

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN KOBALT KROM ALAŞIMLARININ
MİKROİŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Akif OYMAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim GEZER

KASIM-2021

**T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN KOBALT KROM ALAŞIMLARININ
MİKROİŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Akif OYMAK
(36183618103)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim GEZER

KASIM-2021

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemededen beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim GEZER'e ve değerli hocam Doç. Dr. Erkan BAHÇE'ye

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

Ayrıca tezin uygulama aşamasında FYL-2021-2405 numaralı projeye vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı İnönü Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “**Eklemeli İmalat ile Üretilen Kobalt Krom Alaşımlarının Mikroışlenebilirliğinin Araştırılması**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mehmet Akif OYMAK



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	6
1.2. Konunun Literatürdeki Yeri.....	6
1.3. Eklemeli İmalat ile Üretilen Malzemelerin Mikro Frezelemesi	7
1.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mikro Frezeleme	12
2. EKLEMELİ İMALAT	15
2.1. Eklemeli İmalat Çeşitleri	16
2.2. Toz Yatağı Füzyonu	18
2.3 Metal Eklemeli İmalatta Anizotropi	19
2.4 Eklemeli İmalatın Avantajları ve Dezavantajları.....	20
2.5. Eklemeli İmalatla Üretilen Kobalt Krom Alaşımları.....	21
2.6. Eklemeli İmalatla Üretilen malzemeleri Mikro İşleme	23
3. MİKRO İŞLEME	25
3.1. Mikro Talaşlı İmalat	26
3.2. Mikro Frezeleme.....	27
3.2.1 Mikro frezeleme takımları	29
3.2.2 Mikro frezelemede takım aşınması	29
3.2.3. Mikro frezelemede boyut etkileri	32
3.2.4. Mikro frezelemede kesilmemiş talaş kalınlığı.....	33
3.2.5. Mikro frezelemede çapak oluşumu	34
3.2.6 Mikro frezelemede kesme kuvvetleri	36
3.2.7 Mikro frezelemede kesme sıcaklıkları.....	37
3.3. Mikro İmalatta Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modelleme ve Analizi.....	39
3.3.1. Mikro frezelemede sonlu eleman modeli	39

3.3.2. Mikro frezelemede malzemenin yapısal modellemesi	41
3.3.3 Mikro Frezelemede Sürtünmenin Modellenmesi	42
3.3.4 Sonlu Elemanlar ile Mikro Frezelemede Takım Aşınmasının Modellenmesi	43
4. MATERYAL VE METOT	44
4.1. CoCrW Tozu Malzeme Özellikleri ve EDX Analizi	44
4.2. SLE Yöntemi ile Numunelerin Üretilmesi	46
4.3 Mikro Frezeleme İşlemi.....	48
4.3.1 Mikro kesici takım ve özellikleri.....	48
4.3.2. Mikro frezeleme deneyinin yapılması	50
4.3.3. Mikro frezelemede çapak, talaş, takım görüntüleme ve ölçümleme	52
4.3.4. Mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	54
4.3.5 Mikro frezelemede kesme sıcaklıklarının ölçümü	54
4.4. SLE ile üretilen Malzemenin Mikro Frezelemesinde Sonlu Elemanlar Modellemesi	55
5. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ	58
5.1 Mikro Frezeleme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkisi.....	58
5.2 Mikro Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğü Değerlendirilmesi	66
5.4 Takım Aşınması ve Yığıntı Talaş Oluşumu	71
5.5. SLE ile Üretilen CoCr Alaşımlarının Mikro Frezelemesinde Sıcaklık ölçümü	72
5.6. SLE ile Üretilen CoCr Alaşımlarının Mikro Frezelemesinde Sonlu Elemanlar yöntemi	73
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	78
KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Eklemeli imalat yöntemleri ASTM 42 standartlarına göre sınıflandırılması	17
Çizelge 3.1: Mikro takım aşınmalarının çeşitleri	30
Çizelge 4.1: CoCrW Tozunun mekanik özellikleri	44
Çizelge 4.2: SLE yöntemi ile üretilen malzemenin kimyasal içeriği	46
Çizelge 4.3: Üretim parametreleri	47
Çizelge 4.4: Mikro parmak frezenin geometrik özellikleri	49
Çizelge 4.5: TiAlN kaplamalı WC (tungsten karbür) takımın mikro işleme sırasında öne çıkan mekanik özellikleri	49
Çizelge 4.6: Mikro frezeleme deney parametreleri	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1:	İşlenmesi zor olan malzemeler.	4
Şekil 2.1:	Toz yatağı füzyonu üretim şeması.	19
Şekil 2.3:	Toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilen inconel 718'deki kusurları gösteren SEM görüntüleri.	24
Şekil 3.1:	Mikro imalat çeşitleri şeması.	25
Şekil 3.2:	Mikro frezelemede dikkate alınması gereken temel hususlar.	28
Şekil 3.3:	Mikro parmak frezenin SEM resimleri.	30
Şekil 3.4:	Minimum talaş kalınlığının etkisi.	34
Şekil 3.5:	Poisson, koparma ve rollover çapağın oluşum şekli.	35
Şekil 3.6:	Frezeleme çapak çeşitleri.	35
Şekil 3.7:	Frezelemede kesme kuvvetleri.	36
Şekil 3.8:	Sonlu elemanlar yöntemi modellenen mikro frezelemenin sıcaklık dağılımı.	38
Şekil 3.9:	Sonlu elemanlar yöntemi ile mikro frezelemenin modellenmesi.	40
Şekil 4.1:	CoCrW alaşım tozunun SEM görüntüsü.	45
Şekil 4.2:	EDX nokta analizi ve spektrumu.	45
Şekil 4.3:	SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr malzemesinin ölçüleri.	46
Şekil 4.4:	MLAB CUSING SLE cihazı.	47
Şekil 4.5:	TiAlN kaplamalı kaplamalı tungsten karbür takımın teknik resmi ve mikroskopik görüntüsü.	48
Şekil 4.6:	a) Hassas tutucu pens ve parmak freze takımı b) montaj.	50
Şekil 4.5:	Mikro frezelemede işleminin uygulandığı CHEVALIER QP 2040-L marka 3 eksenli CNC freze tezgâhı.	51
Şekil 4.7:	Mikro frezeleme deneyi.	51
Şekil 4.8:	Leo Evo-40xVP model taramalı elektron mikroskobu.	53
Şekil 4.9:	EUROMEX DC.5000-WiFi marka optik mikroskop.	53
Şekil 4.10:	TIME TR-200 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.	54
Şekil 4.11:	TESTO 875-1 Kesme sıcaklıklarını ölçen termal kamera.	55
Şekil 4.12:	Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı ile çizilen mikro frezeleme modeli.	56
Şekil 4.13:	Deneyde kullanılan takımın teknik ölçülerine göre tasarlanan takım.	56

Şekil 4.14: Analiz programında kullanılacak deney parametreleri.....	57
Şekil 4.15: Analiz programı için malzeme ve takıma uygulanan mesh modeli.....	58
Şekil 4.16: SLE ile üretilen CoCr alaşımını mikro frezelenmesinde 0.3 mm kesme derinliğinde üst çapak boyu ölçüleri.....	59
Şekil 4.18: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 8000 dev/dak ve 0.3 mm kesme derinliğinde frezelemede çapak SEM görüntüleri.....	60
Şekil 4.19: Döküm ile üretilen CoCr alaşımını mikro frezelenmesinde 0.3 mm kesme derinliğinde üst çapak boyu ölçüleri.....	61
Şekil 4.20: Döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 8000 devir/dak ve 0.3 mm kesme derinliğinde frezelemede çapak SEM görüntüleri.....	62
Şekil 4.21: SLE yöntemi ile üretilmiş 0.5 mm kesme derinliğinde üst çapak boyu ölçüleri.....	63
Şekil 4.22: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3 mm kesme derinliğinde 5 µm/diş ilerlemede frezelemede farklı devirlerde SEM görüntüleri.....	64
Şekil 4.24: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 9000 dev/dak 5 µm/diş ilerlemede farklı kesme derinliğinde çapak ölçümleri.....	65
Şekil 4.25: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 9000 dev/dak 5 µm/diş ilerlemede çapak 0.3mm 0.5mm kesme derinliğinde SEM görüntüleri.....	66
Şekil 4.26: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3mm farklı devir sayılarında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri.....	67
Şekil 4.27: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının farklı devir sayılarında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri.....	68
Şekil 4.28: Döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3mm farklı devir sayılarında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri.....	69
Şekil 4.29: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 8000 dev/dak ve 0.5 mm kesme derinliğinde frezelemede talaş şekilleri.....	70
Şekil 4.30: Döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 9000 dev/dak ve 0.5 mm kesme derinliğinde farklı ilerlemelerde frezelemede talaş şekilleri.....	71
Şekil 4.31: 9000 dev/dak 0.5 mm kesme derinliğinde f=2,5 µm/diş ve f=5 µm/diş ilerlemede yığıntı talaş oluşumları.....	72

Şekil 4.32: Mikro frezeleme sırasında termal kamera ile ölçülen maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımı.	73
Şekil 4.33: Sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu yapılan deney ortamı.	73
Şekil 4.34: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile mikro frezelemede oluşan farklı ilerlemelerde kesme sıcaklık dağılımı.....	74
Şekil 4.35: CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile farklı ilerlemelerde frezelemede oluşan kesme sıcaklıkları	75
Şekil 4.36: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile farklı ilerlemelerde mikro frezelemede oluşan yüzey Von mises gerilimleri ve çapak oluşumu.	75
Şekil 4.37: Sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu yapılan SLE ile üretilmiş CoCr alaşımlarının mikro frezelemede oluşan çapakların deneyde oluşan çapaklar ile karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.38: CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile frezelemede oluşan çapak boyutları ve von mises gerilim dağılımı	77

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

3B	: 3 Boyut
3DP	: 3 boyutlu yazıcı
BUE	: Built up edge (Yığıntı talaş)
CNC	: Computer Numerical Controlled (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
EBM	: Elektron ışınli ergitme
EDM	: Elektron erezyon işleme
Eİ	: Eklemeli imalat
f	: İlerleme miktarı
FDM	: Ergiterek yığma ile modelleme
F_x	: X ekseninde oluşun kuvvet N
F_y	: Y ekseninde oluşun kuvvet N
F_z	: Diş başına ilerleme
HSP	: Hegzagonal sıkı paket
Mo	: Molibden
MJM	: Jet bağlama
R_a	: Ortalama yüzey prüzlülüğü
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
SEM	: Taramalı elektro mikroskop
SLA	: Seçmeli lazer sinterleme (SLS)
SLE	: Seçici lazer ergitme
STL	: Stereolithography
TiAlN	: Titanyum alüminyum nitrür
W	: Tungsten
WC	: Tungsten karbür
YMK	: Yüzey merkezli kubik
YKY	: Yığıntı talaş yapışması

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN KOBALT KROM ALAŞIMLARININ MİKROİŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehmet Akif OYMAK

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

xi+88 sayfa

2021

Danışman: Prof. Dr. İbrahim GEZER

Teknolojinin gelişimi ile birlikte malzemelerin esnek ve verimli bir şekilde üretebilmek için başta havacılık, otomotiv ve biyomedikal olmak üzere birçok farklı alanlarda eklemeli imalat kullanımı artmaktadır. Biyomedikal alanda eklemeli imalatı geleneksel imalattan ayıran en önemli özellik hastanın durumuna ve vücudun kompleks anatomik bölgelerine uygun şekilde cihazların üretilmesine olanak sağlamasıdır. Bu nedenle tıbbi cihazların üretimi için eklemeli imalat ile üretim sürecinin incelenmesi bu uygulamalar için optimize edilmiş üretim sisteminin tanımlanması önemli bir araştırma konusudur. Eklemeli imalat, metal tozunun katman katman lazer ile eritilerek istenen parçanın oluşmasını sağlamaktadır. Katmanlı üretimin doğal bir sonucu olarak boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi ve sertliği ile ilgili problemler yaşanmaktadır. Özellikle yüksek hassasiyet gerektiğinde veya parçaların fonksiyonel mikro ölçekli özelliklere ihtiyaç duyduğu durumlarda eklemeli imalatın dezavantajları vardır. Bu nedenle parça eklemeli imalat ile oluşturulsa bile, bu işlem zincirinde özel nitelikler üretmek, pürüzsüzlük veya yüzey mekanik özellikleri gibi son parça karakteristiklerini geliştirmek için mikro işlemden faydalanılabilir. Son parçanın özelliklerindeki iyileşme nedeniyle mikro frezeleme bu işlem zincirinde önemli bir yer tutmaktadır.

Mükemmel mekanik özellikleri, yüksek korozyon direnci ve yüksek aşınma direnci nedeniyle CoCr alaşımları, etkili biyo malzemeler olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada mikro işleme yapacağımız CoCr alaşım numuneleri Seçici Lazer Ergitme (SLE) ve döküm yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Eklemeli imalat ile üretilen Co-Cr alaşımlarının mikro kesilmesinde yer alan temel mekanizmalar hakkında sınırlı araştırmalar bildirilmiştir. Bu nedenle Co-Cr alaşımlarının mikro işlenmesinde kesme mekanizmaları hakkında temel bilgiler sunmaya çalışılmaktadır. Ayrıca farklı parametrelerde oluşacak yapısal değişiklikleri sıcaklık, gerilme, yüzey kalitesi, çapak ve talaş oluşumu gibi üretim sürekliliğini etkileyen faktörler karşılaştırılıp yorumlanarak üretim optimizasyonu belirlenmiştir. Mikro frezeleme deneyi sırasında oluşan sıcaklıklar ve Von mises gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikro frezeleme, CoCr, Eklemeli İmalat, Seçmeli lazer ergitme, Sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE MICROMACHINABILITY OF COBALT CHROME ALLOYS MADE BY ADDITIVE MANUFACTURING

Author Name and Surname

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Mecanical Engineering

xi+88 sayfa

2021

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim GEZER

With the development of technology, the use of additive manufacturing in many different fields, especially aviation, automotive and biomedical, is increasing in order to produce materials in a flexible and efficient way. The most important feature that distinguishes additive manufacturing from traditional manufacturing in the biomedical field is that it allows the production of devices by the patient's condition and complex anatomical regions of the body. For this reason, examining the manufacturing process with additive manufacturing for the production of medical devices is an important research topic to define an optimized manufacturing system for these applications. Additive manufacturing provides the formation of the desired part by melting the metal powder layer by layer with a laser. As a natural consequence of additive manufacturing, there are problems with dimensional accuracy, surface quality, and hardness. Additive manufacturing has disadvantages, especially when high precision is required or parts need functional micro-scale features. Therefore, even if the part is created by additive manufacturing, micro-machining can be used to produce special properties in this process chain, improving end part characteristics such as roughness or surface mechanical properties. Micro milling has an important place in this process chain due to the improvement in the properties of the final part.

CoCr alloys have been recognized as effective biomaterials due to their excellent mechanical properties, high corrosion resistance, and high wear resistance. In this study, CoCr alloy samples, which we will micro-machining, are produced using Selective Laser Melting (SLM) and casting methods. Limited research has been reported on the fundamental mechanisms involved in the micro-cutting of Co-Cr alloys produced by additive manufacturing. For this reason, it is tried to present basic information about the cutting mechanisms in the micromachining of Co-Cr alloys. In addition, production optimization was determined by comparing and interpreting the structural changes that will occur in different parameters, factors affecting production continuity such as temperature, stress, surface quality, burr and chip formation. The temperatures and Von mises stresses occurring during the micro-milling experiment were analyzed by the finite element method and compared with the experimental results.

Keywords: Micro Milling, CoCr alloys, Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Finite Element Method

1. GİRİŞ

İmalat, hammadde ve yarı mamullerin makine ve iş gücüyle ile işlenerek ürün elde edilme sürecine denir [1]. İmalat ilk zanaat üretimi ile başlamış ve daha sonra sanayi devrimi ile devam etmiştir [2]. Zanaat üretiminde ürün manuel olarak müşterinin isteğine göre oluşturulmuştur. Fakat bu zanaat üretim maliyetleri ve üretim süresinin yüksek oluşu modern imalat yöntemlerinin bulunmasına yol açmıştır [3]. Sanayi devrimleri ile makinelerin tanıtılması, üretim hattının icat edilmesi, buhar ve elektrik enerjisi ile seri üretime geçilmiştir [4]. Seri üretim ile birlikte ürünler büyük hacimli ve düşük maliyetli üretilmesine rağmen esnek ve verimli üretim imkânları azalmıştır [5]. Günümüzde gelişen teknoloji, artan ihtiyaçlardan ve doğada bulunan malzemelerin sınırlı olmasından dolayı esnek ve verimli üretimin yolları aranmaktadır [6]. Son yıllarda sanayi ürünlerinin verimli ve esnek imal edilebilmesi için birçok imalat yöntemi bulunmuştur.

İmalat yöntemleri geleneksel ve geleneksel olmayan şeklinde ikiye ayrılmaktadır [7]. Geleneksel yöntemler kesici uç, matkap ucu veya taşlama taşı gibi takımlar kullanılarak fiziksel temas yöntemleri ile makro talaş kaldırma işlemleridir [8]. Talaş kaldırma kesici takım ile malzeme sürekli temas halinde üretimin yöntemine göre farklı hareketlerde bulunmaktadır [9]. Takım ve iş parçası arasındaki hareketler ve etkileşimin anlaşılması için uzun süredir birçok araştırma ile bilgi toplanmaktadır [10]. Araştırmalar takım tezgâhlarının üretimde düşük maliyet, esnek ve verimli çalışmasına odaklanmıştır. Son yıllarda bu yöntemler geliştirilmesine rağmen geleneksel imalatın çalışma prensiplerinden dolayı günümüzde daha esnek ve verimli üretim için geleneksel olmayan imalat çeşitleri araştırılmaktadır. [11]. Bunun nedenleri;

- İmalat sırasında malzemedeki eksilen talaş atık malzemeler birçok değerli metalin israfına neden olmaktadır.
- Talaş kaldırma döküm toz metalürjisi gibi alternatif yöntemlere göre daha fazla zaman alır. Aynı zamanda malzemenin sertliği ve dayanımı arttıkça işleme sırasında hızlı takım aşınmasından kaçınmak için işlem hızını düşürmek gerekir. Buda işlem süresini ve maliyeti artırır.
- Kesici takımlar imalat sırasında işlenen malzemenin özelliklerine ve sertliğine göre takım üzerinde aşınmalara neden olur. Malzeme özelliklerine göre daha nitelikli

takımlar kullanılmalı buda işlem maliyetini etkilemektedir. Takım aşınması talaşlı imalatın kaçınılmaz bir sonucudur.

- Talaşlı imalat sırasında malzemenin özelliklerine ve işleme parametrelerine bağlı olarak kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklar oluşur. Buda takım ve talaş arasında talaş yapışmalarına neden olmakta yapışan talaş işlem sırasında koparken takımda yığılma kenar oluşturur ve belli aralıkta koparak takımda aşınmalara ve kötü yüzey oluşumuna neden olur.
- Talaşlı imalat sırasında mekanik işlemenin sonucu olarak titreşimler oluşmaktadır. İmalat işleme boyutlarına göre titreşimler takım kırılmalarına ve ürünün yüzeyde bozulmalara neden olur.
- Kompleks geometrili ürün üretimine olan ihtiyacın artmasıyla birlikte geleneksel imalat yöntemleri ile bu ürünlerin üretiminin zor ve imkânsız olması.
- Takım ile malzeme arasındaki kuvvet uygulanma zorunluluğu nedeni ile takım boyutlarının çok küçük olması mümkün değildir. Bu nedenle küçük boyutlu işlerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor veya imkânsızdır.

Geleneksel yöntemlerin bu sınırlamaları gelişen teknoloji ve günümüzün üretim sanayilerinin isteklerinin artmasıyla özellikle 1950-1970 yılları arasında alışılmamış imalat yöntemleri ortaya çıkmaktadır [12]. Son yıllarda özellikle elektronik, havacılık ve uzay teknolojisinin gelişmesi ile birlikte geleneksel olmayan yöntemlere olan ilgi talebin artmasına neden olmuştur [13]. Bu yöntemlerin üstün yönleri;

- Teknolojide gelişmeler sonunda geleneksel mühendislik malzemelerinden çok daha iyi özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirildi. Yeni imalat yöntemleri bu malzemelerin üstün mekanik özelliklerinden etkilenmeden üretim yapabilmektedir.
- Geleneksel yöntemlerle ulaşılamayan alanların işlenmesi, çok küçük boyutlu hacimlerin işlenmesi, çok küçük boyutlu deliklerin delinmesi alışılmamış imalat yöntemleri daha için kolay ve basit uygulamalar olmaktadır.
- Geleneksel imalatın mekanik uygulamalar ilkelerinden dolayı bilgisayarlı sistemlere bilgi aktarımında zorluklar bulunmaktadır. Alışılmış imalat yöntemleri işleme yöntemleri gereği teknoloji ile daha kolay uyum sağlamaktadır.
- Teknolojinin gelişimi ile birlikte daha hassas malzeme işleme gerekmektedir. İstenen hassaslık boyutları alışılmış imalatın boyutlarının çok altında istenmektedir. Bazı alışılmamış yöntemlerin ise malzemelerin nano boyutlarda yüzey işleme olanağı verebilmesi, alışılmış yöntemlere göre aşırı düzeyde hassas işleme olanağı

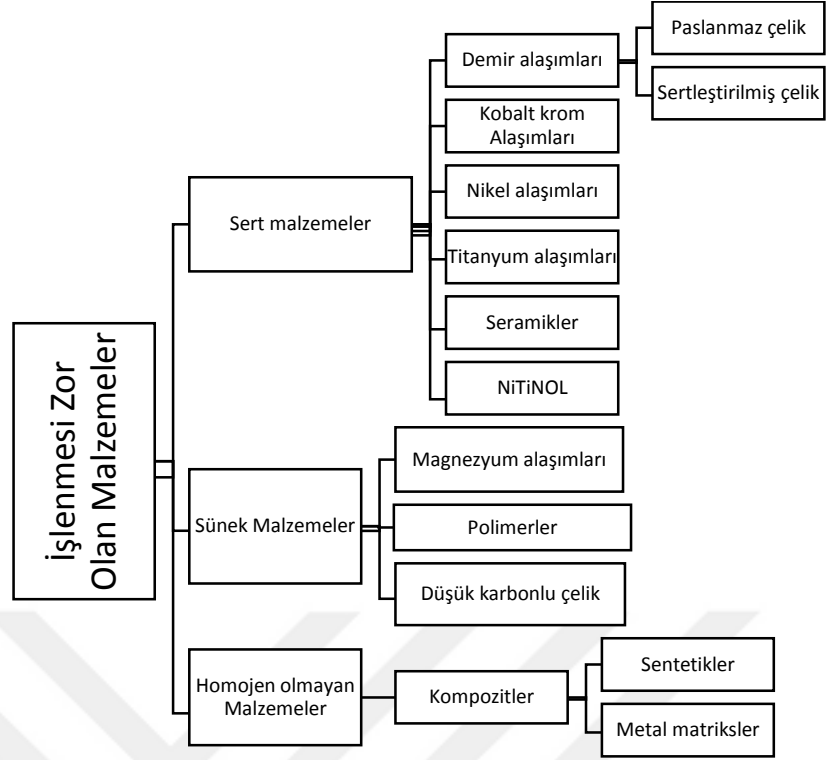
sağlanmaktadır. Sağlanan bu hassas işleme olanaklarının sonucu olarak ürün özellikleri ve buna bağlı performansları gelişmiştir.

Teknolojinin ilerlemesiyle daha az yer kaplayan ve işlevsel ürünlere olan minyatür üretime ilgi artmıştır [14]. Minyatür üretim daha az malzeme kullanımı ve daha hızlı işleme sağlamaktadır [15]. Mikro imalatın gelişmesi ile daha önce olanaksız görülen boyutlarda üretim ve yüzey işleme yapılabilmektedir [16].

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri geleneksel yöntemlere göre daha pahalı ve kullanımı özel uzmanlık gerektirmektedir. Bu yüzden bu yöntemlerle kullanılacak malzemelerin aşağıdaki şartlardan en az birini sağlaması gerekmektedir [17].

- Sert yüksek mukavemet veya kırılabilirlik gibi mekanik özellikler taşıması
- Yüksek korozyon direnci, aşınma direnci, yüksek deformasyon direnci, ısı direncine sahip olması
- Alışılmış imalat usulleri ile işlenemeyecek kadar küçük olması.
- Ürünün geometrisinin karmaşık oluşu küçük boyutlar ve yüksek hassasiyet istemesi.

Bu özellikleri sağlayan CoCr, Ti6Al4V, 316L paslanmaz çelik, Inconel 718 ve Inconel 625 gibi alaşımların işlenmesi zor mekanik özellikleri yüksek malzemelerin alışılmamış imalat yöntemleri ile üretimi son yıllarda öncelik kazanmıştır [18-21]. Şekil 1.1'de işlenmesi zor olan malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 1.1: İşlenmesi zor olan malzemeler [19].

Yeni malzemelerin geleneksel takımlarla işlenmesinde karşılaşılan zorluklar bu malzemelerin üretiminde yeni imalat yöntemleri aramaya ve geliştirmeye yönlendirmiştir. Geleneksel imalat yöntemlerinin yeni malzemelerin sertlik, dayanım ve diğer mekanik özelliklerden etkilenmemesi için işleme mekanizmasında ısıl enerji, elektrik enerjisi veya kimyasal enerji kullanılması sağlanmış ve böylece yeni malzemelerin işlenebilmesine olanak sağlamıştır [21].

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri genellikle malzemeyi işlerken kullanılan enerji çeşidine göre sınıflandırılır [22]. Bu sıralama şu şekildedir;

- Mekanik enerji (Mikro talaşlı işleme, Ultrasonik ve basınçlı su ile işleme).
- Termal enerji (Lazer, elektron, iyon ışını ve plazma ile işleme).
- Kimyasal enerji kullanan (Isıl kimyasal, kimyasal parlatma ve fotokimyasal işleme).
- Elektrokimyasal enerji (Elektrokimyasal sıvı jeti, erozyon taşlama, parlatma) kullanan yöntemler.

Geleneksel olmayan imalat çeşitleri günümüzde ileri teknoloji gerektiren uzay ve medikal alanda kullanılmakta, gelecekte teknolojinin gelişmesiyle kullanım alanlarının genişleyip birçok alanda kullanılacak olması öngörülmektedir [23].

Son yıllarda termal enerji yöntemlerinden olan metal 3B yazıcılar ile metal tozunu katman katman eriterek üretim yapabilen eklemeli imalat yöntemleri popülerlik kazanmıştır [24]. Eklemeli imalatta metal tozu eritme yöntemi ile üretilen malzemelerin avantajlarının yanı sıra birçok dezavantajı da bulunmaktadır [25]. Bu dezavantajların oluşma sebebi parça katmanı üretilirken ani ısıtılıp soğutulması nedeniyle iç gerilmeler, mikro çatlaklar, büzülme boşluğu, kısmen kaynaklı toz parçacıklarının malzeme içinde boşluklara neden olmasındandır [26].

Eİ ile üretim, bu özelliklerinden dolayı mikro işlenebilirliklerini etkilemektedir [27]. Bu dezavantajları azaltmak için Eİ ile üretilen malzemelerin geleneksel yöntemlerle mikro işleme üzerine son zamanlarda birçok akademik çalışma yapılmıştır [34-50]. Bu çalışmalarda Eİ ile üretilen malzemelerin üretim eksikliklerine neden olduğu görülmektedir. Eİ işlem parametrelerinin optimizasyonu, üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü kısmen çözebilir. Pratikte neredeyse tüm Eİ parçalarının işlevsel yüzeylerinin pürüzsüzlüğü için bazı son işlem adımlarına ihtiyacı vardır [28]. Bu üretim sonrası operasyonlar, Eİ ile üretilen malzemelere uygulandığında kendine özgü mikro yapısı nedeniyle bazı sorunlarla karşılaşılır. Bu sorunları düzeltebilmek için Eİ ile üretilen malzemelere uygulanacak ikincil işlemler dikkatle seçilmeli ve işleme parametreleri için bir strateji belirlenmelidir [29]. Günümüzde yapılan birçok araştırmada Eİ ile yapılan üretim hatalarını düzeltmek, üstün yüzey ve mekanik özellikler elde etmek için ısıl işlem, talaşlı imalat, taşlama, kumlama gibi ikincil işlemler uygulanmaktadır [30]. Eİ ile üretilen ürünlerin en çok kullanıldığı alanlar olan havacılık, biyomedikal ve otomotiv sektörlerinde hassas mikro ölçekli özelliklere gereksinim duyulmaktadır [31]. Bu hassaslıkta yüzey kalitesini ve mikro ölçekli mekanik özellikleri sağlayabilmek için ve aynı zamanda mikro ölçekli üretim hatalarını düzeltmek için mikro talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır [32]. Üretim teknolojisinin gelişmesi sonucunda Eİ ile mikro frezeleme teknolojilerini birlikte kullanan hibrit makinelerin üretildiği görülmektedir. Özellikle geleneksel imalatla üretimi imkânsız olan ileri düzeyde yüzey kalitesi ve mekanik özellikler isteyen alanlarda yeni nesil kullanışlı ürünler üretilmeye başlanmıştır [33].

Yukarıdaki literatür incelendiğinde Eİ ile üretilen malzemelerde yüzey özelliklerini artırmak için mikro frezeleme gibi ikincil işleme ihtiyaç duyulduğu CoCr alaşımlarının mikro işlenmesinde yer alan temel mekanizmalar hakkında sınırlı çalışmaların yapıldığı görülmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Biyomedikal, otomotiv ve havacılık gibi alanlarda eklemeli imalatın ve minyatür üretimin yaygınlaşmasıyla bu alanda kullanılan işlenmesi zor alaşımların üretim stratejilerinin belirlenmesi önem kazanmıştır. Talaşlı işlenmesi zor olan CoCr alaşımları Eİ ile üretilerek stent, diş protezi gibi tıbbi alanlarda kullanılmaktadır. Eİ ile üretilen malzemelerde yüzey özelliklerini artırmak için mikro frezeleme gibi ikincil işleme ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Eİ ile üretilen CoCr alaşımlarının mikro kesilmesinde yer alan temel mekanizmalar hakkında sınırlı araştırmalar bildirilmiştir. Bu nedenle bu çalışma, Seçici Lazer Ergitme (SLE) tekniği CoCr için mikro işlenmesine odaklanarak, bu malzemelerin kesme mekanizmaları hakkında temel bilgileri sunmaya çalışılmaktadır. Eklemeli imalatın kullanılmasının ivmelenmesi ile birlikte ürünlerin imalat özelliklerinin geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Bu kapsamda eklemeli imalatın önemli sorunlarından olan yüzey pürüzlülüğü, imalat zamanı gibi özelliklerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Özellikle mikro boyutlarda eklemeli imalatın üretim yapması bu ürünlerin mikro olarak işlenebilirliğinin önemini artırmaktadır. Bu çalışmada eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin mikro işleme özellikleri incelenip geleneksel yollar ile üretilen malzemelerden farkları belirlenecektir.

Bununla birlikte bu çalışmada CoCr alaşımının mikro frezelemesinde deneysel çalışmalara benzer nümerik modeller tasarlanarak deneysel olarak tespiti zor olan kesme sıcaklıkları sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmektedir.

1.2 Konun Literatürdeki Yeri

Yapılan literatür çalışmasında CoCr, Ti6Al4V, 316L paslanmaz çelik, Inconel 718 ve Inconel 625 gibi yüksek sertlik, düşük aşınma ve yüksek korozyon direncine sahip olan ve üretimi zor olan malzemelerin son yıllarda eklemeli imalat (Eİ) yöntemleri ile üretildiği görülmektedir. [37-50]. Eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen bu malzemelerin istenen kaliteyi sağlamak için parametreleri değiştirildiğinde üretim sürelerinin aşırı uzadığı görülmüştür. Daha kısa sürede yüksek boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi gerektiğinde ikincil işlem olarak mikro frezeleme uygulamaları yapıldığı görülmüş ve malzemenin farklı mikro işleme parametrelerinde nasıl tepki gösterdiği ölçülmüştür. Eklemeli imalatla üretilen malzemelerin mikro frezelemesinde optimal parametrelerin bulunması kesmenin işleminin kinematiklerinin, dinamiklerinin ve termal etkilerini önemli ölçüde iyileştirilebileceği literatürde vurgulanmaktadır.

Aynı zamanda mikro frezelemenin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi talaş kaldırma sırasında oluşan mekanikleri deneye ihtiyaç duymadan anlamamıza imkân sağlamaktadır.

