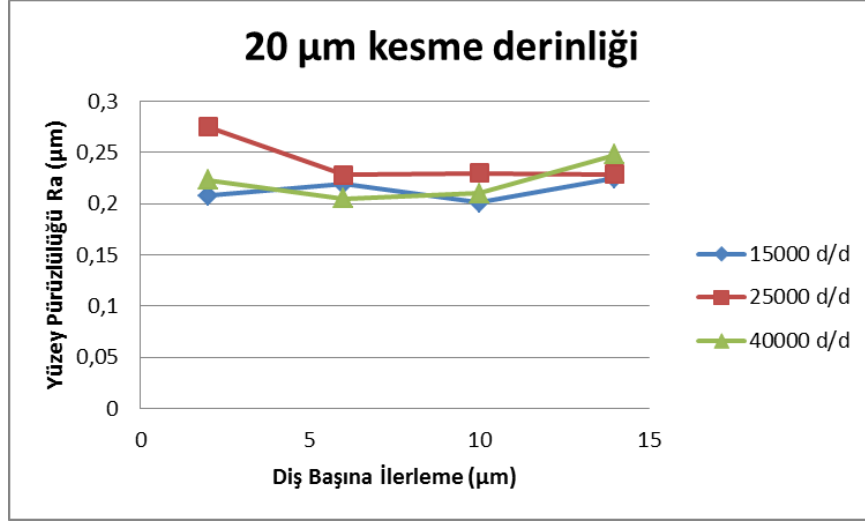
Kesme Hızı (d/d)	Kesme Derinliği (μm)	Diş Başına İlerleme (μm)
15000	20	2
25000	60	6
40000	100	10
		14

Kesme işlemi, 65x65 mm kare prizma iş parçası üzerinde her bir kesme operasyonunda 65 mm boyunda kanal işlenerek gerçekleştirilmiştir. İşlenen kanalın taban yüzeyi, yüzey inceleme mikroskobu ile görüntülenerek, taban merkezinde kesme yönüne paralel doğrultudaki çizgi boyunca yüzey pürüzlülüğü analizi gerçekleştirilmiştir.

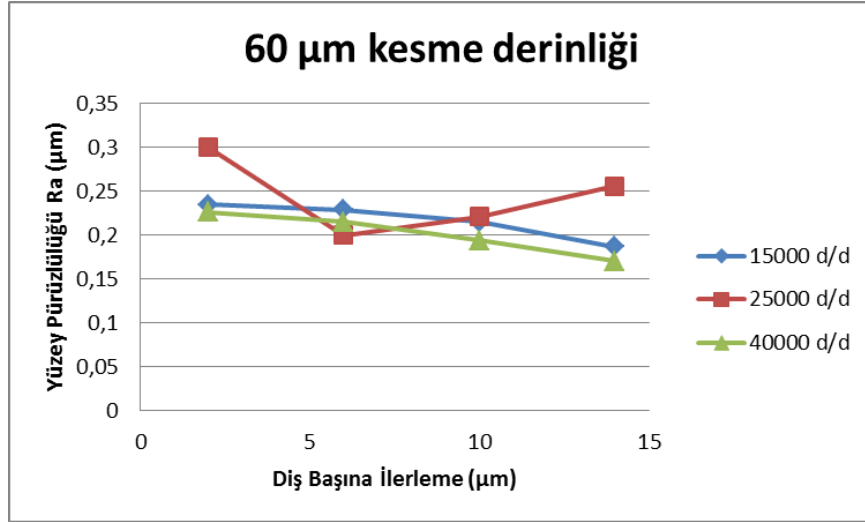


Şekil 2.3 : Nanofocus ile alınmış yüzey görüntüsü ve yüzey pürüzlülüğü analizi.

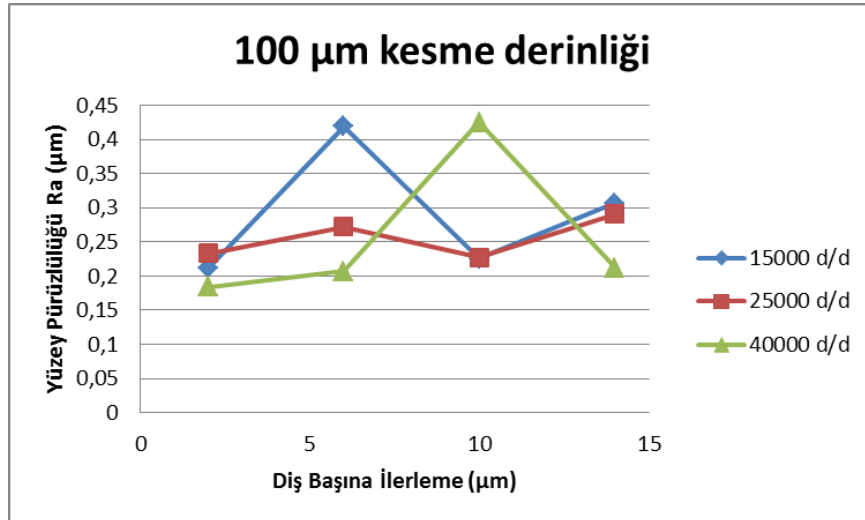
Aşağıda gerçekleştirilen kesme operasyonları sonucu elde edilen kanal yüzeylerinin pürüzlülüklerinin grafiksel karşılaştırmaları yer almaktadır.



Şekil 2.4 : 20 μm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.



Şekil 2.5 : 60 μm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.



Şekil 2.6 : 100 μm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde kesme parametreleri değiştiğinde elde edilen yüzey kalitesi sonuçları da ciddi farklılıklar göstermektedir. 20 μm kesme derinliğinde elde edilen grafiklerde düzgün dağılım gözlenirken artan kesme derinlikleri ile eğrilerin dağılım düzensizleşmektedir. 20 μm kesme derinliğinde bütün kesme hızlarında, 2 μm ilerleme değerinde düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş ilerlemenin 6 μm 'ye çıkarılması ile yüzey pürüzlülükleri artış göstermiştir. Ancak 10 μm ilerleme değerinde beklenenin aksine yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bu durum literatürdeki çalışmalarda da belirtildiği gibi minimum talaş kalınlığının etkisi ile düşük ilerleme hızlarında geleneksel frezelemeden farklı yüzey oluşumu sonuçlarının oluştuğunu göstermektedir. Literatür çalışmalarında da düşük ilerleme değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün yükseldiğini sonucu gözlemlemiştir [8]. İlerleme hızı 5 kat arttırıldığı halde benzer yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edilmesi 5 kat hızlı imalatla aynı sonuçların alınabilmesi açısından çok önemlidir.

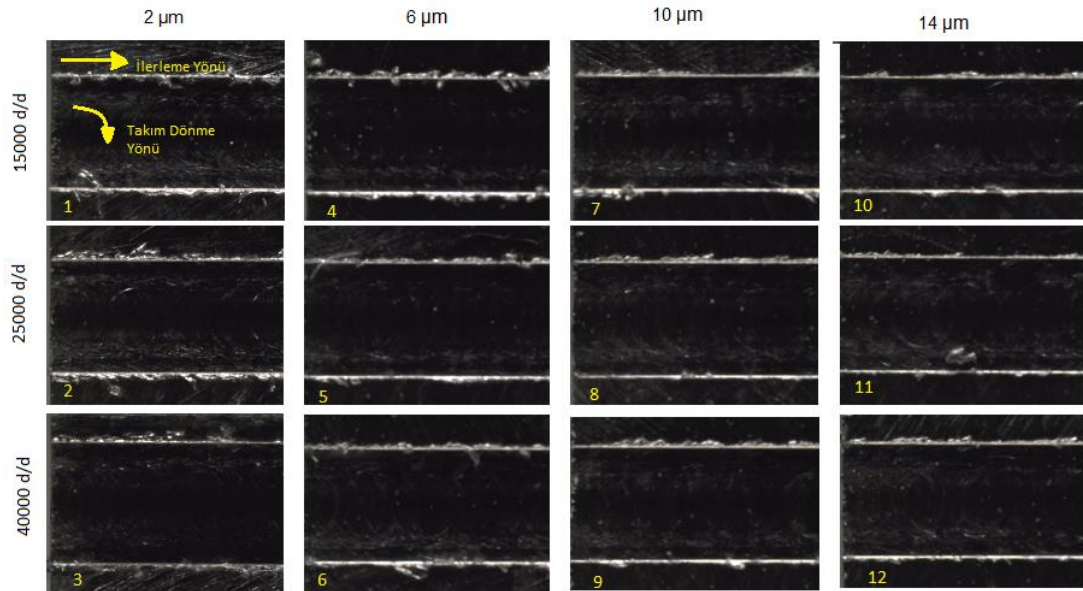
Kesme derinliğinin artması ile sonuçlardaki düzgün dağılım bozulmakta ve farklılıklar gözlemlenmektedir. 60 μm kesme derinliğinde grafiklerin eğilimleri 20 μm kesme derinliğine göre farklılık göstermektedir. Kesme derinliğinin arttırılması ile 2 μm ilerleme değerindeki yüzey kaliteleri kötüleşmiş ilerlemenin 6 μm 'ye çıkarılması ile yüzey kaliteleri iyileşmiştir. İlerlemenin daha da arttırılması ile, 20 μm kesme derinliğinde elde edilen sonuçlara nazaran yüzey pürüzlülüğünde daha belirgin bir iyileşme olduğu görülmektedir.

Genel olarak kesme derinliğinin artması ile yüzey pürüzlülüklerinde artış olduğu yorumu yapılabilir. Özellikle 100 μm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artış ve düzensizlik gözlenmektedir. Kesme derinliğinin artmasının tırlamaya sebebiyet verme durumu, kesme derinliği artışı ile kesme kuvvetlerinin artışı ve bu durumun kesici takım üzerinde bükülmelere sebebiyet vermesi bu kesme derinliğinde karşılaşılan düzensiz yüzey pürüzlülüğü değerlerinin oluşmasının potansiyel nedenleri olarak görülmektedir.

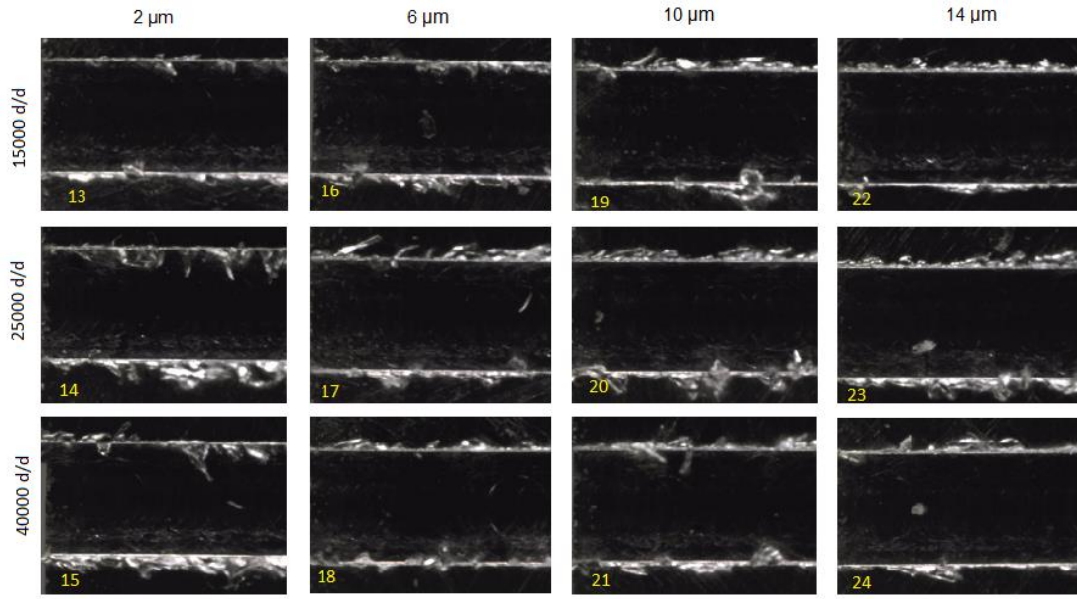
Diğer taraftan kesme hızının artması ile genel olarak aynı ilerleme ve kesme derinliklerinde yüzey kalitesinin iyileştiği görülmektedir. Ancak kesme hızının arttırılmasının da kesme titreşimleri, tırlama gibi sonuçlar doğurabileceği göz önünde bulunulmalıdır. Özellikle mikro frezelemede tırlamanın tespitinin çok zor olacağı düşünülürse, kesme hızının uygun değerlerde seçilmesi önemlidir.

Talaşlı imalatla, imal edilen yüzeylerin mümkün olduğunca çapaksız olması imalatın kalitesi açısından çok önemlidir. Çapaklanmanın önüne geçebilmek için, iş malzemesi göz önünde bulundurularak kesme parametrelerinin uygun seçilmesi çok önemlidir. Çapaklanmış bir yüzey imal edildikten sonra ek çapak alma operasyonlarını gerektirir. Özellikle mikro frezeleme gibi küçük boyutlu ve hassas parçalarda bu durum çok daha önemli olmaktadır. Mikro parçalardaki çapak alma işlemlerinin çok zor olacağı ve hatta imal edilen parçaya zarar verebileceği düşünüldüğünde minimum çapak oluşumu ile yüzey eldesi oldukça önemlidir [14]. Çapak oluşumu ile ilgili literatürde yapılan çalışmalarda; kazınma (ploughing) dominant kesme sırasında daha fazla çapak oluştuğu gözlenmiştir [15]. Bakır malzemenin mikro frezelenmesi ile ilgili çalışmada, kanal açma operasyonlarında en fazla çapaklanmanın en düşük ilerleme değerlerinde oluştuğunu ve ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azaldığını gözlemlemiştir [8].

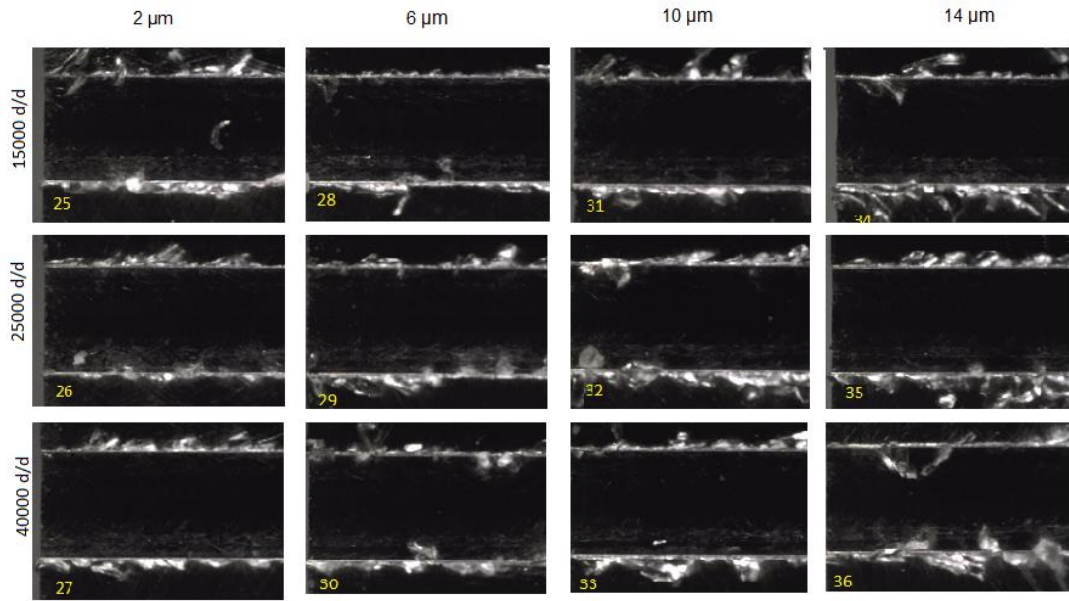
Çapaklanmanın incelenmesi amacıyla mikro frezeleme ile işlenen kanalların görüntüleri Dino Lite mikroskobu ile alınıp görsel olarak karşılaştırılmıştır. Tüm kanal görüntülerinde, takımın dönme ve ilerleme yönü 20 μm kesme derinliği görüntülerinde gösterilen ile aynıdır.



Şekil 2.7 : 20 μm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.



Şekil 2.8 : Kesme derinliğinin 60 µm'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.



Şekil 2.9 : 100 µm kesme derinliğinde oluşan aşırı çapaklanma görüntüleri.

İlk 12 operasyonun çapak görüntüleri incelendiğinde, devir artışı ile çapak oluşumunda azalma olduğu görülmektedir. Yüksek kesme hızlarının, talaşın yüzeyden ayrılmayı kolaylaştırması bu durumun görülme nedenidir. Alüminyumun sünek karakterde olması nedeniyle kesme işleminde çapak oluşumu hayli fazla olmaktadır. Yüzey çapaklanmasına ek olarak, takımın kesici ağzına malzeme sıvanması ve yapışması durumu olan yığıntı talaş oluşumu (BUE) alüminyum gibi sünek karakterdeki malzemelerde karşılaşılan bir durumdur. Kesme hızının

arttırılması talaşın yüzeyden kolay ayrılmasını ve takımının talaş yüzeyinden de daha kolay akmasını sağlayacağından çapak oluşumunu azaltıcı etkide bulunmaktadır. İlerlemenin artışı ile kesme hızına benzer olarak çapaklanmada azalma görülmektedir. Bu durum, ilerleme değerlerinin artması ile, kesme sırasındaki kazınma (ploughing) etkisinin azalması, takımın malzemeye daha rahat dalarak daha kolay talaş çıkartabilmesi ile açıklanmaktadır.

13-24 numaralı operasyonlar incelendiğinde ilk 12 operasyondakine benzer olarak ilerleme artışı ile çapaklanmada azalma görülmektedir. Ancak ilk 12 operasyondan farklı olarak kesme hızı arttığında çapaklanmada azalma yerine artış görülmektedir. Bunun sebebi 13-24 numaralı operasyonlarda kesme derinliğinin 60 μm olması sebebiyle kesme sırasında, 20 μm kesme derinliğine nazaran daha yüksek kesme sıcaklığı oluşması olarak düşünülebilir. Kesme işlemi kuru şartlarda gerçekleştiğinden oluşan ısı kesme bölgesinden uzaklaştırılamamıştır ve bunun sonucu olarak kesme bölgesi sıcaklığı yükselmiştir. Kesme sıcaklıklarının artması ile malzeme daha sünek karakter gösterecek, dolayısıyla kenar çapaklanması ve yığıntı talaş oluşumu daha fazla oluşacaktır.

25-36 numaralı operasyonlar incelendiğinde daha önceki kesme derinliklerine nazaran çapaklanmanın aşırı arttığı gözlemlenmiştir. Genel olarak tüm 36 kesme operasyonunda takımın dönüş yönüne göre kesici ağzın çıktığı duvardaki çapaklanmalar daha fazla görülmektedir. 25-36 numaralı kesme operasyonlarında diğer operasyonlara tezat olarak ilerleme artışı ile özellikle kesici ağzın çıktığı taraftaki kanal duvarında aşırı çapaklanma gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak kesme derinliğinin artması ile çapaklanma artış göstermektedir. Bu durum ve kesme parametrelerinin çapaklanma üzerinde etkilerinin de farklı olması, artan kesme derinliği ile kesme sıcaklıklarının artması sonucu meydana gelmektedir. Gerek yüzey pürüzlülüklerinde artış olması, gerek çapaklanmanın aşırı fazla oluşması, mikro frezeleme ile kanal açma operasyonunda kesme derinliğinin düşük seviyelerde tutulmasının işlenen yüzey kalitesi açısından daha uygun olacağı sonucuna varılmaktadır.

2.2.3 15-5 PH Paslanmaz çelik malzemenin mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi

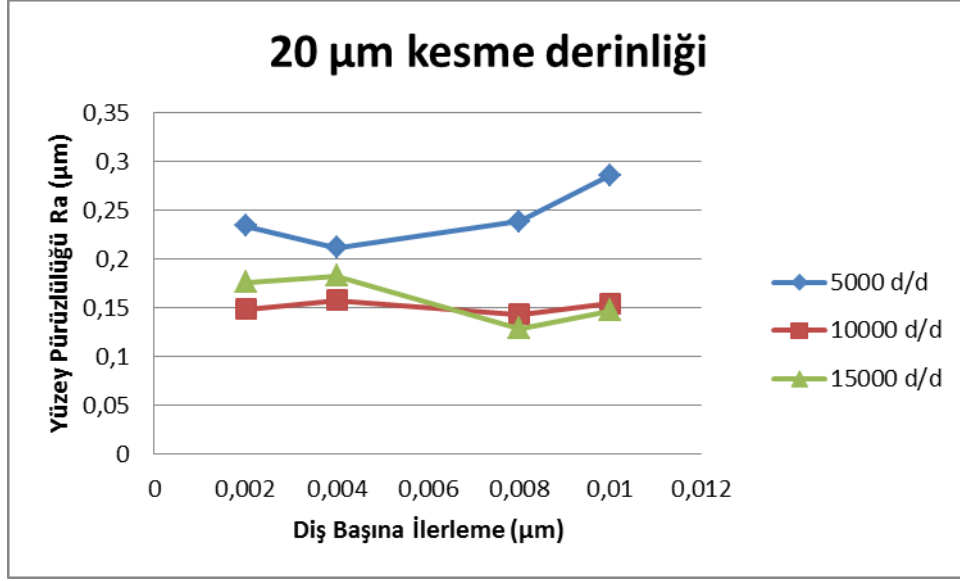
Yapılan çalışmada 1 mm çapındaki kesici takım ile 15-5 PH paslanmaz çelik malzemede kuru kesme şartında aşağıdaki tabloda belirtilen kesme parametrelerinde toplam 24 adet kanal frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.2 : Paslanmaz çelik malzemede gerçekleştirilen mikro frezeleme deneyinin kesme parametreleri.