1.3 Eklemeli İmalat ile Üretilen Malzemelerin Mikro Frezelemesi

Krawczyk ve diğ. (2020) SLE (seçici lazer ergitme) yöntemi ile üretilen CoCr alaşımlarının mikro frezelemeden sonra yüzey ölçümlerini gözlemlemişler. Deneylerde, 2 ağızlı kaplamalı monolitik mikro taneli sementli karbür mikro parmak frezeler kullanılmışlardır. İşlenecek parça SLE yöntemi kullanılarak üretilen CoCr alaşımından yapılmışlardır. Analiz edilen değişkenler, SLE işlemi sırasında lazer tarafından sağlanan hacimsel enerji yoğunluğu ve mikro frezeleme sırasındaki ilerleme hızını dikkate almışlar. Sonuçlar, SLE işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğunu gözlemlemişler. Ayrıca ergitme sırasında sağlanan enerjinin hacimsel yoğunluğuna ve malzemenin mekanik özelliklerinin önemli değişkenliklere neden olduğu görmüşlerdir [34].

Allegri ve diğ (2019) CoCrMo SLE tekniği ile üretilen numunelere mikro-frezeleme işlemi uygulamışlardır. Mikro malzeme davranışını değerlendirmek için mikro frezeleme ile malzemede farklı derinliklere sahip mikro kanallar açılmış. Mikro kanallarda ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü (Ra ve Sa) ve sertlik analiz edilmiştir. Kesme kuvvetleri için minimum kesilmemiş talaş kalınlığını belirlemek için analiz etmişler. Kesme kuvvetinin kesme deriliğinden etkilemediğini, negatif katman etkisinin olmadığını ve işlenmiş yüzeyde daha iyi pürüzlülük ve daha yüksek bir sertlik gözlemlemişlerdir [35].

Fernandez-Zelaia ve diğ (2019) SLE yoluyla üretilen CoCrMo numuneleri üzerindeki ikincil talaşlı işlemenin etkilerini incelemişlerdir. Mekanik testler, mikroyapı karakterizasyonu ve istatistiksel analiz kullanarak, Eİ ile üretilen CoCrMo malzeme anizotropisinin derecesini araştırmışlar ve malzeme anizotropinin frezelemedeki etkilerini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak mekanik anizotropinin hem mikro yapının morfolojisi hem de kristalografik doku tarafından yönlendirildiğini göstermişler. Talaşlı işleme kuvvetlerinin bu anizotropik yapıya duyarlı olduğunu bulmuşlardır [36].

Zhang ve diğ. (2020) Eklemeli imalat (Eİ) ile üretilen Ti6Al4V alaşımının seramik takımla yüksek hızda frezeleme işlemleri altında oluşan kesme tepkilerini incelemişlerdir. İşleme parametrelerinin fonksiyonu olarak kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklığı alanları gibi çeşitli konular analiz etmişlerdir. İlerleme hızının kesme hızına kıyasla kesme kuvvetlerine

ve sıcaklık alanları üzerinde daha büyük etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Frezeleme işlemi sırasında sürekli ve kırıklı talaşlar üretmiş ve talaşların tipik tırtıklı morfolojisi gözlemlenmişlerdir. Seramik takım hızlı işleme altında uygun işlenmiş yüzeyler üretmiş. Takım aşınmasındaki mekanizmaların mekanik ve termal yüklemekten dolayı mikro talaş ve talaş yapışması olduğunu belirtmişlerdir [37].

Greco ve diğ. (2021) Eİ ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezeleme işlenebilirliğini araştırmışlardır. İşleme sırasında malzeme termal geçmişi numunelerin gözenekliliğini ve mekanik davranışını etkileyebildiğinden ve farklı frezeleme performansları verebildiğinden, Eİ parametrelerinin etkilerini de incelemişlerdir. Numunelerin malzeme karakterizasyonu, mikrografik, sertlik testleri ve gözeneklilik yönlerinden değerlendirmesini yapmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü, Eİ ve işlenmiş titanyum numuneleri arasında istatistiksel bir ayrım göstermiştir. Eİ numunelerinin sertliğinin artmasıyla artan kesme kuvvetlerinde de benzer davranış görülmüşlerdir. Ayrıca işlenmiş titanyum numunelerine kıyasla Eİ numunelerinin mikro kanallarının aynı yönlü tarafında çapak oluşumuna doğru artan bir eğilimi gözlemlemişlerdir [38].

Lizzul ve diğ. (2020). 4 farklı yöntemle SLE üretilen Ti6Al4V alaşımının frezelemede takım aşınması incelenmişlerdir. Takım aşınması, talaş morfolojisi ve işlenmiş yüzey kalitesini analiz etmişlerdir. Ti6Al4V alaşımının Eİ ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerine ve işlenebilirliklerine etkileyen mikro yapısal bir anizotropiye neden olduğunu gözlemlemişler. Sonuç olarak, yatay olarak üretilen numunelerin işlenmesinden dikey olarak üretilenlere göre takım ömrünün kademeli olarak %40'a kadar azaldığını göstermişlerdir. [39].

Campos ve diğ (2020) SLE tarafından üretilen ile standart ticari üretilen Ti6Al4V işlenebilirliğini mikro frezeleme işlemi sırasında farklı diş başına ilerleme (0,5 ile 4,0 μm) kullanarak karşılaştırmışlardır. İşlenebilirlik analizi, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu analizi ve mikro talaş morfolojisini dikkate almışlardır. SLE ile üretim daha yüksek mukavemet ve sertlik sunmaktadır. Buna rağmen yüksek sıcaklıktaki malzemenin hızlı soğuması nedeniyle malzemede ortaya çıkan ince martensit, malzeme mikroyapısında değişikliğe neden olduğundan, daha yüksek kesme kuvvetleri, daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha düşük işlenebilirlik sunduğunu gözlemlemişlerdir [40].

Hojati ve diğ. (2019) Eİ ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımı parçaların mikro freze işlemi sırasında kesme kuvvetleri, spesifik kesme enerjisi, çapak oluşumu ve yüzey kalitesi üzerine odaklanarak işlenebilirliğini ele almaktadırlar. Mikro freze takımının kesme kenar radyusu 7.4 µm olan mikro takım kullanmışlar. 7.4 µm den düşük kesilmemiş talaş kalınlıklarında önemli çapak oluşumu, yüksek kesme enerjileri ve kazınma mekanizmasını gözlemlemişlerdir. Kesilmemiş talaş kalınlığı artığında kesme enerjisi ve çapak oluşumu arasındaki korelasyon, daha az çapak oluşturmakta talaş kaldırma baskın hale gelmektedir. Ekstrüde parçalarda oluşan çapak dalgalı ve sürekli iken, Eİ parçalarında yüzeydeki düzensizlik nedeniyle çapaklarda süreksizlik arttığını görmüşlerdir. 7,4-37.3 µm arasındaki kesilmemiş talaş kalınlıklarında geleneksel frezelemeye benzer bir şekilde çapak boylarının ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını gözlemlemişlerdir [41].

Bonaiti ve diğ (2017) Eİ ile üretilen Ti6Al4V alaşımı ile işlenmiş Ti6Al4V'nın mikro frezeleme işlenebilirliğini, işleme sırasında malzeme termal geçmişi, numunelerin gözenekliliğini ve mekanik davranışını etkileyebildiğinden ve farklı frezeleme performanslarına neden olduğundan, Eİ parametrelerinin etkileri de araştırılmışlardır. Numunelerin malzeme karakterizasyonu, sertlik testleri ve gözeneklilik değerlendirmesi ile yapmışlardır. İşlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğü, Eİ ile işlenmiş titanyum numunelerinin arasında istatistiksel bir fark olduğunu ve Eİ numunelerinin sertliğinin artmasıyla artan kesme kuvvetlerinde de benzer davranış sergilediğini görmüşlerdir. Sonuçlarda işlenmiş titanyum numuneler ile Eİ numunelerinin karşılaştırıldığında aynı yönlü frezelemede çapak oluşumunun artan bir eğilim göstermişlerdir [42].

Rysava ve diğ (2016) Eİ ile üretilen Ti6Al4V titanyum alaşımının delinme özelliklerinin değerlendirmişler. 1,6 mm çapında delikler, değişen kesme hızlarında ve ilerleme hızlarında kuru kesme koşullarında 5 eksenli yüksek hassasiyetli mikro freze makinesinde delmişler. İşlenmiş deliklerin geometrik özelliklerini (çap ve derinlik), çapakların miktarını ölçmek ve karşılaştırmak için özel bir ölçüm prosedürü geliştirilmiştir. Eİ malzemenin yüksek hassasiyetli deliklerin geometrik kalitesi üzerindeki etkisini tartışmışlar. Son olarak, diş açma fizibilitesini ve performanslarını kanıtlamak için diş frezeleme deneyleri gerçekleştirmişler. Test edilen kesme koşulları aralığındaki sonuçlardan, kesme hızının ve ilerleme hızının en düşük değerlerinin gerekli delik kalitesini elde etmek için önemli olduğunun sonucuna varmışlardır [43].

Parenti ve diğ (2019) Eİ ile üretilen 316L malzemesinin mikro kesme işlemi yaparak iyi yüzey kalitesine sahip karmaşık geometrilerin daha yüksek üretim esnekliği ile nasıl üretilebileceğini göstermişlerdir. Farklı kesme koşulları altında incelenen hammaddenin işlenebilirliğini incelemişlerdir. Eİ ile mikro frezeleme uygulamanın birlikte kullanımının fizibilitesi yapılmış ve süreci iyileştirmek için gelecekteki adımlar tartışmışlardır [44].

Abeni ve diğ (2021) Eİ ile üretilmiş 17-4 PH paslanmaz çelik numunelerinin mikro frezelemede ilerleme hızının seçimi için malzeme kaldırma davranışının analizini, dış başına ilerleme ve kesme kuvvetlerinin değişimini inceleyerek gerçekleştirmişlerdir. Yüzey bütünlüğü ve boyutsal doğruluk açısından nihai ürün kalitesini etkileyen kesme rejimlerini (kesme, sürme veya bunların kombinasyonu) arasındaki geçişi belirlemek için minimum kesilmemiş talaş kalınlığını hesaplamışlardır. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumun, ilerleme hızının bir fonksiyonu olarak analiz etmişler. Sonuç olarak ilerleme hızının kuvvetleri artırdığını bunun da çapak ve yüzey pürüzlülüğünü etkilediğini gözlemlemişlerdir [45].

Gong ve li (2019) Eİ ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin frezeleme sırasında takım aşınma performansını ve yüzey kalitesini değerlendirmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek ve küçük alanın morfolojisini gözlemek için 3B yüzey kontur profilometresi kullanmışlardır. Takım aşınmasını değerlendirmek için dijital optik ultra derinlik mikroskop analizi yapılmışlardır. Eİ ile üretilen malzemenin yüksekliği arttıkça homojenliğinin azalması ve erimemiş tozlarının bulunması nedeniyle takım aşınmasını artırdığını gözlemlemişlerdir [46].

Kuriakose ve diğ (2019) Eİ ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin mikro frezelemede kesme sıcaklığı, kesme hızı, dış başına ilerleme ve eksenel kesme derinliği gibi tipik mikro frezeleme parametrelerinin mikro kesme karakteristiği üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. İşlenmiş yuvaların kenar bütünlüğünü, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini üç boyutlu mikroskopi ve piezoelektrik kuvvet sensörü kullanarak analiz etmişlerdir. Talaş kalıntılarını giderilmesi için ön ısıtmalı (45°C) mikro frezeleme yapılarak, ortalama metal partikül boyutundan çok daha küçük olan $Sa = 1,5 \mu m$ civarında yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir. Mikro frezeleme sırasında takımda kırılmasına yönelik eğilimin düşük olduğu gözlemlemişlerdir. Bazı durumlarda, mikro kesim sırasında biriken tabakaların yapışmamasından kaynaklanan yüzey kusurları oluşmasına rağmen, mikro frezelemenin Eİ ile üretime entegre edilebileceğini doğrulamışlardır [47].

Sadiq ve diğ. (2018) SLE Eİ ile üretilen Inconel 718'in mikro frezelemesini araştırmışlardır. Takım kaplaması, frezeleme parametresi ve SLE üretim stratejisinin yüzey pürüzlülüğü ve ortaya çıkan takım aşınmasının etkilerine vurgu yapmışlardır. Gözenekler ve katmanlar arasına gömülü cürufurflar gibi yüzey ve hacim kusurlarının, mikro frezelemenin etkinliğini azalttığını görmüşlerdir. Kaplamasız WC takımları tatmin edici bir performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ancak mikro frezeleme sırasında Eİ ile üretilmiş malzemelerde, haddelenmiş malzemelere kıyasla daha düşük kesme hızlarında çalışmak zorunda kalmışlar. AlTiN ve Si3N4 PVD kaplamayı karşılaştırmışlardır, AlTiN kaplamada daha iyi performans gözlemiş ve 1-2 µm Ra yüzey pürüzsüzlüğü elde etmişlerdir. Ampirik modellerde, takım ömrünün yalnızca SLE sırasındaki üretim stratejisinden değil, aynı zamanda talaş yükünden ve daha fazla kesme hızından da etkilendiğini göstermişlerdir [48].

Abeni ve diğ (2020) Eİ ile üretilen parçaların mikro frezelemesi için uygun bir analitik kesme kuvveti modeli açıklamışlardır. Eİ ile üretilen Inconel 625 numuneleri üzerinde deneysel bir çalışma yaparak kesme kuvveti modelinin bir iyileştirme prosedürü tanımlamışlar ve uygulamışlardır. Kesme kuvveti modeli parametrelerini belirlemek ve yinelenmeli bir metot geliştirmek için bir arama algoritması kullanmışlardır. Model parametreleri değiştikçe kesme kuvvetinin nasıl etkilendiğini tahmin ederek başarıyla kanıtlamışlardır [49].

De Assis ve diğ (2020) mikro frezeleme kullanarak Eİ ile üretilen iş parçalarının anizotropisiyle ilgili yönlerini araştırmayı amaçlamışlar. Eİ ile üretilen 316L paslanmaz çeliği iki farklı küresel uçlu mikro freze takımı (600 ve 800 µm) çapında ve 1,7 µm kenar yarıçapına sahip mikro takımlarla işlemişler. Kesme hızı, 60 m/dak, 100 µm kesme derinliği ve 0,5 ila 3 µm/diş arasında değişen diş başına ilerleme seçilmişlerdir. İşleme, yarık uzunluğu boyunca belirli açılarda (60°,90°,120°ve180°) takım yolu yön değiştirerek gerçekleştirilmiştir. Anizotropiyi tespit etmiş ve yarıktaki pürüzlülük değerlerini ölçmüşlerdir. Varyans Analizi (ANOVA), kesme yönü ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük etkisine yoğunlaşmıştır. Sonuçta mikro freze çapını küçülterek anizotropi etkileri, ilerleme hızı değerlerinden bağımsız olarak pürüzlülükte daha etkili olduğunu görmüşlerdir [50].

1.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mikro Frezeleme

Trimple ve diğ. (2020) biyomedikal Co-Cr-Mo alaşımının işlenmesi sırasında ortogonal kuvvetleri tahmin edebilen bir SE (Sonlu Elemanlar) modeli geliştirmeye çalışmışlar. Bunu başarmak için, bu alaşım için yapıcı malzeme modeli belirlemişler. Çeşitli ilerleme hızları ve kesme hızları üzerinde Deform 3D kullanılarak bir ortogonal kesme sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Model, düşük kesme hızlarında farklı ilerleme hızları aralığında kesme kuvvetlerini ve gerilimleri değerlendirmiş. Kesme kuvvetleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve yüksek derecede doğrulukta (%5'ten az hata) tahmin etmişler [51].

Rahul ve diğ. (2021) yüzey ve yüzey altı seviyesindeki artık gerilmenin durumunu daha iyi anlamak için, Ti-6Al-4V malzemesinin, sürekli mekaniğe dayalı SE modellemesi oluşturmuşlar. Birleştirilmiş sıcaklık analizi ile dinamik zaman artış şeması gerçekleştirilmiş. Kritik kesilmemiş talaş kalınlığı ve takım kenarı yarıçapı, diş başına ilerleme ve eksenel derinliğin kesme kuvvetleri üzerindeki sonuçlar SEA (sonlu elemanlar analizi) ile incelenmiştir. Termal ve mekanik alan değişkenlerini teorik elastoplastik ortogonal kesme modeli de gösterilmiştir. SE ile yapılan analizler deneysel analizlerle karşılaştırılmıştır [52].

Davoudinejad ve diğ. (2019) Mikro frezeleme mekanizması anlamak ve ince özelliklerin işlenmesini optimize etmek için, Al6082-T6 alaşım malzemesinin 3D mikro frezeleme işlemi ile SE modellemesini yapmışlar. Talaş kaldırımı sırasında malzeme plastisite başarısızlık kriteri için Johnson-Cook Plastisite modeli kullanmışlardır. İşleme parametrelerini optimize etmek ve işlenebilir minimum duvar kalınlığını araştırmak için deneysel mikro frezeleme ve SE modeli kullanılmıştır. Malzemenin en iyi özellik kalitesini elde etmek için duvar kalınlığı homojenliği ve çapak oluşumu değerlendirilmiştir. Son olarak, SEA tahmin sonuçları deneysel testlerle karşılaştırılmış ve yüzde 8,5 hata payıyla uyum sağladığı görmüşlerdir [53].

Yi ve diğ. (2019) Ti6Al4V titanyum alaşımlı mikro pervane kanadından (karışık sınırları olan mikro ince duvar) elde edilen sınır koşulları esas alınarak mikro ince duvarın üç boyutlu frezeleme SE modelini yapmışlar. Daha sonra mikro cidarlı yapı, malzeme elastik-plastik yapı modeli, mikro freze takımlarının rijitliği ve geometrik yapısı SEA yönteminde dikkate alınarak farklı frezeleme parametreleri altında mikro ince cidarın üç boyutlu deformasyon simülasyonu gerçekleştirmişler. İş parçası Ti-6Al-4V alaşımının

mikro frezelemede gerinim plastik modeli göz önünde bulundurarak, mikro frezelemede boyut etkilerini açıklamışlardır. Mikro ince cidarlı deformasyonun deneysel değerlerini ve sonlu elemanların sayısal sonuçları karşılaştırıp analiz ederek ince cidar frezelemede mikro deformasyon mekanizmaları ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, deneysel frezeleme ile SEA'nin doğruluğunu ve etkinliğini doğrulamış ve mikro ince duvarlı parçaların frezeleme deformasyonunu kontrol etmek için teorik temel ve teknik destek sağlamışlardır [54].

Attanasio ve diğ. (2019) Bu çalışma, CuZn37 malzemesinin mikro frezeleme işleminin takımın adezyon aşınmaları etkileri üzerinde deneysel araştırmaların yanı sıra, adezyon aşınmasını dikkate alınarak talaş akışının simülasyonundan elde edilen süreç tahminleri yapmışlar. 3D talaş şekillerinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülerinde sünek deforme oluşumunu gözlemlemişlerdir. SE simülasyonları, mikro frezeleme işleminde, kesme hızının, ilerleme hızının, kuvvetlerin, talaş akışı ve şekilleri üzerindeki etkilerini araştırmak için kullanmışlardır. Simülasyonlardan tahmin edilen kesme kuvvetleri ve talaş akışı sonuçları, kuvvet ölçümleri, takım adezyon aşınması ve talaş morfolojisi ile karşılaştırıp tartışmışlardır [55].

Wu ve diğ. (2020) Ti6Al4V malzemesinden 1.5:1 ve 3:1 en boy oranlarına sahip mikro slotlar üretilerek deneyler yoluyla çapak tipleri ve morfolojisini gözlemlemişler. Daha sonra çapak oluşum mekanizmaları, SEA yardımıyla teorik ve deneysel bir bakış açısıyla kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. İşleme sırasında oluşan çapakların konuma göre altı kategoride sınıflandırılabilirliğini göstermişlerdir. Üst ve yan duvar çapaklarının boyutu sırasıyla yaklaşık 30 µm ve 40 µm olarak gözlemlemişlerdir. Yüksek en-boy oranlı yapılarda çapak oluşum sürecinin, yan duvarın sınırlandırılması, yırtılma hatası ve talaş malzemelerin ekstrüzyonu ile önemli bir ilişkiye sahip olduğunu bulmuşlar. Ayrıca, en boy oranının, üst ve yan duvar çapak oluşumu üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu gözlemlemişler. Daha düşük kesme yarıçapının üst ve yan duvar çapak boyutunda bir azalma sağlayabileceğini öngörmüşlerdir [56].

Özel ve diğ. (2017) Ti6Al4V malzemesini farklı parametrelerde mikro frezelemede deneysel doğrulama ve SEA çalışması kullanarak talaş akışı, talaş yığılması ve çapak oluşumunu incelemişler. 3B talaş morfolojisinin ve çapakların taramalı elektron mikroskopik (SEM) gözlemi, sünek kırılmış yüzeyler ile birlikte kararsızlık ve hata davranışlarını göstermişler. SEA ile mikro frezeleme işlemini yukarı, aşağı frezeleme ve takım kenarı yarıçapının 3 boyutlu talaş akışı, talaş yığılması ve çapak oluşumu üzerindeki

etkilerini araştırmak için kullanmışlardır. Simüle edilen sonuçlar, talaş morfolojisi, şekli ve boyutlarının ölçümleriyle birlikte, talaş yapışmasının iyi uyum sağlaması için takım kenarı durumu ile karşılaştırılmıştır. SEA ile deneysel uygulamanın iyi uyum sağladığı gözlemlenmişlerdir [57].

Ucun ve diğ. (2016) Inconel 718'in mikro frezelemesini incelemişler. Bu amaçla, kaplamasız takımlar kullanılarak dört farklı ilerleme hızı (1.25, 2.5, 3.75 ve 5 $\mu\text{m}/\text{diş}$) ve sabit kesme hızı (48 m/dak) dikkate alınarak kesme testleri yapılmıştır. SEA ile termomekanik davranışını Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak modellenmişlerdir. Farklı kesici takım kenar açıları (+ 8°,0 ve -8°) için de analizler yapılmıştır. Sayısal analizlerde takım dönüşü ve kesici takım kenar tipine bağlı olarak kesme kuvveti, takım gerilimi ve kesme sıcaklığı değerleri tahmin edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara bakıldığında deneysel kesme kuvveti ve sıcaklık değerlerinin sayısal sonuçlarla uyumlu olduğunu görmüşler. Ayrıca ilerleme hızına bağlı olarak kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve gerilme değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Ayrıca farklı kesici takım kenar geometrileri için sayısal analizlerde kesme kuvveti sıcaklığı ve takım gerilme değerlerinin kenar geometrilerine bağlı olarak değiştiğini gözlemlenmişlerdir [58].

2. EKLEMELİ İMALAT

Son 50 yılda özelleştirme talebinin artması, üretimde yeniliklerin aranmasına neden olmuştur [59]. Üç boyutlu (3B) yazıcılar bu arayışlar sonucunda ortaya çıkmıştır [60]. 3B yazıcı teknolojisi 80'li yıllarda prototip olarak tasarlandığı için hızlı prototipleme olarak adlandırılmıştır. 90'lı yıllarda metal ve seramikten fonksiyonel parçalar üretilmesiyle, imalat yönteminin adı eklemeli imalat (Eİ) olarak ifade edilmiştir [61]. Eİ teknolojileri biyomedikal, uzay sanayi ve havacılık, otomotiv gibi birçok endüstriyel alanda kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır [62]. Örneğin Eİ biyomedikal alanda hastanın anatomik yapısının ihtiyaçlarına göre özel ürün üretilmesini sağlamaktadır. Kemik yapısı bilgisayar ortamına aktarılarak kemiğe uygun implant ve protezler 3B yazıcılarla üretilmektedir [63]. Aynı zamanda yedek parça gibi ürünlerin ihtiyaca özel olarak üretilmesine olanak sağlamıştır [64]. Son yıllarda endüstri 4.0 sanayi devrimi içerisinde Eİ'nin önemli bir yer edineceği ileri sürülmektedir [65]. Eİ teknolojisinin pazar payı önemli ölçüde artmakta, 2023 yılında 33 milyar dolar pazar payına sahip olacağı düşünülmektedir [66]. Bu yüzden Eİ ile ilgili araştırmalar son yıllarda hızlı bir şekilde artış göstermektedir. 3B yazıcılarda imalat prensibi: talaş koparma veya kütleli şekillendirme yerine, Eİ çeşitlerine bağlı olarak farklı yöntemlerin malzemeyi eriterek veya akmaya elverişli hale getirerek katmanlar halinde birbirine eklenmesini sağlayan üç boyutlu parça imalatına dayanır. Bu metotla gerçekleştirilen üretimler, dijital tasarımın direkt olarak üç boyutlu parça haline dönüşümü söz konusu olduğundan, üç boyutlu yazdırma olarak ifade edilmektedir. Metal Eİ' da 3B yazıcılar ile malzemelerin 3B model bilgilerini alıp genellikle mikron düzeyde metal tozları katmanlı bir şekilde birleştirerek nesnelere üretilmektedir [67]. Eİ ile üretilecek parça, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ile üretilir ve bu tasarımın nihai ürün haline dönüştürülebilmesi için CAD tasarımlarının Stereolithography (STL)'ye dönüştürülmektedir. Tasarlanan parça oluşturulan desteklerle birlikte STL formatında üretim yapılacak cihaza aktarılır. Cihazda işlem parametreleri belirlenir ve üretim yapılır. Metal toz yatağı füzyonu ile üretimlerde bilgisayar programları ile üretilecek malzemeler için destek elemanları oluşturulur ve üretimden sonra oluşturulan destek elemanları temizlenir.

Toz yatağı Eİ cihaz parametrelerinin (lazer gücü, tarama yönü ve hızı, yapım yönü, kullanılan toz karakteri, sıcaklık gibi) seçilmesi nihai ürünün yüzey kalitesini oluşturmada önemli etkenlerdendir [68].

2.1. Eklemeli İmalat Çeşitleri

En yaygın eklemeli imalat teknolojileri: ergiterek yığıma ile modelleme (FDM), üç boyutlu yazıcı (3DP), steryolitografi, SLA seçmeli lazer sinterleme (SLS), seçmeli lazer ergitme (SLE), elektron ışınli ergitme (EBM) gibi yöntemlerdir [69]. Lazer veya elektron ışınları, metal tel veya toz parçacıkları eriterek katmanlar oluşturmak için kullanılır, daha sonra bu katmanları birleştirerek karmaşık şekilli bir parça oluşturur. Malzeme püskürtme metal tozu, erimek ve bir parça oluşturmak için enerji ışını odaklı noktada beslenir. Jet bağlama (MJM) organik bağlayıcı malzeme püskürtür ve metal tozunu katmanlar halinde bağlar. Parçanın son formunu oluşturmak için sinterlenir [70]. Çizelge 2.1'de eklemeli imalat yöntemleri malzeme ve uygulama şekilleri tablo ile gösterilmiştir.

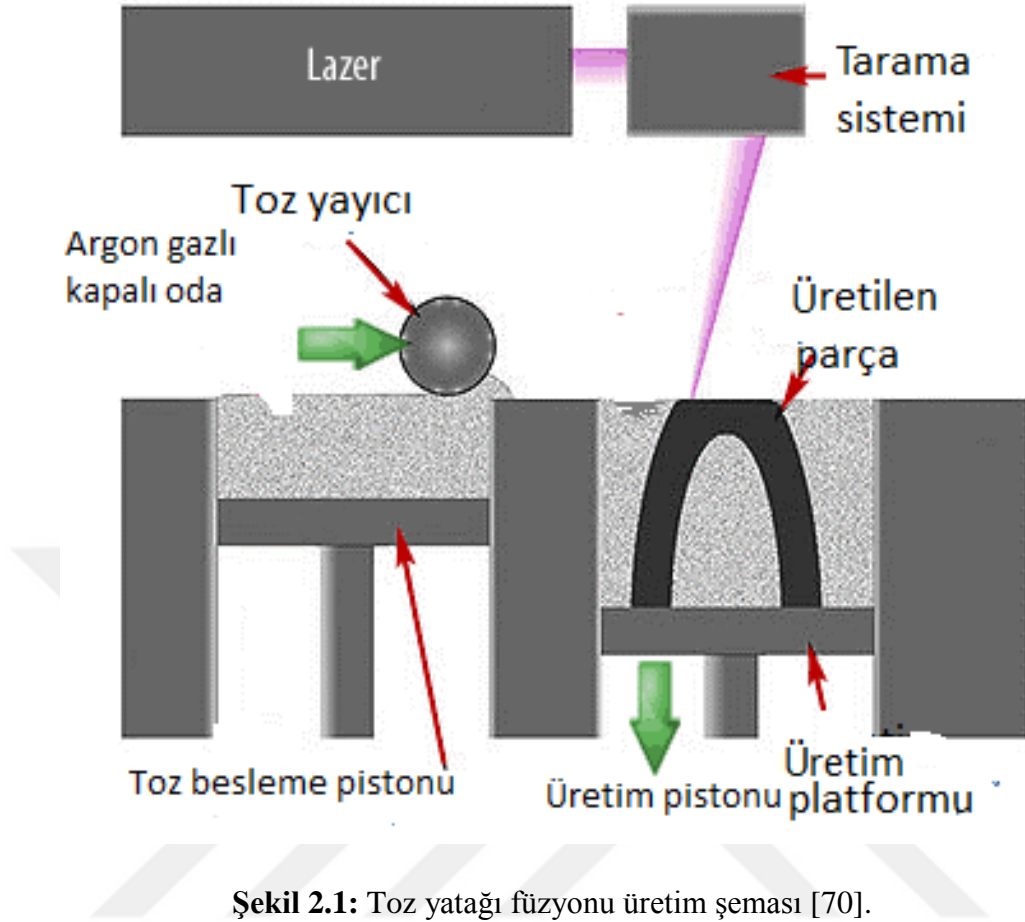
Çizelge 2.1 Eklemeli imalat yöntemleri ASTM 42 standartlarına göre sınıflandırılması

[71].

Malzeme	Üretim çeşidi	Materyal hazırlama yöntemi	Katman oluşturma yöntemi	Aşama değişimi	Malzeme tipi	Uygulamalar
Sıvı	SLA	Fıçıda sıvı reçine	Lazer tarama	Fotopolimerizasyon	UV ile kürlenene reçine, seramik süspansiyon	Prototipler, döküm kalıpları, yumuşak takım
	MJM	Jette sıvı polimer	Işık projeksiyonu Mürekkep-jet yazıcı	Soğutma, fotopolimerizasyon	UV ile kürlenene arkilik Plastik ve mum	Prototipler, döküm kalıpları
	RFP	Nozulda sıvı damlatma	İstek üzerine tortu bırakma	Soğutma ile katılaştırma	Su	Prototipler, döküm kalıpları
Filament/m acun	FDM	Nozulda filament eritme	Sürekli ekstrüzyon Ve biriktirme	Soğutma ile katılaştırma	Termoplastik , mum	Prototipler, döküm kalıpları
	Robotik döküm	Nozul macunu	Sürekli ekstrüzyon	–	Seramik macunu	Foksiyonel parçalar
	FEF	Nozul macunu	Sürekli ekstrüzyon	Soğutma ile katılaştırma	Seramik macunu	Foksiyonel parçalar
Toz	SLS	Toz yatağı	Lazer tarama	Partikül eritme	Termoplastik , mum, metal tozu seramik tozu	Prototipler, döküm modelleri, metal, seramik üretimi
	SLE	Toz yatağı	Lazer tarama	Full eritme	Metal	Takım, işlevsel parçalar
	EBM	Toz yatağı	Elektron ışın tarama	Full eritme	Metal	Takım, işlevsel parçalar
	LMD	Nozul aracılığı ile Toz enjeksiyonu	İsteğe bağlı Enjeksiyon ve Lazer ile eritme	Full eritme	Metal	Takım, metal parça tamiri, işlevsel parçalar
	3DP	Toz yatağı	İstek üzerine bırakma ve ciltleme baskı	–	Polimer, Metal, seramik, Diğer tozlar	Prototipler, döküm kalıp, takım
Katı Levha	LOM	Lazer kesme	Besleme ve ciltleme yapışkanlı tabakalar	–	Kâğıt, plastik, metal	Prototip, döküm modelleri

2.2. Toz Yatağı Füzyonu

Toz yatağı füzyon teknolojisinde proses kapasitesi, koşulları ve parça özellikleri değişiklik gösterse de tüm çeşitleriyle aynı çalışma prensibini paylaşır. Toz (ortalama çap, birkaç on mikrondan birkaç yüz mikrona kadar değişir) malzeme bir bıçak veya silecek mekanizması tarafından tahrik edilen bir baskı tablasına püskürtülür ve yayılır. Yapı plakasının yüzeyi veya bitmiş bir katman ile bu yayma mekanizmasının alt kenarı arasındaki boşluk, yapı alanı boyunca hareket ederken katman kalınlığını ve yüksekliğini tanımlar. Bir toz tabakasının yüksekliği tipik olarak metal sistemlerde birkaç 10 ile 100 µm arasında ve polimer sistemlerde 50 µm ile 150 µm arasındadır. Tabaka yüksekliği, toz yatağı füzyon işleminde önemli bir faktördür ve lazer ışını geometrisi, gücü, toz parçacık boyutu ve boyut dağılımı gibi sistemdeki diğer parametreler dikkatlice seçilir. Bir toz tabakası oluşturulduktan sonra, bir ışın (lazer veya elektron ışını), toz yatağına odaklanır ve istenen 3D modelin bir katmanında tanımlanan alanı doldurmak için model toz yüzeyi boyunca taranır. Tarama deseni de kritik bir faktördür ve tamamlanan parçadaki malzemenin kalitesi, mikro yapısı ve kusurlu yapıları üzerinde güçlü etkilere sahiptir. Bir katman tamamlandıktan sonra, toz yatağı işleme platformu aşağı çekilerek bir katman için yapılan adımlar bir sonraki katmanı tamamlamak için tekrarlanmaktadır. Toz yatağı işleminde her katman lazere maruz kaldığından bir öncekine tam füzyonuna sağlamak için önceki katmanın eritme derinliğine dikkat edilecek şekilde ayarlanmalıdır. Toz yatağı işlemi, plastikler, elastomerler, metaller, seramikler ve kompozitler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemeleri işleme kapasitesine sahiptir. Kullanılan malzemelere, istenen özelliğe, yapıya ve kullanılan sistemlerin sınırlamalarına bağlı olarak, birkaç işlem varyasyonu uygulanabilir. Toz yatağında metal tozu kullanıldığında ise SLE ve EBM yöntemleri kullanılır. Şekil 2.1'de toz yatağı ile üretim şeklinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.1: Toz yatağı füzyonu üretim şeması [70].

2.3 Metal Eklemeli İmalatta Anizotropi

Anizotropik davranış, Eİ'nin ana problemlerinden biridir. Katmanlı üretimin doğası gereği, her katmanın içindeki malzemenin mikro yapısı, katmanlar arasındaki sınırlara kıyasla değişiklik gösterir. Eİ ile üretim sırasında yatay yönlü üretim ile dikey yönlü üretim karşılaştırıldığında gerilim veya sıkıştırma altında 3B üretilen parçanın farklı mekanik davranışlar sergilemektedir. Toz yatağı füzyonu (SLS veya SLE) ile 3B üretilen metallerde ve alaşımlarda, sonraki katmanların eklenmesi önceki katmanların sınırlarını yeniden ısıtmaktadır. Katman sınırlarındaki ısınma termal gradyanlar nedeniyle farklı bir tane mikroyapısı ve anizotropik davranış ile sonuçlanır [71]. Lazer ışınının her katmana ısı geçişi, sadece sinterleme sürecini kontrol etmek için değil, aynı zamanda anizotropik davranışı sınırlamak için de önemli bir faktördür [72]. Enine (yapı) yöndeki morfoloji ve dokudaki değişiklikler, SLE tekniği ile 3D üretilen CoCr alaşımının uzunlamasına yönüne kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti ve süneklik ile sonuçlanır [73]. Bu anizotropik davranış alaşımlar, seramikler ve polimerler içinde gözlenmiştir. Eİ ile üretim sonucu malzemede

oluşan anizotropik yapı yüzey problemlerine ve boyut hassasiyetinde bozulmalara yol açmakta. Bu problemleri düzeltmek için yapılan çalışmalar Eİ cihazının parametrelerinin optimizasyonu ya da ikinci mekanik işlemlerle yüzey pürüzsüzlüklerini düzeltmeye yönelik olmuştur [74]. Eİ cihazı parametreleri her yüzey için bir iyileştirme üretim süresini artırmakta ve yeterince yüzey iyileşmesi sağlamamaktadır. Bundan dolayı belirli özellikler üretmek ve iyi bir yüzey kalitesi için parçalarda ikincil mikro işlemlere gerek duyulmaktadır. Fakat anizotropi sonucu oluşan malzemedeki yüksek çekme mukavemeti ve süneklik gibi mekanik özellikler ikincil mikro talaş kaldırma işlemlerinde zorluklara yol açmaktadır. Bundan dolayı malzemeyi anlamak ve mikro talaşlı imalat stratejisini belirlemek son yıllarda önemli bir araştırma konusu olmuştur [75].

2.4 Eklemeli İmalatın Avantajları ve Dezavantajları

Eİ yöntemleri hem avantajlara hem de bazı dezavantajlara sahiptir.

- Eklemeli imalatın CAD programları tarafından tasarlanan parçaların doğrudan imalatına imkân tanır. Bu sayede envanter, montaj, iş gücü, bakım giderleri olmadığı için üretim maliyetini ciddi şekilde düşürür.
- Toz yatağı füzyonu ile üretilen malzemelerde toz içeriğini değiştirerek farklı özellikte malzemelerin üretimi yapılabilmektedir.
- Eİ makineleri çok karmaşık geometrik şekillere sahip ürünlerin imalatına izin vermekte olup bu sayede yeni ürün tasarımı ve geliştirilmesi için büyük bir özgürlük yaratmaktadır.
- Eklemeli imalatta gözenekli yapılar üretilerek mekanik özellikleri yüksek ve daha hafif yapıların üretilmesi mümkün olmaktadır.

Eİ ile üretim yöntemlerinin bu avantajlarına rağmen işlevsel parçaların birtakım dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır:

- Eİ makineleri belirli bir üretim hacminin az olması daha düşük boyutlardaki parçaları üretmeye imkân tanımaktadır.
- Toz yatağı füzyonu ile katmanlı üretimde üretim tablasından ürünü çıkarılabilmesi için destek elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Destek elemanları üretim işleminden sonra parçadan çıkarılır. Destek elemanlarının üretimi ve parçadan çıkarılması fazladan malzeme ve enerji tüketimine neden olmaktadır.

- Eİ yöntemleri genellikle karmaşık ve belirli bir tasarıma ait ürünlerin üretilmesi için kullanılır. Diğer imalat yöntemlerinde olduğu kadar seri üretime uygun değildir.

Bu dezavantajlarının yanı sıra toz yatağı füzyon üretilen parçalarda metal tozlarının ani ısıtılması ve soğutulduğundan dolayı oluşan:

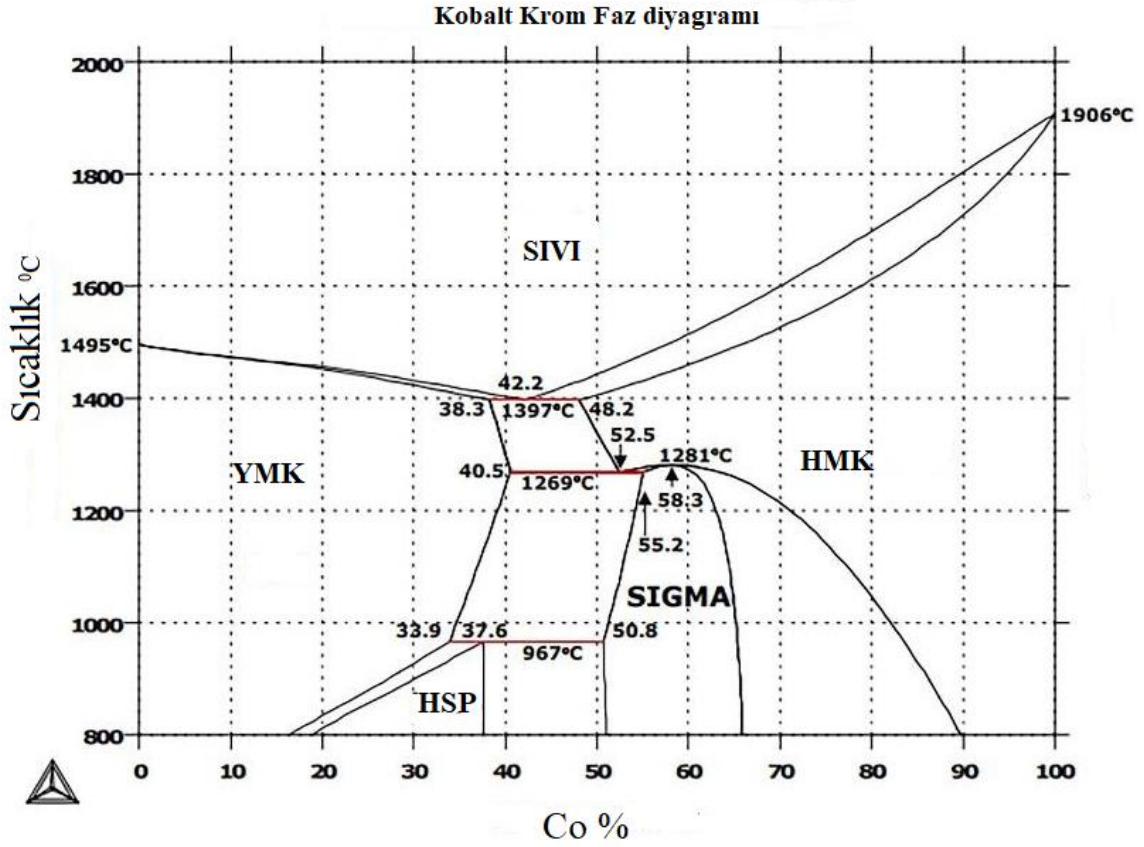
- Parçada malzemenin içyapısında çarpılmalar ve boşluklar meydana getirebilmektedir.
- Parçalarda ısıl gerilmeler oluşabilmektedir ki bu gerilmeler parçaların mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini önemli ölçüde etkileyebilmektedir.
- Toz eritme soğutma yönteminin sonucunda malzemede oluşan anizotropik yapılar malzeme boyut hassasiyetini etkilemektedir.
- Ani ısıtıp soğutmanın önüne geçebilmek için yapılan Eİ cihazı üretim parametrelerindeki değişiklikler üretim sürelerini artırmaktadır.

2.5. Eklemeli İmalatla Üretilen Kobalt Krom Alaşımları

CoCr alaşımı, aero-motor, nükleer, biyomedikal ve gaz türbinleri gibi birçok mühendislik alanının uygulanmasında ilgi çekici bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Modern hava türbin motorlarının sıcak bölümlerinde vakumlu döküm nikel alaşımları baskınken, kobalt alaşımları endüstriyel gaz türbinleri için yakıt nozulları ve kanatçıklar gibi özellikle zorlu uygulamalarda kullanılmaktadır [76]. CoCr alaşımları ilk olarak 1907 yılında, ikili Co-Cr alaşımı için diyagramın düşük kimyasal reaktivitesini ve yüksek mukavemetini gözlemleyen Haynes tarafından sentezlenmiştir [77]. Haynes, alaşımının oksidasyona, aşındırıcı dumanlara dayanabildiğini ve alaşımı kaynayan nitrik aside maruz bıraktığında bile görünür bir kararma belirtisi göstermediğini ve Co-Cr alaşımına Molibden (Mo) veya Tungsten (W) 'nin eklemenin mukavemette kayda değer bir artış ile sonuçlandığı görülmüştür [77]. Co-Cr alaşımı biyomedikal uygulamasının bulunmasıyla daha fazla ilgi görmeye başlamış, 20. yüzyılda, ilk olarak tıbbi alet imalatında ve 1960 yılında ise yüksek aşınma direncini gösteren ilk Co-Cr protez kalp kapağı implantı olarak kullanılmıştır [78]. Biyomedikal uygulamada kobalt-krom, ortopedik implantların üretiminde, özellikle mükemmel aşınma ve korozyon direncinden dolayı diz ve kalça gibi ağır yüklü eklemlerin implantları için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Co-Cr alaşımlarının biyomedikal alanda kullanılma sebebi korozyon direnci, aşınma direnci, yüksek deformasyon direnci, ısı direnci ve iyi biyouyumluluk gibi mükemmel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Vücut içerisinde daha iyi korozyon direnci sağlamak için krom (Cr) parçacıkları yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşturmaktadır. Günümüzde, tıbbi implantlara yönelik pazar talebi, Co-Cr alaşımlarına yönelik talebin artmasına neden olmuştur [79]. Co-Cr-Mo bileşenleri genellikle döküm veya dövme işlemleriyle üretilir. Biyomedikal uygulamalara odaklanan Eİ ile üretilen CoCr alaşımlarına, parçalarda yüksek düzeyde esnekliğe sahip karmaşık bileşenlerin üretimi için tıbbi cihaz imalatının proses zincirinde kullanılmaktadır [80]. Eİ ile üretim döküm ve dövme gibi üretim yöntemleri sırasında yüksek seviyelerde tribomekanik gerilim söz konusu olduğunda işlevsel yüzey ve boyutsal özelliklerini etkiler. Ayrıca, bu işlemler ağa yakın şekil formları üretir, bu nedenle istenen nihai bileşeni elde etmek için ikincil işleme tekniklerine gerek duyulmaktadır [81].

şekil 2’de bu temel ikili alaşımı karakterize eden dengeyi göstermektedir. Yüzey merkezli bir kübik fazı (YMK), Molibden (Mo) veya Tungsten (W) ile karakterize edilir ve mukavemette bir artış sağlar. şekil 2.2’de yüksek iş sertleştirme oranları ve mukavemeti sağlayan denge diyagram yapısını göstermektedir. Ayrıca, ikili Co-Cr alaşımı için U-fazı, stresi emen YMK kristal yapı ile karakterize edilir, daha kararlı hegzagonal sıkı paketli (HSP) yapıya dönüşebilir. HSP yüksek çalışma sertleştirme oranları ve mukavemet sağlar. İşleme açısından, bu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini ve sertliklerini koruduklarından, talaşlı işlenmesi zor olmaktadır. Düşük ısı iletkenliği, yüksek gerilme sertleşmesi, yüksek sıcaklıkta yüksek sertlik ve yüksek aşınma direnci, CoCrMo alaşımlarının işlenebilirlik derecesinin zayıf olmasının nedenlerindedir [82].

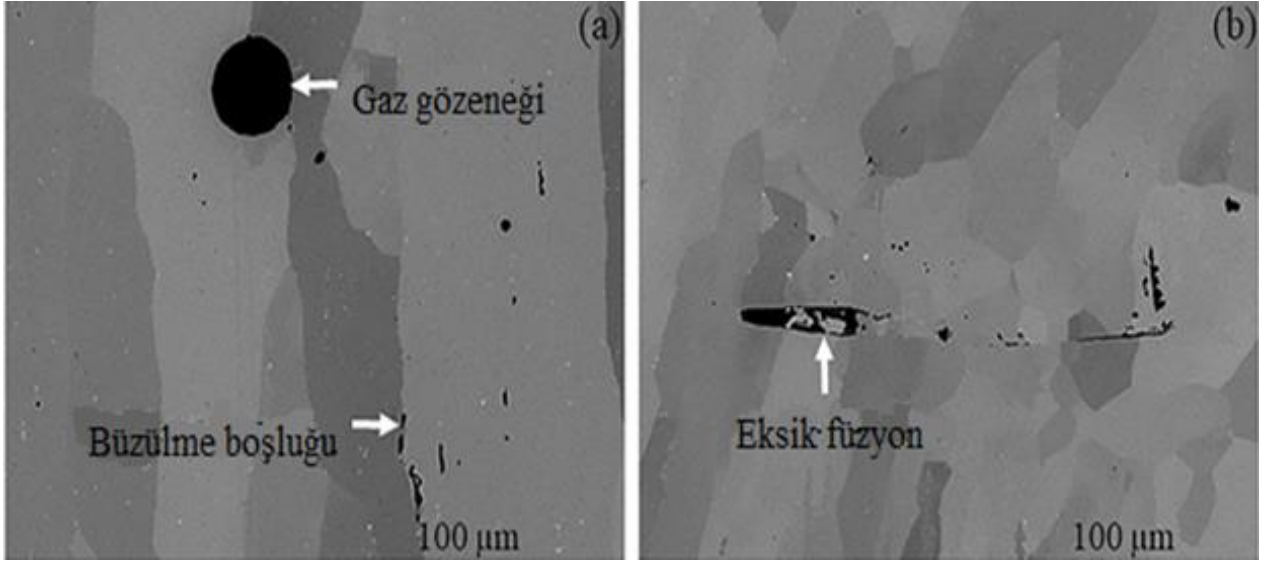


Şekil 2.2: Mikroyapısal değişikliklerle CoCr alaşım denge diyagramı (termodinamik denge koşulları altında) [83].

2.6 Eklemeli İmalatla Üretilen Malzemeleri Mikro İşleme

Yüksek termal kaynaklı artık gerilim veya sinterleme sırasında düzgün olmayan büzülme nedeniyle malzemelerin içyapısında bozulmalara neden olur. Çok pürüzlü bir yüzey ortaya çıkar (15-20 μm Ra) ve Şekil 2.3'de gösterildiği gibi yüzey kusurları (mikro çatlak, büzülme boşluğu, kısmen kaynaklı toz parçacıkları vb.) ve hacim kusurları (gözeneklilik, inklüzyon, vb.) oluşur. Son işlem, yüzey kalitesi veya boyut/biçim toleransları için gerekli mühendislik kriterlerini karşılayabilmeleri için yapılmalıdır.

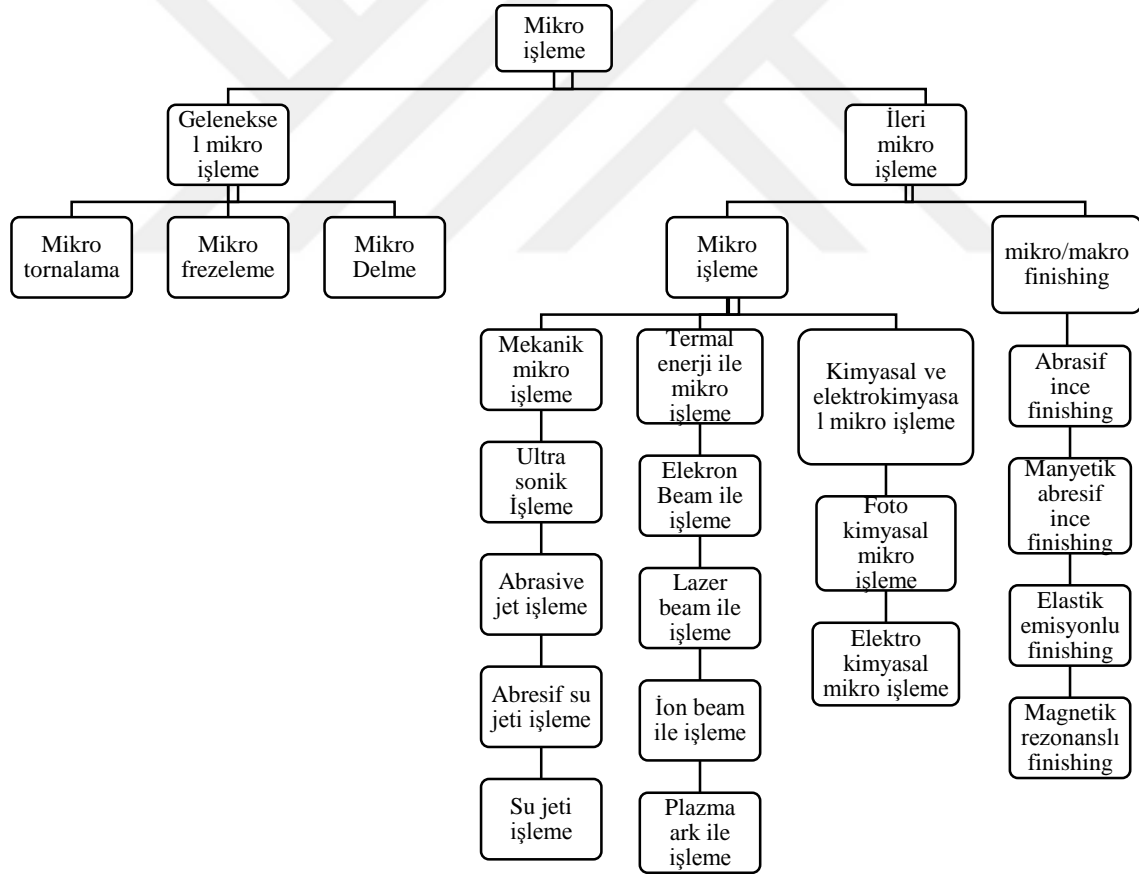
Mikro işleme, yüksek talaş kaldırma oranı ve bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) yöntemleri ile üretimi sağlayabildiğinden, eklemeli olarak üretilmiş metallerin yüzeyini ve boyutunu kontrol etmek için en etkili son işleme tekniği olmaktadır [85].



Şekil 2.3: Toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilen inconel 718'deki kusurlarını gösteren SEM görüntüleri [84].

3. MİKRO İŞLEME

Küresel rekabet gücü, artan ticarileşme ve pazar elde etme rekabeti, günümüz endüstrisinde hassasiyetin gerekliliğinden dolayı üretim süreçlerinin sürekli iyileştirilmesi gerekmektedir [86]. Yüksek hassasiyet elde edilmesi için son yıllarda mikro işlemeye olan ilgi artmaktadır. Mikro işleme yöntemleri hassas kalıplar, makine elemanları gibi büyük ölçekli bileşenler ve mikro boyutlardaki mikro motorlar, mikro ısı eşanjörleri, mikro pompalar, mikro kanallar, baskı kafaları ve tıbbi implantlar, mikro ve nano boyutlu ürünlerin tipik uygulamalarından bazılarıdır [87]. Minyatür ürünlere yönelik sürekli artan talebi karşılamak için farklı mikro üretim teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalarda yapılmaktadır. Mikro işleme çeşitleri ileri mikro işleme ve geleneksel mikro işleme olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.1’de mikro işleme imalat çeşitlerinin şeması verilmiştir:



Şekil 3.1: Mikro imalat çeşitleri şeması [86].

Eklemeli imalat yöntemleri olarak bilinen termal enerjiyle ile işleme yöntemleri verimli ve esnek üretim sağlar. Talaşlı mikro imalat yöntemleri ise daha hızlı ve hassas yüzeyler elde etmemizi sağlamaktadır [88]. Son araştırmalar, mikro bileşenleri yüksek verimli ve uygun maliyetli bir şekilde üretmek için farklı teknolojileri entegre ederken, yeni mikro üretim platformları geliştirmeye odaklanmaktadır. Aynı zamanda mikro imalat çeşitlerini birlikte kullanarak yeni hibrit imalat çeşitleri de tasarlanmaktadır. Son zamanlarda eklemeli imalat ile mikro frezelemenin birlikte uygulandığı hibrit üretim sistemleri popülerlik kazanmaktadır [89].

3.1 Mikro Talaşlı İmalat

Mikro talaşlı imalat yaklaşık 60 milyar dolar işlem hacmine sahip, dünya genelinde hızla büyüyen bir endüstridir. Mikro talaşlı imalat mikro kesme, mikro tornalama, mikro frezeleme, mikro delme ve mikro taşlama gibi geometrik olarak tanımlanmış bir kesici kenar kullanan mekanik mikro işlemeyi ifade eder. Mikro talaşlı imalat, birkaç mikrondan birkaç milimetreye kadar değişen genel boyutlara veya özelliklere sahip çeşitli mühendislik malzemelerinde yüksek doğrulukta 3D bileşenleri işlemek için kullanılır [90].

Boyutları yüz mikrondan birkaç milimetreye kadar veya birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar değişen özelliklere sahip yüksek hassasiyetli mekanik minyatür bileşenler, havacılık, hassas mühendislik, biyoteknoloji, elektronik, iletişim gibi çeşitli endüstriler için giderek daha fazla talep görmektedir. Mikro talaşlı imalat, metaller, polimerler, teknik seramikler ve kompozitler dahil olmak üzere çok çeşitli mühendislik malzemelerini ve aynı zamanda yüksek doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü ile işleyebilmektedir. Uygulamalar arasında yakıt hücreleri, mikro akışkanlar, mikro optik/lensler için kalıplar, fiber optik elemanlar ve mikro nozullar sayılabilir [91].

Mikro talaşlı imalat, mikro parçaları, normal boyutlu parçalardaki mikro özellikleri ve mikro yapılandırılmış yüzeyleri üretmek için kullanılır [92]. Mikro kesimdeki parçaların özellikleri; mikro parçaların kesme boyutları 1-1000 µm arasında değişmeli ve en az iki boyut bu aralıkta olmalıdır. Mikro kesim normalde birkaç mikrondan daha iyi boyutsal mutlak doğruluk veya $10^{-3} - 10^{-5}$ arasında göreceli doğruluk ve 100 nm'den daha az yüzey pürüzlülüğü (Ra) elde edilmesi mikro kesme özelliği kazandırır. Mikro bileşenler ve mikro yapılar için mikron altı doğruluk (10^{-6} sırasıyla göreceli doğruluk) ve nanometrik yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için elmas takımlar kullanılmaktadır [92].

Mikro talaşlı imalat, geleneksel talaşlı imalata kinematik olarak benzer, ancak birçok yönden geleneksel talaşlı imalattan temel olarak farklıdır. Mikro talaşlı imalat, geleneksel talaşlı imalat basit bir düşük ölçeklendirilmesi değildir. Mikro talaşlı imalatta, kesilmemiş talaş kalınlığı, takımların kesici kenar yarıçapı veya iş parçası malzemelerinin tane büyüklüğü önemlidir. Kesici kenar yarıçapının etkisi, negatif eğim açısı, yan yüzdeki takım- iş parça teması, minimum talaş kalınlığı ve mikro yapı etkisi mikro talaşlı imalatta makro imalata göre belirgin farklılıklar göstermektedir.

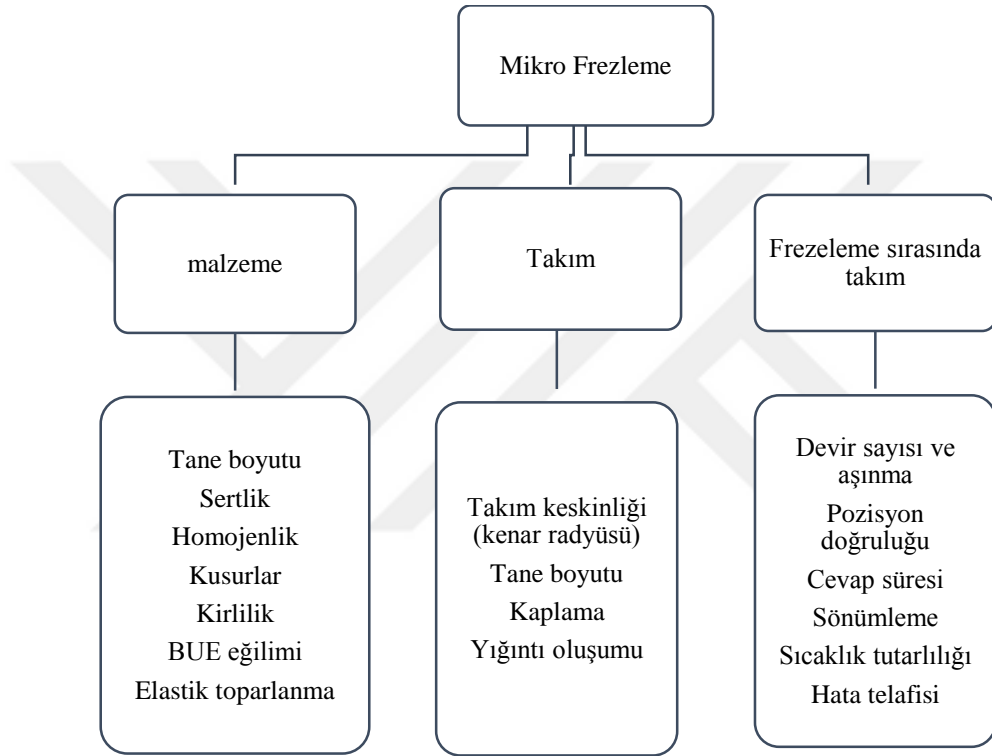
Bu davranışlar, mikro kesme kuvvetleri ve kesme enerjisi, talaş oluşturma işlemi, yüzey üretimi, çapak oluşumu ve takım aşınma mekanizması açısından altta yatan kesme mekaniğini etkileyebilen boyut efektleri olarak bilinir. Öte yandan takım tezgâhlarının ve kesme takımlarının boyut ölçeklendirmesi, işleme dinamikleri üzerinde boyut etkisi de kesme mekaniğini etkiler.

3.2 Mikro Frezeleme

Mikro frezeleme, birçok avantajı olan ve mikro işleme prosesleri içinde çok fazla tercih edilen bir mikro talaşlı imalat yöntemidir. Mikro özellikler üretmek için geleneksel olmayan alternatif işlemler (örneğin, lazerle mikro işleme, elektrik deşarjlı mikro işleme, elektrokimyasal mikro işleme, kimyasal mikro aşındırma, elektron/iyon ışını mikro işleme) mevcut olsa da bu işlemler ya yüksek maliyetli ya da sonuçlanmış yüzey ve yüzey altı bütünlüğü karşılaştırıldığında daha düşüktür. Mikro frezelemenin anizotropik en boy oranı, malzeme kaldırma oranı veya özellik kalitesi daha başarılıdır.

Mikro frezeleme, çok sayıda görevi yerine getirme ve iş parçası üzerinde birçok farklı şekil ve özellik üretme yeteneğine sahip son derece esnek bir işlemdir. Mikro talaş kaldırma işlemi, bir iş parçasının sabit bir konumda tutulmasıyla çalışırken, bir iş mili takımı döndürülmekte ve X, Y ve Z eksenleri boyunca hareket ettirilmektedir. Bu sayede mikro frezeleme mikro tornalama ve delme işlemlerinin yapabileceklerini kolaylıkla yapabilmektedir. Mikro freze takım çapları 25 ile 1000 µm arasındadır. Mikro frezeleme sırasında takımın boyutlarından dolayı çok küçük hatalar bile ciddi takım kırılmalarına ve aşınmalara neden olacağından aşırı doğruluk gereklidir [92]. Mikro işlemede tercih edilen Mikro EDM (elektro erezyon işleme) ile yer değiştirme potansiyeli nedeniyle aktif olarak araştırılmaktadır. Mikro-frezelemenin daha iyi doğruluk sağladığı ve aynı zamanda mikro-EDM'den beş kat daha fazla malzeme kaldırma oranına sahip olduğu kanıtlanmıştır [93]. Bununla birlikte, freze takımları küçüldükçe satın alınması veya üretilmesi zorlaşmaktadır.

Mikro frezeleme 100.000 rpm'ye kadar ulaşan iş mili hızlarında işlenmektedir. Bu yüzden Makro takımında önemsenmeyen küçük titreşimler mikro parmak freze takımının ömrüne zarar verip takım kırılmalarına neden olabilmektedir. Mikro freze takımlarının pahalı oluşundan dolayı talaş kaldırma sırasındaki kesme şartları çok önemlidir. Bundan dolayı mikro frezelemede kesme kuvvetleri, sıcaklıkları, takım aşınması ve yüzey dokusu gibi kesme işlemi karakteristiklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Mikro frezelemede dikkate alınması gereken temel hususlar Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Mikro frezelemede dikkate alınması gereken temel hususlar [94].

3.2.1 Mikro frezeleme takımları

Mikro kesme takımları, mikro kesmeye olanak sağlayan teknolojidir. Çünkü mikro kesmenin mikro bileşenleri ve özellikleri etkinleştirmek için mikro takımları kullanmak gerekir. Kesici takım geometrisi ve malzeme özellikleri, talaş oluşumu, ısı oluşumu, takım aşınması, yüzey oluşumu vb. üzerinde önemli etkiye sahiptir. Mikro kesmede, kesilmemiş talaş kalınlığı ve takım kenarı boyutu aynı büyüklüğe sahiptir, bu da yüksek mekanik, termal gerilimlere ve aşınma direncine dayanıklı kesme kenarları gerektirir. Yüksek sertliği nedeniyle ultra hassas işlemede ağırlıklı olarak tek kristal elmas kullanılmaktadır. Tek kristal elmas mikro takımlarda belirli uygulamalar için mikro kesimde doğruluk ve yüzey kalitesi ile ilgili yüksek gereksinimleri karşılamak üzere üretilmektedir. Öte yandan, demir alaşımlarını işlerken elmas 600°C'yi aşan sıcaklıklarda karbonize olduğundan, elmas mikro talaşlı imalatı, alüminyum ve bakır gibi demir dışı malzemelerin işlenmesiyle sınırlıdır. Tungsten karbür mikro takımlar, mikro kesme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tungsten karbür, yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptir. Aşınma direncini ve sertliği arttırmak için mikro takımlar çok ince taneli tungsten karbürlerden üretilir. Elmas ve titanyum kaplı takımlar gibi çeşitli kaplanmış mikro takımlar mikro kesmede popüler hale gelmiştir.