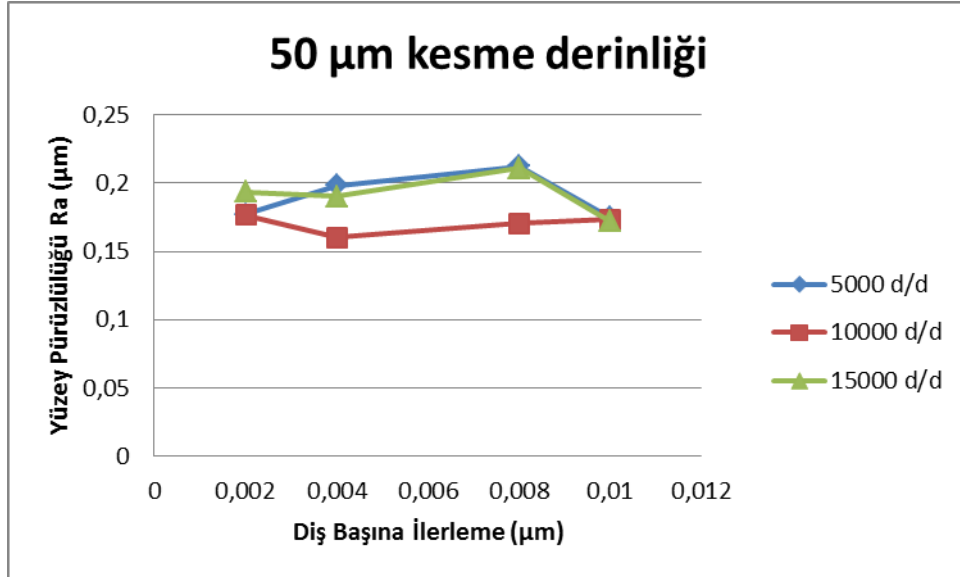
Kesme Hızı (d/d)	Kesme Derinliği (μm)	Diş Başına İlerleme (μm)
5000	20	2
10000	50	4
15000		8
		10

Alüminyum malzeme ile gerçekleştirilen deneylerde kesme derinliğinin yüzey oluşumuna özellikle çapaklanmaya etkisi belirgin bir şekilde gözlemlenmişti. Bu nedenle 15-5 PH paslanmaz çelik ile gerçekleştirilecek deneyde kesme derinliği parametreleri azaltılarak, 2 farklı değerde seçilmiştir. Böylelikle etkisi belirgin bir şekilde gözlemlenmiş bir parametre için fazladan deney yapmayarak, uzun ve zahmetli olan yüzey görüntüleme ve analizlerinde kolaylık sağlaması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen deneyde kesme işlemi, 65x65 mm kare prizma iş parçası üzerinde her bir kesme operasyonunda 65 mm boyunda kanal işlenerek gerçekleştirilmiştir. İşlenen kanalın taban yüzeyi, yüzey inceleme mikroskobu ile görüntülenerek, taban merkezinde kesme yönüne paralel doğrultudaki çizgi boyunca yüzey pürüzlülüğü analizi gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda gerçekleştirilen kesme operasyonları sonucu elde edilen kanal yüzeylerinin pürüzlülüklerinin grafiksel karşılaştırmaları yer almaktadır.



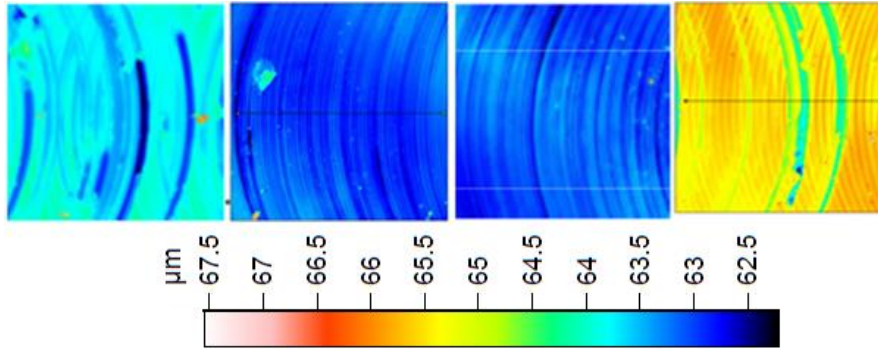
Şekil 2.10 : 20 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.



Şekil 2.11 : 50 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.

Paslanmaz çelik malzeme üzerinde yapılan yüzey incelemelerinin grafikleri yukarıda yer almaktadır. Yukarıdaki bölümlerde bahsettiğimiz düşük ilerlemelerdeki kazınma (ploughing) etkisinin sonucu olarak en düşük ilerleme değerlerinde elde edilen yüksek yüzey pürüzlülükleri grafiklerde görülmektedir. İlerlemenin 2 µm'den, 4 µm'ye çıkarılması ile yüzey kalitesinde genel olarak iyileşme görüldüğü söylenebilir. 4 µm ilerlemeden 8 µm ilerleme değerine doğru tüm grafiklerde birbirinde benzer şekilde yüzey pürüzlülüğünde artış eğilimi görülmektedir. Ancak 50 µm kesme derinliğinde gerçekleştirilen kesme operasyonlarında, 10 µm ilerleme değerinde yüzey kalitesinde iyileşme görülmektedir. Bu durum minimum talaş kalınlığı

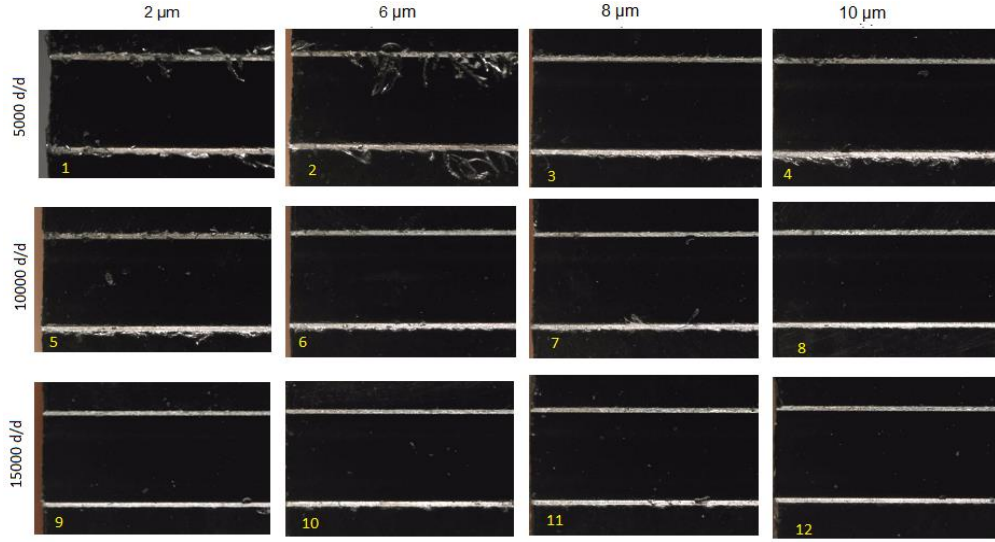
etkisinin azalması ve takımının iş parçasına daha iyi dalabilmesi sonucu daha iyi bir kesme işleminin gerçekleştiğini göstermektedir. Genel olarak grafiklere bakıldığında devir artışının yüzey kalitesinde iyileşme sağladığı görülmektedir.



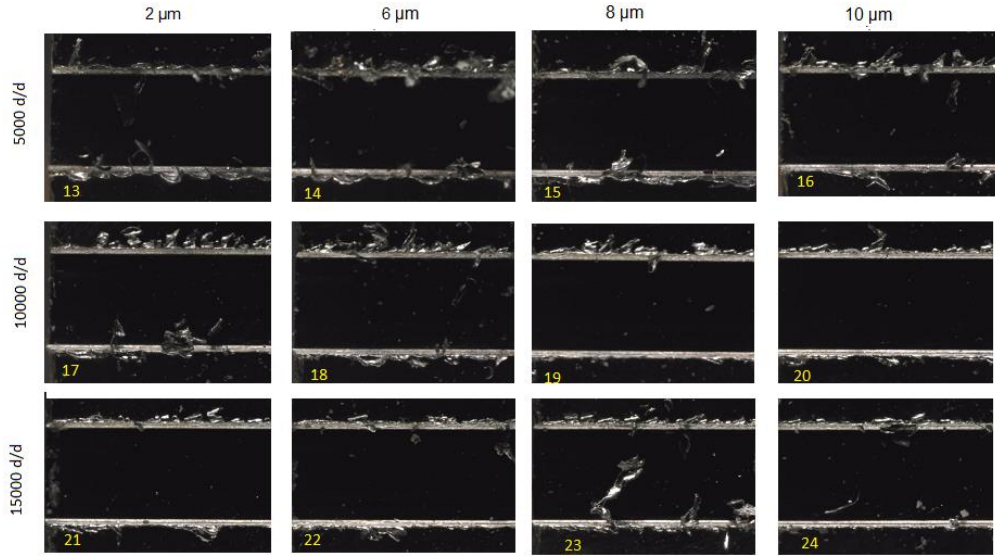
Şekil 2.12 : 5000 d/d, 20 µm kesme derinliğinde sırasıyla 2,4,8, ve 10 µm ilerleme değerlerinde işlenen kanalların taban yüzey görüntüleri.

Yukarıdaki resimde 5000 d/d ve 20 µm kesme derinliğinde sırasıyla 2, 4, 8 ve 10 µm ilerleme değerlerinde nanofocus ile alınan yüzey görüntüleri görülmektedir. 2 µm ilerleme değerinde işlenen kanalın taban yüzeyinde derin takım dalma izleri görülmektedir. Bu izlerin, düşük ilerleme değerinde, kazınma (ploughing) dominant bir kesme sürecinde, takımın malzemeye dalamadığı, malzemenin takımın yanal yüzeyinin altından elastik şekil değişimi ile kaydığı noktalarda takımın bükülmesi sonucu takım burnunun taban yüzeyine dalması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir. Derin izlerin arasındaki düzgün yüzeylerin de, takımın düşük ilerleme sebebi ile aynı yüzeyin üzerinde defalarca dönmesi sonucu, tıpkı ezerek parlatma işlemindeki gibi, takımın alın yüzeyinin taban yüzeyini ezerek bu düzgün profil oluşturması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir. İlerlemenin artması ile birlikte yüzeyde frezelemenin karakteristik trochoidal takım izi belirginleşmektedir. Bu durum kesme işleminin kazınma (ploughing) etkisinden uzak, daha düzgün bir kesme rejiminde meydana gelmesinin sonucu olarak meydana gelmiştir. 10 µm ilerleme değerinde taban yüzeyinde oluşan takım izlerinin, ilerleme artışı sonucu talaş kalınlığının artması ve dolayısıyla kesme kuvvetlerinin artışı ile takımın bükülmeye uğraması ile meydana geldiği düşünülmektedir.

Aşağıdaki resimlerde, her bir parametre kombinasyonunda gerçekleştirilen kanal işleme operasyonları sonucu oluşan çapaklanmaların mikroskop görüntülerinin karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 2.13 : 20 μm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.



Şekil 2.14 : Kesme derinliğinin 50 μm 'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.

1-12 operasyonların çapak görüntüleri incelendiğinde, daha önce alüminyum malzemedeki sonuçlara benzer şekilde, ilerleme ve kesme hızı artışı ile çapaklanmada azalma olmuştur. Kesme derinliğinin 20 μm 'den 50 μm 'ye artması ile tıpkı alüminyum malzemde olduğu gibi çapak oluşumunda aşırı artış meydana gelmiştir. Ancak alüminyum malzeme ile kıyaslandığında, paslanmaz çelik malzemde çok daha az çapak oluşumu meydana gelmiştir. Bunun nedeni, paslanmaz çeliğin alüminyuma kıyasla çok daha az sünek karakteristikte bir malzeme oluşudur. Sonuç olarak paslanmaz malzemde de, alüminyum malzemde

gerçekleştirilen deneylerde gözlemlendiği gibi ilerleme ve kesme hızının artması ile çapaklanma azalmaktadır.

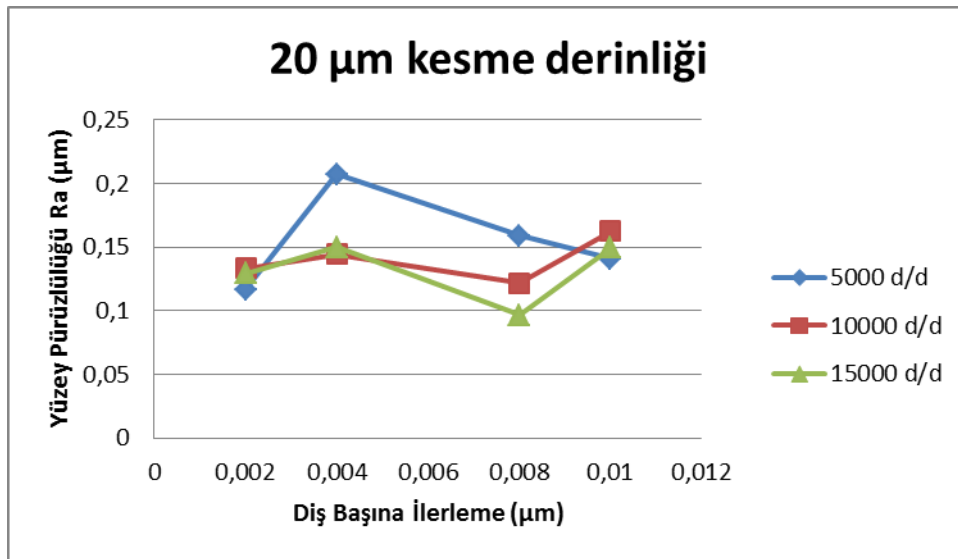
2.2.4 Ti6Al4V Titanyum malzemenin mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi

Yapılan çalışmada 1 mm çapındaki kesici takım ile Ti6Al4V Titanyum malzemede ıslak kesme şartında aşağıdaki tabloda belirtilen kesme parametrelerinde toplam 24 adet kanal frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bir önceki çalışmada, paslanmaz çelik malzemenin kuru kesilmesi sonucu takımda aşırı aşınma meydana gelmiştir. Paslanmaz çelik gibi yüksek dayanımlı olan titanium malzemede ıslak şartlarda işleme gerçekleştirilerek, takım aşınmasının azaltılması amaçlanmıştır.

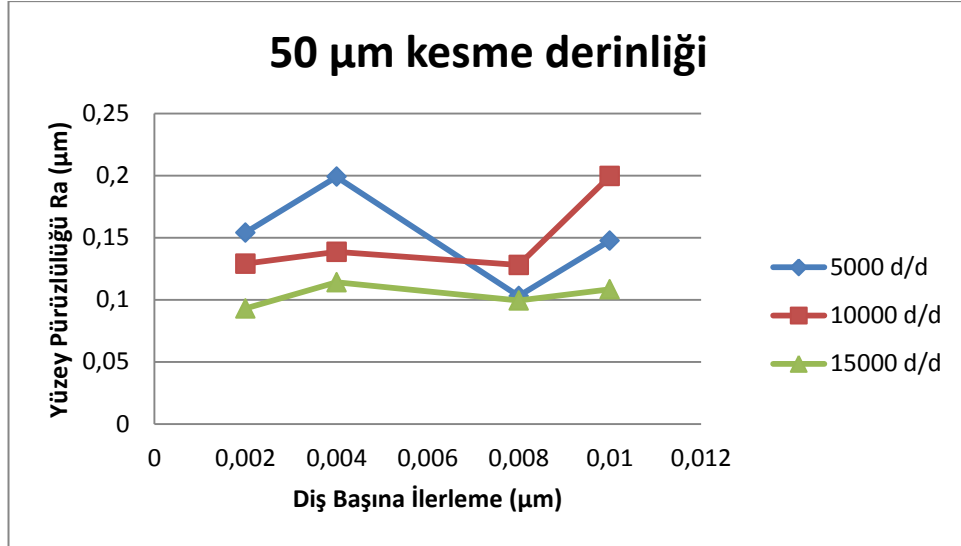
Çizelge 2.3 : Titanyum malzemede gerçekleştirilen mikro frezeleme deneyinin kesme parametreleri.

Kesme Hızı (d/d)	Kesme Derinliği (μm)	Diş Başına İlerleme (μm)
5000	20	2
10000	50	4
15000		8
		10

Aşağıda gerçekleştirilen kesme operasyonları sonucu elde edilen kanal yüzeylerinin pürüzlülüklerinin grafiksel karşılaştırmaları yer almaktadır.



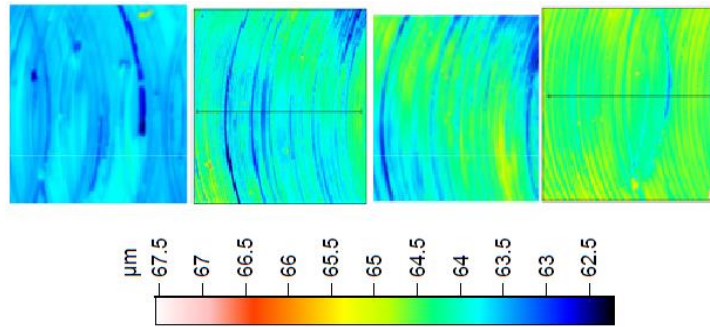
Şekil 2.15 : 20 μm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.



Şekil 2.16 : 50 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.

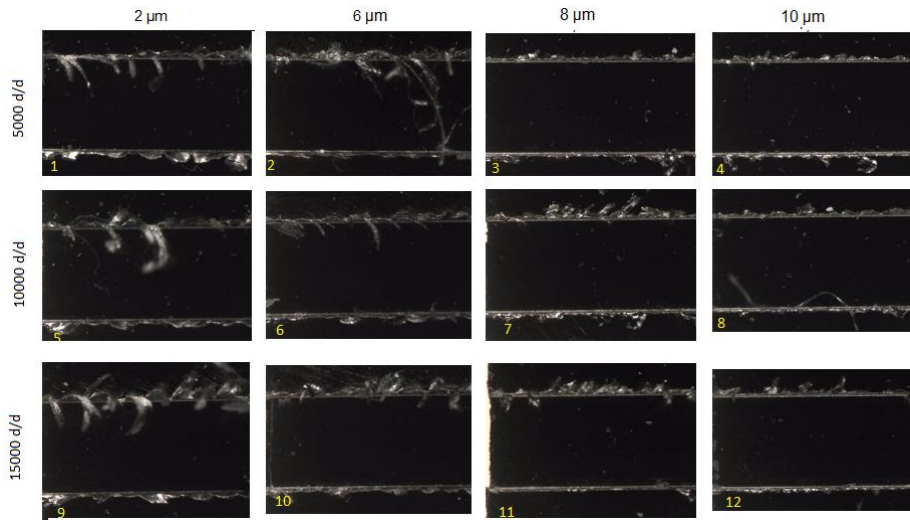
20 µm kesme derinliğinde, 10000 d/d ve 15000 d/d'da gerçekleştirilen kesme operasyonlarında elde edilen yüzey pürüzlülükleri birbirine benzer değerler almakla beraber 5000 d/d'da elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinden daha düşük dağılım göstermektedir. Ayrıca 5000 d/d daki yüzey pürüzlülüğü dağılımı diğer iki kesme hızından farklılık göstermektedir. Bu durum mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunda minimum talaş kalınlığını etkileyen ilerlemenin etkisinin yanı sıra, kesme hızının da işleminde etkisinin olduğunu göstermektedir.

Kesme derinliği 50 µm'ye arttırıldığında, 20 µm kesme derinliğine benzer şekilde 10000 d/d ve 15000 d/d'da gerçekleştirilen kesme operasyonlarında elde edilen yüzey pürüzlülükleri birbirine benzer değerler almakta ve genel olarak 5000 d/d'da elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinden daha düşük dağılım göstermektedir. Bu durumda, kesme derinliğinin, yüzey pürüzlülüğü değerlerine ve dağılım karakteristiğine belirgin etkisinin olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

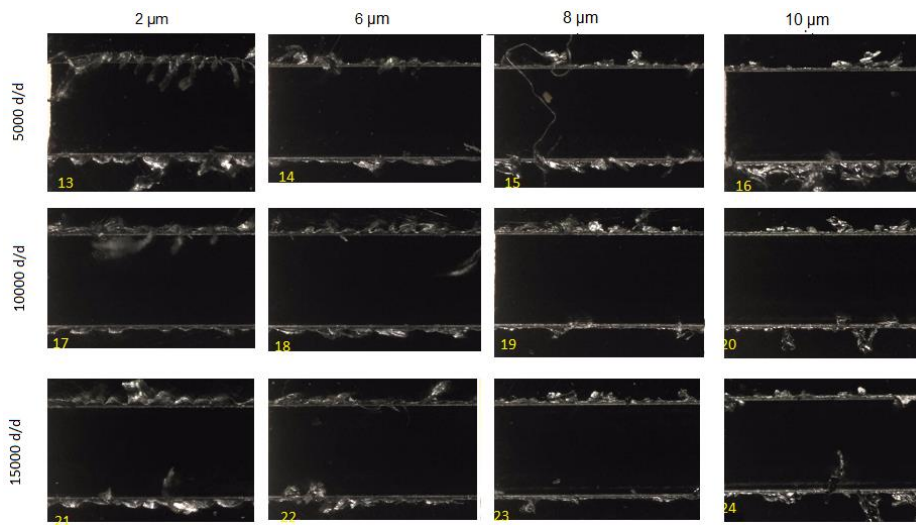


Şekil 2.17 : 5000 d/d, 20 µm kesme derinliğinde sırasıyla 2, 4, 8 ve 10 µm ilerleme değerlerinde açılan kanalların taban yüzey görüntüleri.