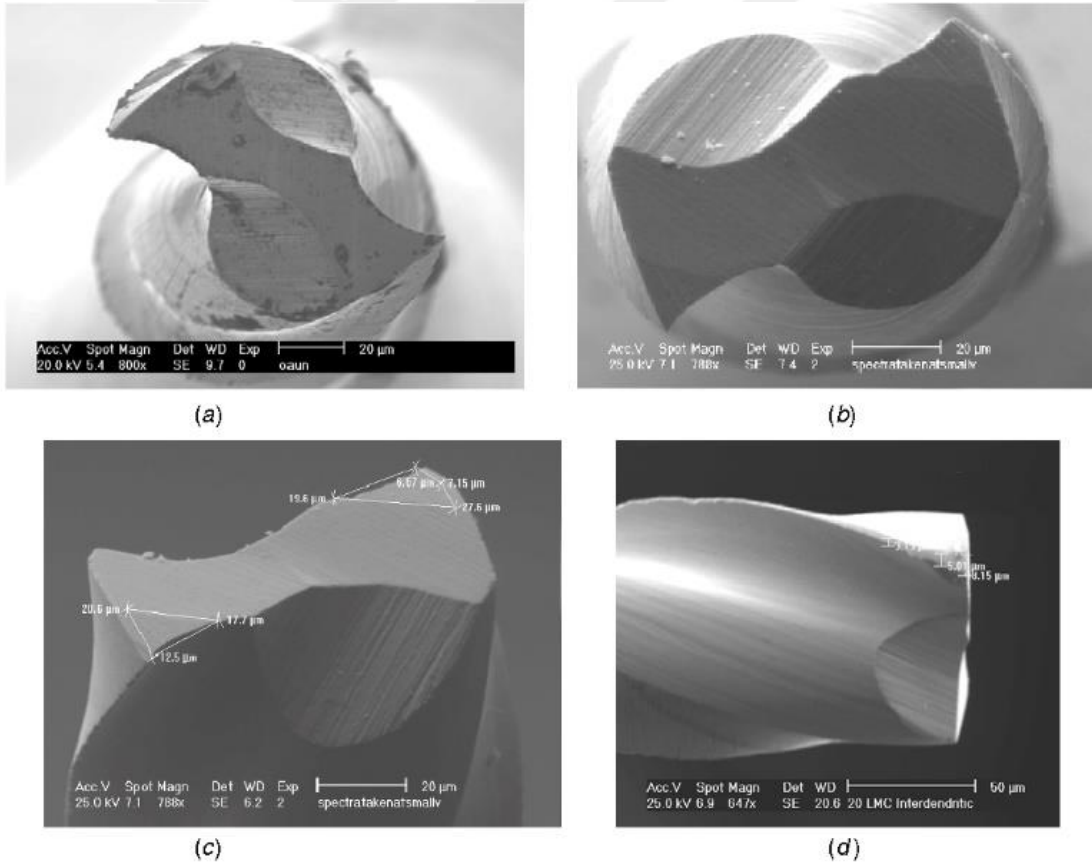
3.2.2 Mikro frezelemede takım aşınması

Mikro frezelemede takım aşınması mikron altı ile yüzlerce mikron arasında değişen hasarın göreceli boyutuna göre Çizelge 3.1'deki gibi kategorize edilebilir. Takım aşınma mekanizmaları, mekanik, termal, kimyasal etkiler veya yapışma nedeniyle oluşan hasarları içerir. Mekanik etki, takım aşınmalarının en yaygın kaynağıdır. Abrazyon aşınma, iş parçasından veya takımdan gelen sert parçacıkların kesici takım yüzeyine karşı düşük hızda kaymasından kaynaklanır. Yüksek bir kesme hızında yeterli soğutucu/yağlayıcı bulunmadığında, takım kesme kenarındaki yüksek sıcaklık, kaplama tabakasında ve malzeme alt tabakasında artan difüzyon hızı ve kimyasal reaksiyon nedeniyle takım aşınmasını hızlandırır. Şekil 3.3'de aşınmaya uğramış bir mikro takımının SEM resimleri gösterilmiştir. Yıpranma aşınması, takımın yüzeyindeki tanelerin zayıflaması sonucunda takımdan ayrılması ile oluşur. Yükleme ve boşaltma sırasında mekanik veya termal şoklar nedeniyle daha büyük takım parçaları çıkarıldığında, mikro talaş yapışması ve ufalanma meydana gelir. Optimum parametrelerde ve rijit kurulumda işleme, bir mikro takımın kesme sırasındaki titreşimini ve mekanik hasarını azaltacaktır. Aşırı kesme hızı ve ilerlemedeki

işleme sırasında yüksek gerilim nedeniyle talaş yapışması meydana gelebilir [95]. Takım talaşı, takım kaplama malzemesi, iş parçası malzemesi ve soğutucu/yağlayıcı arasındaki kimyasal reaksiyon nedeniyle mikro çatlaklarla da başlayabilir.

Çizelge 3.1: Mikro takım aşınmalarının çeşitleri [95].

Mikro Takım Aşınmaları	Aşınma miktarı (μm)	Aşınma Mekanizması
Abrazyon	<1	Mekanik ve Termal
Yıpranma	1–3	Mekanik ve Termal
Soyulma	1–3	Mekanik ve kimyasal
Mikro talaş yapışması	3–10	Mekanik ve adhesion
Talaş yapışması	10–30	Mekanik
Çatlak	>100	Mekanik



Şekil 3.3: Mikro parmak freze takımını SEM resimleri: (a) yeni takım, (b) aşınmış takım (üstten görünüm), (c) aşınmış takım (ana görünüm) ve (d) aşınmış takım (yan görünüm) [95].

Termal etki, takım aşınmasının ikinci nedenidir. Bir kesici takım kenarı, yüksek hızda işlemede sıcaklıktan dolayı yumuşar, plastik olarak deforme olur ve takımdan kopar. Hem yüksek hız çeliği takımı hem de yüksek kobalt içeriğine sahip karbür takım, termal hasara karşı savunmasızdır. Yüksek sıcaklık ayrıca difüzyona da neden olur, yani takımdan ve iş parçasından gelen atomlar, ara yüzleri boyunca karşılıklı olarak hareket eder ve özelliklerini bozarak difüzyon aşınmasına neden olur. Bir takım, termal hasarı azaltmak için uygun soğutma sıvısı uygulayarak veya bir takım yüzeyinden istenmeyen termal difüzyonu engelleyen koruyucu bir kaplama ile faydalı ömrü uzatılabilir. Daha yüksek kesme hızlarında, termal/difüzyon aşınması ana takım aşınma mekanizmasıdır. Hem yüksek kesme hızı hem de malzeme sertliği birleştirildiğinde, aşındırıcı ve termal aşınma kombinasyonu mevcut olabilir. Bir takımın kimyasal hasarı, takım malzemesi ile hava, kesme sıvısı veya iş parçası malzemesi gibi çevresi arasındaki kimyasal reaksiyondan kaynaklanır. Havada yüksek hızda kesim yaparken takım oksidasyonu yaygındır. Oksidasyon reaksiyonu sıcaklıkla hızlanır, ancak kesme takımını çevreleyen oksijenden korumak için inert gaz kullanılarak sorun ortadan kaldırılabilir. Örneğin, çelikteki demir, demir oksit oluşturmak için önce yüksek kesme sıcaklığında oksitlenir; bu demir oksit daha sonra takımın alüminyum oksit kaplamasını zayıflatır ve kaplamanın soyulmasına ve ufalanmasına neden olur. Talaş yapışması sonucunda oluşan yığılma kenar yapışması (YKY) bir takım yüzeyine güçlü bir şekilde kaynak yaptığından ve ardından takım malzemesinden kopması ile meydana gelir. YKY'nin bir kısmı bir talaşın arkasında birikir, ancak bazıları işlenmiş yüzeyde oluşabilir ve bu nedenle iş parçası kalitesini düşürür. Yumuşak malzemeleri işlerken, bir talaş takıma yapışma eğilimi gösterir ve boyut olarak büyür. Bu tür kümülatif BUE büyük olduğunda ve kararsız hale geldiğinde, YKY'nin ve takım ara yüzünün taneler arası bağlanma mukavemetinden daha yüksek yapışma mukavemeti nedeniyle kesme takımının bir kısmını keserken talaşla kopar. Paslanmaz çelik, nikel ve titanyum alaşımlarının karbür mikro takımlarda yapışma aşınmasına neden olduğu bilinmektedir. Yapışma hasarı, talaş ile takım arasındaki sürtünmeyi azaltmak için uygun yağlayıcı kullanılarak, takımı pürüzsüz ve düşük sürtünmeli bir tabaka ile kaplayarak, takım kenar yarıçapını azaltarak veya takım yüzey sıcaklığını yükseltmek ve YKY'yi yumuşatmak için kesme hızını artırarak önlem alınabilir. Kalın takım kaplaması, daha kalın bir difüzyon bariyerine sahip olmasına rağmen, ara yüzeydeki aşırı kesme gerilimi nedeniyle zamanından önce takım arızalarına neden olabilir. Karbür kesici uç için 5 µm kalınlığında bir kaplama yaygındır, ancak mikro takımlar için 1-2 µm kalınlığında bir kaplama önerilir [96]. Mikro takımların arızalanması, yukarıdaki mekanizmaların kombinasyonu nedeniyle meydana

gelebilir. Örneğin, takım kaplamasının soyulmasında, bir yüzey boyunca büyük bir gerilim gradyanı mevcut olduğundan, bu durum kaplama kusurlarından veya mekanik mekanizmadan kaynaklanabilir.

3.2.3 Mikro frezelemede boyut etkileri

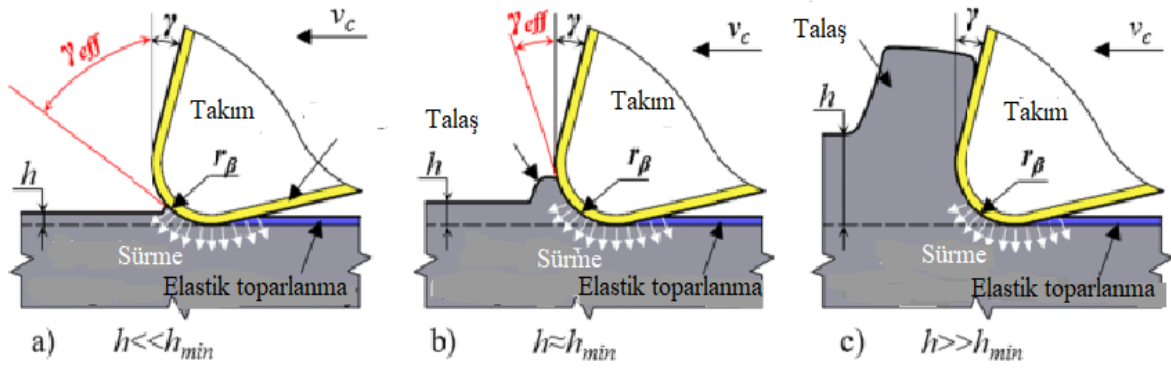
Kesilmemiş talaş kalınlığının takım kenar yarıçapına oranının küçük olmasından kaynaklanan boyut etkileri, mikro kesmede talaş kaldırma mekanizması için baskın bir faktör olmaktadır. Bu oran kesme, sürme veya kayma olayı meydana getirir ve sonuç olarak yüzey kalitesi ve yüzey bütünlüğü gibi kesme işlemlerini etkiler. Mikro frezelemede kesme kenarı yarıçap boyutu önemli bir etki göstermektedir. Önceki mikro frezeleme çalışmalarında, çok sayıda araştırmacı minimum talaş kalınlığı ve spesifik kesme enerjisi, sünek işlemede, yüzey üretimi ve çapak oluşumu açısından boyut etkileri araştırılmaktadır. Tane boyutu gibi iş parçası malzemesinin mikro yapısı, boyut olarak takım kenar yarıçapı ve kesme derinlikleriyle karşılaştırılarak, mikro yapı boyutu etkisi gözlemlenmiştir. Tipik mühendislik malzemelerinin tane boyutu 100 nm ile 100 µm arasında değişirken, kesilmemiş talaş kalınlığı birkaç mikron olabilir, bu nedenle talaş oluşumu bireysel tane içinde gerçekleşebilir. Mikro kesmedeki malzemeler, geleneksel makro kesmedeki gibi izotropik ve homojen olarak ele alınamaz. Ayrıca, bu boyut ölçeğinde tane sınırı etkileri ihmal edilemeyeceğinden, tek kristal malzemenin geleneksel kesiminden farklıdır. Mikro yapı boyut etkisi, talaş oluşum mekanizması, yüzey oluşumu ve kesme kuvvetlerinin değişimi dahil olmak üzere mikro kesme işlemlerini etkileyecektir [97]. Ayrıca tane boyut etkisinden dolayı çok küçük özelliklerde mikro kesim yapıldığında yüzey kalitesini kontrol etmenin giderek zorlaştığı bildirilmektedir. Malzeme mekanik özellikleri açısından, yapısal boyut veya özelliklerinin birkaç mikron veya daha küçük ölçeğe yaklaştığında boyut etkisi baskın bir rol oynamaya başlar.

Böyle bir boyut ölçeğinde, bileşenlerin atomlar arasındaki bağ yapısına bağlı olduklarından malzemelerin elastik özellikleri üzerinde önemli bir etki olmamasına rağmen, plastik deformasyonun başlangıcı, indüklenmiş bir stres altında dislokasyon hareketliliğinden dolayı oluşur [95]. Boyut etkileri daha sonra çıkıkların başlamasına ve kaymasını engelleyen geometrik kısıtlamalar yaratarak plastik davranışı yönetmeye başlar. Değişen malzeme özellikleri de mikro kesmenin işlenebilirliğini etkileyecektir.

3.2.4 Mikro frezelemede kesilmemiş talaş kalınlığı

Kesilmemiş talaş kalınlığı, mikro frezeleme işlemi sırasında çıkarılan malzeme katmanıdır. Mikro talaşlı imalatta kesilmemiş talaş kalınlığı geleneksel makro kesimden farklıdır. Masuzawa ve Tonshoff mikro üst sınırı yaklaşık 200 µm olarak tanımlarken, bu sınır geleneksel teknoloji düzeylerine göre değişmektedir [92]. Kesilmemiş talaş kalınlığının bu sınırı, işleme teknolojilerindeki ilerlemelerle azalır. En son teknolojide, onlarca mikrondan daha az kesilmemiş bir talaş kalınlığı mikro işleme olarak kabul edilmiştir. Geleneksel işleme düşünüldüğünde, kesici takım kenarının tamamen keskin olduğu ve takımın boşluk yüzü ile işlenmiş yüzey arasında hiçbir temas olmadığı varsayılır [93]. Bununla birlikte, elde edilebilir takım kenarı yarıçapının genellikle talaş kalınlığı (kesme derinliği) ile aynı miktarda olan mikro işleme için böyle bir varsayım yapılamaz. Geleneksel talaşlı imalatta kesmenin kesme düzlemi boyunca gerçekleştiği yerlerde, mikro işlemede kesme gerilimi kesme kenarı çevresinde sürekli olarak yükselir ve malzeme kesilmek yerine itilerek deforme olur [94]. Bu nedenle, mikro işleme süreçleri, kesme derinliğindeki küçük bir değişiklik bile kesme işlemine önemli bir etkiye neden olan kesme derinliğinin kesme kenarı yarıçapına oranından büyük ölçüde etkilenir [96]. Bu oran kesme, sürünme veya kaydırma gibi aktif malzeme çıkarma mekanizmasını ve dolayısıyla ortaya çıkan yüzey kalitesini etkilemektedir.

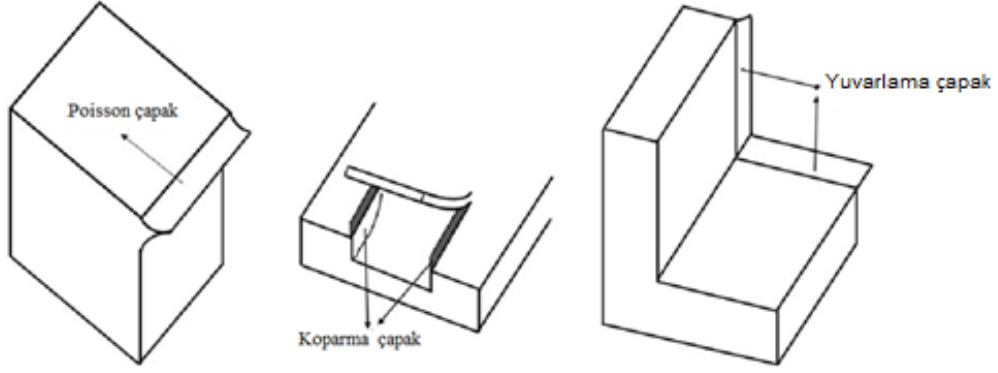
Minimum talaş kalınlığının tanımı, seçilen talaş kalınlığının altında talaşların oluşmayabileceği minimum deforme olmamış talaş kalınlığıdır [97]. Şekil 10, kesici takım kenar yarıçapına (R_β) ve kesilmemiş talaş kalınlığına (h) göre talaş oluşumunu göstermektedir. Kesilmemiş talaş kalınlığı, Şekil 3.4 (a)'da gösterildiği gibi minimum talaş kalınlığından (h_{min}) daha küçük olduğunda, yalnızca elastik deformasyon meydana gelir ve kesici tarafından hiçbir iş parçası malzemesi çıkarılmaz. Kesilmemiş talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığına yaklaştıkça, Şekil 3.4 (b), iş parçasının kesilmesi ile talaşlar oluşur ve bazı elastik deformasyonlar meydana gelir. Sonuç olarak, gerçek kesme derinliği istenen derinlikten daha azdır. Bununla birlikte, kesilmemiş talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığından daha büyük olduğunda Şekil 3.4 (c), elastik deformasyon önemli ölçüde azalır.



Şekil 3.4: Minimum talaş kalınlığının etkisi [97].

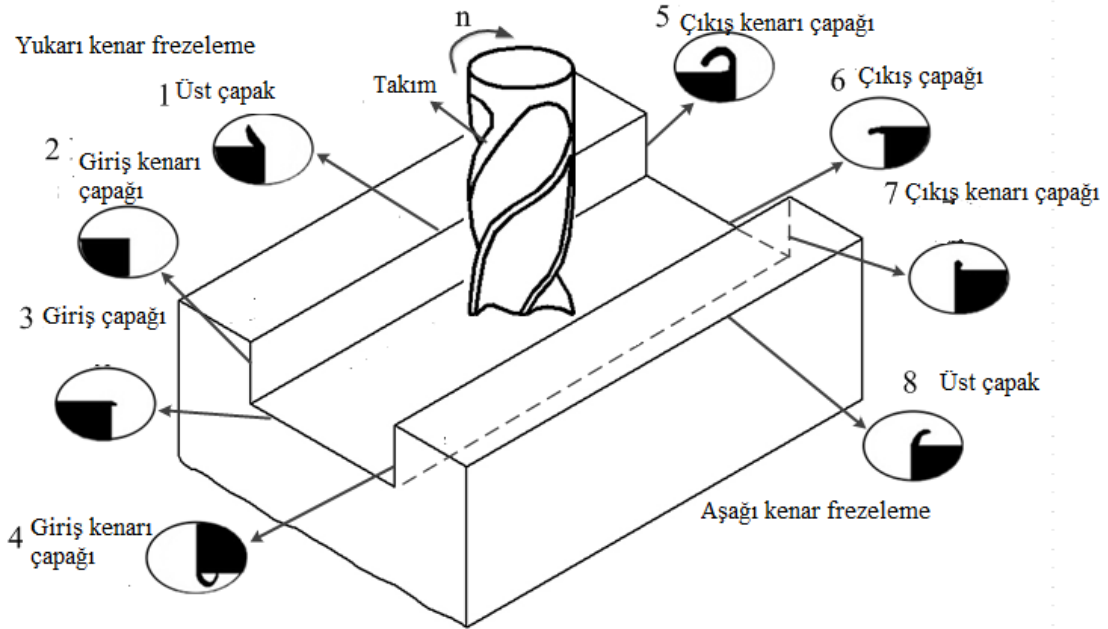
3.2.5 Mikro frezelemede çapak oluşumu

Daha küçük kesme alanı ve diş başına kesme yarıçapına göre ilerleme, boyut etkisi, minimum talaş kalınlığı, düşük mikro takım sertliği, adhezyon aşınması vb. Mikro frezelemeyi geleneksel frezeleme işleminden ayıran faktörlerdir [95]. Mikro frezelemede geleneksel frezelemeye kıyasla daha küçük çapak boyutu nedeniyle, çapak giderme ve kontrolü büyük bir problem oluşturmaktadır [95]. Kesme parametreleri, iş parçası malzeme özellikleri, takım geometrisi, kaplama, yağlama, mikro frezeleme işleminde çapak oluşumunu etkileyen faktörlerdir. Mikro kesimden kaynaklanan işlenmiş yüzey, mikro ürün performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mikro bileşenlerin yapı bütünlüğü, dinamik performansları ve elektrostatik özellikleri, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey bütünlüğü açısından elde edilen mikro işlenmiş yüzey parametrelerine güçlü bir şekilde bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle mikro-işlenmiş yüzeylerin karakterizasyonu ve işleme parametrelerinin optimizasyonu araştırılmaktadır. Mikro kesimde boyut etkilerinin spesifik kesme kuvveti ve enerjisine benzer şekilde kesme yüzeyi oluşumunda güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Normalde daha küçük kesilmemiş talaş kalınlığı daha küçük yüzey pürüzlülük değeri ile sonuçlanır, ancak birçok araştırmacı bazı mikro kesme araştırmalarında kesilmemiş talaş kalınlığı belirli bir değere düşürüldüğünde yüzey pürüzlülüğünün artmaya başladığını gözlemlemiştir. Frezelemede 3 tip işleme çapağı incelenmiştir: Şekil 3.5'de gösterdiği gibi Poisson çapak, yuvarlama çapak, koparma çapak. Poisson çapak, malzemenin kalıcı plastik olana kadar sıkıştırıldığında kenarlara doğru çıkıntı yapma eğiliminin bir sonucu olarak deformasyon oluşturur. Yuvarlama çapağı nispeten büyük bir çapak ile sonuçlanan, kesilmek yerine bükülen bir talaştır. Bu çapak türü genellikle kesme işleminin son aşamasında olduğu için çıkış çapağı olarak da bilinir. Koparma çapağı, malzemenin kesme yoluyla temizlenmesinden ziyade iş parçasından koparak ayrılmasının bir sonucudur.



Şekil 3.5: Poisson, koparma ve yuvarlama çapağın oluşum şekli [98].

Çapakların ikinci tanımı, çapak konumlarına, çapak şekillerine ve çapak oluşum mekanizmalarına göre Hashimura ve diğ. (1999) tarafından sınıflandırılmıştır [99]. Takımın küçük kenarı tarafından işlenen yüzeye tutturulan çapak, çıkış çapağı olarak adlandırılır. Bir yan çapak, ana kenar tarafından işlenen geçiş yüzeyine eklenen bir çapak olarak tanımlanır. Üst çapak, iş parçasının üst yüzeyine eklenen bir çapak olarak tanımlanır. Çapak tipleri Şekil 3.6'de gösterilmektedir.

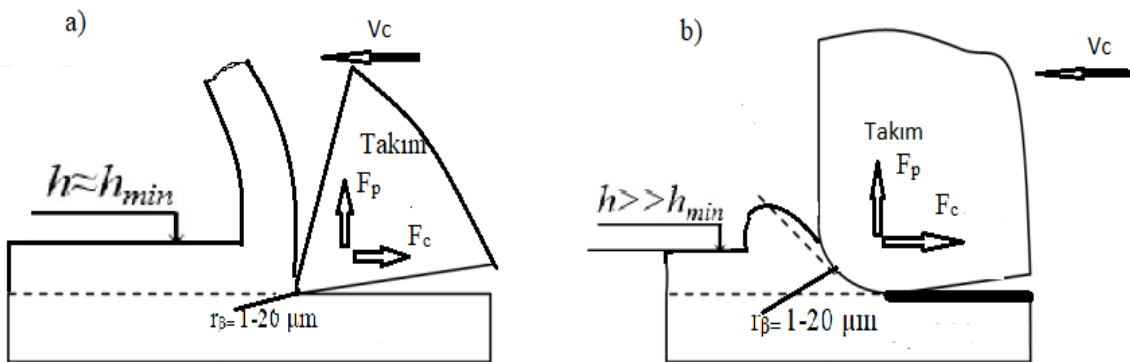


Şekil 3.6: Frezeleme çapak çeşitleri [100].

3.2.6 Mikro frezelemede kesme kuvvetleri

Mikro frezeleme süreçlerini araştıran araştırmacıların çoğu, işlenmiş ürünlerin kalitesini izlemek veya iyileştirmek için kesme kuvveti kullanmıştır. Aşırı kesme kuvveti, takımın ve iş parçasının sapması nedeniyle kesme doğruluğunu ve derinliğini sınırlar, yığılma kenarı (BUE) ortaya çıkararak bükülme gerilimlerine neden olur. Bu nedenle, mikro frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetini azaltmak, malzeme kaldırma verimliliğini önemli ölçüde artırır, takım sapmasını, aşınmasını azaltır, arızasını geciktirir ve iş parçasına tolerans sağlar. Konvansiyonel işlemede olduğu gibi, mikro işleme kesme kuvveti temel olarak normal ve teğet bileşenlerden oluşur, bunlar genellikle kesme, sürme ve itme kuvveti olarak adlandırılır. Kesme kuvveti açısından makro ve mikro ölçekli işleme arasındaki temel farklar Şekil 3.7'de görülebilir.

Mikro frezelemedeki boyut azalması nedeniyle, kesme kuvvetlerinin büyüklüğü, makro frezeleme durumundakinden önemli ölçüde daha küçüktür. Tipik olarak, kuvvet genlikleri birkaç onda bir ile birkaç onluk Newton arasındadır. Bununla birlikte, kesme kuvvetin (F_c) ve pasif kuvvetin (F_p) oranı önemli ölçüde farklılık gösterir [91]. Mikro frezelemede, pasif kuvvet, sürme talaş kaldırma işlemi üzerinde daha önemli bir etkiye sahiptir. Talaş oluşumu, talaş kaldırma mekanizması, titreşim ve takım durumu gibi birçok alanda bilgi sağladıkları için kesme kuvvetlerini bilmek ve izlemek önemlidir. Tüm bunlar, sürecin öngörülebilirliğini geliştirmeye, takım aşınmasının hızını azaltmaya ve sürecin güvenilirliğini artırmaya katkıda bulunur. Mikro frezelemede kesme kenarı yarıçapı talaş kaldırmada önemli bir rol oynar. Çünkü minimum talaş kalınlığı ve talaş kaldırma mekanizmalarını etkiler. Takım aşınmasına bağlı olarak takımın r_β değeri ve diğer özellikleri sürekli değiştiğinden, aşınmanın kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi birçok araştırmanın konusudur.

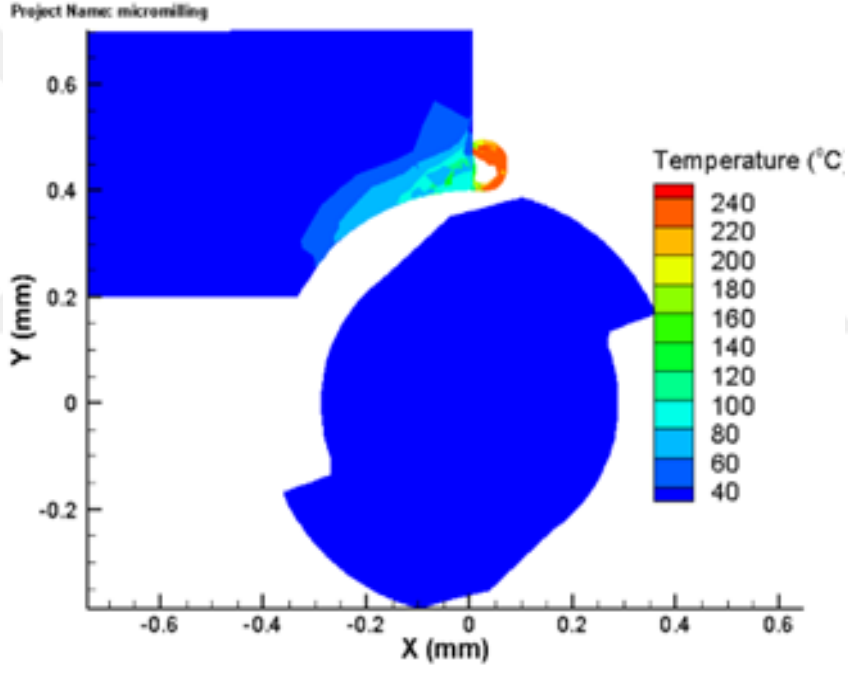
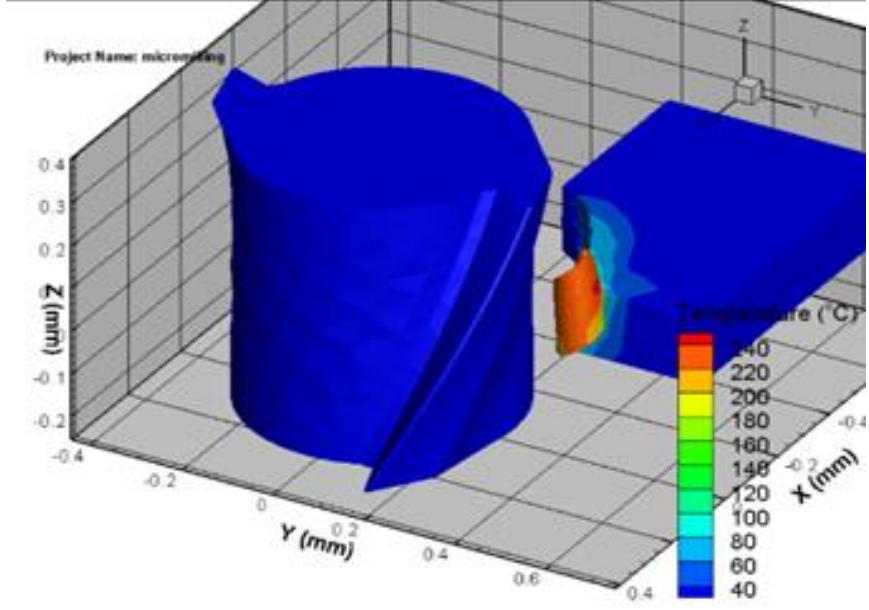


Şekil 3.7: a) Makro frezeleme b) Mikro frezelemede kesme kuvvetleri [91].

3.2.7 Mikro frezelemede kesme sıcaklıkları

Kesme sıcaklığı, takım aşınmasını, çapak oluşumunu, talaş kaldırma mekanizmalarını ve yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilediği için tüm metal kesme işlemlerinde önemli bir rol oynar. Hem işlenmiş bileşenin doğruluğu hem de takım ömrü açısından önemine rağmen, mikro frezeleme sıcaklığı kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. Bununla ilgili zorluklar, kesmede sıcaklık değerlendirmesi için mevcut yöntemlerin sınırlamaları ile ilgilidir: küçük hedef alan (kızılötesi kameralar) ve yeterli verinin toplanmasına izin veren toplama hızlarında çalışan ekipman kullanılması önerilir. Termokupllar müdahalecidir ve mikro kesimde sıcaklığı ölçmek için kullanılmamalıdır. Konvansiyonel frezeleme ile karşılaştırıldığında, kullanılan küçük kesilmemiş talaş kalınlık değerleri nedeniyle, mikro frezelemede oldukça düşük sıcaklık değerleri beklenir, bununla birlikte işleme sırasında termal genleşme, malzemede yüzey hatalarına neden olabilir.

Kesme sıvısının sıcaklığı ile takım tezgâhı çerçevesinin sıcaklığı arasındaki fark, takım ve iş parçası arasındaki bağıl konumu (kesme derinliği) olumsuz etkileyebilir. Sonlu elemanlar yöntemiyle mikro frezeleme sırasında takım ve iş parçasında oluşan sıcaklık dağılımı Şekil3.8'de verilmiştir.



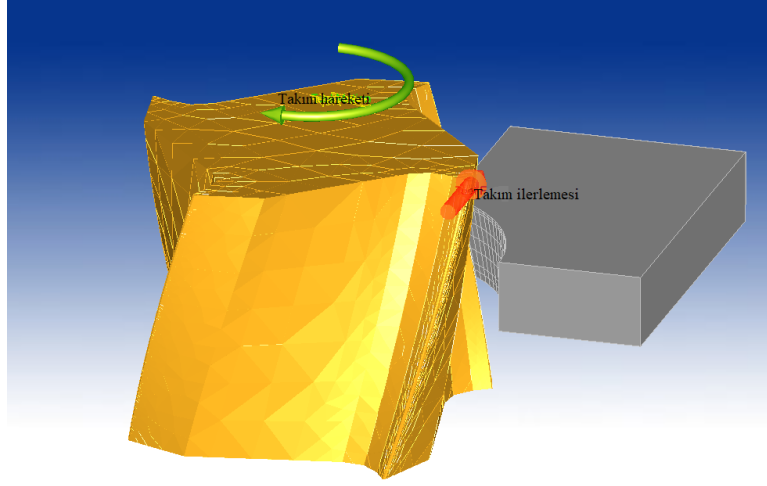
Şekil 3.8: Sonlu elemanlar yöntemi modellenen mikro frezelemenin sıcaklık dağılımı.

3.3. Mikro İmalatta Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modelleme ve Analizi

Sonlu elemanlar (SE) yöntemi bugün şüphesiz hesaplama bilimindeki en önemli sayısal araçlardan biridir. Bu, 1960'lardan beri matematikçiler tarafından özellikle hata tahmini ile ilgili olarak üretilen sonlu elemanlar teorisine ilişkin sonuçlar içerir. Son yarım yüzyılda bilgisayar gücündeki önlenemez artış ve buna bağlı olarak kullanıcıların beklentilerini artırmıştır. Bununla birlikte, SE teorisinin çok geniş bir uygulama alanı bulunduğu ve SE tekniklerinin uygulanması için ticari yazılımların büyük miktarda artışına sebep olmuştur. Mikro kesme mekanizması, mikro takımın önemli bir rol oynadığı nispeten karmaşık bir işlemdir. SE, bilgisayar donanımının ve ticari yazılımının geliştirilmesi ile birlikte mikro kesme simülasyonu için kullanışlı bir araç haline gelmektedir. Ayrıca, mevcut simülasyon modellerinin çoğu, ortogonal kesme hipotezine dayanan iki boyutludur (2D). Mikro kesmenin üç boyutlu analizi, 2B modellerle birlikte varsayımlardan kaçınarak sürecin daha gerçekçi simülasyonunu sunmaktadır. Bu nedenle SE simülasyonu, mekanik açıdan mikro kesmenin davranışını anlamak için anahtar bir teknoloji olarak düşünülmektedir.

3.3.1 Mikro frezelemede sonlu eleman modeli

SE modelleme yöntemi, malzemelerin sürekli yapılar olarak tanımlandığı ve kristal yapı, tane boyutu ve atomlar arası mesafeler gibi mikro bileşenlerin etkilerinin göz ardı edildiği, sürekli ortam mekaniği ilkesine dayanmaktadır. Bir SE modelinde, ağ yapısındaki düğüm noktalarındaki değişkenlerinin değeri tam olarak elde edilebilir, değişkenlerin değerleri enterpolasyon ile belirlenir. Bu nedenle, gerekli hesaplama doğruluğuna göre düğüm sayısı ve düğümler arasındaki mesafeler seçilir. SE simülasyonu kesme işlemine uygulanması, kesme işleminin mekaniğini ve özelliklerini anlamak için etkili bir yol sağlar. Tipik bir SE kesme modeli, iş parçasının sabitlendiği ve takımın hareket halinde olduğu Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 3.9: Sonlu elemanlar yöntemi ile mikro frezelemenin modellenmesi.

Kesme simülasyonu sırasında iş parçasının arayüzü ile takım arasındaki düğümlerin etkileşimi, iş parçasının diğer düğümlerine aktarılır. Düğümler arasındaki etkileşimler, üç tür SE formülasyonu ile tanımlanabilir: Yeniden ağ oluşturma algoritması gerektiren Lagrange formülasyonu, talaş oluşturmak için bir talaş ayırma kriteridir. Önceden bir talaş şekli varsayımına ihtiyaç duyan Euler formülasyonu ve Arbitrary Lagrange-Eulerian formülasyonudur. Kesme işlemi sırasında plastik deformasyonun ve malzeme gerinme hızının tanımlanması için genellikle iyi bilinen Johnson Cook formülasyonu kullanılmaktadır. SE yönteminin kesimde uygulanması, 1970'lerden bu yana birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Mikro kesme, geleneksel kesmeden önemli ölçüde farklı olabilse de örneğin plastisite ve takım/talaş tribolojisi gibi yönetim ilkeleri kalmalı, ancak büyük ölçüde boyut etkisine tabi olmalıdır. Bu aşağıdaki ilkelere göre SE yöntemi kullanılarak mikro kesme işleminin çeşitli yönleri araştırılabilir:

- Talaş kaldırma ve talaş oluşumu;
- Takım geometrisi ve proses parametrelerinin etkileri;
- Malzeme mikro yapısının etkileri;
- Mikro kesimde artık gerilim.

Ayrıca, genellikle takımın boyutuna göre yürütülen bazı araştırma alanları, son zamanlarda SE yöntemi ile araştırılmıştır, örneğin:

- İş parçası kristalografik oryantasyonunun prosesin kesme ve itme özgül enerjileri üzerindeki etkisi.
- Boyut etkisi ve minimum kesme kalınlığı.

- Takım ve iş parçasının sıcaklığı.

Mikro frezeleme, malzeme kaldırma için tipik bir karmaşık işlemdir. SE yöntemini kullanan mikro frezeleme modellemesi, çapak oluşumunu, kesme kuvvetini, kırılmayı ve termal dağılımı araştırmak için oluşturulmuştur.

3.3.2 Mikro frezelemede malzemenin yapısal modellemesi

İş malzemesinin plastik olarak deforme olmayan, akmaya başladığı akış gerilimi veya anlık akma mukavemeti çoğunlukla sıcaklık, gerilim, gerinim ve diğer faktörlerden etkilenir. Doğru ve güvenilir akış gerilimi modelleri, özellikle yüksek hızlı kesme koşulları altında iş malzemesinin yapısal davranışını temsil etmek için oldukça gerekli kabul edilir. Ne yazık ki, atomik seviyedeki malzeme davranışına dayanan sağlam teorik modeller, Jaspers ve Dautzenberg tarafından bildirildiği gibi gerçekleştirilmekten uzaktır. Bu nedenle, yarı deneysel kurucu modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Johnson ve Cook [101] tarafından önerilen kurucu model, bir malzemenin akış stresi denklem 1'de verilmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan Johnson-Cook (JC) kurucu malzeme modeli, daha önceki literatürlerde kullanılan güvenilir bir model (Denk.3.1) [102] olarak kabul edilmektedir. σ malzeme akış gerilimi, ϵ plastik şekil değiştirme, $\dot{\epsilon}$ şekil değiştirme hızı, $\dot{\epsilon}_0$ referans şekil değiştirme hızıdır. Malzeme sıcaklığı, T_m erime noktası ve T_a oda sıcaklığıdır.

JC sabitleri sırasıyla: A akma gerilimi, B ön üstel faktör, C gerilme oranı faktörü, n iş sertleştirme üssü ve m termal yumuşatma üssüdür. Genel olarak, modelin A, B, C, n ve m parametreleri, düşük gerilim ve gerinim oranlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen çeşitli malzeme testlerinin yanı sıra, ayırık Hopkinson basınç bar (SHPB) testleriyle elde edilen gerinim oranları 1000 s^{-1} 'e kadar ve 600 °C 'ye kadar sıcaklıklardaki verilere uyarlanır. JC modeli, metallerin gerinim-sertleşme davranışı için iyi bir uyum sağlar ve sayısal olarak güvenilirdir ve sonlu eleman simülasyon modellerinde kolaylıkla kullanılabilir.

$$\sigma = [A + B(\epsilon)^n][1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)][1 - \left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^m] \quad (3.1)$$

3D birleştirilmiş mikro talaşlı imalatta termo-mekanik analizde, geçici sıcaklığın küresel dağılımı şu şekilde verilir:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} + \frac{\partial T}{\partial z^2}\right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

Burada Q, özgül hacimsel ısı akısı oranıdır ve t'de zamandır.

Isı akısı q_p , dönüşümünden kaynaklanır. Plastik iş ve kesme deformasyonu ve şu şekilde tanımlanır:

$$q_p = \frac{MfpWp}{\rho} \quad (3.3)$$

Burada M mekanik eşdeğer ısıdır, fp ısıya dönüştürülen plastik işin yüzdesidir (yaklaşık 0.9) ve Wp plastik iştir.

Çevreye yayılan ısı akısı q_c mikro takımdan veya iş parçasından konveksiyon yoluyla yüzeyler, şu şekilde tanımlanır:

$$q_c = h_c (T_t - T_{oda}) \quad (3.4)$$

3.3.3 Mikro Frezelemede Sürtünmenin Modellenmesi

Sürtünme modellemesi mikro ölçekli kesmede, talaş ara yüzündeki sürtünme modellemesindeki ikincil deformasyon bölgesi ve takımın talaş yüzeyi ile ilgili olarak makro ölçekli kesme ile aynı varsayımları kullanılır. Birçok araştırmacı Coulomb yasasını kullanır (yani, sürtünme kayma kuvveti, uygulanan normal yük ile orantılıdır ve bu ikisinin oranı, talaş ile takım arasındaki tüm temas uzunluğunda sabit olan sürtünme katsayısı μ 'dir). Sürtünme gerilmeleri τ ve normal gerilmeler arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (3.5)$$

Ancak normal gerilmeler artıp kritik bir değeri aştığından, bu denklem doğru tahminler vermemektedir. Deneysel analiz, kuru işlemede iki temas bölgesinin, yani yapışma ve kayma bölgelerinin ayırt edilebileceğini doğrular. Zorev'in (1963) yapışma-kayma sıcaklığından bağımsız sürtünme modeli yaygın olarak kullanılan modeldir [103]. Bu modelde, yapışmadan kayma bölgelerine geçişi ifade eden takım ucundan 'c' mesafeli bir geçiş bölgesi bulunmaktadır. Takım kesme kenarının yakınında ve 'c'ye kadar (yani, yapışma bölgesi), kesme gerilimi, iş parçası kesme mukavemetine eşittir; k, kayma bölgesi ise Coulomb yasasına göre sürtünme gerilimi artar.

$$\tau = \begin{cases} k, & \leq l \leq lc \\ \mu \sigma, & l > lc \end{cases} \quad (3.6)$$

Zorev'in modeline dayalı işlemede, talaş yüzeyinde ortalama bir sürtünme katsayısının veya kayma ve yapışma bölgeleri için farklı katsayıların tanımlanmasını içeren başka yaklaşımlar bildirilmiştir.

3.3.4 Sonlu Elemanlar ile mikro frezelemede takım aşınmasının modellenmesi

Mikro frezeleme işleminin, iş parçasının ve takımın simülasyonları herhangi bir dış kuvvete maruz kalmaz. Usui ve diğerleri (1978) tarafından önerilen mekanik temas basıncı, kayma hızı ve sıcaklığa duyarlı kayma aşınma mekanizmasına dayalı bir aşınma oranı modeli birçok çalışmada kullanılmaktadır [104]. Bu takım aşınma oranı modeli, birim zaman başına birim alan başına takımdaki hacim kaybı oranını hesaplar. Aşınma denklemi sabitleri $a = 1 \times 10^{-5}$ $b=1000$ olarak ayarlanır. Takım yüzeyinde girdiler olarak arayüz sıcaklığı (T), P arayüz basıncı ve kayma hızı (v_s) ve Denklem 6'de gösterildiği gibi takımda bir aşınma oranı (dW/DT) dağılımı verir (6).

$$dW/dt = aPv_s e^{-b/T} \quad (7)$$

Ayrıca takım kaplaması, eşdeğer ısı iletkenliği, kaplanmış takımın ısı kapasitesini ve takım-talaş temasındaki sürtünme katsayısını etkiler.

4. MATERYAL VE METOT

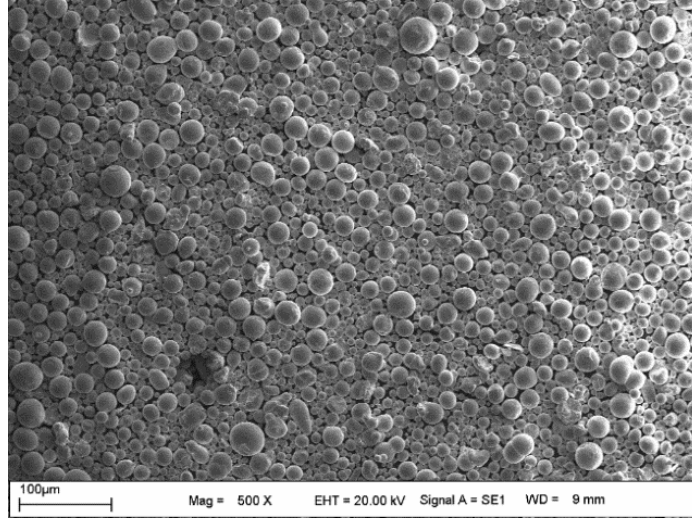
4.1. CoCrW Tozu Malzeme Özellikleri ve EDX Analizi

CoCrW alaşımları diş hekimliğinde metal seramik kaplama ve kombine restorasyonlarda kuronlar, köprüler ve çerçeveler için kullanılır. CoCrW alaşımları korozyona karşı iyi direnç gösterdiklerinden CoCrW alaşımları diş protezlerinde kullanılmıştır. Bir yandan bu alaşımlardaki krom içeriğinin korozyona direnci açısından belirleyici olduğundan, diğer yandan da seramiklerin iyi bir şekilde yapışması için alaşım yüzeyinde belirli oksitlerin bulunması çok faydalıdır. CoCr alaşımları genelde Molibden (Mo) veya Tungsten (W) ile karakterize edilir ve mukavemette bir artış sağlar. Molibden yerine Tungsten kullanımı daha iyi bir seramik-metal yapışması hedeflenerek geliştirilmiştir [105]. CoCrMo üçlü alaşımlar, özellikle mikroyapı çalışmaları gibi çok az ilgi gören CoCrW üçlü alaşımlara kıyasla daha fazla çalışılmıştır [105]. Döküm malzemelerinin tamamen erimesini ve aşırı ısınmasını kullanan döküm, prefabrik bir metal bloğun öğütülmesi ve ince bir metalik tozun SLE ile üretim sürecindeki büyük farklılıklar göz önüne alındığında, mikroyapısal özelliklerde büyük farklılıklar beklenmektedir. SLE ile üretilen CoCrW alaşımlarının malzeme özelliklerini ve mikro frezelemede karşılaşılabilecek zorlukları anlamak için önemlidir. Deneylerde kullanılan CoCrW alaşım tozunun mekanik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: CoCrW Tozunun mekanik özellikleri [105].

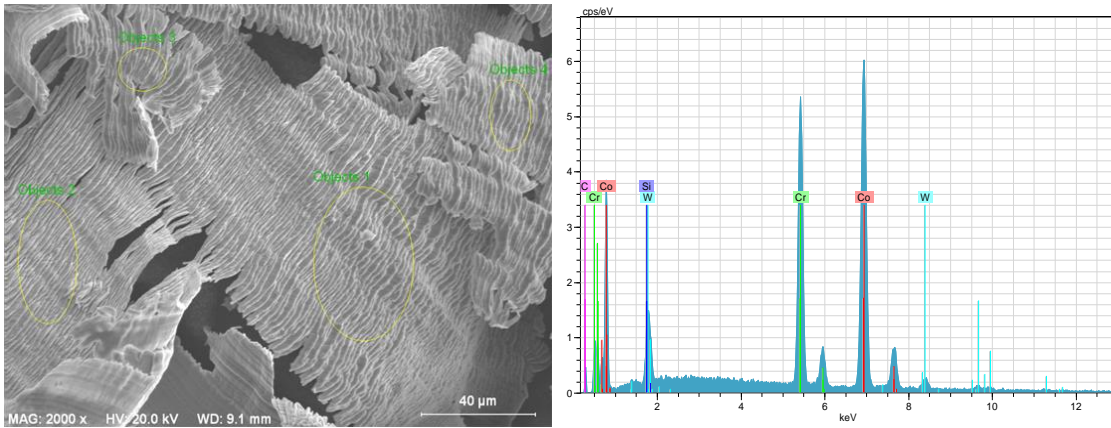
Mekanik özellikleri	Değerleri
Akma dayanımı MPa (Rp 0.2)	760
Kopma dayanımı MPa	1090
Uzama %	15
Elastic modülü GPa	225
Vickers Sertlik HV 10	425
Yoğunluğu g/cm ³	8.5
Erime Aralığı °C	1310-1410
CTE (20-500°C) ⁻⁶ K ⁻¹	14.5 x 10
CTE (20-600°C) K ⁻¹	14.7 x 10 ⁻⁶
Laser kaynağı	Yapılabilir
Type (DIN EN ISO 22674)	5

Deney numunelerinin üretiminde kullanılan CoCrW alaşımının tozunun SEM görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: CoCrW alaşım tozunun SEM görüntüsü.

EDX analiz yöntemi Leo Evo-40xVP sistemi ile birlikte çalışan Rontech Xflash Dedektör ile yapıldı. EDX analizi Eİ ile üretilmiş malzemede bulunan atomik ağırlık oranlarını belirlemede kullanılmıştır. Numune yüzeyine gönderilen elektronların oluşturduğu X-ışınlarının numune ile etkileşmesi sonucu, farklı atomlara göre farklı dalga boylarında ve açılarında X-ışınları saçılır. Daha sonra saçılan X-ışınları dedektör yardımıyla tespit edilir ve bilgisayar yazılımı ile numunelerin % atomik oranları elde edilir. MLAB CUSING cihazı ile SLE yöntemi ile üretilmiş malzemeden 4 noktadan alınan EDX analizi ve spektrumu şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: EDX nokta analizi ve spektrumu.

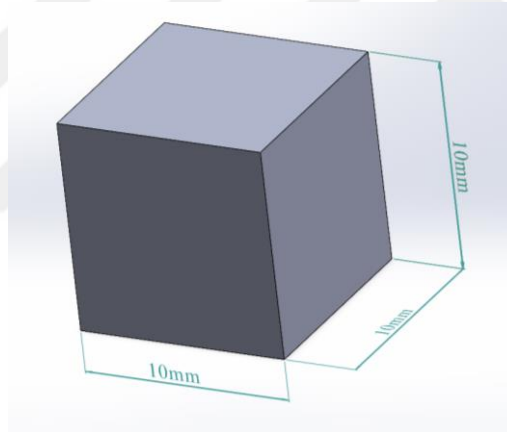
Çizelge 4.2’de SLE yöntemi ile üretilen malzemenin kimyasal içeriğinin ağırlık yüzdesi Edx analizinden elde edilen verilere göre verilmiştir.

Çizelge 4.2: SLE yöntemi ile üretilen malzemenin kimyasal içeriği.

Element	Kompozisyon (% ağırlık)
Co	58.50
Cr	31.50
W	6.65
Si	1.25
C	2.20

4.2. SLE Yöntemi ile Numunelerin Üretilmesi

Bu çalışma kapsamında kullanılan malzeme SLE yöntemiyle üretilen CoCr alaşımıdır. SLE yöntemiyle üretilmek üzere bilgisayarlı ortamda CAD formatında tasarlanan numune ve boyutsal özellikleri Şekil 4.3’ de sunulmuştur.



Şekil 4.3: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr malzemesinin ölçüleri.

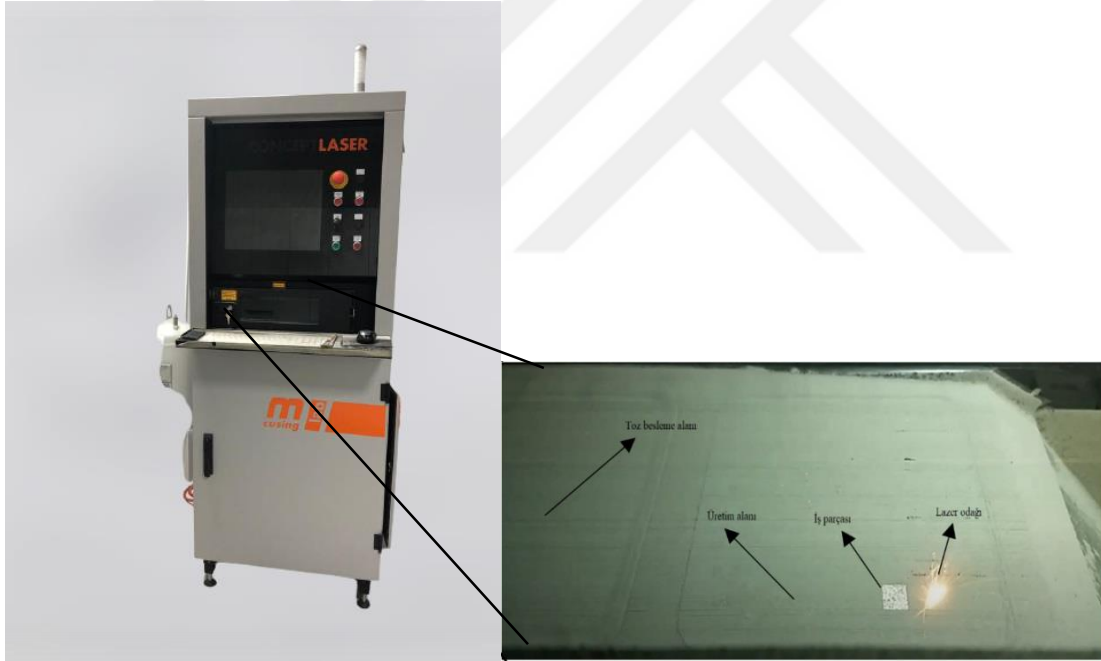
SLE ile üretilcek parça bilgisayar destekli tasarım (CAD) ile tasarlanmakta ve bu tasarımın ürün haline dönüştürülebilmesi için CAD tasarımlarının Stereolithography (STL)’ ye dönüştürüldü. STL ile oluşturulan parçanın üzerine destek yapıları oluşturuldu. Desteklerle birlikte STL formatında üretim yapılacak MLAB CUSING cihazına aktarıldı. Cihazda işlem parametreleri belirlenerek ve üretim yapıldı. Metal toz yatağı füzyonu ile üretimlerde bilgisayar programları ile üretilcek malzemeler için destek elemanları oluşturulur ve üretimden sonra oluşturulan destek elemanları temizlenmektedir.

Toz yatağı SLE cihaz parametreleri (lazer gücü, tarama hızı, lazer gücü, katman kalınlığı gibi) Çizelge 4.3’deki gibi seçildi.

Çizelge 4.3: Üretim parametreleri

Üretim Parametreleri	Değerler
Lazer gücü W	80
Tarama hızı (m/s)	2
Lazer çapı (μm)	50
Toz boyutu (μm)	15-50
Katman kalınlığı (μm)	20
Atıl gaz	Argon

Numuneler 90mm x 90 mmx80 mm üretim hacmine ve Yb-fiber lazer; 100 W lazer tipine sahip MLAB CUSING cihazı ile üretilmiştir. Şekil 4.4'te üretim için kullanılan MLAB CUSING cihazı sunulmuştur.

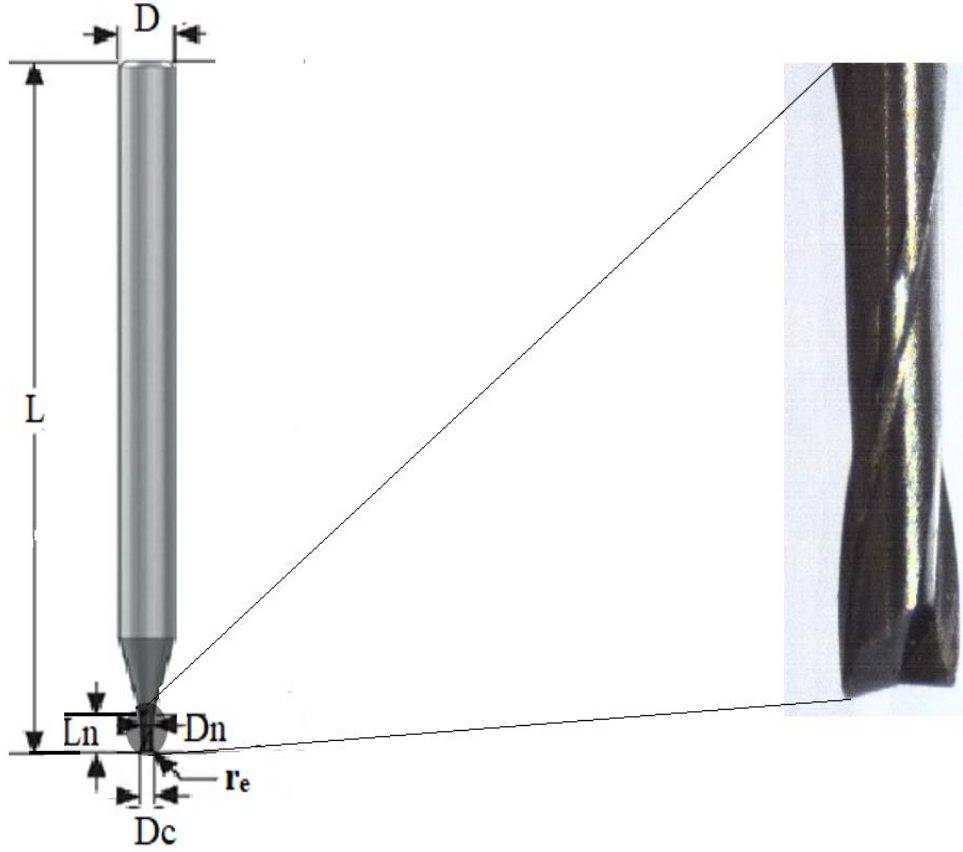


Şekil 4.4: MLAB CUSING SLE cihazı.

4.3 Mikro Frezeleme İşlemi

4.3.1 Mikro kesici takım ve özellikleri

Deneyde kullanılan mikro freze takımları 0.8mm çapa sahip SECO firmasından tedarik edilen kesici takımlar, %90 WC ve %10 Co bileşimine sahip TiAlN kaplamalı takımın teknik resmi ve mikroskobik görüntüsü Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5: TiAlN kaplamalı kaplamalı tungsten karbür takımın teknik resmi ve mikroskobik görüntüsü.

Çizelge 4.4: Mikro parmak frezenin geometrik özellikleri

Geometrik Parametreleri	Değerleri
Şaft Çapı (D)	4
Takım çapı (Dc)	0.8
Boy (L)	45
Helis boyu (Ln)	1,6
Ağız sayısı	2
Kesici kenar radyüsü (μm)	5
Helis açısı	30^0
Eksenel talaş açısı	0^0
Eksenel boşluk açısı	12^0

Kullanılan takımlar, oldukça ince bir kesite sahip olmasından ve literatürdeki mikro frezeleme deneylerinde kullanımından dolayı Çizelge 4.5 teki özelliklere sahip TiAlN kapmalı takımlar seçilmiştir.

Çizelge 4.5: TiAlN kaplamalı WC (tungsten karbür) takımın mikro işleme sırasında öne çıkan mekanik özellikleri.

Sertlik (Vickers)	Oksidasyon sıcaklığı (^0C)	Sürtünme katsayısı	Kaplama kalınlığı (μm)	Yüzey pürüzlüğü Ra (μm)
2800	800	0.70	2	0.4

4.3.2. Mikro Frezeleme Deneyinin Yapılması

Mikro frezeleme geleneksel frezelemeye göre oldukça ince bir kesite sahip olduğundan frezeleme yapılırken oluşabilecek titreşimler takımda aşınma ve kırılmalar neden olabilmektedir. Bu sebepten dolayı mikro frezeleme sırasında daha verimli işleme yapabilmek için SECO firmasından tedarik ettiğimiz hassas işlemeye uygun takım tutucunun mikro parmak freze takımı ile bağlantısı Şekil 4’de görüldü gibi yapıldı.



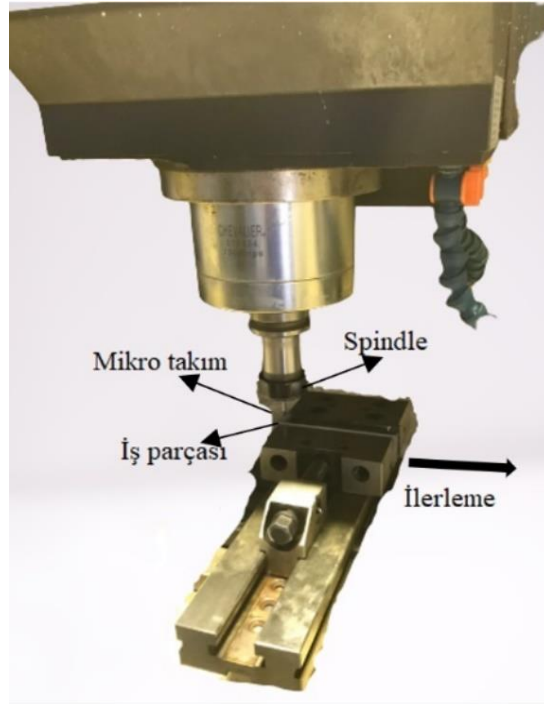
Şekil 4.6: a) Hassas tutucu pens ve parmak freze takımı b) montaj

SLE ile üretilen numuneler 10000 devire ulaşabilen 3 eksenli x, y, z boyutları sırasıyla 1020 mm, 530 mm, 510 mm olan CHEVALIER QP 2040-L marka CNC tezgâhta mikro frezeleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.5: Mikro frezelemede işleminin uygulandığı CHEVALIER QP 2040-L marka 3 eksenli CNC freze tezgâhı.

İş parçası SLE yöntemi ile 18 adet 10x10x10 mm boyutlarında küp şeklinde üretilmiştir. 0.8 mm çaplı mikro freze takımları ile her bir numunenin ortasından mikro kanallar açılmıştır.



Şekil 4.7: Mikro frezeleme deneyi.

Yapılan deneylerde, CHEVALIER QP 2040-L Frezeleme tezgâhında 3 farklı ilerleme, 3 farklı devir ve 2 farklı kesme derinliği değerlerinde 0,8 mm çapta kaplamalı mikro düz parmak freze takımı kullanılarak SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımları üzerine kanal açma işlemleri yapılmıştır. Farklı işleme parametrelerin çapak oluşumlarına ve yüzey pürüzsüzlüğüne etkisi gözlemlenmiştir. Çizelge 4.7’de mikro frezeleme deneyinde kullandığımız deney parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.6: Mikro frezeleme deney parametreleri.

Devir sayısı (d/d)	Kesme derinliği (μm)	Diş başına ilerleme (μm)
8000	300	2,5
9000	500	5
10000		10

Deney 3 farklı ilerleme hızında 3 farklı devir sayısında 2 farklı paso miktarında toplam 18 adet mikro frezeleme işlemi yapılmıştır. Minimum talaş kalınlığının mikro frezeleme işleminde çok önemli bir etkiye sahip olduğundan dolayı mikro freze takımının kesici radyüsünü dikkate alarak talaş kaldırma etkisini gözlemleyebilmek için 3 farklı ilerleme seçildi. Deney kurulumu Şekil 4.7’de gösterildiği gibi 18 ayrı parçaya aynı özelliklerdeki takımlarla kanallar açılmıştır. Bu çalışmada kullanılan mikro parmak freze takımının kesici kenar radyüsü 5 μm ’dur.

4.3.3 Mikro frezelemede çapak, talaş, takım görüntüleme ve ölçümleme

SLE yöntemi ve döküm yöntemi ile üretilen numuneler mikro frezeleme yapıldıktan sonra mikro freze takımları, işlenen numunelerdeki mikro kanallar ve oluşan talaşlar şekil 4.8’deki Leo Evo-40xVP model taramalı mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 4.8: Leo Evo-40xVP model taramalı elektron mikroskobu.

Aynı zamanda mikro kanallardaki çapak oluşum görüntülerini almak ölçülendirmeler yapmak için Şekil 4.9'daki EUROMEX DC.5000-WiFi marka dijital optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 4.9: EUROMEX DC.5000-WiFi marka optik mikroskop.

4.3.4. Mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Pürüzlülük, yüzeydeki yükseklik farklılıklarından oluşan düzensizliğe denir. Kesici takım sapmaları, yüzeydeki bir takım hareketinden kaynaklanır. Pürüzlülük cihazları yükseklik farklarını ölçerek pürüzlülük değeri verir. Şekil 4.15’de gösterilen TIME TR-200 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla a mikro frezeleme ile açılan kanallardan 4 farklı Ra değeri alınarak Ra değerlerinin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 4.10: TIME TR-200 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

4.3.5 Mikro frezelemede kesme sıcaklıklarının ölçümleri

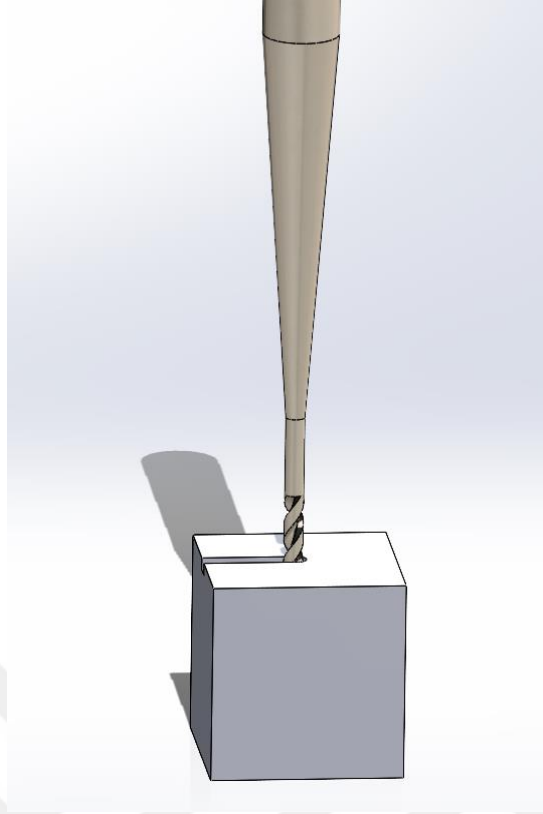
Termal kamera, kızılötesi enerjiyi binlerce detektör pikseli içeren bir detektör çipine (sensörler) odaklayan bir optik sistemdir. Sensördeki her bir piksel yüzeye odaklanarak kızılötesi enerjiye tepki verip elektronik sinyal üretmektedir. Şekil 4.11’de gösterilen Testo 875-1 marka termal mikro frezeleme sırasında sıcaklıklar ölçülmüş sonlu elemanlar yöntemi ile bu sıcaklıklar karşılaştırılmıştır.