Yukarıdaki resimde 5000 d/d da sırasıyla 2, 4, 8 ve 10 μm ilerleme değerlerindeki yüzey görüntüleri görülmektedir. 2 μm ilerleme değerinde kazınma (ploughing) etkisinin yüksek olduğu bir kesme gerçekleştiği, daha önceki çalışmalarda da gözlemlendiği gibi yüzeydeki derin takım izlerinden anlaşılmaktadır. Ancak ilerlemenin artırılması ile daha düzgün bir kesme işlemi gerçekleşmiş ve yüzeyde frezeleme işleminin karakteristik takım hareketinin izleri görülmektedir. Aşağıdaki resimlerde, her bir parametre kombinasyonunda gerçekleştirilen kanal işleme operasyonları sonucu oluşan çapak oluşumlarının mikroskop görüntüleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.18 : 20 μm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.



Şekil 2.19 : Kesme derinliğinin 50 μm 'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.

Yukarıdaki resimde 20 μm kesme derinliğindeki kanallarda çapak görüntülerinden açıkça anlaşılabacağı gibi, ilerlemenin ve devir sayısının artışı çapaklanmayı azaltmaktadır. Kanal derinliğinin 50 μm ' ye çıkarılması ile çapaklanmada artış olduğu gözlenmiştir. 50 μm kesme derinliğinde de ilerleme ve kesme hızı artışı çapaklanmayı azaltmaktadır.

2.2.5 1 mm Çapındaki kesici takım ile gerçekleştirilen yüzey oluşumu deneylerinin sonuçları

Bu bölümde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile mikro frezeleme işleminde, kesme parametrelerinin yüzey oluşumuna etkileri incelenmiştir. Farklı malzemelerde, farklı kesme parametrelerinde gerçekleştirilen deneyler ile yüzey oluşumuna etkileyen mekanizmalar, mikro talaş kaldırma temelleri göz önünde bulundurularak irdelenmiştir. Gerçekleştirilen 3 farklı deney için detaylı incelemeler ve sonuç analizleri deney sonralarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmaların sonuçları değerlendirildiğinde, mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumu ile ilgili olarak aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır.

Geleneksel frezeleme işlemlerinden farklı olarak, mikro frezeleme işleminde düşük ilerleme değerlerinde kötü yüzey oluşumu gözlemlenmektedir. Bu durum düşük ilerleme değerlerinde minimum talaş kalınlığı prensibi ve dolayısıyla kazınma mekanizmasının etkin oluşu nedeniyle talaş oluşumu zorlaşmakta bu durum yüzey pürüzlülüğünde ve çapaklanmada artışa neden olmaktadır.

Kesme hızının artırılması yüzeyden talaşın kaldırılmasını kolaylaştırıcı etkiye bulunduğu ve oluşan talaşın takım yüzeyinden rahatça akmasını sağladığından yüzey pürüzlülüğünde ve çapaklanmada azalma sonucu vermektedir.

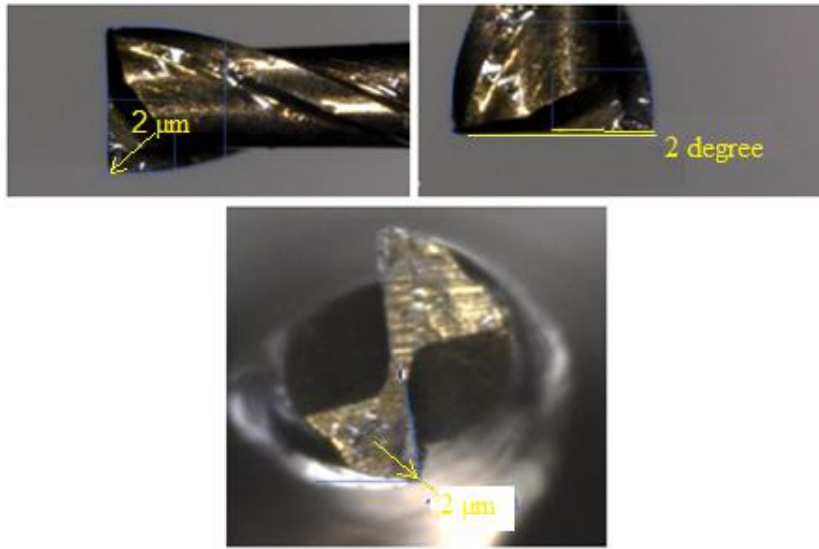
Kesme derinliğinin artışı ile yüzey pürüzlülüğünde çok belirgin olmayan artış, çapaklanmada ise aşırı artış gözlemlenmektedir.

2.3 0.5 mm Çapındaki Mikro Frezeleme Takımı ile Gerçekleştirilen Yüzey Oluşumu Deneyleri

Önceki bölümlerde, mikro frezelemede minimum talaş kalınlığının süreçte büyük etkisinin olduğu ve minimum talaş kalınlığının takımın kesici kenar yarıçapı ile ilişkili olduğu ifade edilmişti. Önceki bölümde 1 mm çapındaki takımlar ile

gerçekleştirilen deney sonuçlarında da görüleceği gibi, minimum talaş kalınlığı ve dolayısı ile ilerlemenin yüzey oluşumunda etkisi büyük olmaktadır. Bu nedenle bu bölümde gerçekleştirilen çalışmalarda, kesici takım geometrisi detaylı bir şekilde incelenecek ve ilerleme seviyelerinin sayısı artırılarak, ilerlemenin prostesteki etkisi daha detaylı incelenmeye çalışılacaktır. Bir önceki çalışmalarda, gerek mikro frezeleme işlemi gerekse yüzey ve takım incelemelerinde kazanılan tecrübeler ile bu kısımda 0,5 mm çapındaki takımların kullanımına geçilmiştir.

Aşağıdaki şekilde bu bölümdeki deneylerde kullanılacak 0,5 mm çaplı kaplamalı mikro freze takımının DinoLite mikroskobu ile alınmış görüntüleri yer almaktadır.

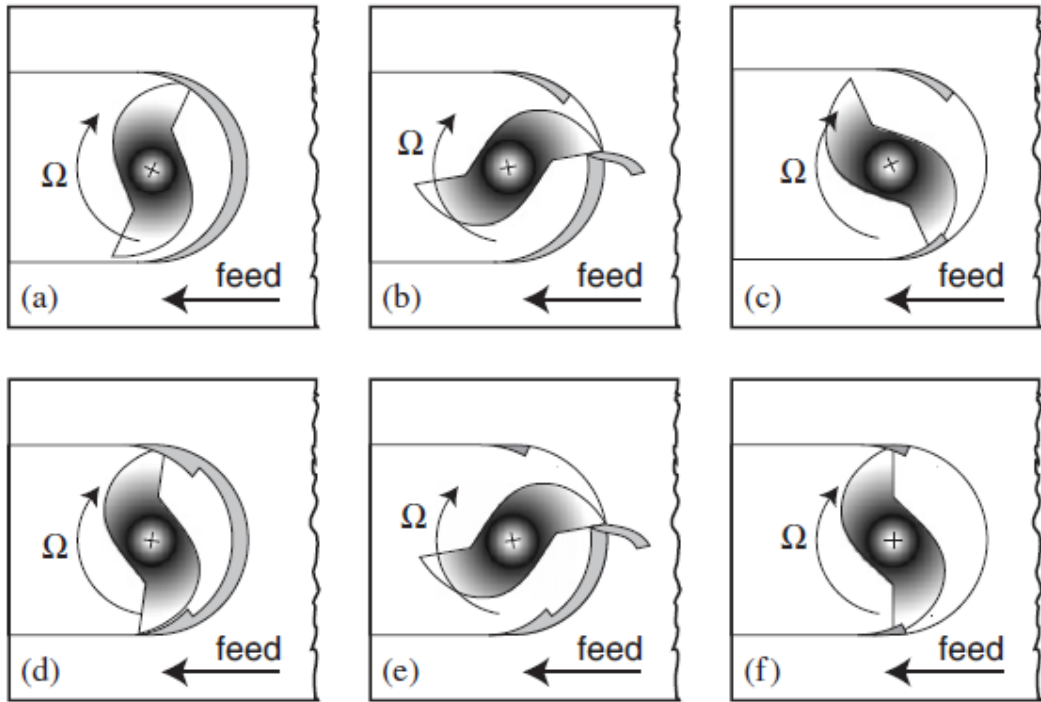


Şekil 2.20 : 0,5 mm çapındaki mikro frezeleme takımının ön veya an mikroskop görüntüleri ve takım ölçümleri.

Alınan mikroskop görüntülerinden takımın kesici kenar ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Resimlerde görüleceği gibi takım kesici kenarı kusursuz keskinlikte değildir ve bir yarıçap değerine sahiptir. Aynı şekilde kesici takım köşelerinin mikron seviyesinde de olsa bir yarıçapı vardır. Bunun sonucu olarak takımın alın yüzeyi de düz bir yapıda değildir. Bunun sonucu olarak takımın alın yüzeyinin de düz bir yapıda olmadığı çok küçük de olsa açılı bir kırılma kuyruğu şeklinde geometriye sahip olduğu görülmektedir. Alın freze takımı makro frezelemede 90 derece keskin köşeli ve düz alına sahip kabul edilebilir iken mikro frezelemede etkileşime girilen talaş kalınlıklarının çok küçük mertebelerde olması sebebiyle takım kesici kenar geometrilerinin süreçte ihmal edilemeyecek önemli

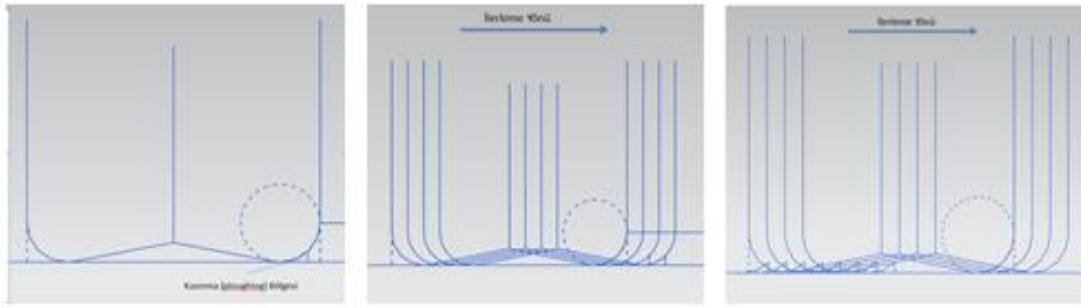
etkilere sahiptir. Takımın yanal kesici kenarlarının bir radyus değeri olduğu gibi, alın kesici kenarları da mikron seviyesinde bir radyus değerine sahip olacaktır.

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi frezeleme işleminde takım malzeme de kesme işlemi gerçekleştirirken talaş kalınlığı değişken olmaktadır. Talaş kalınlığı freze takımının dönme hareketi ile “0” ile f_t değerlerinde değişmektedir. Frezeleme işleminde değişken talaş kalınlığı ve mikro frezelemedeki minimum talaş kalınlığı etkisi birleştiğinde, takımın kesici ağzı malzeme ile etkileşime geçtiğinde talaş kalınlığı 0’dan minimum talaş kalınlığı değerine kadar olan süreçte kazınma (ploughing) oluşmakta, minimum talaş kalınlığından maksimum talaş kalınlığı değeri olan diş başına ilerleme değerine kadar olan süreçte malzeme yüzeyinden talaş kaldırılmaktadır. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere, mikro frezelemede yanal yüzeylerde minimum talaş kalınlığı etkisinden dolayı, kesilecek talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığı değerine ulaşana kadar, talaş oluşumu gerçekleşmemektedir. Minimum talaş kalınlığının altındaki talaş derinlikleri, takımın ilerleyen geçişlerinde yeterli talaş kalınlığı değerlerine ulaştığında talaş oluşumu gerçekleşmektedir. Bu durum kesme işleminde yanal yüzeylerde kesilememiş malzeme kalıntıları oluşmasına ve kenar çapaklanmasının oluşmasına neden olmaktadır [16].



Şekil 2.21 : Mikro frezelemede kesme sürecinde yanal yüzeyin oluşumu.

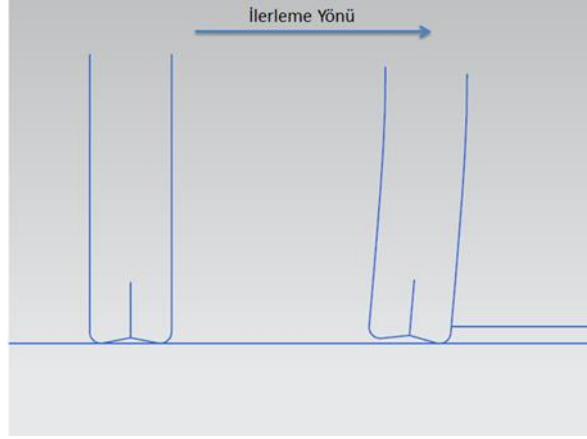
Mikro frezelemede minimum talaş kalınlığı etkisi, taban yüzeyinin oluşumunda da etki göstermektedir. Takım köşesinin belirli bir yuvarlama yarıçapına sahip oluşu taban yüzeyinde kaldırılan talaşın yay şeklinde bir profilde gerçekleşmesine neden olmaktadır. Alın ve köşe yüzeyindeki kesici kenarların yanıl kesici kenarlarda olduğu gibi yuvarlama yarıçapına sahip oluşundan ötürü taban yüzeyinde de kazınma (ploughing) oluşacak, yüzeydeki malzemenin tamamında talaş oluşumu gerçekleşmeyecektir. Bu durum literatürde de incelenmiş, mikro frezeleme işleminde taban yüzey profilini bu kalıntı malzeme geometrilerinin oluşturduğu ifade edilmiştir [17].



Şekil 2.22 : Mikro frezeleme işleminde taban yüzeyi oluşumu.

Yukarıdaki şekildeki örneklemelerde, takımın ilerleme yönünde öndeki kesici ağzın kesme sonrası yüzey üzerinde oluşturacağı yüzey profili geometrik yaklaşımla incelenmiştir. Takımın ilerleme hareketi ile öndeki kesici ağzın oluşturacağı yüzeyin üzerinden arkada kalan kesici ağızda geçecektir. Literatür çalışmalarında, arka kesici ağzın yüzeyde kalıntı malzeme ile etkileşime girdiği ve yüzey profiline etkisinin olduğu durumlar incelenmiştir [18]. Teorik olarak yüzeyde kalan malzeme kalıntıları minimum talaş kalınlığından düşük kalınlıklarda olduğu düşünülürse arkada kalan kesici ağız yüzeyden talaş kaldıramayacaktır. Ancak talaş oluşumu yapılan geometrik yaklaşımdan çok daha karmaşık bir biçimde gerçekleştiği ve yüzeyden talaş ayrılmasının geometrisinin çok daha düzensiz ve kestirilemez oluşu düşünüldüğünde arka kesici ağzın da yüzeyden malzeme kaldırması muhtemel olacaktır. Arka kesici ağız yüzeyden talaş kaldıramadığı kazınma (ploughing) durumlarında da malzeme elastik-plastik şekil değişimine uğrayacak ve yüzeye sürtünerek, lepleme, ezerek parlatma gibi proseslerde olduğu gibi malzemeyi yüzeye bastırarak yüzey profilinde değişikliklere sebep olacaktır.

Takım, kesme işlemini gerçekleştirirken ilerleme yönünde oluşan kuvvetin etkisi ile bükülmeye uğrayacaktır. Takım büküldüğünde ön kesici ağzın malzeme ile temas geometrisi değişecek, arka kesici ağız da yüzeyden uzaklaşacaktır. Bu durumda ön kesici ağzın etkileşime girdiği talaş profilini değişmesi ve arka kesici ağzın yüzey üzerindeki sürtünme temasını azaltarak yüzey ezilmesinin azalması beklenmektedir.



Şekil 2.23 : İlerleme yönünde oluşan kuvvetin etkisi ile takımın bükülmesi.

2.3.1 Deney tasarımı

Yapılan çalışmada, Kern Evo Mikro Frezeleme tezgahında 8 farklı ilerleme, 3 farklı kesme hızı ve 2 farklı kesme derinliği değerlerinde 0,5 mm çapta kaplamalı mikro düz parmak freze takımı kullanılarak iş parçası üzerine kanal açma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kazınma (ploughing) ve minimum talaş kalınlığının mikro frezeleme işleminde önemli etkiye sahip olduğu düşünülerek proste etkisini gözlemleyebilmek adına 8 farklı ilerleme değerinde işlemin gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Aşağıdaki çizelgede kullanılan kesme parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 2.4 : 0,5 mm çaptaki mikro freze takımı ile gerçekleştirilen deneyler için kesme parametreleri.

Kesme Hızı (d/d)	Kesme Derinliği (μm)	Diş Başına İlerleme (μm)
30000	5	0,25
40000	15	0,5
50000		1
		1,5
		2
		2,5
		3
		3,5

Yapılan takım ölçümlerinde kesici kenar yuvarlama çapı yaklaşık 2 µm olarak ölçülmüştür. Minimum talaş kalınlığının kesici kenar yuvarlama yarıçapının %20-40 arasında değerler aldığı göz önünde bulundurulduğunda, minimum talaş kalınlığı 1,2-2,4 µm arasında olacağı düşünülebilir. Kesici takım köşe yarıçapı yaklaşık 2 µm olarak ölçülmüştür. Takım alın ve köşe kesici kenarı da kesici kenar gibi radyusa sahip olacağından yüzeyde kalıntı olarak kalacak malzeme profilleri de minimum talaş kalınlığı ile ilişkili olacaktır.

İş parçası malzemesi olarak bir önceki yüzey oluşumu deneylerinde de kullanılan, havacılık, medikal sanayi gibi ileri teknoloji uygulamalarında büyük önem taşıyan Ti6Al4V ve 15-5 PH paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler dayanım ve sertlik olarak benzer özelliklerde olmasına karşın, elastisite modülü ve kopma uzaması karakteristikleri bakımından farklı özellikler göstermektedir. Titanyum malzeme, paslanmaz çelik malzemeye kıyasla düşük elastisite modülüne ve yüksek kopma uzaması değerine sahiptir. Bu bakımdan titanium malzeme için paslanmaz malzemeye kıyasla daha sünek karakteristikte bir malzeme olduğu söylenebilir. Bu gibi malzeme özellikleri ile deney sonuçlarının incelenmesi sırasında yüzey oluşumuna etkileri incelenmek istenmektedir. Malzemelerin mekanik özellikleri aşağıdaki çizelgede yer almaktadır.

Çizelge 2.5 : 0,5 mm çaptaki mikro freze takımı ile gerçekleştirilen deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

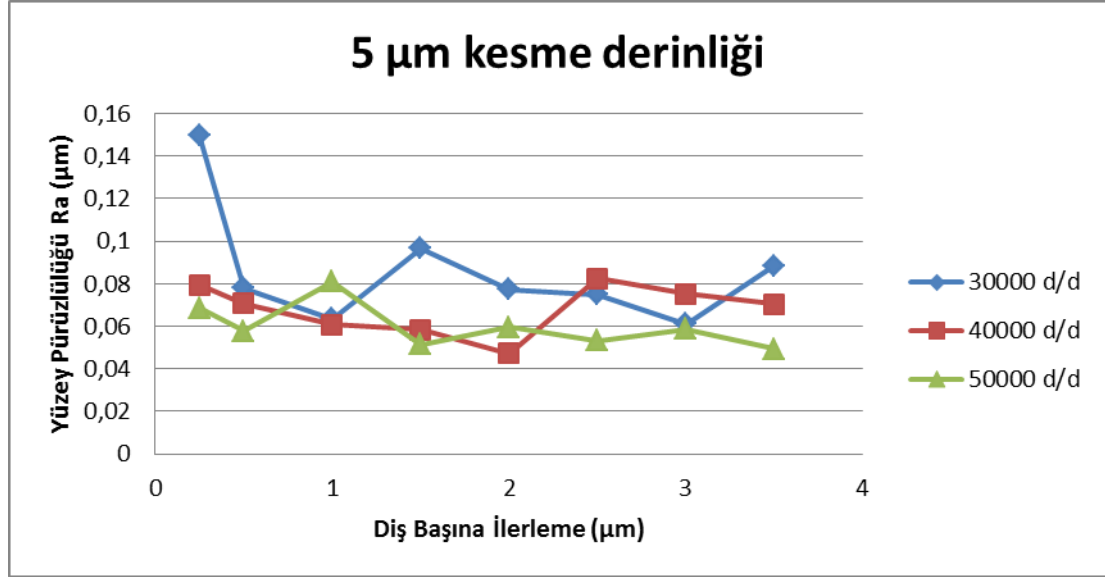
	Ti-6Al-4V	15-5 PH
Akma Dayanımı (Mpa)	880	963
Elastisite Modülü (Gpa)	113,8	196
Sertlik	36 (HRC)	35 (HRC)
Kopma Uzaması	%14	%8,4

İş parçası 65x65 mm boyutlarında kare prizma şeklinde hazırlanmıştır. Bir önceki çalışmada, kesici takımın paslanmaz çelik malzemede aşınmaya ve kırılmaya uğraması nedeniyle kesme işlemi soğutma sıvısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir operasyonda 10 mm uzunluğunda kanal frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

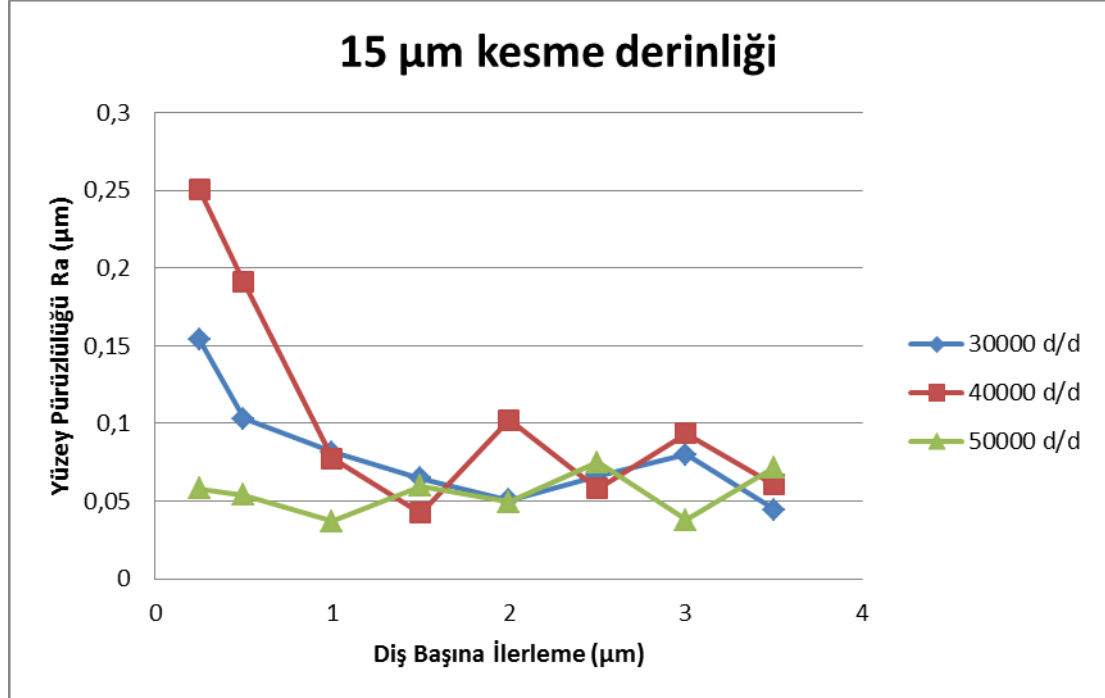
Açılan mikro kanalların taban yüzey pürüzlülükleri, Yüzey mikroskobu ile bir önceki çalışmadaki ile aynı ölçüm mantığı ile gerçekleştirilmiş, kanal kenarlarındaki çapaklanmalar ve takım kesici ağız profilleri optik mikroskop ile görüntülenmiştir.