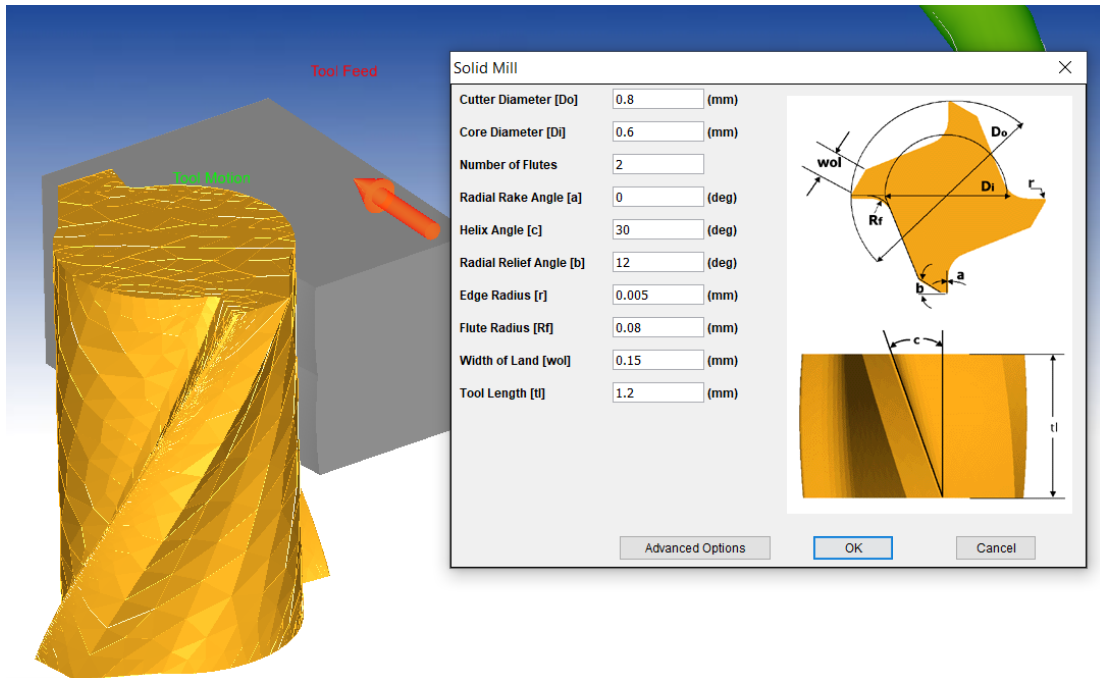
Şekil 4.11: TESTO 875-1 Kesme Sıcaklıklarını ölçen termal kamera.

4.4. SLE ile Üretilen Malzemenin Mikro Frezelemede Sonlu Elemanlar Modellemesi

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı ile 10mm en 10mm boy 10mm derinlikte modellenen parça CoCrW alaşımı seçildi. CoCrW Malzemesinin özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Mikro freze takımı deneyde kullandığımız takım ölçülerinde olup WC (tungsten karbür) TiAlN kaplamalı malzemedan seçildi. Şekil 4.12’de CAD programı ile çizilen mikro frezeleme modeli gösterilmiştir. Şekil 4.13’de deneyde kullanılan takımın teknik ölçülerine göre tasarlanan takım ölçüleri gösterilmiştir.

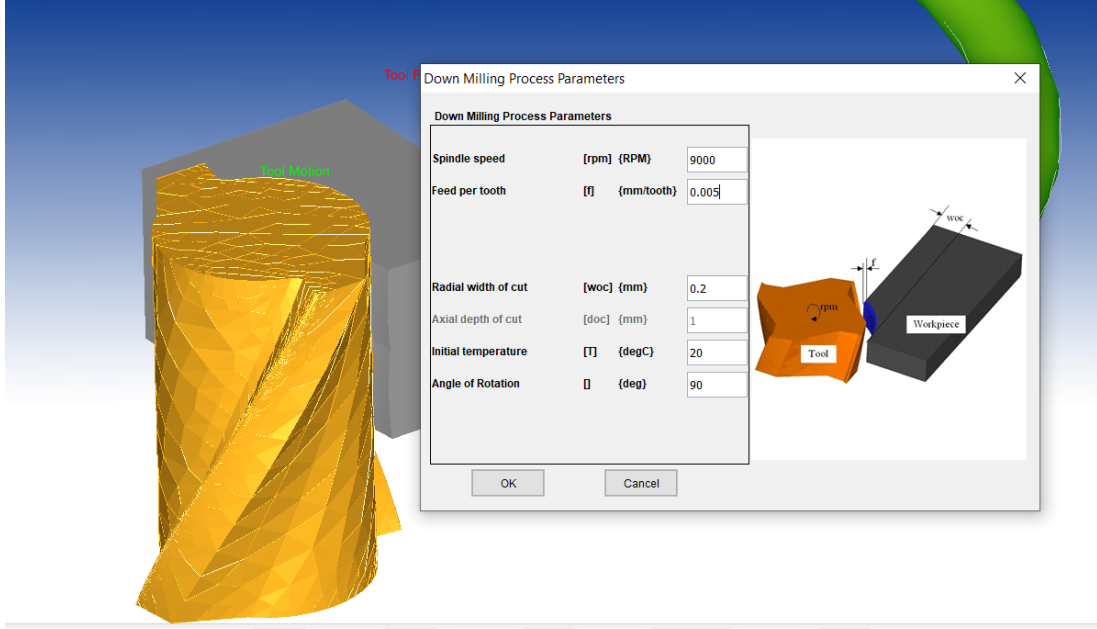


Şekil 4.12: Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı ile çizilen mikro frezeleme modeli.



Şekil 4.13: Deneyde kullanılan takımın teknik ölçülerine göre tasarlanan takım.

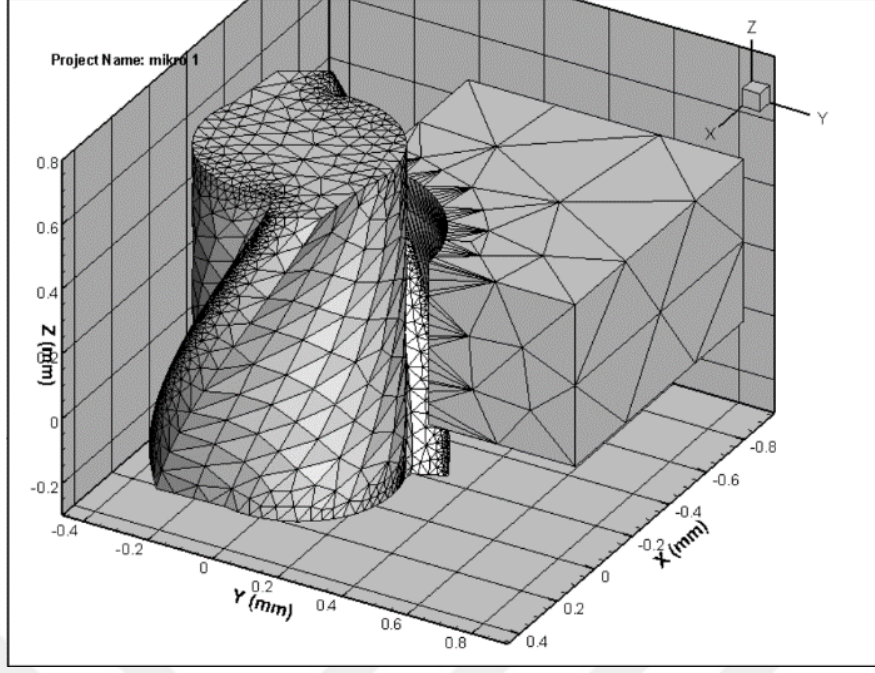
Analiz parametreleri yapılan deneye göre Şekil 4.14'deki gibi seçilmiştir. Analiz kuru ortamda yapılmış, sürtünme katsayısı TiAlN kaplamalı tungsten karbür takım için Çizelge 4.5'de verilen 0.7 katsayısı seçilmiştir.



Şekil 4.14: Analiz programında kullanılacak deney parametreleri.

Bu çalışmada sonlu eleman yazılımı ile talaş oluşumunun hesaplamasını yapabilmek için Lagrangian yaklaşımı kullanılarak mesh atılmıştır.

Lagrangian yaklaşımının tipik eleman bozulmalarını azaltmak ve yakınsama için açık integrasyon çözümünü kullanan Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) yaklaşımı uygulanmıştır. Mesh modeli Şekil 4.15'deki gibi oluşturulmuştur.

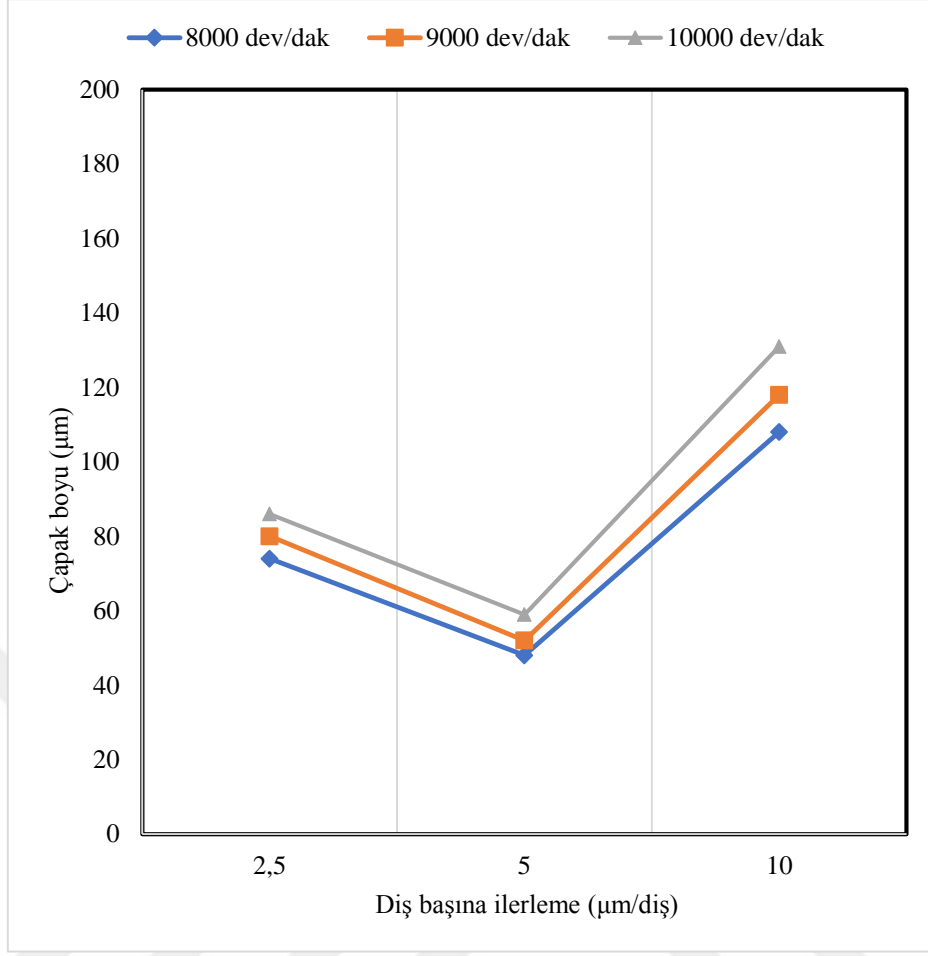


Şekil 4.15: Analiz programı için malzeme ve takıma uygulanan mesh modeli.

5. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Mikro Frezleme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkisi

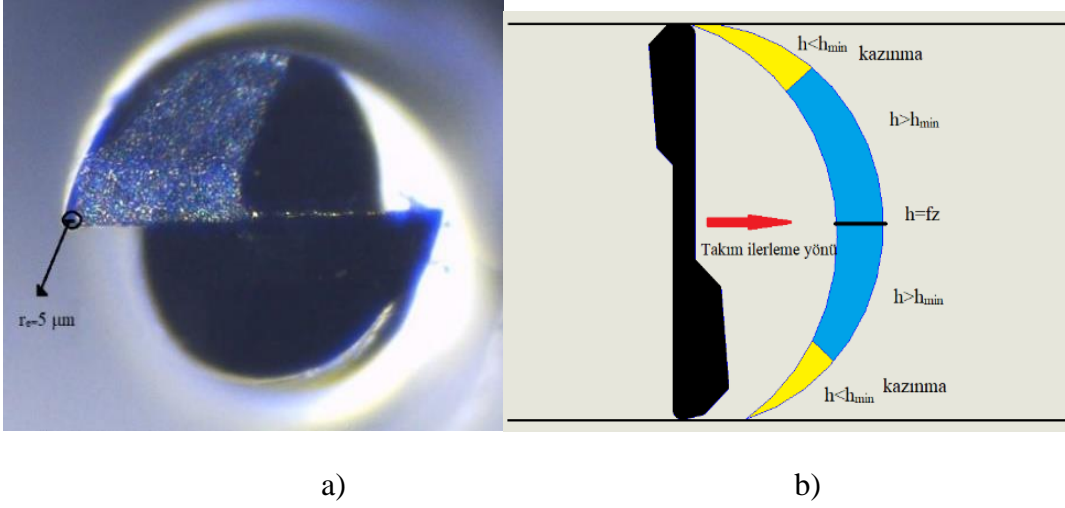
SLE yöntemi ile üretilen CoCr alaşımının farklı ilerleme, devir ve kesme derinliklerinde mikro frezeleme işlemlerinde çapak oluşumlarına etkileri incelenmiştir. Çapak yüksekliklerinin ölçüleri sonucunda oluşturulan Şekil 4.16'daki grafikte ilerleme hızını $2.5 \mu\text{m}/\text{diş}$ 'den $5 \mu\text{m}/\text{diş}$ 'e çıkarıldığında çapak yüksekliği azalırken bu değerden sonra çapak yüksekliği arttığı görülmektedir.



Şekil 4.16: SLE ile üretilen CoCr alaşımını mikro frezelenmesinde 0.3 mm kesme derinliğinde üst çapak boyu ölçüleri.

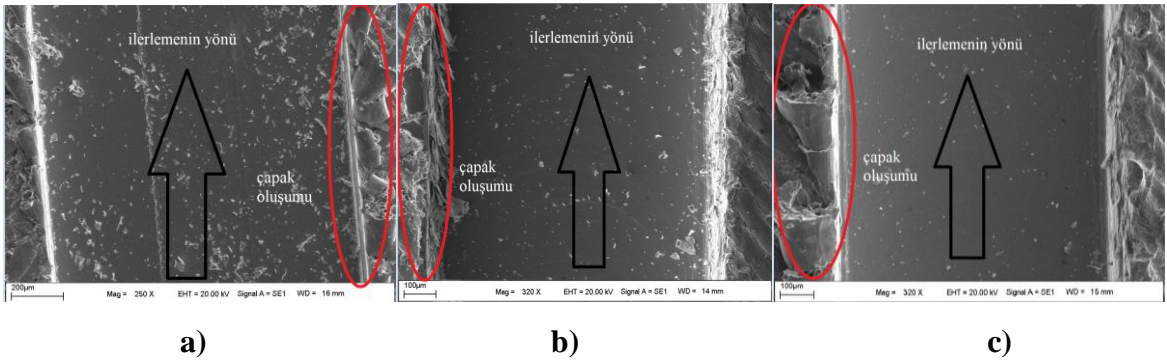
5µm/diş ilerlemeden küçük ilerleme değerlerinde çapak oluşumun fazla olmasının nedeni; mikro frezelemede kesilmemiş talaş kalınlığının (h) mikro freze takımının kenar radiusundan daha küçük olduğu durumlarda kenar radiusu negatif talaş açısına benzer bir davranış sergilemekte ve daha yüksek çapak oluşumuna neden olduğu görülmektedir.

Şekil 4.17’de mikro frezelemede kesici kenar radiusu (r_e), diş başına ilerleme (f_z) ve kesilmemiş talaş miktarı (h) birimlerinin birbiri arasındaki ilişkiyi göstermek için çizilmiştir.



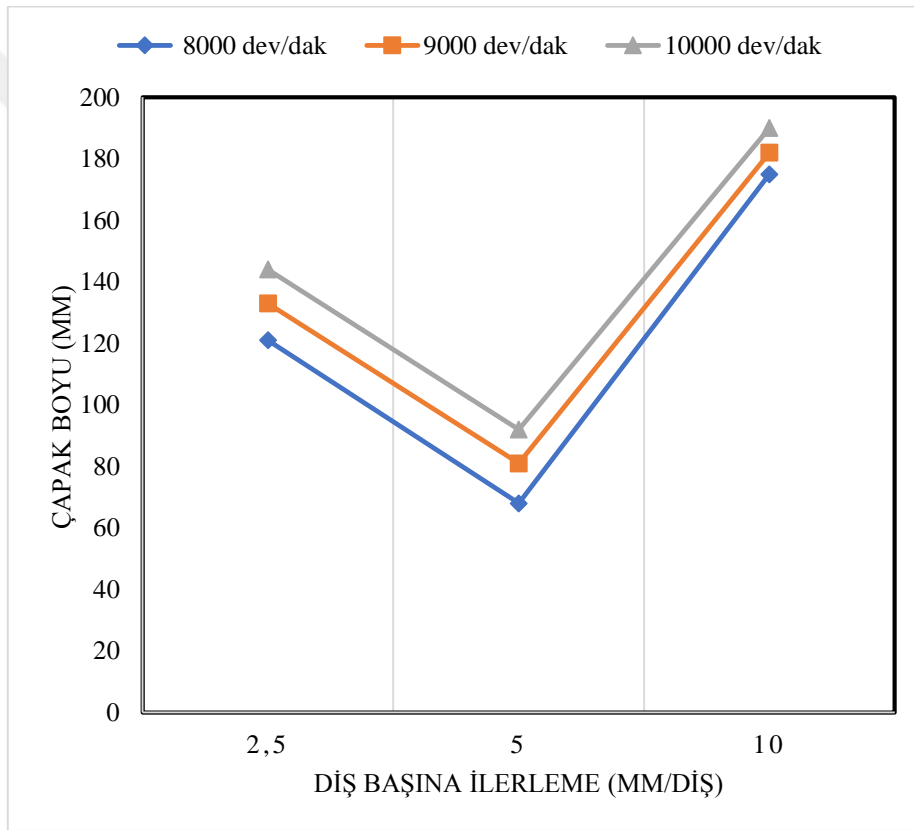
Şekil 4.17: a) Deneyde kullanılan mikro freze takımı kesici kenar yarıçapı b) Mikro frezelemede kesme derinliği, diş başına ilerleme (f_z), ve kesilmemiş talaş miktarı (h).

Kesilmemiş talaş kalınlığının (h) kesici kenar yarıçapından küçük olduğu durumda takım parçayı tam kesmek yerine bir kısmını kazıyarak uzaklaştırmaya çalışmaktadır. Bunun sonucunda takımın iş parçasının kesmesi sırasında talaşın tahliyesi tam olarak sağlanamadığından zıt yönlü frezeleme tarafında daha yüksek çapak oluşumu Şekil 4,18 (a)'deki SEM görüntüsündeki gibi meydana gelebilmektedir. 5 μm /diş ilerlemeden sonraki hızlarda, kesilmemiş talaş kalınlığının (h), takım kesme kenarı yarıçapından (r_c) daha büyük olması sonucu, mikro frezeleme sırasında kesme işlemi baskın hale gelmektedir. Buda geleneksel frezelemeye benzer bir şekilde ilerleme hızı ile doğru orantılı olarak aynı yönlü frezeleme tarafında Şekil 4.18 (b ve c)'deki gibi talaş biriktirerek çapak yüksekliğini artırmaktadır.



Şekil 4.18: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 8000 dev/dak ve 0.3 mm kesme derinliğinde frezelemede çapak SEM görüntüleri a) $f_z=2,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ b) $f_z=5 \mu\text{m}/\text{diş}$ c) $f_z=10 \mu\text{m}/\text{diş}$.

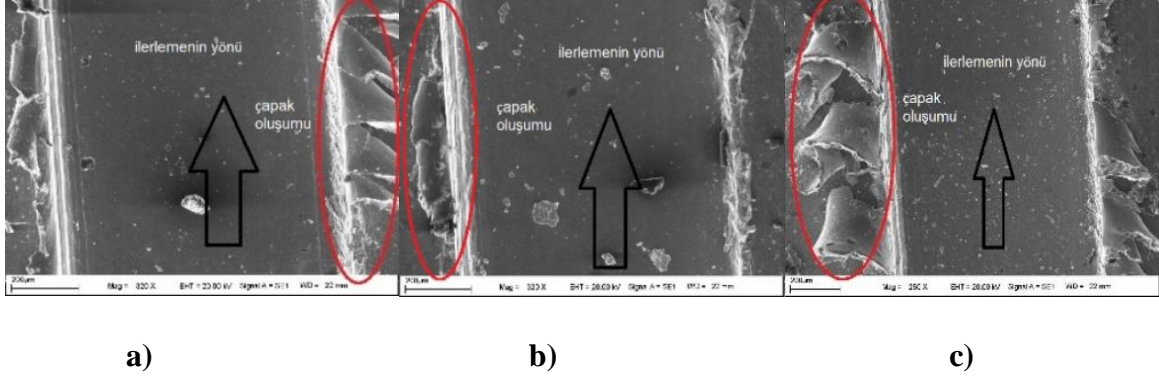
Mikro frezelemede iş parçası malzemesinin mikro yapısı çapak, yüzey pürlülüğü ve talaş oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. 0.3 mm kesme derinliğinde Şekil 4.19'deki grafiği Şekil 4.16'daki grafiklerle karşılatırırsak döküm ile üretilen CoCr alaşımının mikro frezelenmesinde daha yüksek çapak oluşumu meydana geldiği ölçülmüştür. Bunun nedeni döküm ve SLE alaşımı farklı fazlar ve tane şekli sunmaktadır. Döküm alaşımı, malzeme yapısında alfa/beta bölgeleri olan eş eksenli alfa taneleri sunarken, SLE ile üretimde metal tozlarının katman katman hızlı ısıtılıp soğutulması sonucunda iğnemsiz alfa martanzit oluşmaktadır. Bu iğnemsiz alfa martanzit yapı gevrek bir yapı sunduğundan döküm ile üretime göre daha düşük çapak boyları oluşturması beklenmektedir.



Şekil 4.19: Döküm ile üretilen CoCr alaşımını mikro frezelenmesinde 0.3 mm kesme derinliğinde üst çapak boyu ölçüleri.

Şekil 4.20'de döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının farklı ilerleme değerlerindeki SEM görüntüleri ve çapak oluşumları gösterilmiştir. Şekil 4.18 deki SEM görüntüleri ile karşılaştıracak olursak döküm ile üretime SLE ile üretime göre daha yüksek çapak oluşumları meydana geldiği görülmektedir. Aynı zamanda mikro frezelemede

farklı diş başına ilerleme hızlarının döküm ve SLE ile üretimlerde benzer etkileri görülmüştür.



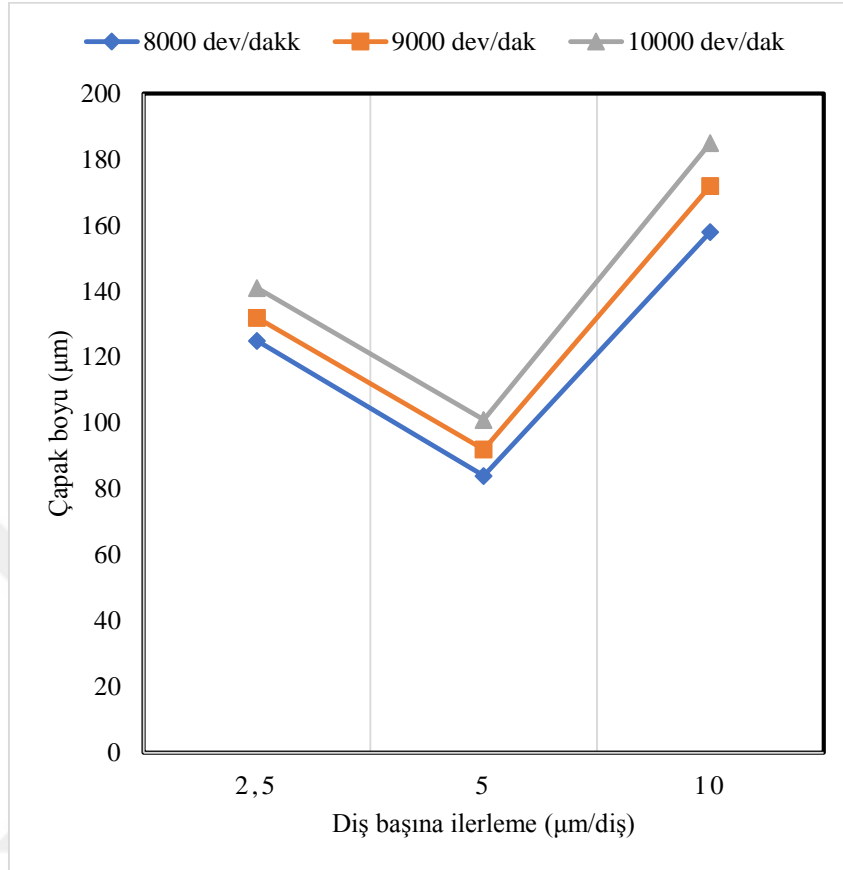
Şekil 4.20: Döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 8000 dev/dak ve 0.3 mm kesme derinliğinde frezelemede çapak SEM görüntüleri a) $fz=2,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ b) $fz=5 \mu\text{m}/\text{diş}$ c) $fz=10 \mu\text{m}/\text{diş}$

Diş başına ilerlemenin kesici kenar yarıçapına oranının çapak kalınlığını azaltmada baskın parametre olduğu literatürde incelenmiştir [106]. Wu ve diğ.(2017) mikro frezelemede diş başına ilerlemenin kesici kenar yarıçapına eşit olduğunda çapak oluşumunun minimum değerine ulaştığı sonucuna varmışlardır [107].

Campos ve diğ. (2020) SLE ve döküm ile üretilmiş Ti6Al4V malzemelerinin mikro frezelenmesi farklı ilerleme hızlarında karşılaştırmışlar. SLE ile üretilen malzeme dökümle üretilmiş malzemelere göre daha iyi mikro frezelenme, yüzey kalitesi ve daha az çapak oluşumu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise SLE ile üretimde malzemenin daha hızlı soğutulmasından dolayı mikro yapısının sivri uçlu martenzite dönüşmesindedir [108].

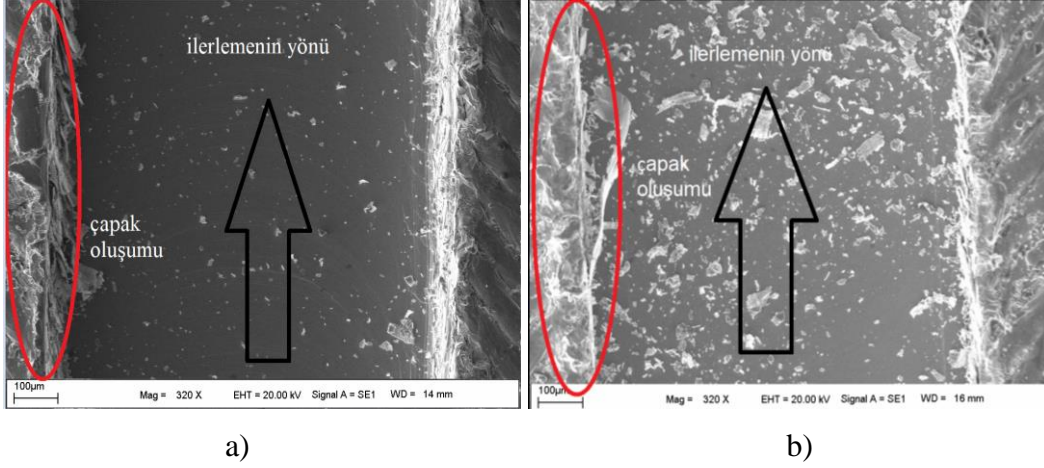
Bu deneyde seçilen devir sayıları daha düşük ve arasındaki fark az olduğundan çapak oluşumuna etkisinin ilerlemeye göre daha az olduğu Şekil 4.16 ve Şekil 4.21'deki grafiklerde görülmektedir. 8000 dev/dak'dan 9000 devir/dak'ya çıktığında sürtünme ve sıcaklık artacağından çapak boyunda bir artış görülmektedir. Literatürde yüksek devir hızlarında mikro frezeleme yapılan deneylerde plastik deformasyon için yetersiz zamanın sağlandığından sürtünme ve kesme kuvvetleri önemli ölçüde azaldığı incelenmiştir. Yüksek devir sayıları daha kararlı mikro frezeleme işlemi oluşturduğundan üst çapak oluşturmak için deforme olan malzemeler azaltabilmektedir [108]. Şekil 4.21'de kesme derinliği 0,5 mm'ye çıkarılması ile çapak yükseklikleri artmış fakat ilerleme ve devir

sayılarındaki değişimlere kesme derinliği 0,3 mm olan Şekil 4.18'deki grafiğe benzer tepkiler vermiştir.



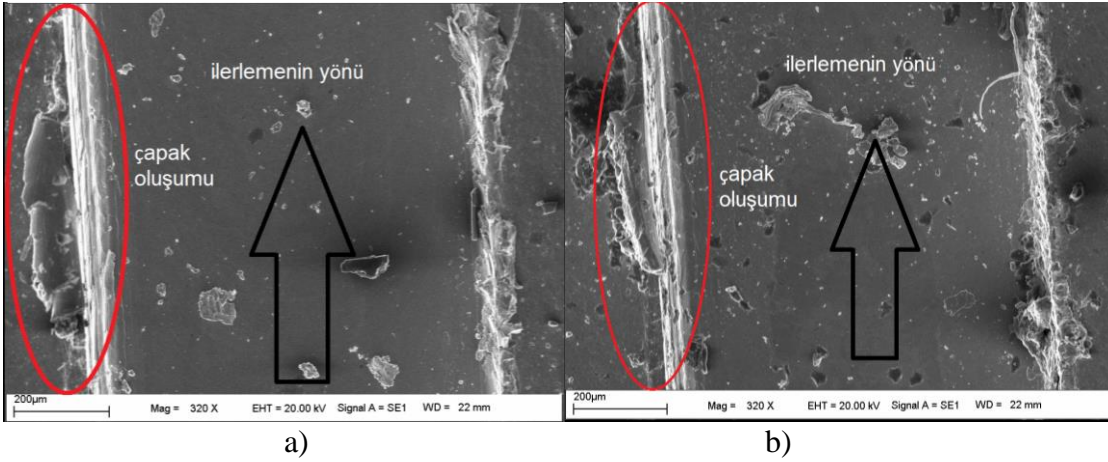
Şekil 4.21: SLE yöntemi ile üretilmiş 0.5 mm kesme derinliğinde üst çapak boyu ölçüleri.

Bununla birlikte aynı yönlü frezeleme kenarındaki üst çapakların, ters yönlü frezeleme tarafındakinden çok daha büyük ve daha geniş olduğu ve devir sayısı artıka çapak miktarının arttığı Şekil 4.22'de SEM görüntülerinde gözlemlenmektedir. Çünkü devir sayısı artarsa aynı oranda kesme hızıda artar. Yüksek kesme hızı, yüksek şekil değiştirme hızı anlamına gelir. Bu da kesme bölgesinde fazın östenitten martenzite dönüşmesine neden olur. Fakat kesme bölgesindeki artan sıcaklıkta malzemenin martenzite dönüşümünü engeleyerek daha sünek bir yapı oluşmasına ve çapak yüksekliğinin artırmasına neden olur. Kesme işlemi her takım döndürme döngüsünün orta ve son aşamasında talaş kaldırma ağırlıklı olduğu için çapak oluşumu aynı yönlü frezeleme tarafında oluşmaktadır.



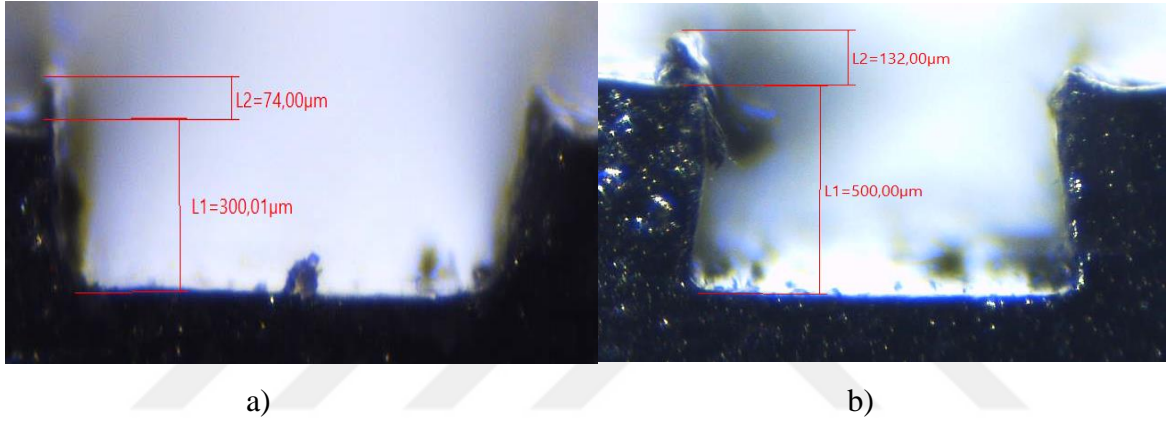
Şekil 4.22: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3 mm kesme derinliğinde 5 µm/diş ilerlemede frezelemede a) 8000 dev/dak b) 9000 dev/dak SEM görüntüleri.

Şekil 4.23'deki döküm ile üretilmiş 8000 ve 9000 dev/dak devir sayılarında mikro frezelenmiş CoCr alaşımlarının SEM görüntüleri Şekil 4.22 ile karşılaştırdığımızda döküm ile üretimde daha yüksek aynı yönlü mikro frezeleme tarafında çapak oluşumu görülmektedir. Dökümle üretimin malzeme yapısından dolayı daha sünek bir oluşum gözükmemektedir. Bu süneklik malzeme yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ve biriken çapak miktarını da artırdığı görülmektedir.



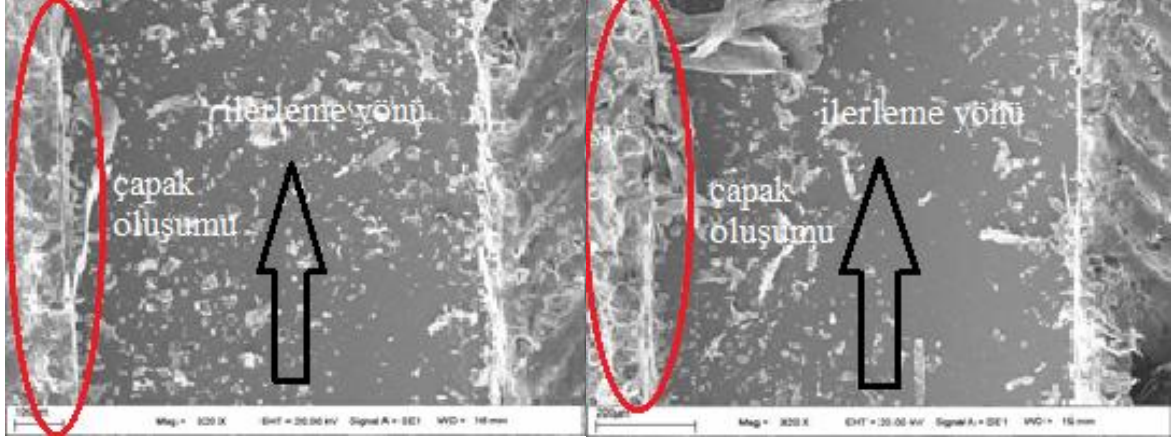
Şekil 4.23: Döküm ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3 mm kesme derinliğinde 5 µm/diş ilerlemede frezelemede a) 8000 dev/dak b) 10000 dev/dak de SEM görüntüleri.

SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3 ve 0.5 mm kesme derinliğindeki mikro kanallardaki üst çapak yüksekliklerinin mikroskobik ölçümleri Şekil 4.24'de gösterilmektedir. Mikro kanalların üst çapak boyutu, Şekil 4.24'de gösterildiği gibi, kesme derinliği artırıldığında hem aynı yönlü frezeleme hem de ters yönlü frezeleme tarafı için artmaktadır. Kesme derinliğinin artmasıyla takım ve iş parçası arasındaki temas alanı artarak ekstrüzyon işlemi artmaktadır. Kesme derinliği arttıkça kesme kuvveti artar ve maksimum etkili gerinim artmaktadır [108]. Bu nedenle, daha fazla malzeme deformasyonu ve takımın kesici kenarı boyunca daha büyük üst çapaklar oluşmaktadır. Üst çapak oluşumunu azaltmak için küçük kesme derinliğinin benimsenebileceği görülmektedir.



Şekil 4.24: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 9000 dev/dak 2,5 µm/diş ilerlemede çapak ölçümleri kesme derinliğinde a) 0.3mm 78 µm b) 0.5mm 132 µm çapak boyu görülmüştür.

SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3 ve 0.5 mm kesme derinliğindeki SEM görüntüleri Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Derinlik arttıkça kaldırılan talaş miktarının oluşturduğu yükten dolayı mikro frezeleme yüzeyinde ve çapak miktarında artış görülmektedir.



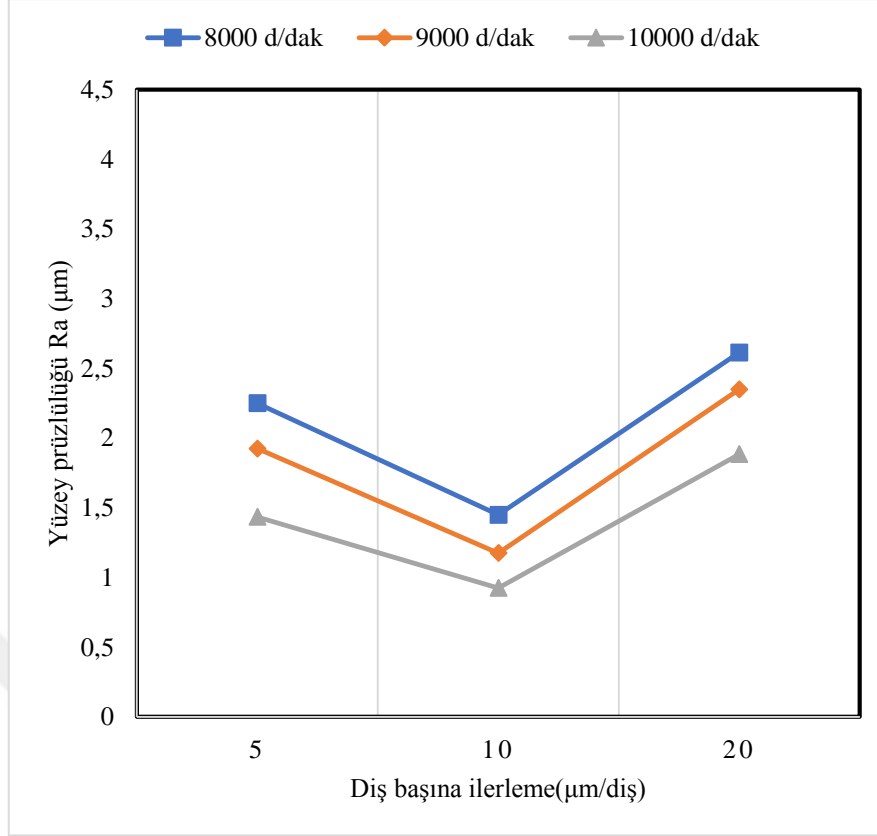
a)

b)

Şekil 4.25: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 9000 dev/dak 5 µm/diş ilerlemede çapak SEM görüntüleri a) 0.3mm b) 0.5mm

5.2 Mikro Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğü Değerlendirilmesi

Bu deneyde mikro frezelemenin yüzey üzerindeki etkisini analiz etmek için aritmetik yüzey pürüzlülüğü, Ra, kullanıldı. Şekil 4.22’de görüldüğü üzere birinci bölge, diş başına ilerlemeyi 2,5 µm’ten 5 µm yükseltirken geleneksel frezelemeden farklı olarak pürüzlülük değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bunun nedeni mikro frezelemede meydana gelen diş başı ilerlemede yüzeye zarar verebilen ve düzensiz plastik malzeme akışına neden olan kazınma ile açıklanabilir. İkinci bölge, diş başına ilerleme 5 µm’den sonra yükselen bir yüzey pürüzlülük (Ra) değeri görmekteyiz. Bu, geleneksel frezeleme için beklenen aynı eğilimi temsil etmektedir. Bu aralıkta diş başına ilerleme ve kayma baskın olduğundan Ra değerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zaman devir sayısı arttığında yüzey pürüzlülüğünün azaldığı Şekil 4.22’de ve Şekil 4.23’de görülmüştür. Yüksek devirde takım yüzeye daha fazla temas ederek yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktadır.

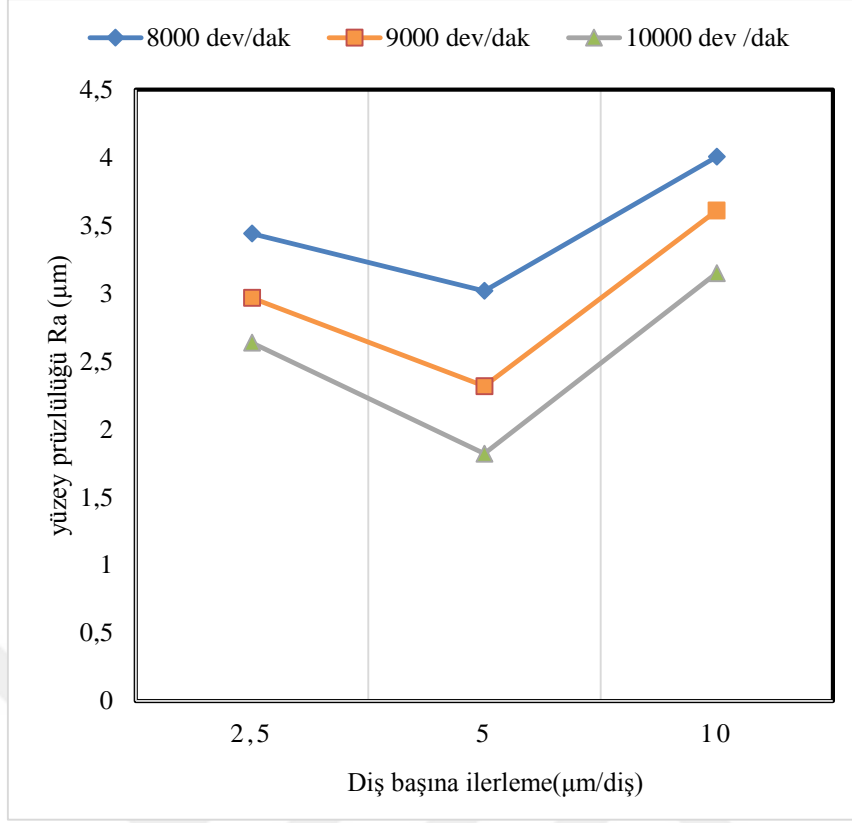


Şekil 4.26: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3mm farklı ilerleme ve devir sayılarında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri.

Şekil 4.26 ve 4.27’de optimum yüzey pürüzlülüğü (Ra), kesilmemiş talaş kalınlığının kesme kenarı radiusuna eşit olduğunda ortaya çıktığı görülmüştür. Bu nedenle, SLE yöntemi ile üretilen CoCr alaşımının mikro frezelemede en iyi yüzey pürüzlülüğü, negatif talaş açısı (sürme etkileri) ile geleneksel ilerleme etkisi arasında kesici kenarın diş başına ilerleme miktarına eşit olduğu yerde gözlemlenmiştir.

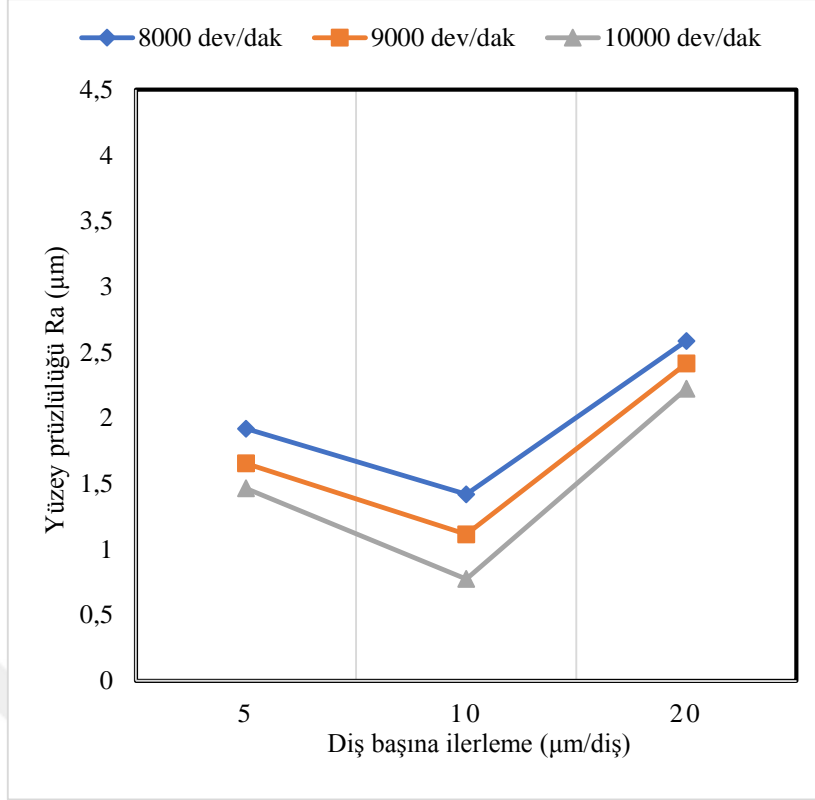
Kesme derinliğinin artmasıyla mikro freze takımının iş parçasına teması yüzeyinin artmaktadır ve bunun sonucunda talaş yükü ve takım titreşimler artarak yüzey pürüzlülüğüne etkilemektedir. Şekil 4.27’de kesme derinliği arttıkça yüzey pürüzlülüğü arttığı fakat devir sayısının etkisinin Şekil 4.26’deki 0,3 kesme derinliğine göre daha az olduğu ölçülmüştür.

Kesme derinliğinin artmasıyla mikro freze takımının iş parçasına teması yüzeyinin artmaktadır ve bunun sonucunda talaş yükü ve takım titreşimler artarak yüzey pürüzlülüğüne etkilemektedir. Talaş yükü arttığından dolayı devir sayısının etkisi kesme derinliğine bağlı olarak azalmaktadır.



Şekil 4.27: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.5mm farklı ilerleme ve devir sayılarında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri.

Şekil 4.28 de döküm yöntemi le üretilmiş CoCr alaşımınının 0.3 mm kesme derinliğindeki yüzey prüzlülük değerleri (Ra) verilmiştir. 0.3mm kesme derinliğinde Şekil 4.28 ve 4.26 karşılaştırıldığında döküm ile üretilen CoCr alaşımlarının mikro frezelenmesinde daha düşük prüzlülük değeri gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni SLE ile üretilen CoCr alaşımının hızlı ısıtılıp hızlı soğutulması sonucu daha gevrek bir malzeme yapısına sahiptir. Mikro frezleme sırasında SLE ile üretimin gevrek yapısı daha kısa talaş yapısına neden olamakta ve daha erken kırılan talaş işlememe yüzeyinde kalıntılar bırakarak yüzey prüzlülüğünü etkilemektedir.



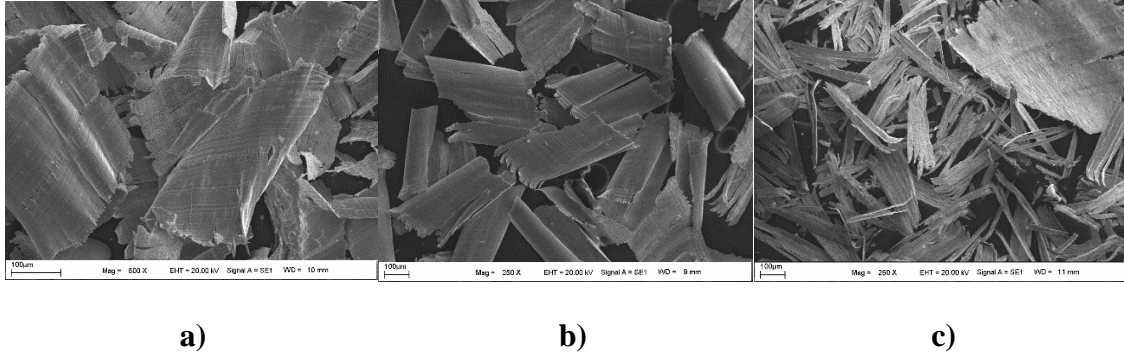
Şekil 4.28: Döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 0.3mm de farklı ilerleme ve devir sayılarında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri.

Mikro frezelemede bazı durumlarda diş başına ilerlemeyi arttırırken yüzey pürüzlülüğü davranışının geleneksel frezeleme standart sonuçlarını takip etmediği görülebilir [109]. Deforme olmamış talaş kalınlığının kesme kenarı yarıçapına oranının etkisinin iki olgusu gözlenmiştir. İlk aralıkta diş başına ilerleme azaldıkça yüzey pürüzlülüğü artmakta. İkinci aralık, talaş kalınlığı kesme yarıçapından daha büyük olduğunda, yüzey pürüzlülüğü diş başına ilerleme ile artar [110]. Bu durumda, diş başına ilerlemenin etkisi geleneksel frezeleme ile meydana gelen ile aynıdır. Ek olarak, kesici kenar yarıçapından daha yüksek bir diş başına ilerlemedeki mikro frezelemede durumunda, geleneksel kesme mekanizmalarında olduğu gibi diş başına ilerleme ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı da literatürde bildirilmiştir [111].

5.3 SLE ile Üretilen CoCr Alaşımlar Mikro Frezelemesinde Talaş Oluşumu

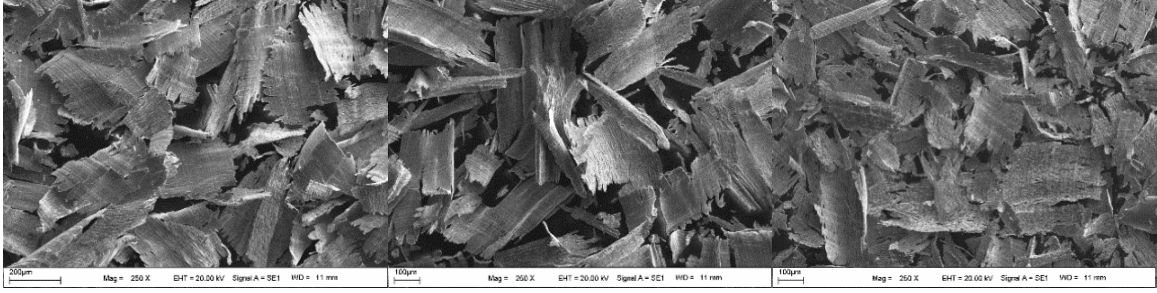
Deneylelerdeki talaşlar toplandı ve daha sonra SEM cihazında görüntüleri gözlemlendi. Mikro frezeleme deneylerinde oluşan talaşların SEM görüntüleri kısmen Şekil 4.24'te gösterilmiş olup, ilerleme hızı arttıkça teorik talaş kalınlığının arttığı ve talaş uzunluğunun uzadığı görülmektedir.

Talaş uzunluğu $2,5 \mu\text{m}$ /diş ilerleme hızındaki talaş uzunluğunun diğer ilerleme hızlarından uzun olduğu ve en kısa talaş oluşumunun 10 m/diş ilerlemede olduğu Şekil 4.29'te görülmüştür. Aynı zamanda ilerleme artıkça talaşın daha hızlı kopmaya eğilimi olduğundan düşük kesme hızında sürekli talaşın, yüksek kesme hızında süreksiz talaşın olduğu Şekil 4.29'da görülmektedir. Bu, ilerleme hızının artışıyla, artan talaş kalınlığının, talaşın sürekli talaşlar oluşturmak yerine parçalara ayrılmaya neden olduğu görülmektedir. İşlenen malzeme CoCr tozundan SLE yöntemi ile üretildiğinden dolayı mikro frezelemeden sonra oluşan çapıklarda tel tel oluşumlar meydana geldiği Şekil 4,29'da gözlemlenmiştir. Bunun nedeni CoCr tozlarının hızlı ısıtılıp soğutulması sonucu daha dağınık alfa taneli martenzit yapıya sahip olmasındandır.



Şekil 4.29: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 8000 dev/dak ve 0.5 mm kesme derinliğinde frezelemede talaş şekilleri a) $f=2,5 \mu\text{m/diş}$ b) $f=5 \mu\text{m/diş}$ c) $f=10 \mu\text{m/diş}$

Şekil 4.25 döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 8000 d/d devir ve 0.3 mm kesme derinliğinde frezelemede talaş şekilleri gösterilmiştir. Döküm ile üretilmiş CoCr alaşımlarının eş eksenli alfa taneli martenzit yapı sunduğundan daha sünek bir yapıya sahiptir. Bu sünek yapı sonucunda oluşan talaş yapısı SLE ile üretime göre daha uzun ve kalın talaş yapı sağladığı Şekil 4.30 ve 4.29 daki SEM görüntülerini karşılaştırdığımızda görülmektedir.



a)

b)

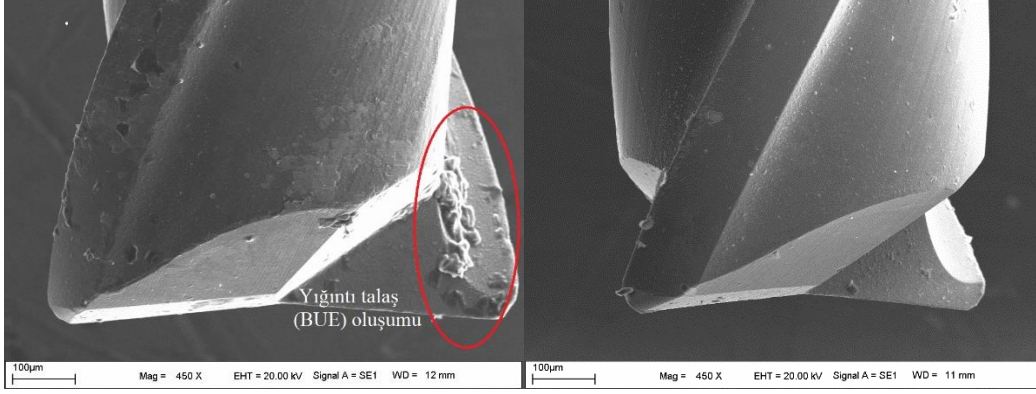
c)

Şekil 4.30: Döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının 9000 dev/dak ve 0.5 mm kesme derinliğinde frezelemede talaş şekilleri a) $f=2,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ b) $f= 5 \mu\text{m}/\text{diş}$ c) $f=10 \mu\text{m}/\text{diş}$

5.4 Takım Aşınması ve Yığıntı Talaş Oluşumu

Mikro işleme prosesinde boyut etkisi ve minimum talaş kalınlığı olgusu, kazınmaya neden olur ve bu nedenlerle ilişkili malzeme akış modeli ve kesme kenarı boyunca elastik-plastik deformasyon işleme performansının belirlenmesinde baskın bir rol oynamaya başlar. Oluşan talaş yığını kesici kenar alanında yığıntı talaş (BUE) olarak adlandırılır ve takım yüzeyine yapışan bu malzemelerin işleme süreci üzerinde büyük etkisi vardır. BUE oluşumu kesme kuvvetinin değişmesine, daha kısa kenar ömrüne neden olmaktadır. Talaş üzerinde kalan yırtık malzeme parçacıklarının bozucu etkilerinden dolayı zayıf yüzey kalitesi oluşumuna yol açar. Mikro frezelemede diş başına ilerleme miktarının kesici kenardan radyusunu düşük seçtiğimizden dolayı $2,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerlemede $5 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerlemeye göre aşırı fazla yığıntı talaş (BUE) oluşumu Şekil 4.31’de görülmektedir.

Mikro frezelemede kesici kenar radyusu ve ilerleme miktarının seçiminin kritik olduğu bu değerlerin birbirine yakın seçmenin takım aşınmasında çok önemli bir rol oynadığı görülmektedir.



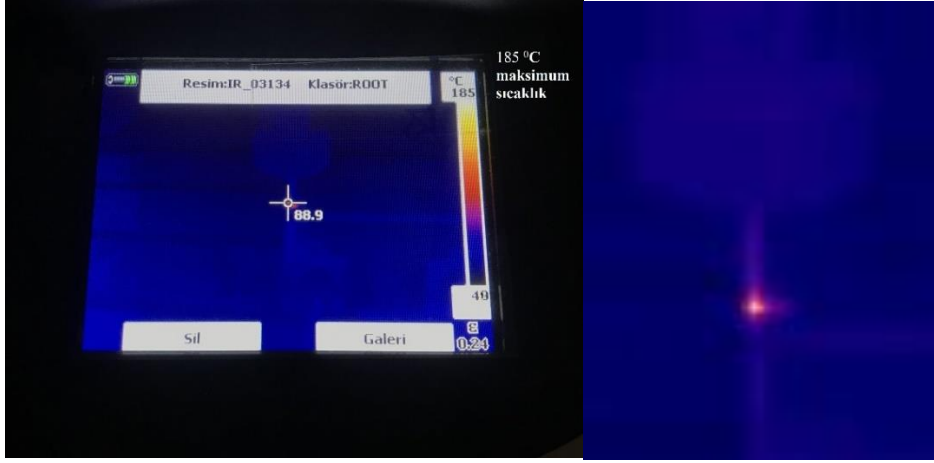
a)

b)

Şekil 4.31 9000 dev/dak 0.5 mm kesme derinliğinde a) $f=2,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ b) $f=5 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerlemede yığıntı talaş oluşumları

5.5 SLE ile Üretilen CoCr Alaşımlarının Mikro Frezelemede Sıcaklık Ölçümü

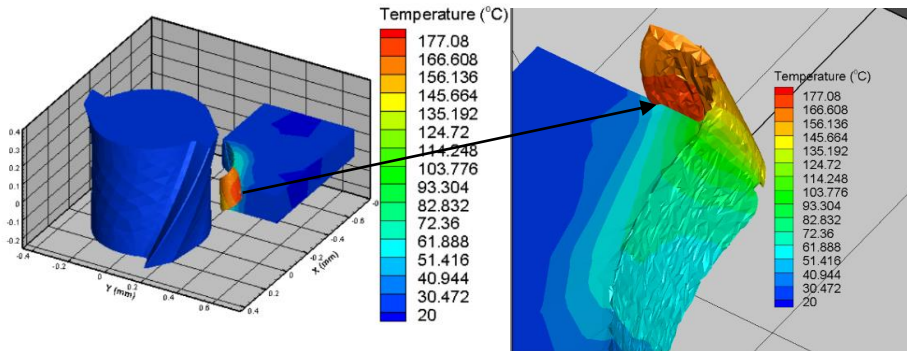
Kesme sıcaklığı, takım aşınmasını, çapak oluşumunu, talaş kaldırma mekanizmalarını ve yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Buna rağmen mikro frezeleme sıcaklığı kapsamlı araştırmalar yetersizdir. Bunun nedeni çok küçük alanları hedef alan (kızılötesi kameralar) ve yeterli verinin toplanmasına izin veren toplama hızlarında çalışan ekipman kullanılması önerilir. Geleneksel frezeleme ile karşılaştırıldığında, kullanılan küçük kesilmemiş talaş kalınlık değerleri nedeniyle, mikro frezelemede oldukça düşük sıcaklık değerleri beklenir, bununla birlikte işleme sırasında termal genişleme, malzemede yüzey hatalarına neden olabilir. Şekil 4.32’de SLE ile CoCr mikro frezeleme sırasında ölçülen maksimum sıcaklık değeri ve sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Deneyde ilerleme, devir sayısı ve kesme derinliği arttıkça maksimum kesme sıcaklığının arttığı görülmektedir. Maksimum sıcaklık 10000 d/dak $10 \mu\text{m}/\text{diş}$ 0.3mm kesme derinliğinde Şekil 4.26’de görüldüğü gibi 185°C olarak ölçülmüştür. En düşük sıcaklık ise 8000 d/dak $2,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ 0.3 mm kesme derinliğinde 101°C ölçülmüştür. Kesme derinliğinin sıcaklık oluşumunda etkisinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Takım aşınmalarına ve yüzey kalitesini etkilediği için mikro frezeleme sırasında kesme sıcaklıklarını tahmin edip önlem almak mikro talaşlı imalatta önem taşımaktadır.



Şekil 4.32: Mikro frezeleme sırasında termal kamera ile ölçülen maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımı.

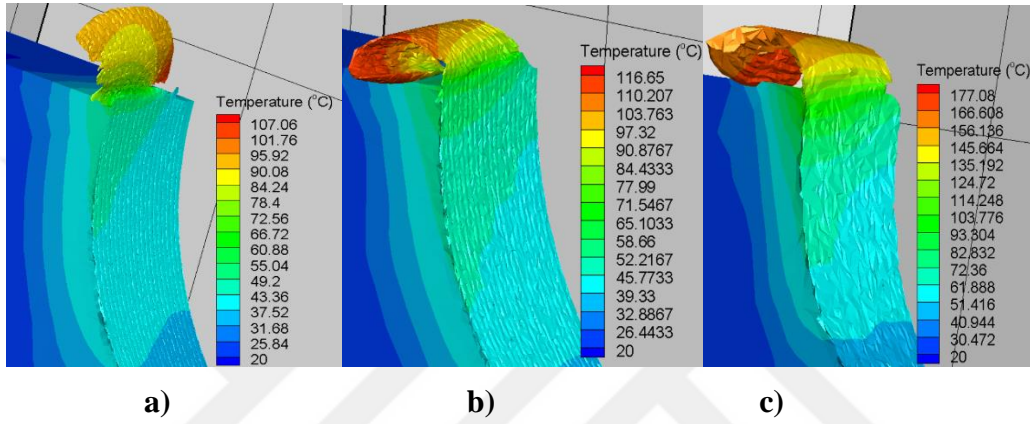
5.6 SLE ile Üretilen CoCr Alaşımlarının Mikro Frezelemede Sonlu Elemanlar yöntemi

Sonlu Elemanlar yöntemi ile mikro frezeleme deney ortamının simülasyonu yapıldı. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen analizlerde deneysel analizlere yakın sonuçlar elde edildi. Şekil 4.33’de 3 boyutlu mikro frezeleme analizinde SLE yöntemi ile üretilen CoCr alaşımının 9000 d/dak 10 µm/diş ilerleme hızında mikro frezelenmesinde bir dişte kaldırılan talaş miktarı ve sıcaklık dağılımı görülmektedir. En yüksek sıcaklığın talaşın kopma anında oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni talaşın kesici takım temas süresinin artması ve talaşın takımın kesici ağzında birikmesi ve kopma anında bütün sıcaklığın talaş üzerinden atılmasındandır. Maksimum sıcaklık Şekil 4.33’de görüldüğü gibi 177,08 derece ölçülmüştür. Termal kamera ile ölçülen sıcaklıkları karşılaştırdığımızda %4,5 bir hata payı gözükmemektedir.



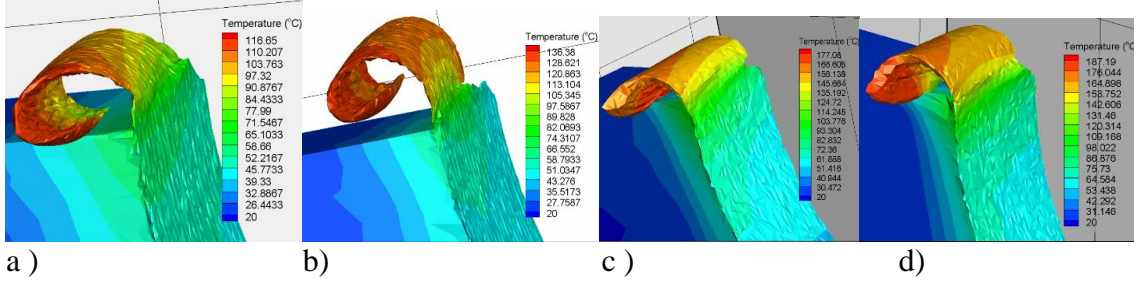
Şekil 4.33: Sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu yapılan deney ortamı.

Şekil 4.34’de SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile mikro frezelemede oluşan kesme sıcaklıkları ilerleme arttıkça arttığı görülmüştür. 2,5 µm/diş ve 5 µm/diş ilerleme hızlarında sıcaklık farkının %9 olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık farkının az olmasının nedeni kesme radiusu 5 µm olan mikro takımın 2,5 µm/diş ilerleme hızında yeterince talaş kaldıramaması sonucunda sıcaklığa etki ettiği kaldırılan talaş miktarında ve sıcaklık dağılımında gözükmektedir. 5 µm/diş ve 10µm/diş ilerleme hızlarında ise talaş şekli miktarı ve maksimum sıcaklığın geleneksel frezelemeye benzer bir şekilde ilerleme arttıkça aşırı derecede arttığı görülmektedir.



Şekil 4.34: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile mikro frezelemede oluşan kesme sıcaklık dağılımı a) $f=2,5 \mu\text{m/diş}$ b) $f=5 \mu\text{m/diş}$ c) $f= 10 \mu\text{m/diş}$.