2.3.2 Ti6Al4V Titanyum malzemenin 0,5 mm çapındaki takım ile mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi

Aşağıda gerçekleştirilen kesme operasyonları sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin grafiksel karşılaştırmaları yer almaktadır.



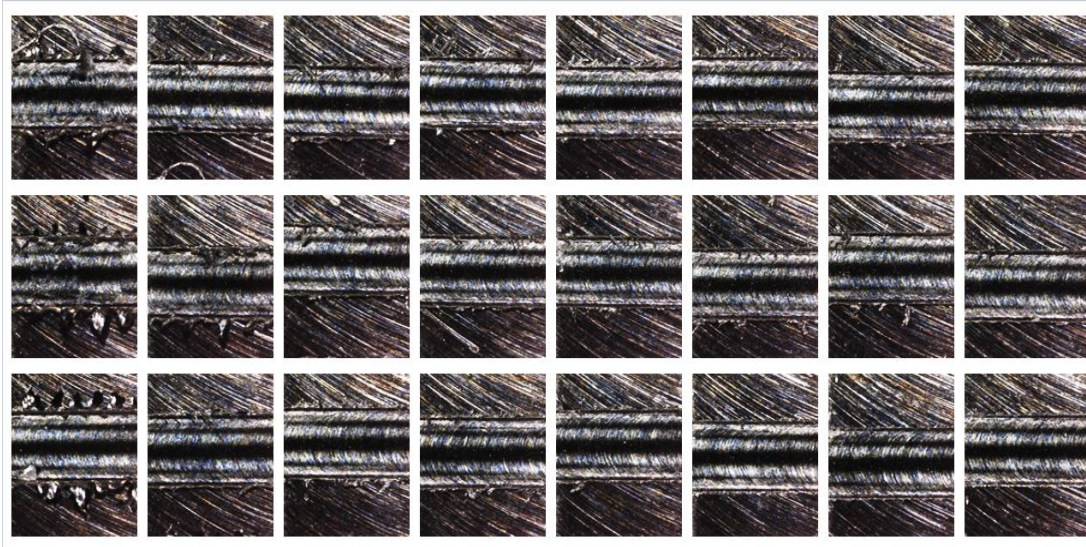
şekil 2.24 : 5 m kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.



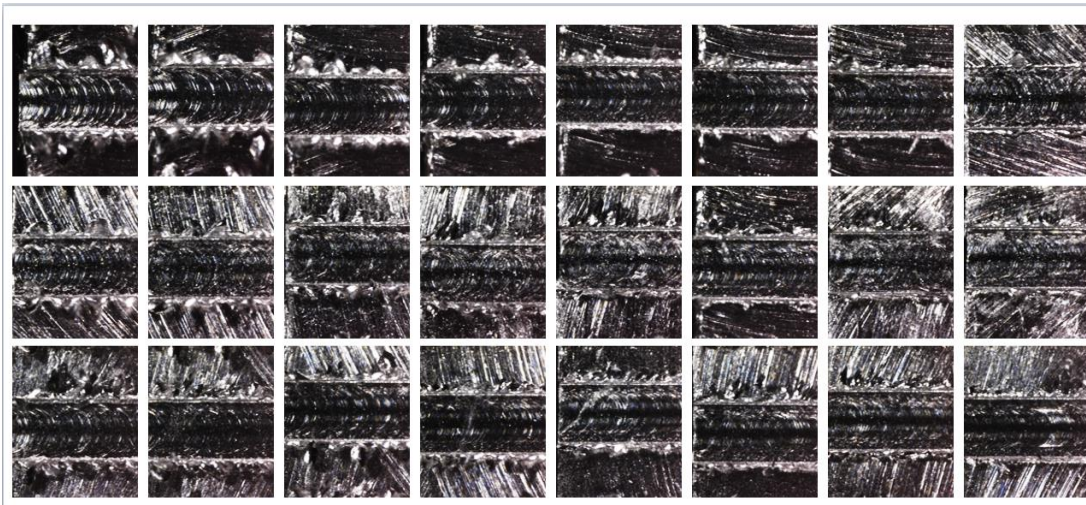
şekil 2.25 : 15 m kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.

Grafikler incelendiğinde her iki kesme derinliğinde gerçekleştirilen kesme işlemlerinde de ilerlemenin artışı ile yüzey kalitesinde iyileşme gerçekleşmiştir.

Özellikle 15 μm kesme derinliğinde bu iyileşme daha belirgin bir şekilde gerçekleşmiştir. Her iki kesme derinliğinde de kesme hızının artışı ile daha iyi yüzey kalitelerinin elde edildiği görülmektedir. 1 μm 'den yüksek ilerleme değerlerinde her iki kesme derinliğinde de benzer yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmesine karşın, 1 μm 'den düşük ilerleme değerlerinde 15 μm kesme derinliğinde yüzey kalitesinde aşırı kötüleşme olduğu gözlemlenmektedir. Önceki çalışmadaki gibi, işlenen kanalların optik mikroskop ile görüntüleri alınmış, her bir kesme operasyonu için oluşan çapak oluşumları görsel olarak karşılaştırılmıştır. Aşağıda yüzey çapaklanmalarının mikroskop görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 2.26 : 5 μm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.

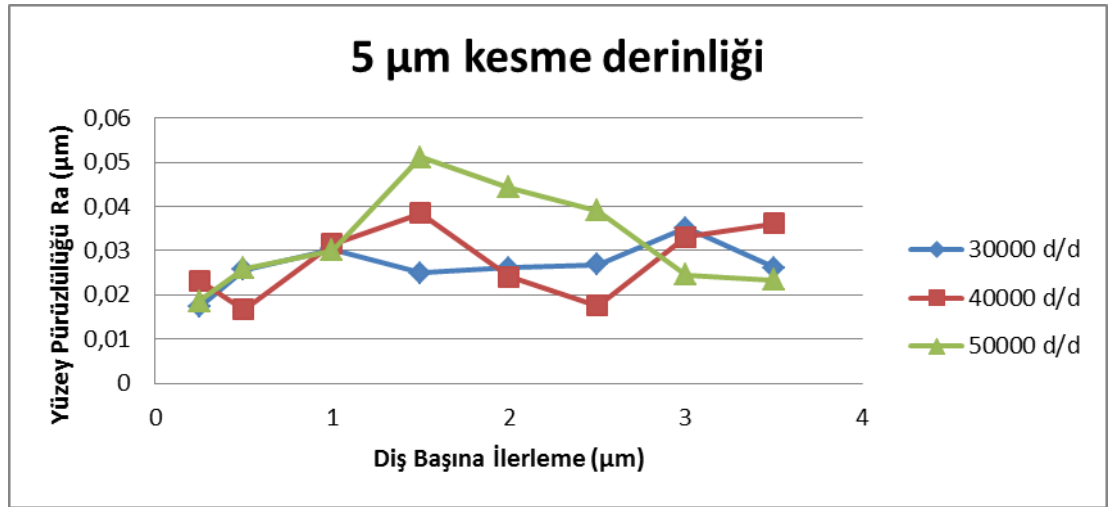


Şekil 2.27 : Kesme derinliğinin 15 μm 'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.

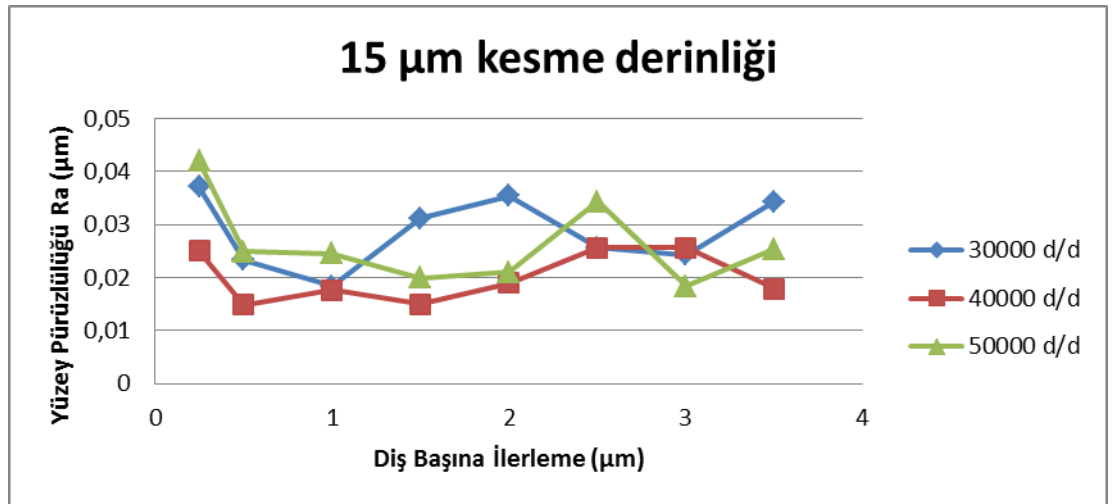
Çapaklanma görüntüleri incelendiğinde, bir önceki çalışmada da gözlemlendiği üzere, ilerlemenin artması ile çapaklanmada azalma gerçekleşmektedir. Kesme hızının artması yine benzer şekilde çapaklanmayı azaltıcı yönde etki ederken, kesme derinliğinin artması ile çapaklanma artışı meydana gelmiştir.

2.3.3 15-5 PH Paslanmaz çelik malzemenin 0,5 mm çapındaki takım ile mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun incelenmesi

Aşağıda gerçekleştirilen kesme operasyonları sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin grafiksel karşılaştırmaları yer almaktadır.



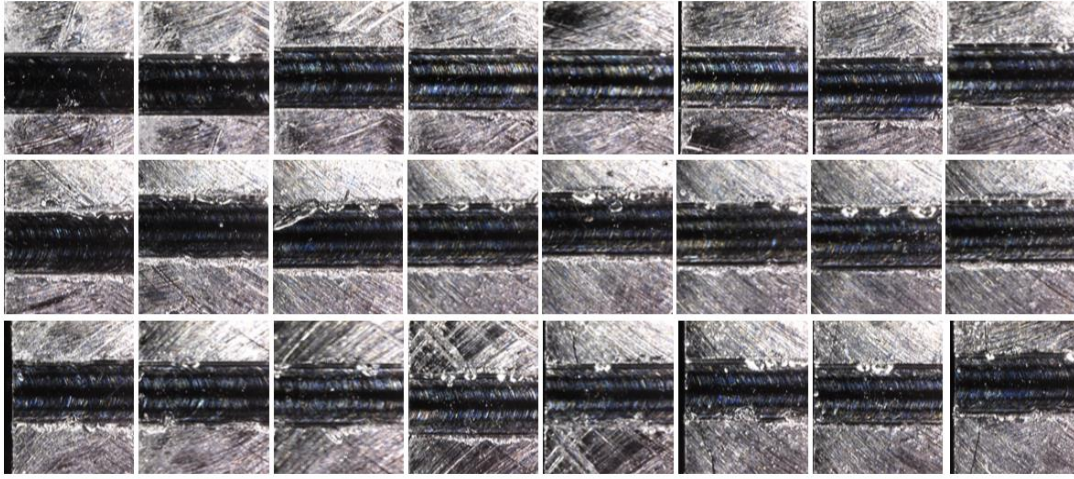
Şekil 2.28 : 5 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.



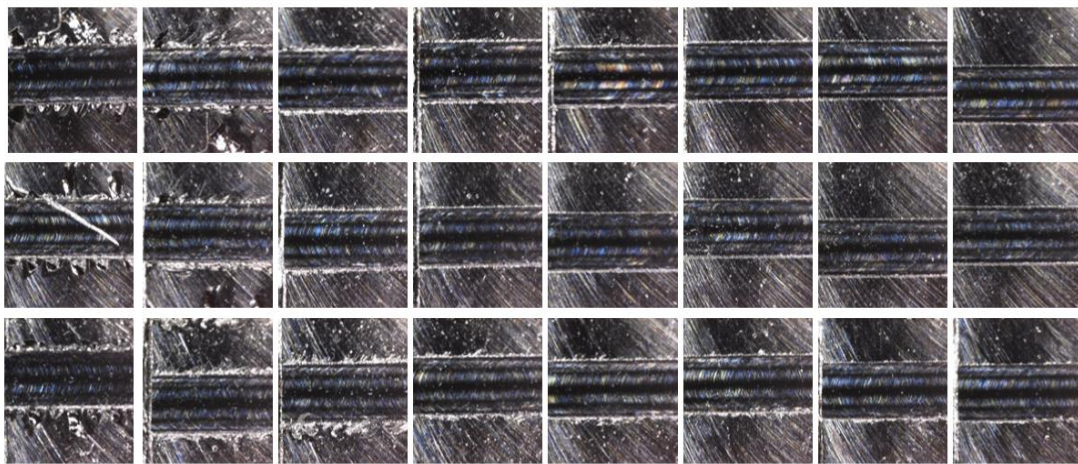
Şekil 2.29 : 15 µm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiği.

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü dağılımlarının birbirine yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir. Titanyum malzemede gerçekleştirilen

deney sonuçlarına kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edilmesinin yanında, düşük ilerleme değerlerinde aşırı yüzey pürüzlülüğü artışı paslanmaz malzemede gözlemlenmemektedir. Bu duruma malzemelerin mekanik özelliklerinin farklı oluşunun etkisinin neden olmaktadır. Daha sünek özellikteki titanyum malzemede talaşın yüzeyden ayrılması sırasında kalıntılar daha fazla gerçekleşmekte, ve özellikle düşük ilerlemedeki takımın arka kesici ağzının ezici etkisi sünek ve elastik özelliği yüksek olan titanium alaşımında yüzeyde kalıntı malzemeler üzerinde daha az etkili olmaktadır. Malzemenin sünek karakteristiğinin fazla oluşu minimum talaş kalınlığını arttırmaktadır. Bu nedenle yüzeydeki kalıntı malzeme boyutları artmaktadır [7,10]. Aşağıdaki resimlerde yüzey çapaklanmalarının mikroskop görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 2.30 : 5 µm kesme derinliğinde ilerlemenin artışı ile çapak oluşumunun azalması.



Şekil 2.31 : Kesme derinliğinin 15 µm'ye çıkarılması sonucu çapak oluşumunun artması.

Çapaklanma görüntülerinden görüleceği gibi ilerlemenin artması ile çapaklanmada azalma gerçekleşmektedir. Titanyum malzemede elde edilen çapaklanmalar ile kıyaslandığında paslanmaz çelik malzemede çok daha az çapaklanmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülüğü incelemelerinde bahsedildiği gibi, titanyum malzemenin paslanmaz çelik malzemeye kıyasla daha sünek yapıda oluşu ile ilgilidir. Kopma uzaması değeri daha düşük olan paslanmaz malzemede talaş yüzeyden ayrılırken elastik ve plastik şekil değişimine daha az uğramakta koparak yüzeyden ayrılma eğiliminde bulunmaktadır. Kesme hızının artması yine benzer şekilde çapaklanmayı azaltıcı yönde etki ederken, kesme derinliğinin artması ile çapaklanma artışı meydana gelmiştir.

2.3.4 0,5 mm Çapındaki kesici takım ile gerçekleştirilen deney sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi

Yüzey pürüzlülük değerleri ve grafikleri incelendiğinde, minimum talaş kalınlığı ve kazınma mekanizmasının beklenen etkisinin sonucu olarak düşük ilerleme değerlerinde yüksek ilerleme değerlerine göre daha kötü kalitede yüzey oluşumu gözlemlenmiştir. Bu durum geleneksel frezelemede ilerlemenin artışı ile yüzey pürüzlülüğünün artması durumundan farklı özellik göstermektedir. Titanyum malzemede ilerleme artışı ile yüzey kalitesinde iyileşme eğilimi paslanmaz çelik malzemeye göre daha belirgin görülmektedir. Paslanmaz çelik malzemede farklı ilerleme değerlerinde elde edilen yüzey pürüzlülükleri birbirine yakın değerlerde seyretmekle beraber, yüksek ilerleme değerlerinde düşük ilerleme değerlerine göre daha iyi yüzey kalitelerinin oluştuğu durumlar görülmektedir. Bu sonuçlar deney malzemelerinin mekanik özellikleri ile ilişkilendirilebilir. Dayanımları ve sertlik değerleri hemen hemen aynı olan iki malzemeden, titanyum daha sünek yapısı ve daha yüksek kopma uzaması değeri ile paslanmaz çelikten farklılık göstermektedir. Bu mekanik özellikler kazınma mekanizması ile elastik-plastik şekil değişiminde malzemelerin farklı davranışlar göstermesine sebebiyet verecektir. Sünek karakteristik gösteren ve yüksek kopma uzaması değerine sahip titanyum malzemede kazınma mekanizması sonucu şekil değişiminin elastik karakteri daha fazla olmakta, minimum talaş kalınlığı daha büyük olmaktadır. Elastik karakterin fazla oluşu nedeni ile ön kesici ağız talaş kaldırdığında daha fazla malzeme yüzeyde kalacak ve arka kesici ağız kalıntı malzemeyi ezdiğinde daha iyi eski haline dönme eğilimi gösterecektir. Titanyum malzemede yapılan kesme işlemleri sonucu ilerleme ile

yüzey pürüzlülük değerlerinin daha geniş dağılım göstermesi paslanmaz malzemede ise daha yakın değerler alması bu durumu destekler niteliktedir. Düşük ilerlemelerde kazınma mekanizmasının etkin olmasının yanında arka kesici ağzın ezme hareketinin de yoğun olarak gerçekleşecektir. Dolayısı ile bu durumda yüzey oluşumunda talaş kaldırmanın yanı sıra malzemenin ezilerek şekillenmesi de yoğun olarak gerçekleşecektir. Özellikle paslanmaz malzemede düşük ilerlemede iyi yüzey kalitelerinin oluşması malzemenin ezilerek şekil almasının daha fazla meydana gelmesidir.

Kesme hızının artması ile titanyum malzemede yüzey kalitesinde belirgin bir iyileşme görülmüştür. Sünek karakteristeki malzemelerin talaşlı işlenmesinde kesme hızının artışının talaş oluşumunu kolaylaştırıcı etkisi bu duruma neden olmaktadır. Paslanmaz malzemede kesme hızının artışı ile yüzey kalitesinde belirgin bir iyileşme meydana gelmemektedir. Hatta bazı bölgelerde yüksek kesme hızlarında kötü yüzey kalitelerinin elde edildiği grafiklerde görülmektedir. Bu durumda kesme hızı artışının titreşime ve tırlamaya yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Kesme derinliğinin artması ile genel olarak yüzey kalitesinde kötüleşmeden bahsedilebilir. Bunun sebepleri; ilerleme yönündeki kuvvet artışı sonucu takımın bükülmesi ve kesme sürecini etkilemesi ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca takımdaki bükülme sonucu arka kesici ağzın ezme etkisinin azalması yüzey kalitesindeki bozulmanın bir diğeri muhtemel sebebi olarak düşünülebilir. Kesme derinliği artışının tırlamaya yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Kenar çapaklanmaları incelendiğinde, her iki malzemede de ilerleme artışı ile çapaklanmada azalma gerçekleşmektedir. Bu durum ilerleme artışı ile kesme işleminde kazınma mekanizmasının etkinliğinin azalması sonucu daha iyi bir kesme rejimi oluşması ve yanall yüzeylerde kalıntı malzemenin azalmasının sonucudur. Kesme hızı artışı ile çapaklanmada azalma meydana gelmiştir. Kesme hızı artışı ile talaş oluşumunun kolaylaşması çapaklanmanın azalmasına neden olmuştur. Kesme derinliğinin artması ile çapaklanmalarda artış meydana gelmiştir. Bu durum artan kesme kuvvetleri sonucu takımın deformasyona uğraması ve kesme sürecini kötü etkilemesi olarak düşünülebilir. Titanyum malzemede çapaklanma oluşumu paslanmaz malzemeye göre oldukça fazla olarak gerçekleşmiştir. Bu durum da titanyum malzemenin paslanmaz malzemeye göre daha sünek yapıda olması ve kopması uzamasının daha yüksek olmasından ötürü meydana gelmektedir.