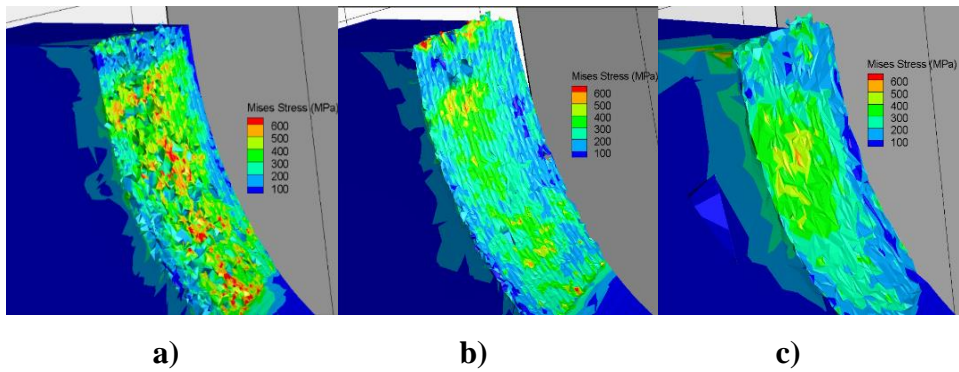
Şekil 4.35’de SLE ve döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile frezelemede oluşan kesme sıcaklıkları ve talaş oluşumları karşılaştırılmıştır. Döküm yöntem ile üretilen üretilen CoCr alaşımlarının SLE ile üretilen alaşımlara göre maksimum sıcaklıkların daha yüksek çıktığı ve oluşan talaşın kıvrımının arttığı Şekil 4.35’te görülmektedir. Döküm ile üretilmiş CoCr alaşımların yapısal olarak homojen alfa martenzit yapıya sahip olmasından daha sünek bir yapıda olması beklenmektedir. Bu sünek yapıdan dolayı talaşın daha çok takımda birikmesi sonucunda kesme sıcaklıkları artmaktadır.



Şekil 4.35: CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile frezelemede oluşan kesme sıcaklıkları a) $f=5 \mu\text{m}/\text{diş}$ SLE b) $f=5 \mu\text{m}/\text{diş}$ döküm c) $f=10\mu\text{m}/\text{diş}$ SLE d) $f=10 \mu\text{m}/\text{diş}$ döküm

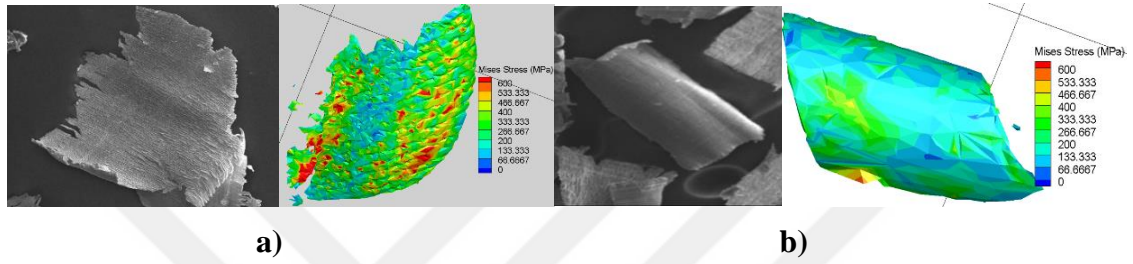
5.7 CoCr Alaşımlarının Mikro Frezelemede Oluşan Yüzey, Çapak ve Talaş Oluşumlarını Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

Şekil 4.36'de SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile farklı ilerleme hızlarında frezelemede oluşan yüzey mises gerilmeleri ve çapak oluşumu gözlemlenmiştir. Kesme kenar yarıçapını $5 \mu\text{m}$ seçilen bu deneylerde $2.5 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızıyla yapılan sonlu eleman analizinde yüzeyde yüksek mises gerilmeler görülmektedir. Bu mises gerilmeleri kesici takım yarıçapının dış başına ilerleme hızından daha fazla olduğunda talaşın tam olarak kaldırılamadığı yüzeyde kazınmaya ve sürünmeye neden olduğu ile açıklanabilir. $5 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerlemede ise von mises gerilmelerinin talaşın ayrıldığı kenarda yoğunlaştığı ve daha iyi bir kesme sağlamaktadır. Aynı yönlü frezleme tarafında ilerleme hızı arttıkça çapak oluşumunun arttığı görülmektedir. $2.5 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerlemede kazınma ve sürünmeden dolayı talaşın zıt yönlü frezleme tarafında daha fazla olması beklenmektedir.



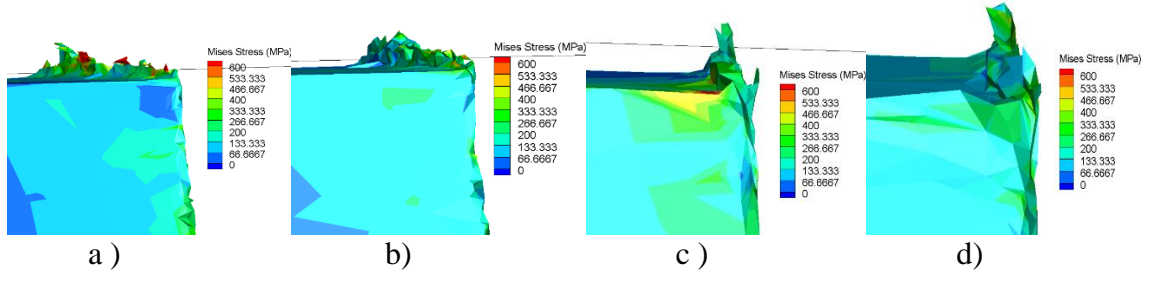
Şekil 4.36: SLE yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile frezelemede oluşan yüzey mises gerilmeleri ve çapak oluşumu a) $f:2,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ b) $f: 5 \mu\text{m}/\text{diş}$ c) $f: 10 \mu\text{m}/\text{diş}$.

Şekil 4.37 SLE ile üretilmiş CoCr alaşımlarının mikro frezlenmesinde 2,5 ve 5µm/diş ilerlemede oluşan deney sonucunda oluşan talaş ve sonlu elemanlar yöntemi ile oluşan talaşın benzerlik gösterdiği görülmüştür. 2,5 µm/diş ilerlemede mises gerilmelerinin talaş yüzeyinde aşırı derecede arttığı görülmektedir. Bunun sebebi kaldırılan talaşın kesme kenar radyüsünden küçük olduğunda talaşın sürüklenerek kaldırılması sonucunda takım ve malzeme arasında aşırı mises gerilmelere neden olmaktadır. Bu oluşumları talaş üzerinde bu gerilmeleri deneyde ve sonlu elemanlar yöntemi ile yaptığımız analizlerde görülmektedir.



Şekil 4.37: Sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu yapılan SLE ile üretilmiş CoCr alaşımlarının mikro frezelemede oluşan çapakların deneyde oluşan çapaklar ile karşılaştırılması a) 2,5 ve b) 5 µm/diş ilerlemede.

Şekil 4.38'de SLE ve döküm yöntemi ile üretilmiş CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile frezelemede oluşan çapak boyutları ve mises gerilmeleri karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerin deneysel sonuçlarla benzer gözlemlenmiştir. SLE ile üretilen CoCr alaşımlarında çapak boylarının daha düşük çıktığı ve mises gerilmelerinin kesme bölgesinde döküm ile üretime göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. SLE ile üretilen CoCr alaşımlarının üretimindeki toz malzemenin katman katman hızlı ıstıllıp soğutulması sonucunda malzeme yapısındaki dağınık iğnemsiz martenzit yapının malzemeyi gevreklettiğinden talaş ayrılma bölgesinde dökümle üretime göre daha kolay ayrılabilirdiği mises gerilmelerinden ve çapak boylarındaki farktan gözlemlenebilmektedir. Dökümle üretimdeki CoCr alaşımlarında üretim farkından dolayı daha homojen bir yapıda oluşması mikro kesme sırasında daha sünek yapıda talaş kaldırılmasına ve daha yüksek çapak oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.38: CoCr alaşımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile frezelemede oluşan çapak boyutları ve von mises gerilim dağılımı a) f:5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ SLE b) f:5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ döküm c) f=10 $\mu\text{m}/\text{diş}$ SLE d) f=10 $\mu\text{m}/\text{diş}$ döküm.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, geleneksel yöntemlere göre avantajlı bir imalat yöntemi olan SLE yöntemi ile özellikle dental uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılan CoCrW alaşım malzemesinin mikro frezeleme sonrasında çapak ve yüzey pürüzlülüğü değerleri incelenmiş ve frezeleme sırasında sıcaklık oluşumu ölçülüp sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

- Mikro frezeleme işleminin çapak oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü geleneksel frezelemeden farklılıklar göstermektedir.
- Mikro frezeleme sonucunda oluşan üst çapak boylarını incelediğimizde en iyi sonucun SLE yöntemi ile üretilen CoCr alaşımlarında 0.3mm kesme derinliğinde 5 µm/diş 8000 d/dak da 48 µm olarak ölçülmüştür.
- Geleneksel frezelemeden farklı olarak ilerleme değerinin en düşük olduğu 2,5 µm/diş ilerlemede, 5 µm/diş ilerlemeye göre daha fazla çapak oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü meydana gelmiştir. Bu durum mikro frezelemede ilerlemenin takım radius değerinden daha küçük seçilen değerlerde kazınma mekanizmasının baskın olmasından dolayı ortaya çıkmaktadır.
- 5 µm/diş dan 10 µm/diş ilerleme hızına çıkıldığında çapak ve yüzey pürüzlülüğün aşırı artarak geleneksel frezelemeye benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Mikro frezelemeden sonra SEM ve mikroskopik görüntülerde çapak oluşumları incelendiğinde 5 µm/diş ve 10 µm/diş ilerleme talaş birikmesinin mikro takımın zıt yönlü freze tarafında birikmelerin oluştuğu, fakat 2,5 µm/diş ilerlemede ise aynı yönlü freze tarafında talaşın biriktiği görülmüştür. Bunun nedeni 5 µm/diş ve 10 µm/diş ilerlemede talaş tahliyesi düzgün bir şekilde yapılabilirken 2,5 µm/diş ilerlemede talaş kaldırma işlemi kazınma mekanizmasından dolayı tam yapılamamakta, talaş aynı yönlü freze kenarında tarafında birikmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu döküm ile üretilmiş CoCr alaşımların mikro frezelenmesinde 5 µm/diş 10000 d/dak 0,3 mm kesme derinliğinde Ra: 0,775µm ölçülmüş, devir sayısının büyük ve kesme derinliğinin daha küçük seçilmesi durumunda yüzey pürüzlülüğünü azaltmada önemli bir etken olduğu gözlemlenmiştir.
- Kesme derinliğinin çapak oluşumu, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklığı önemli ölçüde artırdığı için daha düşük kesme derinliği seçilmelidir.

- SLE ile üretilen CoCr alaşımlarında daha düşük çapak oluşumları gözlemlenirken döküm ile üretilen CoCr alaşımlarda daha düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür.
- Mikro frezelemede oluşan talaş ilerleme arttıkça, kısa talaş oluşumu gözlemlendi. İlerleme arttıkça talaşta sürekli talaşın, süreksiz talaş oluşumuna yönlendiği görülmektedir.
- Mikro freze takımlarında 2,5 µm/diş ilerlemede, 5 µm/diş ilerlemeye göre takım üzerinde aşırı yığıntı talaş oluşumu gözlemlenmiştir.
- Deneysel olarak termal kamera ve sonlu elemanlar ile mikro frezeleme sırasında yaptığımız ölçümlerde döküm ile üretilen CoCr alaşımlarında SLM ile üretilen CoCr alaşımlarına göre daha yüksek sıcaklık oluşumu görülmüştür.
- Sonlu elemanlar yöntemi ile gözlemlenen von mises gerilmelerinde SLM yöntemi ile üretilen CoCr alaşımlarının dökümle üretime göre gerilmelerin kesme bölgesinde daha çok yoğunlaşarak talaşın daha iyi kopma sağladığı görülmektedir.
- Sonlu elemanlarla yapılan analizlerde deneylere benzer sıcaklık, çapak, talaş oluşumları görülmüş ve yapılan analizlerin doğruluğu kanıtlanmıştır.

Mikro frezelemede diş başına ilerleme miktarının kesici takım radiusuna ne kadar yakın seçilirse istenmeyen çapak oluşumuna, yüzey pürüzlülüğüne ve takım aşınmalarına önlem alınabileceği görülmüş ve SLM ile üretilen CoCr malzemelerin daha düşük çapak ve daha iyi talaş oluşumu gözlemlenmiştir. Yapılan mikro frezeleme işlemlerinde kesilmemiş minimum talaş kalınlığının mikro takım kesici kenar radiusuna oranının önemi gözlemlenmiştir. Döküm ile üretilen CoCr alaşımının malzeme yapısında alfa/beta bölgeleri olan eş eksenli alfa taneleri sunarken, SLE ile üretimde metal tozlarının katman katman hızlı ısıtılıp soğutulması sonucunda iğnemsî alfa martanzit oluşmakta bu yapı gevreklik sağlamaktadır. Bu nedenle CoCr alaşımlarının SLE ile üretiminde, döküm ile üretime göre daha düşük çapak boyları, kesme sıcaklıkları ve daha kısa talaş oluşumu gözlemlendiğinden mikro frezeleme işlemi ikinci bir boyutsal ve yüzeysel hataları düzeltmek için önerilir.

KAYNAKLAR

- 1- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811-833.
- 2- Gibson, C. (2016). Material inheritances: how place, materiality, and labor process underpin the path-dependent evolution of contemporary craft production. *Economic Geography*, 92(1), 61-86.
- 3- Pozdnyakova, U. A., Golikov, V. V., Peters, I. A., & Morozova, I. A. (2019). Genesis of the revolutionary transition to industry 4.0 in the 21st century and overview of previous industrial revolutions. In *Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century* (pp. 11-19). Springer, Cham.
- 4- Jideani, A. I., Mutshinyani, A. P., Maluleke, N. P., Mafukata, Z. P., Sithole, M. V., Lidovho, M. U., ... & Matshisevhe, M. M. (2020). Impact of Industrial Revolutions on Food Machinery-An Overview. *Journal of Food Research*, 9(5), 42-52.
- 5- Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: trends and research challenges. *Production planning & control*, 23(2-3), 83-104.
- 6- Mellor, S., Hao, L., & Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International journal of production economics*, 149, 194-201.
- 7- Davim, J. P. (Ed.). (2008). *Machining: fundamentals and recent advances*. Springer Science & Business Media.
- 8- Samuel, J., Jun, M. B., Ozdoganlar, O. B., Honegger, A., Vogler, M., & Kapoor, S. G. (2020). Micro/Meso-Scale Mechanical Machining 2020: A Two-Decade State-of-the-Field Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110809.
- 9- Ning, Y., Rahman, M., & Wong, Y. S. (2001). Investigation of chip formation in high speed end milling. *Journal of materials processing technology*, 113(1-3), 360-367.
- 10- Dogra, M., Sharma, V. S., Sachdeva, A., Suri, N. M., & Dureja, J. S. (2010). Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(2), 341-358.
- 11- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127-182.
- 12- Jain, V. K. (2009). *Advanced machining processes*. Allied publishers.
- 13- Debnath, S., Kunar, S., Anasane, S. S., & Bhattacharyya, B. (2017). Non-traditional micromachining processes: opportunities and challenges. *Non-traditional Micromachining Processes*, 1-59.

- 14- Debnath, S., Kunar, S., Anasane, S. S., & Bhattacharyya, B. (2017). Non-traditional micromachining processes: opportunities and challenges. *Non-traditional Micromachining Processes*, 1-59.
- 15- Qin, Y., Brockett, A., Ma, Y., Razali, A., Zhao, J., Harrison, C., ... & Loziak, D. (2010). Micro-manufacturing: research, technology outcomes and development issues. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(9-12), 821-837.
- 16- Ashby, M. F. (2012). *Materials and the environment: eco-informed material choice*. Elsevier.
- 17- Masuzawa, T., & Tönshoff, H. K. (1997). Three-dimensional micromachining by machine tools. *CIRP Annals*, 46(2), 621-628.
- 18- Rysava, Z. (2017). Micro-Cutting Of Difficult-To-Cut-Materials.
- 19- Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2012). Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of machine Tools and manufacture*, 57, 83-101.
- 20- Kim, S. W., Lee, D. W., Kang, M. C., & Kim, J. S. (2001). Evaluation of machinability by cutting environments in high-speed milling of difficult-to-cut materials. *Journal of materials processing technology*, 111(1-3), 256-260.
- 21- Kishawy, H. A., & Hosseini, A. (2019). Machining difficult-to-cut materials. *Mater. Form. Mach. Tribol.*
- 22- Snoeys, R., Staelens, F., & Dekeyser, W. (1986). Current trends in non-conventional material removal processes. *CIRP annals*, 35(2), 467-480.
- 23- Wei, W., Di, Z., Allen, D. M., & Almond, H. J. A. (2008). Non-traditional machining techniques for fabricating metal aerospace filters. *Chinese Journal of Aeronautics*, 21(5), 441-447.
- 24- Duda, T., & Raghavan, L. V. (2016). 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 103-110.
- 25- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- 26- Kumar, K. V. (2016). *Subtractive and additive manufacturing technology in moulding industry* (Doctoral dissertation).
- 27- Yamazaki, T. (2016). Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia Cirp*, 42, 81-86.
- 28- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012.
- 29- Moussaoui, K., Rubio, W., Mousseigne, M., Sultan, T., & Rezai, F. (2018). Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 735, 182-190.

- 30- Turner, B. N., & Gold, S. A. (2015). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*.
- 31- Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.
- 32- Li, F., Chen, S., Shi, J., Tian, H., & Zhao, Y. (2017). Evaluation and optimization of a hybrid manufacturing process combining wire arc additive manufacturing with milling for the fabrication of stiffened panels. *Applied Sciences*, 7(12), 1233.
- 33- Flynn, J. M., Shokrani, A., Newman, S. T., & Dhokia, V. (2016). Hybrid additive and subtractive machine tools—Research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 101, 79-101.
- 34- Krawczyk, M. B., Królikowski, M. A., Grochala, D., Powalka, B., Figiel, P., & Wojciechowski, S. (2020). Evaluation of surface topography after face turning of CoCr alloys fabricated by casting and selective laser melting. *Materials*, 13(11), 2448.
- 35- Allegri, G., Colpani, A., Ginestra, P. S., & Attanasio, A. (2019). An experimental study on micro-milling of a medical grade Co-Cr-Mo alloy produced by selective laser melting. *Materials*, 12(13), 2208.
- 36- Fernandez-Zelaia, P., Nguyen, V., Zhang, H., Kumar, A., & Melkote, S. N. (2019). The effects of material anisotropy on secondary processing of additively manufactured CoCrMo. *Additive Manufacturing*, 29, 100764.
- 37- Zhang, H., Dang, J., Ming, W., Xu, X., Chen, M., & An, Q. (2020). Cutting responses of additive manufactured Ti6Al4V with solid ceramic tool under dry high-speed milling processes. *Ceramics International*, 46(10), 14536-14547.
- 38- Greco, S., Kieren-Ehse, S., Kirsch, B., & Aurich, J. C. (2021). Micro milling of additively manufactured AISI 316L: impact of the layerwise microstructure on the process results. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(1), 361-373.
- 39- Lizzul, L., Sorgato, M., Bertolini, R., Ghiotti, A., & Bruschi, S. (2020). Influence of additive manufacturing-induced anisotropy on tool wear in end milling of Ti6Al4V. *Tribology International*, 146, 106200.
- 40- de Oliveira Campos, F., Araujo, A. C., Munhoz, A. L. J., & Kapoor, S. G. (2020). The influence of additive manufacturing on the micromilling machinability of Ti6Al4V: A comparison of SLM and commercial workpieces. *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 299-307.
- 41- Hojati, F., Daneshi, A., Soltani, B., Azarhoushang, B., & Biermann, D. (2020). Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process. *Precision Engineering*, 62, 1-9.
- 42- Bonaiti, G., Parenti, P., Annoni, M., & Kapoor, S. (2017). Micro-milling machinability of DED additive titanium Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing*, 10, 497-509.

- 43- Rysava, Z., Bruschi, S., Carmignato, S., Medeossi, F., Savio, E., & Zanini, F. (2016). Micro-drilling and threading of the ti6al4 v titanium alloy produced through additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 46, 583-586.
- 44- Parenti, P., Cataldo, S., Grigis, A., Covelli, M., & Annoni, M. (2019). Implementation of hybrid additive manufacturing based on extrusion of feedstock and milling. *Procedia Manufacturing*, 34, 738-746.
- 45- Abeni, A.; Ginestra, Paola Serena; Attanasio, Aldo (2021). Micro-milling of Selective Laser Melted Stainless Steel. In: *Selected Topics in Manufacturing*. Springer, Cham, p. 1-12.
- 46- Gong, Y., & Li, P. (2019). Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 33(5).
- 47- Kuriakose, S., Parenti, P., Cataldo, S., & Annoni, M. (2019). Green-state micromilling of additive manufactured AISI316 L. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 7(1).
- 48- Sadiq, M. A., Hoang, N. M., Valencia, N., Obeidat, S., & Hung, W. N. (2018). Experimental study of micromilling selective laser melted Inconel 718 superalloy. *Procedia Manufacturing*, 26, 983-992.
- 49- Abeni, A., Loda, D., Özel, T., & Attanasio, A. (2020). Analytical force modelling for micro milling additively fabricated Inconel 625. *Production Engineering*, 14(5), 613-627.
- 50- de Assis, C. L. F., Mecelis, G. R., & Coelho, R. T. (2020). An investigation of stainless steel 316L parts produced by powder bed fusion submitted to micro-endmilling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(7), 1867-1880.
- 51- Trimble, D., Agarwal, A., McDonnell, D., Barron, S., Ahearne, E., & O'Donnell, G. E. (2020). Finite element simulation of orthogonal machining of biomedical grade Co–Cr–Mo alloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 28, 8-14.
- 52- Rahul, Y., Vipindas, K., & Mathew, J. (2021). Methodology for prediction of sub-surface residual stress in micro end milling of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 600-612.
- 53- Davoudinejad, A., Li, D., Zhang, Y., & Tosello, G. (2019). Optimization of corner micro end milling by finite element modelling for machining thin features. *Procedia CIRP*, 82, 362-367.
- 54- Yi, J., Wang, X., Jiao, L., Xiang, J., & Yi, F. (2019). Research on deformation law and mechanism for milling micro thin wall with mixed boundaries of titanium alloy in mesoscale. *Thin-Walled Structures*, 144, 106329.
- 55- Attanasio, A., Abeni, A., Özel, T., & Ceretti, E. (2019). Finite element simulation of high speed micro milling in the presence of tool run-out with experimental validations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(1-4), 25-35.

- 56- Wu, Y., Chen, N., Bian, R., He, N., Li, Z., & Li, L. (2020). Investigations on burr formation mechanisms in micro milling of high-aspect-ratio titanium alloy ti-6al-4 v structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 185, 105884.
- 57- Özel, T., Olleak, A., & Thepsonthi, T. (2017). Micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V: 3-D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation. *Production Engineering*, 11(4), 435-444.
- 58- Uçun, İ., Aslantas, K., & Bedir, F. (2016). Finite element modeling of micro-milling: Numerical simulation and experimental validation. *Machining Science and Technology*, 20(1), 148-172.
- 59- Steenhuis, H. J., Fang, X., & Ulusemre, T. (2020). Global diffusion of innovation during the fourth industrial revolution: the case of additive manufacturing or 3D printing. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 17(01), 2050005.
- 60- Duda, T., & Raghavan, L. V. (2016). 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 103-110.
- 61- Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D printing. In *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine* (pp. 1-10). Academic Press.
- 62- Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., & Donmez, A. (2015). Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1).
- 63- Al-Dulimi, Z., Wallis, M., Tan, D. K., Maniruzzaman, M., & Nokhodchi, A. (2020). 3D printing technology as innovative solutions for biomedical applications. *Drug Discovery Today*.
- 64- Najmon, J. C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive manufacturing for the aerospace industry*, 7-31.
- 65- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554.
- 66- Roach, D. J., Hamel, C. M., Dunn, C. K., Johnson, M. V., Kuang, X., & Qi, H. J. (2019). The m4 3D printer: A multi-material multi-method additive manufacturing platform for future 3D printed structures. *Additive Manufacturing*, 29, 100819.
- 67- Popovich, A., & Sufiiarov, V. (2016). Metal powder additive manufacturing. In *New trends in 3D printing*. IntechOpen.
- 68- Moussaoui, K., Rubio, W., Mousseigne, M., Sultan, T., & Rezai, F. (2018). Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 735, 182-190.
- 69- Horn, T. J., & Harrysson, O. L. (2012). Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science progress*, 95(3), 255-282.

- 70- Pham, D. T., & Gault, R. S. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of machine tools and manufacture*, 38(10-11), 1257-1287.
- 71- Zhang, B., Li, Y., & Bai, Q. (2017). Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(3), 515-527.
- 72- Carroll, B. E., Palmer, T. A., & Beese, A. M. (2015). Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 87, 309-320.
- 73- Mantrala, K. M., Das, M., Balla, V. K., Rao, C., & Kesava Rao, V. V. S. (2015). Additive manufacturing of Co-Cr-Mo alloy: influence of heat treatment on microstructure, tribological, and electrochemical properties. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 1, 2.
- 74- Langelaar, M. (2019). Integrated component-support topology optimization for additive manufacturing with post-machining. *Rapid Prototyping Journal*.
- 75- Li, F., Chen, S., Shi, J., Tian, H., & Zhao, Y. (2017). Evaluation and optimization of a hybrid manufacturing process combining wire arc additive manufacturing with milling for the fabrication of stiffened panels. *Applied Sciences*, 7(12), 1233.
- 76- Zaman, H. A., Sharif, S., Kim, D. W., Idris, M. H., Suhaimi, M. A., & Tumurkhuyag, Z. (2017). Machinability of cobalt-based and cobalt chromium molybdenum alloys-a review. *Procedia Manufacturing*, 11, 563-570.
- 77- Disegi, J. A., Kennedy, R. L., & Pilliar, R. (1999, October). Cobalt-base alloys for biomedical applications. Danvers: ASTM.
- 78- Nair, K., Muraleedharan, C. V., & Bhuvaneshwar, G. S. (2003). Developments in mechanical heart valve prosthesis. *Sadhana*, 28(3), 575-587.
- 79- Al Jabbari, Y. S. (2014). Physico-mechanical properties and prosthodontic applications of Co-Cr dental alloys: a review of the literature. *The journal of advanced prosthodontics*, 6(2), 138-145.
- 80- Narushima, T., Mineta, S., Kurihara, Y., & Ueda, K. (2013). Precipitates in biomedical Co-Cr alloys. *Jom*, 65(4), 489-504.
- 81- Koutsoukis, T., Zinelis, S., Eliades, G., Al- Wazzan, K., Rifaiy, M. A., & Al Jabbari, Y. S. (2015). Selective laser melting technique of Co- Cr dental alloys: a review of structure and properties and comparative analysis with other available techniques. *Journal of Prosthodontics*, 24(4), 303-312.
- 82- Al Jabbari, Y. S., Koutsoukis, T., Barmpagadaki, X., & Zinelis, S. (2014). Metallurgical and interfacial characterization of PFM Co–Cr dental alloys fabricated via casting, milling or selective laser melting. *Dental Materials*, 30(4), e79-e88.
- 83- Gupta, K. P. (2005). The Co-Cr-Mo (cobalt-chromium-molybdenum) system. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 26(1), 87.

- 84- Goel, S., Ahlfors, M., Bahbou, F., & Joshi, S. (2019). Effect of different post-treatments on the microstructure of EBM-built Alloy 718. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(2), 673-680.
- 85- Karunakaran, K. P., Suryakumar, S., Pushpa, V., & Akula, S. (2010). Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 490-499.
- 86- Debnath, S., Kunar, S., Anasane, S. S., & Bhattacharyya, B. (2017). Non-traditional micromachining processes: opportunities and challenges. *Non-traditional Micromachining Processes*, 1-59.
- 87- Dornfeld, D., Min, S., & Takeuchi, Y. (2006). Recent advances in mechanical micromachining. *CIRP annals*, 55(2), 745-768.
- 88- Newman, S. T., Zhu, Z., Dhokia, V., & Shokrani, A. (2015). Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, 64(1), 467-470.
- 89- Li, L., Haghghi, A., & Yang, Y. (2018). A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. *Journal of Manufacturing Processes*, 33, 150-160.
- 90- Boswell, B., Islam, M. N., & Davies, I. J. (2018). A review of micro-mechanical cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1), 789-806.
- 91- Balázs, B. Z., Geier, N., Takács, M., & Davim, J. P. (2020). A review on micro-milling: recent advances and future trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-30.
- 92- Masuzawa, T., & Tönshoff, H. K. (1997). Three-dimensional micromachining by machine tools. *CIRP Annals*, 46(2), 621-628.
- 93- Miao, J. C., Chen, G. L., Lai, X. M., Li, H. T., & Li, C. F. (2007). Review of dynamic issues in micro-end-milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31(9-10), 897-904.
- 94- Carou, D., Rubio, E. M., Herrera, J., Lauro, C. H., & Davim, J. P. (2017). Latest advances in the micro-milling of titanium alloys: a review. *Procedia Manufacturing*, 13, 275-282.
- 95- Li, H., Lai, X., Li, C., Feng, J., & Ni, J. (2007). Modelling and experimental analysis of the effects of tool wear, minimum chip thickness and micro tool geometry on the surface roughness in micro-end-milling. *Journal of micromechanics and microengineering*, 18(2), 025006.
- 96- 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(14), 1578-1584.
- 97- De Oliveira, F. B., Rodrigues, A. R., Coelho, R. T., & De Souza, A. F. (2015). Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89, 39-54.

- 98- Zheng, L., Chen, W., & Huo, D. (2019). Experimental investigation on burr formation in vibration-assisted micro-milling of Ti-6Al-4V. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(12), 4112-4119.
- 99- Hashimura, M., Chang, Y. P., & Dornfeld, D. (1999). Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting.
- 100- Kou, Z., Wan, Y., Cai, Y., Liang, X., & Liu, Z. (2015). Burr controlling in micro milling with supporting material method. *Procedia Manufacturing*, 1, 501-511.
- 101- Abushawashi, Y. M. (2013). *Modeling of metal cutting as purposeful fracture of work material*. Michigan State University.
- 102- Johnson, G. R. (1983). A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. *Proc. 7th Int. Sympo. Ballistics*, 541-547.
- 103- Markopoulos, A. P., Vaxevanidis, N. M., & Manolacos, D. E. (2015). Friction modeling in finite element simulation of orthogonal cutting. *Tribology in Industry*, 37, 440-448.
- 104- Usui, E., Shirakashi, T., & Kitagawa, T. (1978). Analytical prediction of three dimensional cutting process—Part 3: Cutting temperature and crater wear of carbide tool.
- 105- Lu, Y., Wu, S., Gan, Y., Zhang, S., Guo, S., Lin, J., & Lin, J. (2016). Microstructure, mechanical property and metal release of As-SLM CoCrW alloy under different solution treatment conditions. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 55, 179-190.
- 106- Mamedov, A., & Lazoglu, I. (2016). An evaluation of micro milling chip thickness models for the process mechanics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87 (5), 1843-1849.
- 107- Wu, X., Li, L., & He, N. (2017). Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting. *Precision Engineering*, 47, 191-196.
- 108- Aurich, J. C., Bohley, M., Reichenbach, I. G., & Kirsch, B. (2017). Surface quality in micro milling: Influences of spindle and cutting parameters. *CIRP Annals*, 66 (1), 101-104.
- 109- Kiswanto, G., Azmi, M., Mandala, A., & Ko, T. J. (2019, October). The Effect of Machining Parameters to the Surface Roughness in Low Speed Machining Micro-milling Inconel 718. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 654, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- 110- Aramcharoen, A., & Mativenga, P. T. (2009). Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, 33(4), 402-407.
- 111- Sahoo, P., Patra, K., Szalay, T., & Dyakonov, A. A. (2020). Determination of minimum uncut chip thickness and size effects in micro-milling of P-20 die steel using surface quality and process signal parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11), 4675-4691.

ÖZGEÇMİŞ

Adı- Soyadı: Mehmet Akif OYMAK

Lisans: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
2016, KAYSERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR:

- 1- Oymak, M. A. , Bahçe, E. & Gezer, İ. (). Investigation Of Cryogenic Cooling Effect With Finite Element Method In Micro Milling Of Ti6Al4V Material . International Journal of Innovative Engineering Applications , , . DOI: 10.46460/ijiea.948297
- 2- Oymak, M.A., Bahçe, E. & Gezer, İ., Mikro İmalat Teknolojileri ve Mikro Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi. In 2021 International Congress On Social Policies And Inter Disciplinary Scientific Researches-II: pp 78-87
- 3- Oymak, M.A., Bahçe, E. & Gezer, İ., Cocr Alaşımının 3d Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Mikro Frezelemesinde Takım Kesme Açılarının Kesme Sıcaklıkları Üzerinde Etkisinin Değerlendirilmesi. In 2021 International Congress On Social Policies And Inter Disciplinary Scientific Researches-I: pp 88-99.