2.4 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Yapılan çalışmalarda, farklı çapta kesici takımlar ve kesme parametreleri ile çeşitli malzemelerde ve koşullarda deneyler gerçekleştirilerek, mikro frezeleme işleminde talaş ve yüzey oluşumu incelenmiştir. Karşılaştırmalı incelemeler ve yaklaşımlar ile kesme parametrelerinin sürece etkileri belirlenmiş, İş parçası malzemesinin özellikleri, takım malzeme etkileşimi ve süreç geometrisi irdelenerek mikro frezeleme işleminde talaş ve yüzey oluşumu prensipleri belirlenmiştir. Yapılan alışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Mikro frezeleme işleminde, düşük ilerleme değerlerinde kazınma (ploughing) mekanizmasının etkin olmasından ötürü kötü yüzey kalitesi oluşumu ve aşırı çapaklanma görülmektedir. İlerlemenin arttırılması ile, kazınma (ploughing) mekanizmasının etkinliğini yitirmesi sonucu daha iyi bir talaş kaldırma prosesi gerçekleşmekte ve yüzey kalitesinde iyileşme, apak oluşumunda da azalma görülmektedir.

Sünek karakterde ve yüksek kopma uzamasına sahip malzemelerde minimum talaş kalınlığının fazla oluşu nedeni ile kazınma (ploughing) mekanizmasının yüzey ve apak oluşumunda etkinliği fazla olmaktadır.

Düşük ilerleme değerlerinde kazınma (ploughing) mekanizmasının yanı sıra takımın yüzeye sürtünmesi ve yüzeyi ezmesi sonucu yüzey kalitesinde iyileşmeler görülebilmektedir.

Kesme hızının artması ile yüzey kalitesinde iyileşme ve apak oluşumunda azalma olmaktadır. Sünek karakterde ve yüksek kopma uzamasına sahip malzemelerde kesme hızının yüzey ve apak oluşumunda etkinliği fazla olmaktadır.

Sünek karakterde ve yüksek kopma uzamasına sahip malzemelerde, kesme işlemi sonrası apak oluşumu daha fazla gerçekleşmektedir. Sünek malzemelerde minimum talaş kalınlığının yüksek oluşu sonucu kazınma (ploughing) mekanizmasının daha etkin olması bu duruma sebebiyet vermektedir.

Kesme derinliğinin artması ile yüzey kalitesinde kötüleşme eğilimi olmakta, apak oluşumunda da belirgin bir artış gerçekleşmektedir.

3. MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ

Talaşlı imalatı işlenmiş yüzeyin kalitesi büyük önem taşımaktadır. Diğer imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında, boyutsal ve geometrik hassasiyete daha iyi ulaşma imkanı veren talaşlı imalat yöntemlerinde oluşan yüzey kalitesinin iyi olması istenen proses çıktılarından. Endüstride imalatçılar iyi yüzey kalitesi diğer bir değişle düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini yakalayabilmek amacıyla proses stratejileri geliştirmekte, takım imalatçıları takım dizaynları geliştirmekte, tezgah üreticileri tezgah özelliklerini ve yapılarını daha iyi proses çıktıları elde edebilmek adına geliştirmeler yapmaktadır. Diğer taraftan araştırmacılar da; prosesi ve yüzey kalitesine etkiyen proses parametrelerini incelemekte, sonuçlara etkiyen değişkenleri belirlemekte ve yüzey oluşumu ile ilgili modelleme çalışmaları yapmaktadır. Yüzey oluşumu ile ilgili geliştirilen modellemeler, proses öncesinde işlem çıktılarını öngörebilmek adına büyük önem taşımaktadır. Literatürde talaşlı imalat yöntemleri için geliştirilmiş ve doğrulanmış bir çok yüzey modeli bulunmaktadır. Ancak mantık olarak geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile aynı olsa da proses süreci ve temelleri olarak geleneksel yöntemlerden farklılıklar gösteren mikro talaşlı işleme yöntemleri için mevcut geliştirilen talaşlı imalatı yüzey oluşumu modelleri geçersiz olmaktadır. Mikro işlemede boyutların önemli ölçüde küçülmesi; kesme sürecini oldukça etkilemektedir. Makro işlemede etkisi ihmal edilebilecek takım ucu yuvarlama çapı, iş malzemesinin özellikleri tane yapısı, takım malzemesi ve tanecik yapısı, titreşimler, ısı değişimleri gibi etkenler, mikro işlemede süreci önemli ölçüde etkilemektedir. Bu gibi sebepler araştırmacıları mikro işlemeye özgü süreç modellemeleri geliştirmeye yöneltmiştir.

Şüphesiz ki mikro kesme işlemindeki, kesici kenar yarıçapı, minimum talaş kalınlığı ve kazınma(ploughing) gibi oluşumlar süreci farklılaştıran en önemli etkilere. Bu etkiler mikro kesme sürecini geleneksel yöntemlerden farklılaştırmakta ve geleneksel modellemelerin mikro kesme işlemlerinde geçerliliğini yitirmesine neden olmaktadır. Bu etkiler mikro kesme sürecinde talaş oluşumunu belirlemekte, belirli talaş

kalınlığından düşük talaş kalınlıklarında talaş oluşmamasından ötürü süreci etkilemektedir.

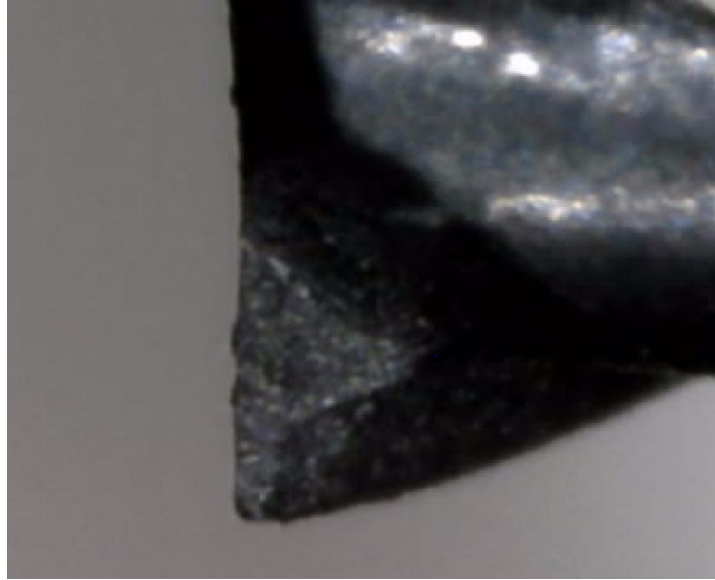
Literatürdeki araştırmalarda görülebileceği üzere, yapılan çalışmalarda bu etki göz önünde bulundurularak kuvvet ve yüzey oluşumu ile ilgili modelleme çalışmaları yapılmaktadır ve konu ile ilgili geliştirmeler devam etmektedir. Araştırmacılar çeşitli yaklaşımlar ile yüzey oluşumunu modellemeye çalışmışlardır. Bu amaçla mikro freze takımını geometrik olarak modelleyerek minimum talaş kalınlığı etkisini vektörel olarak hesaba katarak yüzey oluşumu modeli geliştirilmiş, ferrit ve perlit malzemeler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Minimum talaş kalınlığının mikro frezelemede yüzey oluşumu karakteristiğine temel neden olduğunu saptanmıştır [17]. Diğer bir çalışmada malzeme mikro yapı özelliklerini göz önünde bulundurarak mikro frezelemede yüzey oluşumunu modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir [19]. Bir diğer çalışmada, takım aşınması minimum talaş kalınlığı ve takım geometrisini incelenerek mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumu incelenmiş, modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir [20]. Malzeme tane yapısı talaş oluşumu sürecine etkimektedir. Yapılan incelemelerde bu etki göz önünde bulundurularak yüzey oluşumu incelenmiştir ve modelleme çalışmaları yapılmıştır [21].

3.1 Amaç

Tez çalışmasının bu bölümünde, mikro frezeleme işleminde taban yüzey oluşumu ile ilgili modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yüzey modelinin oluşturulmasından önce işlem sırasında taban yüzeyinin oluşumunun incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bundan önceki bölümlerde takımın hareketi, geometrisi, parça ile etkileşimi ve minimum talaş kalınlığı gibi parametreler incelenerek taban yüzey oluşumu detaylı bir biçimde incelenmişti. Ayrıca detaylı takım incelemeleri gerçekleştirilerek takımın aslında kesici kenarının, köşesinin bir yarıçapı olduğu ve taban yüzeyinin düz değil kıvrımlı kuyruğu gibi bir profilde olduğu tespit edilmişti. Edinilen bu çıkarımların doğrultusunda, minimum talaş kalınlığı – kazınma (ploughing) prensipleri ve proses geometrisi ele alınarak mikro frezelemede taban yüzey pürüzlülüğünü öngören modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

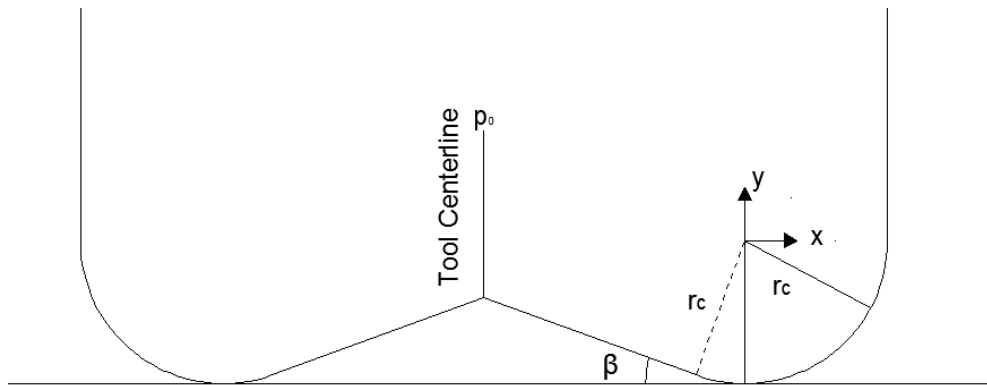
3.2 Taban Yüzey Oluşumu Modeli

Önceki bölümde, takımın kesici kenarlarının köşelerinin bir radyus değerine sahip olduğu, taban yüzeyinin de düz değil kırılmalı kuyruğu şeklinde bir geometriye sahip olduğu ifade edilmişti. Aşağıdaki resimde kesici takımın mikroskop görüntüsünde bahsedilen köşe radyusu ve taban yüzeyi görülmektedir.



Şekil 3.1 : 0,5 mm Çapındaki Kesici Takımın Köşe ve Taban Profilinin Mikroskop Görüntüsü.

Mikro alın parmak freze takımının profil geometrisi, aşağıdaki gibi matematiksel olarak ifade edilebilir [17].



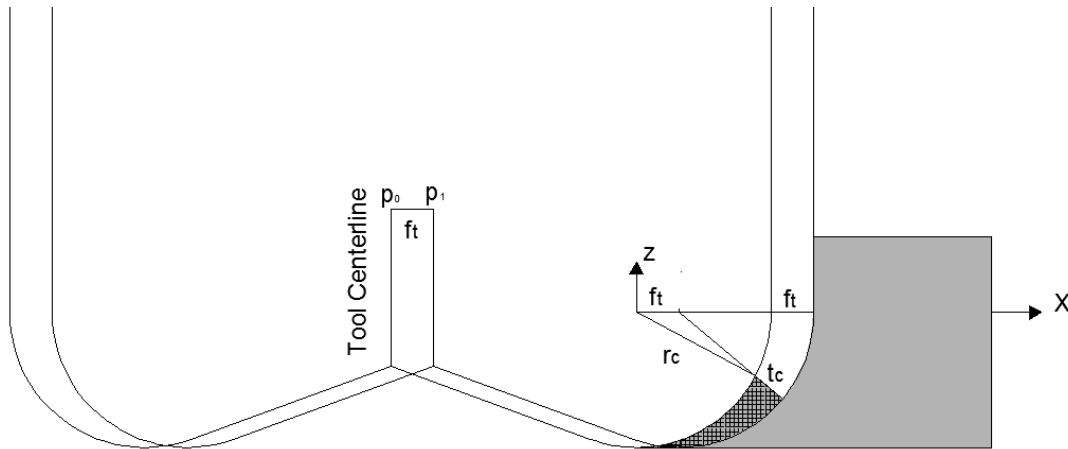
Şekil 3.2 : Kesici takım geometrisinin matematiksel ifadesi.

$$y(x) = \begin{cases} -\sqrt{r_c^2 - x^2}; & x > -r_c \sin \beta \\ -r_c \cos \beta - [x + r_c \sin \beta] \tan \beta; & x \leq -r_c \sin \beta \end{cases} \quad (2.1)$$

Geliştirilen matematiksel ifade de, takımın profile sahip olduğu köşe radiusunun merkezi referans alınarak formulize edilmiştir. Takımın alt kesici kenar açısı olan β değeri de profilin matematiksel ifadesinde hesaplamada yer almaktadır.

Freze takımında kesici kenar, köşe radiusu ve taban kesici ağızları da kesici kenar yuvarlama yarıçapına sahip olacağından, minimum talaş etkisi bütün kesme bölgelerinde etkili olacaktır. Önceki bölümlerde de incelendiği üzere minimum talaş kalınlığı ve ilerleme, mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun temel parametreleridir. Kesme hızı ve kesme derinliği gibi faktörler yüzey oluşumuna daha ilerlemeye kıyasla daha az etkide bulunmakta, meydana getirdikleri etki de daha çok sıcaklık, şekilde değişim hızı etkisi gibi özelliklerden ötürü süreçte etkileşim halindeki malzemenin mekanik davranışına etkimektedir (sıcaklık etkisi ile malzemenin daha sünek davranması, şekil değişim hızı artışı ile malzemenin elastisitesinin azalması gibi). Bu nedenle bu parametrelerin etkisi proses geometrisinden çok minimum talaş kalınlığı noktasında belirleyici olacaktır. Bu nedenle yüzey modelinde referans alınacak parametreler temel olarak geometri, ilerleme ve minimum talaş kalınlığıdır. Bu nedenle bu parametrelerin etkisi proses geometrisinden çok minimum talaş kalınlığı noktasında belirleyici olacaktır. Bu nedenle yüzey modelinde referans alınacak parametreler temel olarak geometri, ilerleme ve minimum talaş kalınlığıdır.

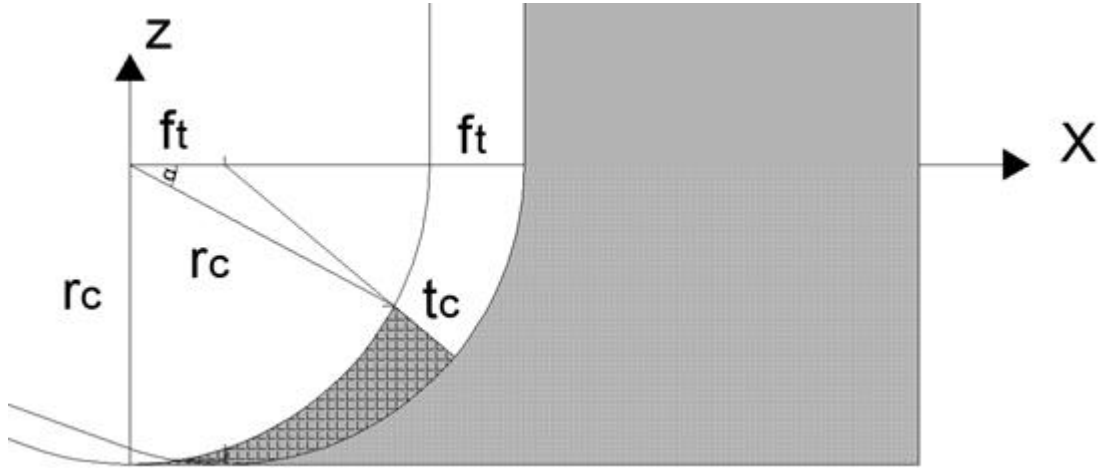
Takımın malzemeyi keserkenki pozisyonu düşünüldüğünde bu yuvarlama yarıçapından dolayı talaş kalınlığı değişiklik gösterecektir. Aşağıdaki resimde takımın malzeme ile etkileşime girmesi örneklendirilmiştir.



Şekil 3.3 : Takımın kesme sürecinde malzeme ile etkileşimi.

Şekilde görüleceği gibi, takım parça içerisinde f_t diş başı ilerleme değerinde ilerlediğinde kesici kenarlar ile temas halinde olan talaş kalınlığı takımın r_c ile adlandırılan köşe radiusundan dolayı değişiklik göstermektedir. Mikro kesme işlemindeki minimum talaş kalınlığı prensibini düşündüğümüzde, minimum talaş kalınlığı olan t_c değerinden daha düşük talaş kalınlıklarında malzemede elastik-plastik şekil değişimine uğrayacak ve talaş oluşumu gözlemlenmeyecektir. Bundan dolayı şekilde gösterildiği gibi t_c değerinden düşük olan talaş kalınlıkları talaş olarak yüzeyden kaldırılamayacak ve yüzeyde kalacaktır. Bu malzeme kalıntıları, işlenen yüzeyin profilini oluşturacaktır. Yüzey oluşumu modelinin oluşturulması için, kalıntı geometrilerinin, takım ve süreç geometrilerinin hesaplanması gerekmektedir.

Aşağıdaki şekilde takımın geçişi sonucu talaş olarak kaldırılan ve kazınmaya uğrayarak yüzeyde kalıntı olarak kalan bölgeler görülmektedir. Takım ile etkileşime giren malzeme bölgesinde t_c minimum talaş kalınlığının sağlandığı bölgeler ve sağlanmadığı bölgeler arasında bir sınır oluşmaktadır. Bu sınır takımın kesici kenar radiusu ile ilişkili olan minimum talaş kalınlığı değeridir. Kesme bölgesinin geometrisi incelendiğinde bu değer sağlandığı nokta takım köşe radiusunun x eksenine ile α açısını yaptığı noktada gerçekleşecektir.

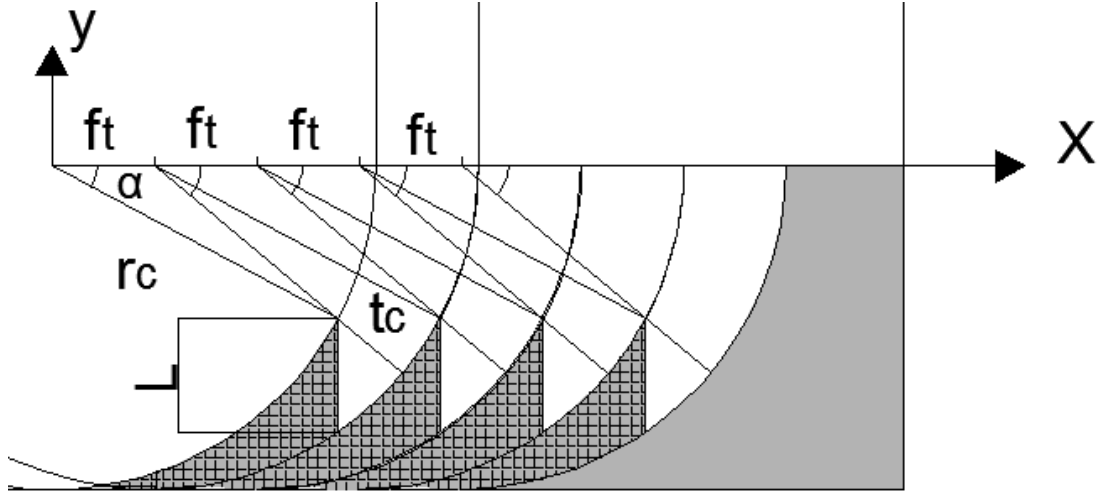


Şekil 3.4 : Minimum talaş kalınlığı sınırı ve açısı.

Minimum talaş kalınlığı sınırının açısı olan α değerinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(-\frac{(r_c - t_c)^2 - f_t^2 - r_c^2}{2f_t r_c} \right) \quad (2.2)$$

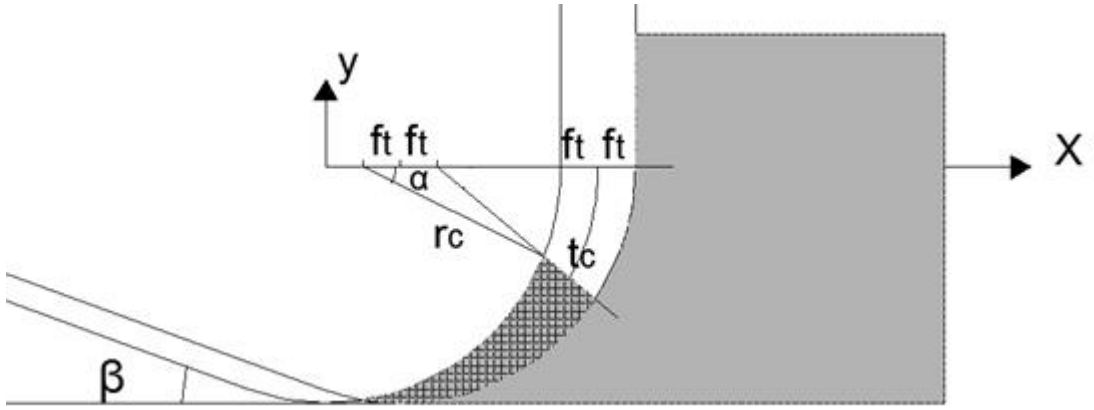
α açısı ile hesaplanan kalıntı malzeme bölgesinin tepe noktası, takımın bir f_t ilerleme değeri kadar ilerlediğinde etkileşime gireceği talaş alanı ile dikey olarak birleştirilerek yinmeli bir şekilde hesaplanırsa aşağıdaki gibi yüzey profili oluşacaktır.



Şekil 3.5 : Model ile oluşturulan yüzey profili.

Şekilde görüldüğü gibi α açısı ile hesaplanan kalıntı malzeme bölgesinin tepe noktası ile takımın bir f_t ilerleme değeri kadar ilerlediğinde etkileşime gireceği talaş alanı arasındaki dik L mesafesi, oluşan yüzey profilindeki en üst ve en alt sınırlar arasındaki maksimum mesafeyi yani R_t değerini temsil etmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi, minimum talaş kalınlığı mikro frezeleme işleminde talaş oluşumunu belirleyen temel kriterdir. Bu nedenle dış başına ilerleme değerinin minimum talaş kalınlığından küçük olduğu durumlarda, ilk ilerleme değerinde talaş oluşumu gözlenmeyecektir. Takım ilerleme hareketine devam edip minimum talaş kalınlığına ulaştığı noktada talaş oluşumu başlayacaktır. Aşağıdaki resimde bu durum örneklenmiştir.



Şekil 3.6 : Diş başına ilerleme değerinin minimum talaş kalınlığı değerinden küçük olduğu kesme süreci.

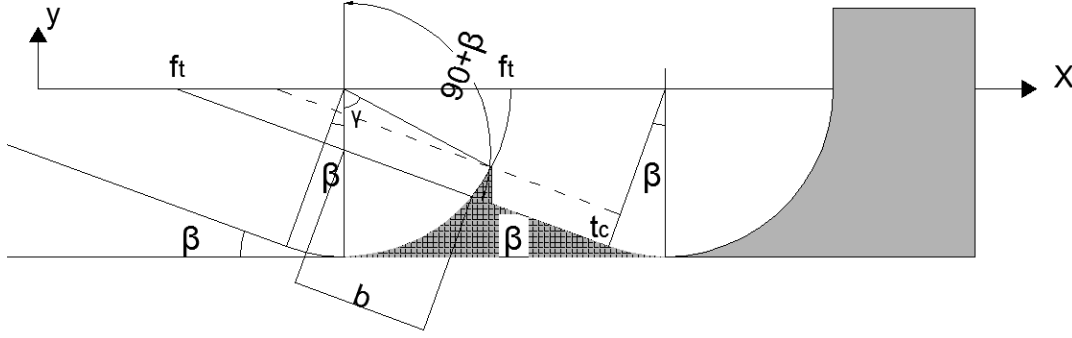
Şekilde görüldüğü gibi, ilk ilerleme değerinde minimum talaş kalınlığı sağlanamamış, takım ikinci ilerleme hareketini yaptığında yeterli talaş kalınlığı sağlanmıştır. Bu yaklaşım ile, yüzeyde kalıntı olarak kalan malzeme geometrisi periyodik olarak hesaplanarak yüzey profilini oluşturmak mümkündür. Aşağıda yüzey profilinin matematiksel ifadesi yer almaktadır.

$$y_{profil} = \begin{cases} y = r_c - \sqrt{r_c^2 - x^2} & r_c \cos \alpha - f_t \times n_{ft} < x \leq r_c \cos \alpha \\ y = r_c - \sqrt{r_c^2 - (x - f_t \times n_{ft})^2} & r_c \cos \alpha < x \leq f_t \times n_{ft} + r_c \cos \alpha \end{cases} \quad (2.3)$$

Formüldeki n_{ft} değeri, talaş oluşumunun kaçınıcı ilerleme hareketinde meydana geldiğini ifade etmektedir. Modelde α açısı, minimum talaş kalınlığının sağlandığı sınırın açısı idi. Bu nedenle, α açısının hesaplanabildiği ilerleme sayısı n_{ft} değerine eşit olacaktır. Oluşan yüzey profilinde, maksimum alt ve üst nokta arası mesafe olan L değeri de aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Bu değer aynı zamanda R_t değerine eşit olmaktadır.

$$Rt = L = \sqrt{r_c^2 - (r_c \cos \alpha - f_t \times n_{ft})^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_c \cos \alpha)^2} \quad (2.4)$$

Bu noktaya kadar, modelleme çalışmalarında, iş parçası ile takımın köşe radyusunun etkileşime geçtiği durumları inceledik. Ancak, takımın geometrisinden ötürü, ilerleme değerinin yüksek olduğu durumlarda, takımın köşe radyusunun yanında alt kısımlarında malzeme ile etkileşime geçtiği durumlar meydana gelecektir.



Şekil 3.7 : Diş başına ilerlemenin takım köşe radyusu sınırlarından büyük olduğu kesme süreci.

Yukarıdaki resimde yüksek ilerleme değerlerinde, takımın alt yüzeylerinin malzeme ile etkileşime geçtiği durumlar örneklendirilmiştir. Takımın geometrisinin matematiksel ifadesinde, köşe radyusu toplamda $90+\beta$ açısında bir yay şeklindedir. Buradan hareketle, talaş oluşum sınırını belirleyen α açısı, köşe radyusu yay açısından büyük olduğu durumlarda, takımın alt kısımlarının da malzeme ile etkileşime geçtiğini söyleyebiliriz. Şekilde görüldüğü gibi, takım alt yüzeyi, köşe radiusundan sonra açılı doğru şeklinde devam eden bir geometridir. Bu kısımda takımın diğer kesici ağızları ile aynı kesici kenar radiusuna sahip olduğu düşüncesi ile hareket edilirse, minimum talaş kalınlığı etkisi bu noktalarda da geçerli olacaktır. Şekilde görüldüğü gibi, minimum talaş kalınlığından ötürü yüzeyde kalıntı malzemenin sınırını belirleyen γ açısıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$r_c^2 = (r_c - \sin\beta f_t - t_c)^2 + b^2 - 2(r_c - \sin\beta f_t - t_c)b\cos(90 + \beta) \quad (2.5)$$

$$b^2 = (r_c - \sin\beta f_t - t_c)^2 + r_c^2 - 2(r_c - \sin\beta f_t - t_c)r_c\cos\gamma \quad (2.6)$$

Denklemler çözüldüğünde:

$$\gamma = \cos^{-1}\left(-\frac{(r_c - \sin\beta f_t - t_c)^2 - b\cos(90 + \beta)}{r_c}\right) \quad (2.7)$$

γ açısı ile yüzey profili matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$y_{profil} = \begin{cases} y = r_c - \sqrt{r_c^2 - x^2} & 0 < x \leq r_c \sin\gamma \\ y = (f_t - x) \sin\beta & r_c \sin\gamma < x \leq f_t - r_c \sin\beta \\ y = r_c - \sqrt{r_c^2 - (x - f_t)^2} & f_t - r_c \sin\beta < x \leq f_t \end{cases} \quad (2.8)$$

Oluşan yüzey profilinde, maksimum alt ve üst nokta arası mesafe olan L değeri de aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Bu değer aynı zamanda Rt değerine eşit olmaktadır.

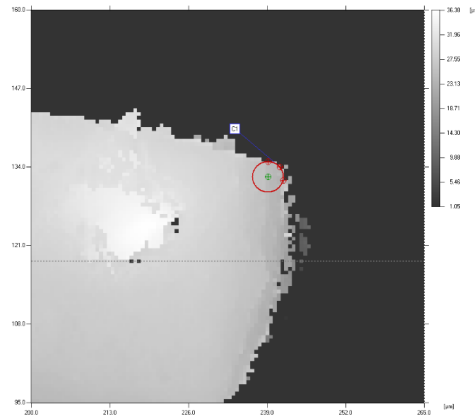
$$Rt = L = r_c - \sqrt{r_c^2 - (r_c \sin \gamma)^2} \quad (2.9)$$

3.3 Geliştirilen Yüzey Modelinin Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması

Yüzey modelinin deneysel veriler ile karşılaştırılması amacıyla, Ti6Al4V titanyum alaşımı üzerinde, kesme sıvısı kullanılarak, 0.5 mm çapındaki düz mikro freze ile 15 µm kesme derinliğinde ve 30000 d/d da 8 farklı dış başına ilerleme değerlerinde kanal frezeleme işlemi gerçekleştirilerek, oluşan yüzey profili ölçülecektir. Elde edilen sonuçlar geliştirilen model ile karşılaştırılacaktır. Geliştirilen model ile hesaplamalar yapılabilmesi için takımın geometrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yüzey mikroskobu ile takımın kesici kenar yarıçapı ve köşe yarıçapı değerleri ve takım taban açısı ölçülmüştür.

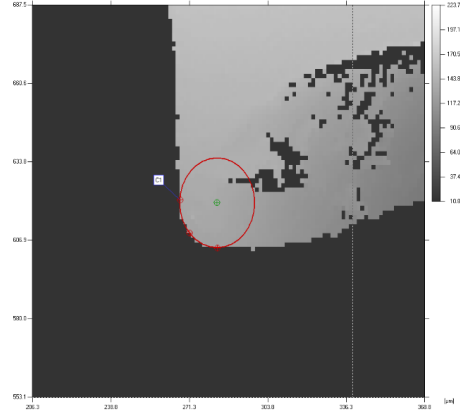
Çizelge 3.1 : Kesme parametreleri.

Kesme Hızı (d/d)	Kesme Derinliği (µm)	Dış Başına İlerleme (µm)
30000	15	0,25
		0,5
		1
		1,5
		2
		2.5
		3
		3,5



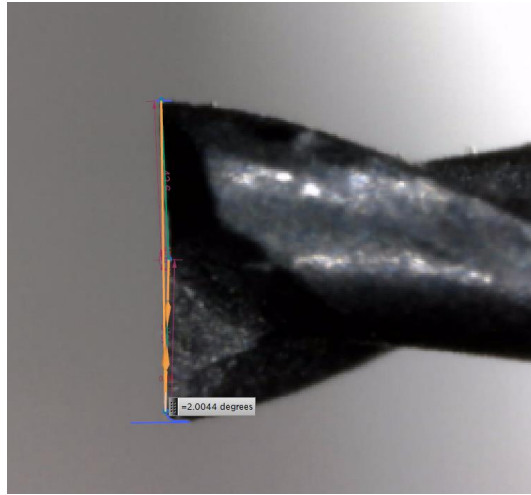
Şekil 3.8 : Takımın kesici kenar yarıçapının ölçülmesi.

Yapılan ölçümler neticesinde takımın kesici kenar radyusunun yaklaşık olarak 2,5 μm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.9 : Takımın köşe radyusunun ölçülmesi.

Yapılan ölçümlerde köşe radyusunun yaklaşık olarak 2 μm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.10 : Taban alt kesici kenar açısının ölçülmesi.

Yapılan ölçümlerde alt kesici kenar açısının yaklaşık olarak 2 derece olduğu belirlenmiştir.

Geliştirilen model ile hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi için, minimum talaş kalınlığı değerinin bilinmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda minimum talaş kalınlığı değerinin iş parçası malzemesine ve takım özelliklerine göre, genelde kesici kenar radyusunun 0,20 ila 0,40 katı arasında değer aldığı, bakır ve alüminyum malzeme ile yapılan çalışmalarda 0,05 katı kadar olduğu, ferrit ve perlit malzemelerde yapılan test ve modellemelerde 0,13-0,43 katı kadar değer aldığı görülmektedir.[10,11,17] Minimum talaş kalınlığı oranı iş malzemesi, malzeme, takım malzemesi ve kaplama tipi, kesme koşulları gibi etkenlerden etkileneceği

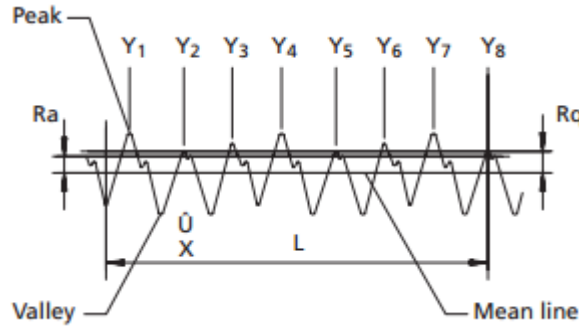
düşünüldüğünde, bu değerin net olarak bulunması için modelleme çalışmalarından, deneysel çalışmalardan ve sonlu eleman analizlerinden faydalanabilir. Bu çalışmada, minimum talaş kalınlığı için katsayı değeri 0,16 olarak seçilmiştir. Bu koşullarda minimum talaş kalınlığı değeri:

$$tc = 2,5 \times 0,16 = 4 \mu m \quad (3.1)$$

Olarak hesaplanmıştır.

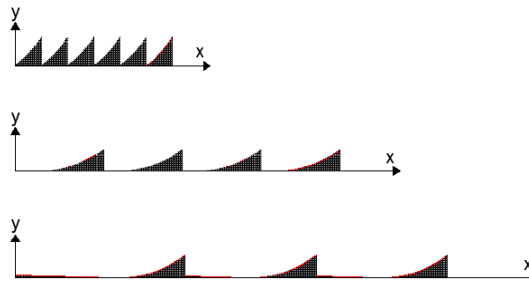
Deneysel sonuçlar ile karşılaştırılabilmesi amacıyla, geliştirilen model ile, belirtilen ilerleme değerleri için yüzey profilleri hesaplanacaktır. Oluşturulan yüzey profillerinde geometrik olarak birbirini yineleyen profil belirlenerek Rt ve Ra yüzey pürüzlülük parametreleri hesaplanacaktır. Ra değeri aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x) dx| \quad (3.2)$$



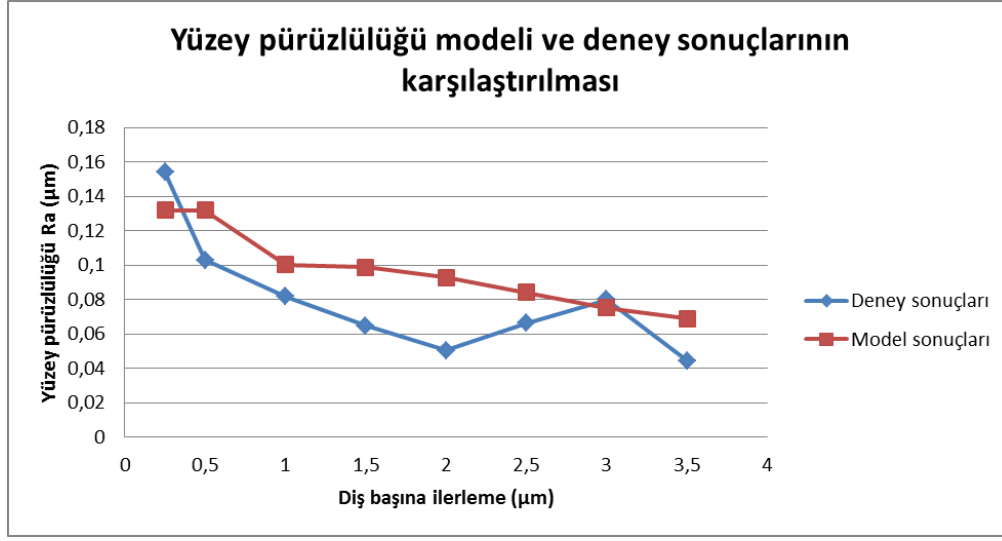
Şekil 3.11 : Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri Ra.

Geliştirilen model ile oluşturulan işlenmiş yüzey profile örnekleri aşağıdaki resimde görülmektedir.



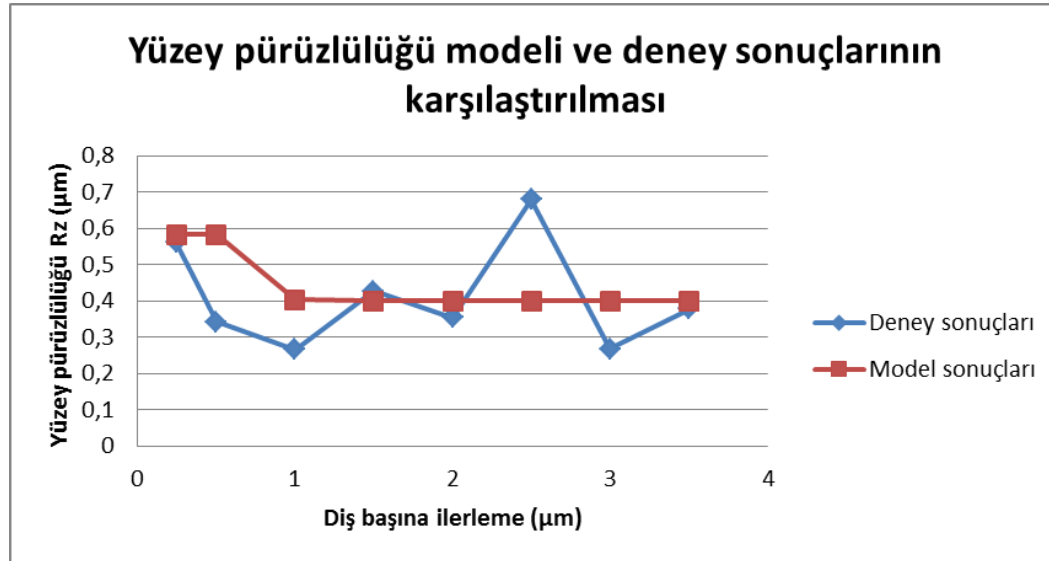
Şekil 3.12 : Geliştirilen model ile oluşturulan yüzey profilleri (Yukarıdan aşağıya; 0,5 μm, 1,5 μm ve 2,5 μm dış başına ilerleme).

Aşağıdaki grafikte, yüzey pürüzlülüğü Ra değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırması yer almaktadır.



Şekil 3.13 : Yüzey pürüzlülüğü Ra değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.

Yukarıdaki grafikte görüldüğü gibi, geliştirilen model, deneysel sonuçlarla elde edilen değerlere yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 3.14 : Yüzey pürüzlülüğü Rz değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.

Yukarıdaki grafikte, yüzey pürüzlülüğü Rz değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırması yer almaktadır. Geliştirilen modelde yüzey profilinin en üst ve en alt noktaları arasındaki mesafe olan Rt değeri hesaplanmıştır. Ancak modellenen Rt değerinin yüzeyde ölçülen Rt değeri ile karşılaştırılması çok isabetli

bir yaklaşım olmayacaktır. Bunun nedeni, optik olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğünde, yüzeyde oluşabilecek teorik yaklaşımın dışındaki bir aşırı malzeme kalıntısı, çapak ya da talaş kalıntısının, bütün yüzey boyunca tek bir değere tekabül eden R_t değeri ile modellenen değer arasında aşırı fark gösterebileceğidir. Bu nedenle yüzeyde kalıntı malzemenin oluşturduğu maksimum yükseklik kıyaslanırken, yüzey profilinde en büyük 5 tepe-çukur noktası mesafesinin ortalaması değeri olan R_z değeri kullanılacaktır. Geliştirilen modelde yüzey profili tekrar eden bir şekilde oluşturulduğu için R_t değeri R_z değerine eşit olacaktır. R_z değerlerinin karşılaştırıldığı grafik incelenecek olursa, geliştirilen yüzey modelinin, deneysel sonuçlarla yakın değerler verdiği görülmektedir. Yüzeyde talaş oluşumu sınırı olarak minimum talaş kalınlığı değeri baz alındığı için ilerleme değerinin artması ile birlikte, kalıntı malzeme yüksekliği minimum talaş kalınlığı değeri olan 4 μm 'de sabit kalmaktadır. Buradan yola çıkarak, mikro frezeleme işleminde daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için düşük minimum talaş kalınlığı değerinin sağlanacağı; daha keskin yani düşük kesici kenar radyuslu takım, kesme bölgesinin soğutularak malzemenin ısı ile daha sünek hale gelmesinin önüne geçilmesi, kesme hızının mümkün olabildiğince yüksek tutularak, yüksek şekil değiştirme hızı sağlanarak malzemenin daha az sünek davranış göstermesinin sağlanması gibi durumlar göz önüne alınmalıdır.

3.4 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Mikro frezeleme işleminde taban yüzey pürüzlülüğünü hesaplamanması amacı ile minimum talaş kalınlığı – kazınma prensipleri ile proses geometrisi ilişkilendirilerek matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model oluşan taban yüzeyinin R_z ve R_a değerlerini yaklaşık olarak hesaplayabilmektedir. Modelin doğru sonuç verebilmesi hususunda en kritik değişken minimum talaş kalınlığı değeridir. Yapılan hesaplamalarda tahmini olarak seçilen minimum talaş kalınlığı değeri ile yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. İş malzemesi, takım malzemesi ve kesme şartlarına göre iyi kalibre edilmiş minimum talaş kalınlığı değeri ile model çok daha doğru sonuçlar verecektir. Önceki bölümlerde incelendiği gibi, ilerleme artışı ile minimum talaş kalınlığı etkisinin azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana gelmesi beklenmektedir. Geliştirilen modelde de bu eğilim gözlemlenmiştir. Mikro frezeleme işleminde talaş oluşumunda belirleyici faktör olan, minimum talaş kalınlığının daha

düşük değerlere indirgenmesi için; daha keskin yani düşük kesici kenar radyuslu takım kullanılması, kesme bölgesinin soğutularak malzemenin ısı ile daha sünek hale gelmesinin önüne geçilmesi, kesme hızının mümkün olabildiğince yüksek tutularak, yüksek şekil değiştirme hızı sağlanarak malzemenin daha az sünek davranış göstermesinin sağlanması gibi geliştirmeler uygulanabilir.

4. MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE TAKIM AŞINMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Takım aşınması, talaşlı imalat operasyonlarında en önemli konulardan biridir. İşlem kalitesini direkt olarak etkilemesi, işleme maliyetlerini arttırması gibi nedenlerden ötürü geçmişten günümüze, araştırmacılar takım aşınmasının temellerini incelemişler, kesme parametrelerini optimize edip, çeşitli takım kaplamaları geliştirerek takım aşınmasını önleme çalışmaları yapmışlardır.

Prosesin zorlukları, küçük takım geometrileri gibi etkenlerden ötürü, takım aşınması mikro işleme operasyonlarında en önemli konulardan biridir. Mikro frezelemenin yeni gelişen bir teknoloji oluşundan ötürü, konu ile ilgili literatürde yapılmış çalışmaların sayısı kısıtlıdır. Yapılan çalışmalarda takım kesici kenar yarıçapı ile takım aşınma hızı arasındaki ilişkiyi incelenmiş ve kesici kenar yarıçapının artması ile takım aşınmasında arttığını gözlemlenmiştir. Takımın aşınması ile beraber kesici ağızda yığıntı talaş oluşumunu gözlemlenmiş ve DLC kaplamanın takım ömrünü arttırdığını tespit edilmiştir [22]. Diğer bir çalışmada, DLC kaplı takımlar ile mikro takım aşınmasını incelenmiş ve DLC kaplamanın kesme kuvvetlerini azalttığını tespit edilmiştir [23]. Bir diğer çalışmada, farklı kaplama tiplerinin aşınma dayanımları karşılaştırılmış ve yüzey kalitesi ve korozyon kriterleri baz alındığında TiN kaplamalı takımın en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir [1].

4.1 Amaç

Gerçekleştirilen çalışma ile, mikro frezeleme işleminde takım aşınması deneysel olarak incelenmiştir. Mikro frezeleme işleminde, sürece en etkili parametrenin ilerleme olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti. Geleneksel frezeleme işlemlerinde, proste kullanılan takımın uygun ilerleme aralıklarında, ilerlemenin takım aşınmasına etkisi olmamaktadır. Ancak mikro frezeleme işleminde yüzey ve talaş oluşumunda en etkili parameter olan ilerlemenin takım aşınmasında da etkili olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, farklı tipte kaplamaya sahip takımlar ile farklı ilerleme değerlerinde takım aşınması testleri gerçekleştirilerek, kaplamanın ve ilerlemenin

mikro frezeleme işleminde takım aşınmasına etkileri deneysel olarak gözlemlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Takım aşınması incelemeleri, takım çapındaki azalma, kesme kuvvetlerinin ölçümü ve işlenen yüzey pürüzlülüklerinin ölçümlerinin karşılaştırmalı incelemesi ile gerçekleştirilmiştir.

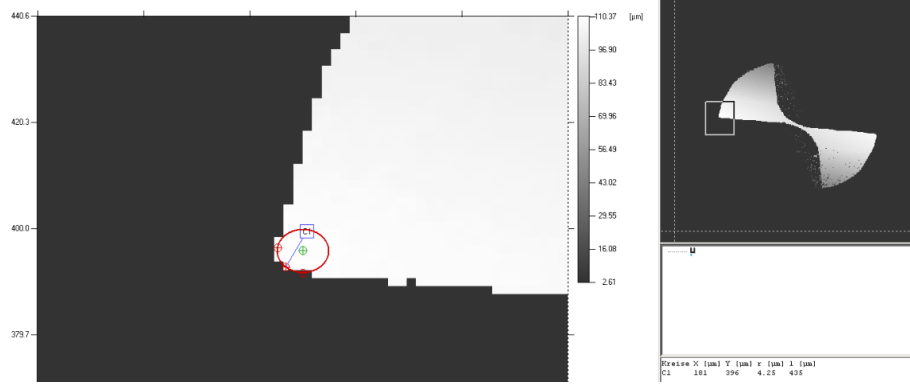
4.2 Deney Tasarımı

Takım aşınması deneyleri Kern Evo Mikro İşleme Tezgahında gerçekleştirilmiştir. İş parçası malzemesi olarak Ti-6Al-4V titanium alaşımı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmanın hedefi, farklı kaplama özelliklerindeki takımlar ile ilerlemenin mikro frezeleme işleminde takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu nedenle 0,5 mm çapında, 2 ağızlı AlTiN ve ZrN kaplamalı takımlar ile 3 farklı ilerleme değerinde takım aşınması testleri gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi kuru kesme şartında, sabit kesme derinliği ve kesme hızında, kanal frezeleme işlemi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki tabloda kesme parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1 : Kesme parametreleri.

Kesme Hızı (d/d)	Kesme Derinliği (μm)	Diş Başına İlerleme (μm)
35000	20	1
		3
		5

İlerlemenin dolayısı ile minimum talaş kalınlığı ve kazınma mekanizmalarının takım aşınmasında etkisini gözlemlemek için sırasıyla 1, 3 ve 5 μm diş başına ilerleme değerleri seçilmiştir. Maksimum ilerleme değeri takım üreticisi kataloğunda 7 μm olarak belirtilmiştir. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, minimum talaş kalınlığı , kesici kenar yarıçapının %20-40'ı arasında değer almaktadır. Aşağıdaki resimde görüldüğü gibi, kesici takımların kenar yarıçapı değerleri Nanofocus yüzey görüntüleme mikroskobu ile ölçülmüş ve yaklaşık 2 μm değere sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1 : Kesici kenar yarıçapının ölçülmesi.

Literatürdeki minimum talaş kalınlığı oranlarını göz önüne alırsak, minimum talaş kalınlığı değerinin 0,4-0,8 μm arasında değer alacağı düşünülebilir. Bu nedenle 1 μm ilerleme değerinde gerçekleşecek kesme operasyonu kazınma dominant kesme sürecinde gerçekleşecektir. İlerlemenin 3 μm değerine getirilmesi ile kesme işlemi normalize hale gelecektir. 5 μm ilerleme değeri ile yüksek ilerleme değerinde takım aşınmasının incelenmesi amaçlanmıştır. AlTiN ve ZrN kaplamalı takımlar, kaplama malzemesinin takım aşınması üzerindeki etkisini incelemek adına seçilmiştir. AlTiN kaplama yüksek sertlik ve yüksek çalışma sıcaklığı özelliklerine sahiptir. Bu nedenle titanyum gibi işlenmesi zor malzemelerde tercih edilen bir kaplama tipidir. ZrN kaplama düşük sürtünme karakteristiğine sahip bir kaplama tipidir. Bu özelliği ile yağlama ve yüksek adhezyon direnci özellikleri göstermektedir. Bu kaplama demirdışı malzemelerin işlenmesinde tercih edilmektedir. Üretici firma tarafından sağlanan kaplama karakteristikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Kaplama malzemelerinin özellikleri.

Kaplama Tipi	Sertlik (Gpa)	Maks.. Oper. Sıc. ($^{\circ}\text{C}$)	Sürtünme Katsayısı	Yapı
AlTiN	36	800	0,6	Multilayer
ZrN	25	550	0,4	Monolayer

Özellikle düşük ilerleme değerlerinde, mikro frezeleme işlemi kazınma dominant bir süreçte gerçekleşmektedir. Bu koşulda malzeme talaş oluşumu gerçekleştirerek yüzeyden ayrılmaktan ziyade elastik – plastik şekil değişimine uğrayarak takımın kesici ağzının altından kazınma şekilden kayıp gitmektedir. Özellikle, düşük sürtünme katsayısına sahip ZrN kaplamalı takımların düşük ilerleme değerlerindeki,

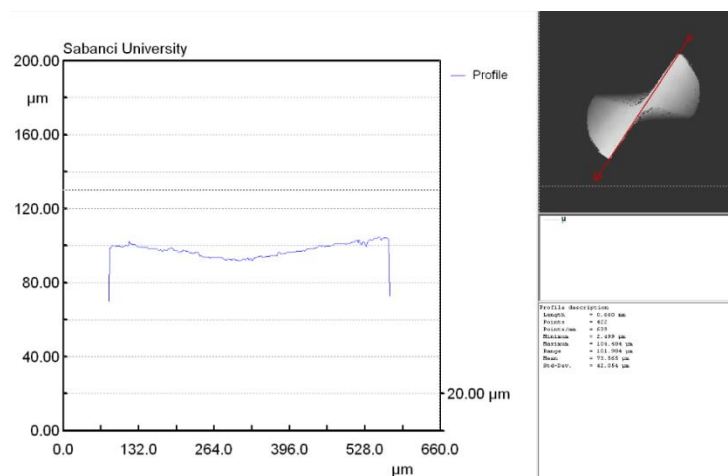
Takım aşınması testleri, 65x65 mm boyutlarındaki kare prizma iş parçası üzerinde, her bir takım için toplam 16,64 m boyunca kesme işlemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Takım aşınma miktarı, kuvvet ölçümleri 33 eş aralıkta gerçekleştirilmiş, oluşan yüzey pürüzlülük incelemeleri 17 eş aralıkta gerçekleştirilmiştir. İşlenen kanalın taban merkez çizgisi doğrultusunda yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve takım aşınması ölçümleri Nanofocus yüzey mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri Kistler marka mini dinamometre ile gerçekleştirilmiştir.

4.3 Takım Aşınması Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Takım aşınması deney sonuçları, Takım çapındaki azalma, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değişimi ölçümlerinin karşılaştırılması ile incelenmiştir. Takım aşınması ölçümleri, Kesici ağız arasındaki mesafe ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Takım aşınma miktarı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

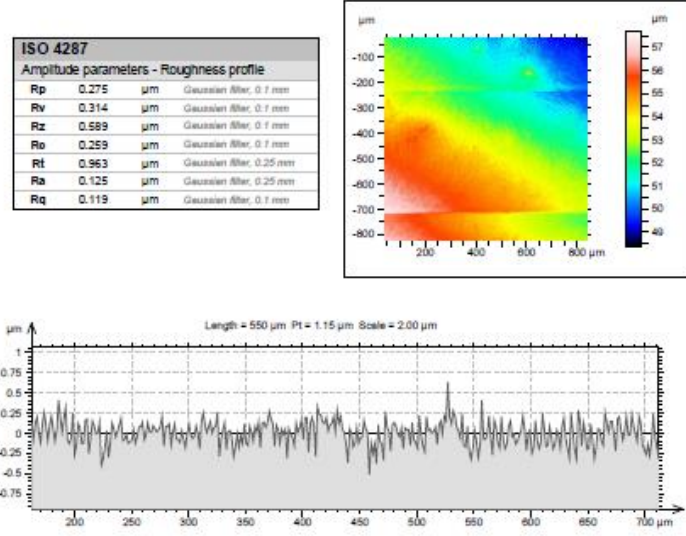
$$Takım aşınması = \frac{d_0 - d_i}{2} \quad (4.1)$$

Formüldeki d_0 değeri, kullanılmamış takım çapını, d_i değeri ilgili operasyon sonunda ölçülen takım çapı değerini temsil etmektedir.



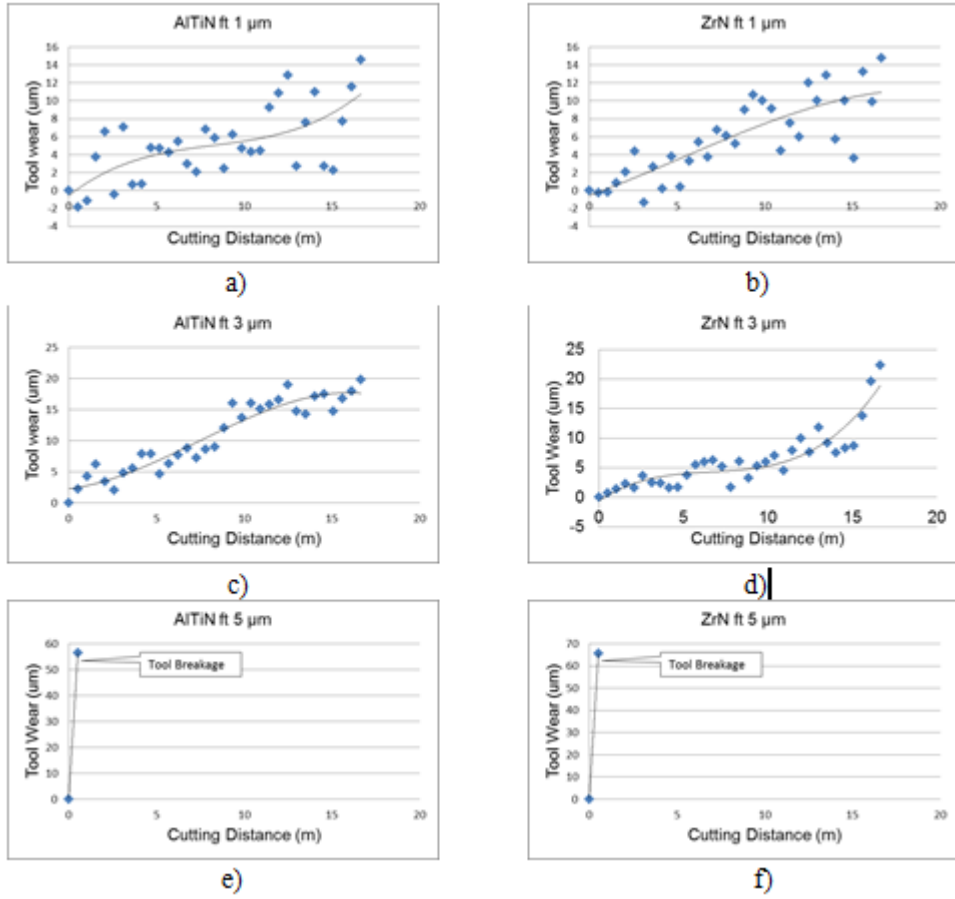
Şekil 4.2 : Takım çapının ölçülmesi.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, Nanofocus yüzey görüntüleme mikroskobu ile işlenmiş kanal taban yüzeyinin ortasında ilerleme yönüne paralel doğru boyunca alınmıştır.



Şekil 4.3 : Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi.

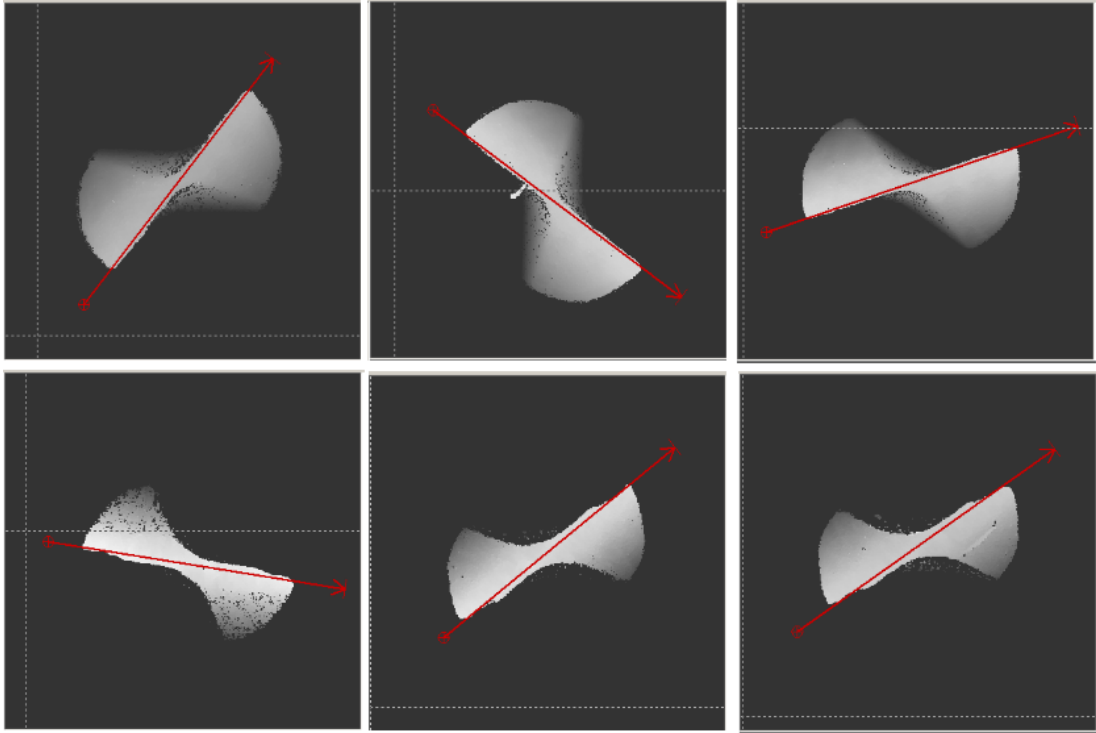
Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi takım aşınmasını belirlemek adına gerçekleştirilmiştir. Ölçülen kesme kuvvetlerinin maksimum genlik değerlerinin bileşkeleri alınarak karşılaştırmalı olarak grafiklerde incelenmiştir. Kesme kuvveti verileri her bir ilerleme değerinde gerçekleştirilen deneylerde, ilk kesme operasyonunda ölçülen kuvvete oranlanarak şekilde grafiklerde incelenmiştir. Bu amaçla farklı operasyonda elde edilen kesme kuvvetleri birbiri ile karşılaştırılabilir, takım aşınmasının nasıl etkilendiği karşılaştırmalı incelenecektir.



Şekil 4.4 : Takım aşınması grafikleri.

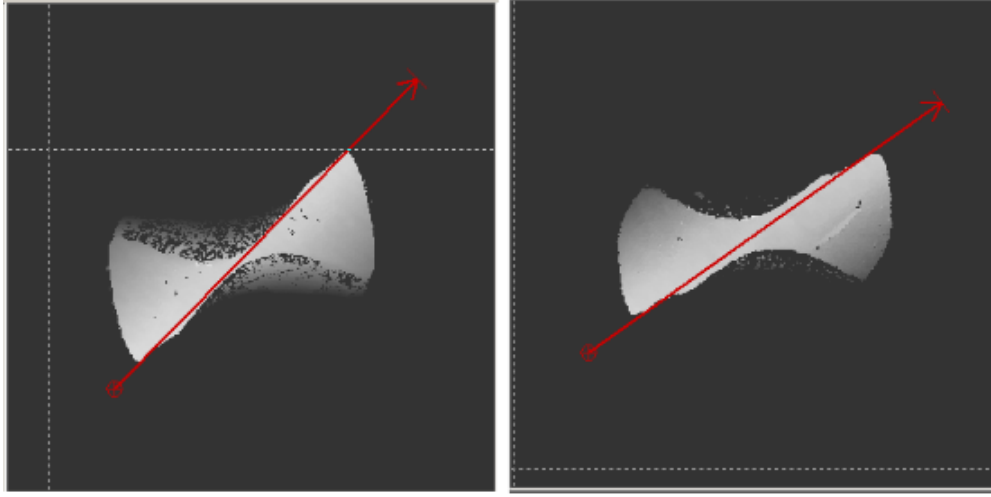
Her bir ilerleme ve kaplama tipi için ayrı hazırlanmış takım aşınması grafikleri yukarıdaki resimde gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde takım aşınma verilerinde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Grafikteki her bir nokta kesme mesafesi ile meydana gelen takım aşınmasını diğer bir deyişle takım yarıçapındaki azalmayı göstermektedir. Dolayısı ile her ölçümde takımdaki aşınma miktarının bir önceki değere göre artması gerekirken, grafikteki bazı değerlerde tam tersi durumun olduğu görülebilir. Bu durumun nedenlerinden biri, takım kesici ağzına yapışan mikro taneciklerin temizlemesinin zor oluşundan ötürü, alınan ölçümleri manipüle etmesidir. Takım çapındaki beklenmedik artışı bir diğer nedeni ise, aşınma ile birlikte takım kesici ağzında yığıntı talaş oluşumunun meydana gelmesidir. Kesici ağza kaynayan malzemeler takım çapının olduğundan daha büyük ölçü göstermesinde neden olmaktadır. Grafiklerde görüldüğü üzere ilerlemenin artışı ile birlikte takım aşınma hızında artış meydana gelmektedir. İlerleme değeri 5 µm'ye getirildiğinde, operasyonun ilk aşamasında her iki takımda da kırılma meydana gelmiştir. Takım aşınma değerlerindeki dalgalanma 3 µm ilerleme değerinde azalma göstermiştir. Bunun nedeni ilerlemenin arttırılması ile kazınma etkisinin azalması ve

bunun sonucu olarak düşük ilerleme değerine nazaran yığıntı talaş oluşumunda azalmanın gerçekleşmesidir. Elde edilen sonuçlara göre, AlTiN kaplamalı takımlar, ZrN kaplamalı takımlara göre daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Görünen o ki düşük sürtünme karakteristiğine sahip ZrN kaplamalı takımları kazınma dominant kesme operasyonlarında ve normalleşmiş kesme operasyonlarında beklendiği gibi takım aşınmasını azaltıcı etki göstermemiştir. Grafiklerdeki eğilim çizgileri incelendiğinde, ZrN kaplamalı takımların, AlTiN kaplamalı takımlara kıyasla daha fazla artan aşınma eğiliminde olduğu sonucu tespit edilmiştir.



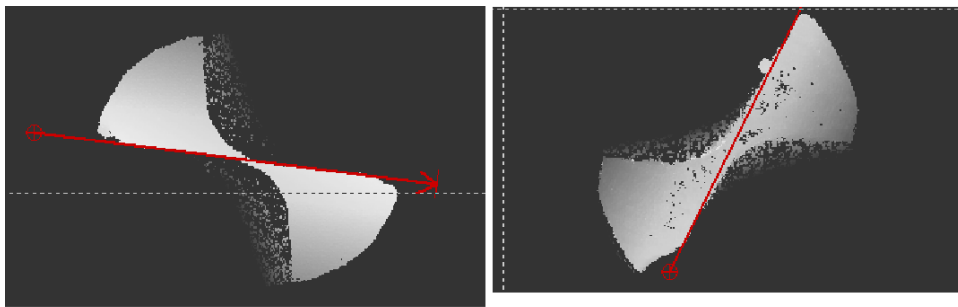
Şekil 4.5 : 3 μ m ilerleme değerinde gerçekleştirilen kesme operasyonlarında soldan sağa doğru, kullanılmamış, 16. ve 32. Operasyon sonu takım görüntüleri (Üstte AlTiN, altta ZrN kaplamalı takım).

Yukarıdaki resimde görüldüğü gibi, ZrN takımında belirgin krater aşınması meydana gelmiştir. Bunun sebebi, ZrN takımın AlTiN kaplamalı takıma kıyasla daha düşük maksimum operasyon sıcaklığına sahip olmasıdır. İlerlemenin artması ile birlikte talaş yükü artışı meydana gelmekte, bunun sonucu olarak da kesme bölgesi sıcaklığı yükselmektedir. Krater aşınmasının gerçekleşmesi sonucu, takım kesici ağzı zayıflamakta ve takım ağzında parçalanmalar meydana gelmekte bunun sonucu olarak flank aşınması artış göstermektedir. [24]



Şekil 4.6 : ZrN kaplamalı takımlarda krater aşınmasının meydana gelmesi (Sol 1 µm diş başına ilerleme, sağ 3 µm diş başına ilerleme).

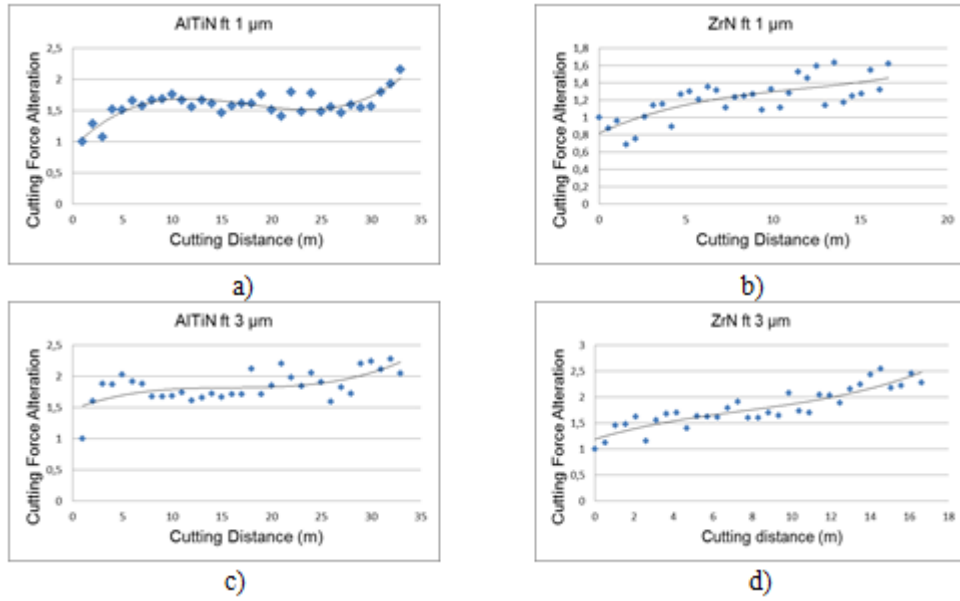
İlerlemenin 5 µm değerine artırılması ile talaş yükü daha da fazla artmış, bunun sonucu olarak kesme bölgesindeki sıcaklık daha da yükselmiştir. Bunun sonucu olarak, her iki takım da aşırı krater aşınması meydana gelmiş ve zayıflayan kesici ağız bölgesinde kırılma meydana gelmiştir. Aşağıdaki resimde takımlarda meydana gelen kırılmalar görülmektedir. AlTiN ile karşılaştırıldığında, ZrN kaplamalı takım daha büyük kırılma gerçekleşmiştir. Bunun sebebi ZrN kaplamanın daha düşük maksimum operasyon sıcaklığına sahip olmasıdır. Her iki takım için de üretici firma tarafından verilen maksimum ilerleme değeri 7 µm olmasına rağmen, 5 µm ilerleme değerinde her iki takım da kırılma meydana gelmiştir. Bu durumun tek sebebi talaş yükünün artması sonucu meydana gelen kesme bölgesi sıcaklık artışının, aşırı krater aşınmasına sebebiyet vermesidir.



Şekil 4.7 : 5 µ ilerleme değerindeki operasyonlarda meydana gelen takım kırılması (Sol, AlTiN; sağ, ZrN kaplamalı takım).

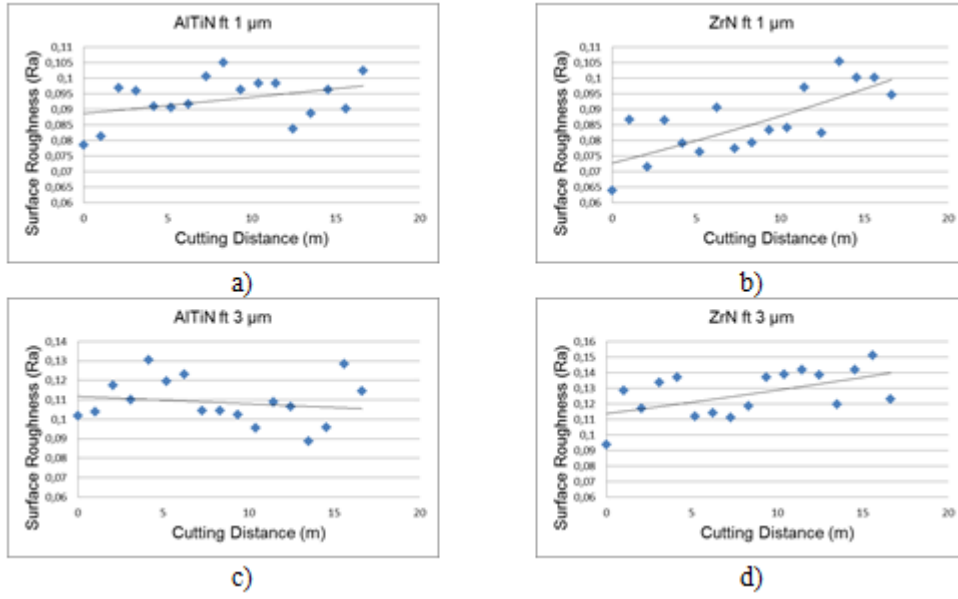
Kesme kuvveti değişim grafikleri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. 5 µm ilerleme değerinde, takımların ilk aşamada kırılmasında dolayı bu ilerleme değerinde kuvvet değişim grafikleri çizdirilememiştir. Grafikler incelendiğinde kesme mesafesinin

artışı ile birlikte artan takım aşınması sonucu, kesme kuvvetlerinde yükselme görülmektedir. Meydana gelen krater aşınması, takımın talaş açısının artarak kuvvetlerin artmasına neden olmaktadır. Grafiklerdeki eğilim çizgileri göz önüne alındığında ZrN kaplamalı takımlar ile elde edilen kesme kuvveti değişimlerinin, AlTiN kaplamalı takımlara kıyasla daha fazla artan eğilimde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, ZrN kaplamalı takımlarda daha fazla aşınmanın meydana gelmesidir. Kesme kuvvetlerindeki artış, ilerlemenin 1 μm 'den 3 μm 'ye artırılması sonucu artan takım aşınması nedeniyle daha fazla meydana gelmiştir.



Şekil 4.8 : Kesme kuvveti değişim grafikleri.

Aşağıdaki resimde, kesme mesafesi ile yüzey pürüzlülüğü değişimi grafikleri görülmektedir. Grafiklerdeki eğilim çizgileri incelendiğinde, 3 μm ilerleme değerinde AlTiN kaplamalı takım ile gerçekleştirilen deney harici, diğer tüm deneylerde kesme mesafesi arttıkça yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmiştir. Her ne kadar bu deneyde elde edilen eğilim çizgisi azalan eğilimde gözüксе de operasyon sonlarında yüksek yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, ölçümün yapıldığı yer, yüzeyin temizliği ve hatta malzemenin mikro yapısı gibi faktörlerden etkilenebilmektedir [19]. Kesici takım aşındıkça, kesici ağız körleşecek bir diğer deyişle, kesici kenar yarıçapı değeri artacaktır. Daha büyük kesici kenar yarıçapı, kesme sürecindeki kazınma etkinliğini arttıracak, bunun sonucu olarak da yüzey pürüzlülüğü artışı meydana gelecektir [17].



Şekil 4.9 : Yüzey pürülülüğü değişim grafikleri.

4.4 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Bu bölümde mikro frezeleme işleminde, takım aşınmasının deneysel incelemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma ile mikro frezeleme işleminde takım aşınması mekanizmasının temelleri ve oluşum mekanizması incelenmiş, geleneksel talaşlı imalat yöntemlerindeki takım aşınması mekanizmasından farklılıkları belirlenmiştir. Bu amaçla farklı kaplama tipindeki takımlar ile farklı ilerleme değerlerinde takım aşınması testleri gerçekleştirilerek, kaplama özelliklerinin ve ilerlemenin takım aşınmasına etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu:

Mikro frezeleme işleminde ilerlemenin takım aşınmasına belirgin etkisi olmaktadır. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde ilerlemenin takım aşınmasına etkisi olmazken, mikro frezeleme işleminde ilerlemenin artması ile birlikte takım aşınması artmaktadır.

İlerlemenin artması ile birlikte talaş yükü artmakta, bunun sonucu olarak kesme bölgesi sıcaklığı yükselmekte ve bu durum krater aşınmasına neden olmaktadır.

Kazınma dominant kesme rejiminde aşırı takım aşınması gözlemlenmemiştir. Takım aşınması ilerlemenin arttığı normalize kesme rejimlerinde daha fazla meydana gelmiştir.

Düşük sürtünme karakteristiğine sahip ZrN kaplamalı takımlar hem kazınma dominant hem de normalize kesme süreçlerinde takım aşınmasını engellemede etkisiz kalmıştır.

Makimum operasyon sıcaklığı, daha iyi aşınma dayanımı sağlamada çok önemli bir kriter olmaktadır.

AlTiN kaplamalı takımlar, ZrN kaplamalı takımlara kıyasla hem flank hem de krater aşınmasında daha iyi performans göstermiştir. Bunun sebebi AlTiN kaplamanın daha yüksek sertlik ve daha yüksek maksimum operasyon sıcaklığına sahip oluşudur.

Kesme kuvvetleri takım aşınmasının artması ile birlikte yükselmektedir.

Takım aşınması ile birlikte yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmektedir.

Takım aşınması ile birlikte takım kesici kenar radyusu değeri büyümekte, bunun sonucu olarak kesme süreci daha kazınma dominant hale gelmektedir. Bu durumu yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun ve takım aşınmasının deneysel incelemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar 3 ana başlıkta özetlenebilir. Birinci kısımda mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumu deneysel olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları şu şekilde sıralanabilir:

Mikro frezeleme işleminde, düşük ilerleme değerlerinde kazınma (ploughing) mekanizmasının etkin olmasından ötürü kötü yüzey kalitesi oluşumu ve aşırı çapaklanma görülmektedir.

İlerlemenin arttırılması ile, kazınma (ploughing) mekanizmasının etkinliğini yitirmesi sonucu daha iyi bir talaş kaldırma prosesi gerçekleşmekte ve yüzey kalitesinde iyileşme, çapak oluşumunda da azalma görülmektedir.

Sünek karakterde ve yüksek kopma uzamasına sahip malzemelerde kazınma (ploughing) mekanizmasının yüzey ve çapak oluşumunda etkinliği fazla olmaktadır.

Düşük ilerleme değerlerinde kazınma (ploughing) mekanizmasının yanı sıra takımın yüzeye sürtünmesi ve yüzeyi ezmesi sonucu yüzey kalitesinde iyileşmeler görülebilmektedir.

Kesme hızının artması ile yüzey kalitesinde iyileşme ve çapak oluşumunda azalma olmaktadır.

Sünek karakterde ve yüksek kopma uzamasına sahip malzemelerde kesme hızının yüzey ve çapak oluşumunda etkinliği fazla olmaktadır.

Sünek karakterde ve yüksek kopma uzamasına sahip malzemelerde, kesme işlemi sonrası çapak oluşumu daha fazla gerçekleşmektedir.

Kesme derinliğinin artması ile yüzey kalitesinde kötüleşme eğilimi olmakta, çapak oluşumunda da belirgin bir artış gerçekleşmektedir.

Birinci kısımda gerçekleştirilen kazanımlar ile tez çalışmalarının ikinci kısmında mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumu modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile ilgili olarak şu sonuçlar sıralanabilir:

Mikro frezeleme işleminde taban yüzey pürüzlülüğünü hesaplamanması amacı ile minimum talaş kalınlığı – kazınma prensipleri ile proses geometrisi ilişkilendirilerek matematiksel model geliştirilmiştir.

Geliştirilen model oluşan taban yüzeyinin Rz ve Ra değerlerini yaklaşık değerler ile hesaplayabilmektedir.

Modelin doğru sonuç verebilmesi hususunda en kritik değişken minimum talaş kalınlığı değeridir. Yapılan hesaplamalarda tahmini olarak seçilen minimum talaş kalınlığı değeri ile yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. İş malzemesi, takım malzemesi ve kesme şartlarına göre iyi kalibre edilmiş minimum talaş kalınlığı değeri ile model çok daha doğru sonuçlar verecektir.

Mikro frezeleme işleminde talaş oluşumunda belirleyici faktör olan, minimum talaş kalınlığının daha düşük değerlere indirgenmesi için; daha keskin yani düşük kesici kenar yarıçaplı takım kullanılması, kesme bölgesinin soğutularak malzemenin ısı ile daha sünek hale gelmesinin önüne geçilmesi, kesme hızının mümkün olabildiğince yüksek tutularak, yüksek şekil değiştirme hızı sağlanarak malzemenin daha az sünek davranış göstermesinin sağlanması gibi geliştirmeler uygulanabilir.

Önceki bölümlerde incelendiği gibi, ilerleme artışı ile minimum talaş kalınlığı etkisinin azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana gelmesi beklenmektedir. Geliştirilen modelde de bu eğilim gözlemlenmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmaların üçüncü kısmında, mikro frezeleme işleminde takım aşınmasının deneysel incelemesi gerçekleştirilmiştir. Takım aşınması deneylerinden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde, ilerlemenin takım aşınmasına etkisi olmazken, mikro frezeleme işleminde ilerlemenin takım aşınmasına belirgin etkisi olmaktadır. İlerlemenin artması ile birlikte takım aşınması artmaktadır.

İlerlemenin artması ile birlikte talaş yükü artmakta, bunun sonucu olarak kesme bölgesi sıcaklığı yükselmekte ve bu durum krater aşınmasına neden olmaktadır.

Kazınma dominant kesme rejiminde aşırı takım aşınması gözlemlenmemiştir. Takım aşınması ilerlemenin arttığı normalize kesme rejimlerinde daha fazla meydana gelmiştir.

Düşük sürtünme karakteristiğine sahip ZrN kaplamalı takımlar hem kazınma dominant hem de normalize kesme süreçlerinde takım aşınmasını engellemede etkisiz kalmıştır.

Maksimum operasyon sıcaklığı, daha iyi aşınma dayanımı sağlamada çok önemli bir kriter olmaktadır.

AlTiN kaplamalı takımlar, ZrN kaplamalı takımlara kıyasla hem flank hem de krater aşınmasında daha iyi performans göstermiştir. Bunun sebebi AlTiN kaplamanın daha yüksek sertlik ve daha yüksek maksimum operasyon sıcaklığına sahip oluşudur.

Kesme kuvvetleri takım aşınmasının artması ile birlikte yükselmektedir.

Takım aşınması ile birlikte yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmektedir.

Takım aşınması ile birlikte takım kesici kenar radyusu değeri büyümekte, bunun sonucu olarak kesme süreci daha kazınma dominant hale gelmektedir. Bu durumu yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Yang, S., Cooke, K.E., Teer, D.G.** (2008). Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 1578–1584.
- [2] **Liu X., DeVor R.E., Kapoor S.G.** (2004). The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126-4, 666–678.
- [3] **Ozel T., Lui X., Dhanorker A.** (2007). Modelling and simulation of micro-milling process. *Proceedings of the Fourth International Conference and Exhibition on design and production of machines and Dies/Molds*, Cesme, Turkey, 21–23 Temmuz.
- [4] **Malekiana M., Mostofaa M.G., Parka S.S.** (2012). Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminium, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 553-559.
- [5] **Chae J., Park S.S., Freiheit T.** (2006). Investigation of micro-cutting operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 313–332.
- [6] **Yang K., Liang Y., Zheng K., Bai Q., Chen W.** (2011). Tool edge radius effect on cutting temperature in micro-end-milling process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 52, 905–912.
- [7] **Weule H., Huntrupl V., Tritschlerl H.** (2001). Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50, 61-64.
- [8] **Filiz S., Conley M.C., Wasserman M.B., Ozdoganlar O.B.** (2007). An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1088-1100.
- [9] **Ng C.K., Melkotea S.N., Rahman M., Kumarba S.** (2006). Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 929-936.
- [10] **Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmuri, G., Uchikoshi, J., Yoshinaga, H.** (1993). Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation, *CIRP Ann.*, 42, 91–94.
- [11] **Yuan, Z. J., Zhou, M., and Dong, S.** (1996). Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultraprecision Machining, *J. Mater. Process. Technol.*, 62, 327–330.

- [12] **Li C., Lai X., Li H., Ni J.** (2007). Modeling of three-dimensional cutting forces in micro-end-milling, Publishing Journal of Micromechanics and Micro engineering J. Micromech. Microeng., 17, 671–678.
- [13] **Basuray, P. K., Misra, B. K., Lal, G. K.** (1977). Transition from Ploughing to Cutting During Machining With Blunt Tools, Wear, 43-3, 341– 349.
- [14] **Lekkala, R., Bajpai, V., Singh, R.K., Joshi, S.S.** (2011). Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling, Precision Engineering, 35-4, 625-637.
- [15] **Kim, C.-J., Bono, M., Ni, J.** (2002) ‘Experimental Analysis of Chip Formation Formation in Micro-Milling, Society of Manufacturing Engineers, MR02-159, 1-8.
- [16] **Min, S., Sangermann, H., Mertens, C., Dornfeld, D.** (2006). A study on initial contact detection for precision micro-mold and surface generation of vertical side walls in micromachining, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 57-1, 109-112.
- [17] **Vogler M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G.** (2004). On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, part I: surface generation, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126-4, 685–694.
- [18] **Ryua, S.H., Choib, D.K, Chuc, C.N.** (2006). Roughness and texture generation on end milled surfaces, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46-3,4, 404-412.
- [19] **Elkaseer A. A. M., Dimov S. S., Popov K. B., Negm M., Minev R.** (2012). Modeling the Material Microstructure Effects on the Surface Generation Process in Microendmilling of Dual-Phase Materials, J. Manuf. Sci. Eng., 134.
- [20] **Hongtao L., Xinmin L., Chengfeng L., Jie F., Jun N.** (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, J. Micromech. Microeng., 18.
- [21] **Wang, J.S., Gong, Y.D., Abba, G., Chen, K., Shi, J.S., Cai G.Q.** (2007). Surface generation analysis in micro end-milling considering the influences of grain, Microsystem Technologies, 14-7, 937-942.
- [22] **Thepsonthi, T., Özel, T.** (2015). 3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Experimental validations on chip flow and tool wear, Journal of Materials Processing Technology, 221, 128-145.
- [23] **Ucun, İ., Aslantas, K., Bedir, F.** (2015). The performance of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718, Precision Engineering, 41, 135-144.
- [24] **Altintas, Y.** (2012). Manufacturing Automation Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design, Second Edition, Cambridge University Press.

- [25] **Hosford, W.F., Caddell, R.M.** (1993). Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, Second Edition, Prentice- Hall.
- [26] **Weinert, K., Petzoldt V.** (2008). Machining NiTi micro-parts by micro-milling, Materials Science and Engineering, 481–482, 672–675.
- [27] **Jin, C.Z., Kang, I.S., Park, J.H, Jang, S-H., Kim, J-S.** (2009). The characteristics of cutting forces in the micro-milling of AISI D2 steel, Journal of Mechanical Science and Technology, 23, 2823-2829.
- [28] **Malekian, M., Park S.S., Jun M.B.G.** (2009). Tool wear monitoring of micro-milling operations, Journal of Materials Processing Technology, 209, 4903–4914.
- [29] **Rahman M., Kumar A.S., Prakash J.R.S.** (2001). Micro milling of pure copper, Journal of Materials Processing Technology, 116, 39-43.
- [30] **Uhlmann, E., Piltz, S., Schauer K.** (2005). Micro milling of sintered tungsten–copper composite materials, Journal of Materials Processing Technology, 167, 402–407.
- [31] **Tansel I.N., Arkan T.T., Bao W.Y., Mahendrakar N., Shisler B., Smith D., McCool M.** (2000). Tool wear estimation in micro-machining. Part I: tool usage–cutting force relationship, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 599–608.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ersen Hatipoğlu
Doğum Tarihi ve Yeri : 18.02.1989 – Çorlu/Tekirdağ
E-posta : ersen-h@live.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013-2015 yılları arasında Sabancı Üniversitesi Üretim Araştırma Laboratuvarında 112M930 proje numaralı, ‘‘Mikro Frezeleme İşlemlerinin Modelleme ve Deneysel Yöntemler Aracılığı ile İncelenmesi ve Endüstriyel Uygulamalar İçin Verim Arttırıcı Yöntemler Geliştirilmesi’’ başlıklı Tübitak projesinde çalıştı.
- 2014 yılından beri, Ford Otosan Arge Merkezi’nde, Ürün Geliştirme Mühendisi olarak çalışmakta.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Hatipoğlu E., Budak E., 2014. Mikro frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey ve talaş oluşumuna etkisinin deneysel olarak incelenmesi. 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS), Ekim 23-25, 2014 Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
- Hatipoğlu E., Budak E., Bakkal M., 2015. Experimental Investigation of Tool Wear in Micro Milling. 8th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, June 18-21, 2015 Kusadasi, Aydın, Turkey.
- Hatipoğlu E., Budak E., 2015. Mikro Frezeleme İşleminde Yüzey Oluşumunun Modellenmesi. 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS), Kasım 5-7, 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.