



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Biyolojik olarak parçalanabilen implant üretiminde magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesinin değerlendirilmesi

Evaluation of micro milling of magnesium alloys in biodegradable implant production

Yazar(lar) (Author(s)): Musa BİLGİN^{1,2}, Zekai Murat KILIÇ²

ORCID¹: 0000-0001-8482-8291

ORCID²: 0000-0002-7700-3360

To cite to this article: Bilgin M., Kılıç Z. M., “Evaluation of micro milling of magnesium alloys in biodegradable implant production”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Bilgin M., Kılıç Z. M., “Biyolojik olarak parçalanabilen implant üretiminde magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesinin değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1466579

Biyolojik Olarak Parçalanabilen İmplant Üretiminde Magnezyum Alaşımlarının Mikro Frezelenmesinin Değerlendirilmesi

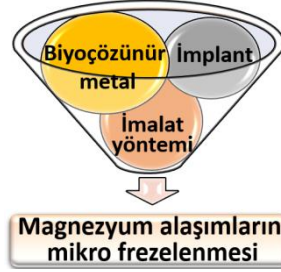
Evaluation of Micro Milling of Magnesium Alloys in Biodegradable Implant Production

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Biyobozunur metallerden magnezyum alaşımları / Magnesium alloys in biodegradable metals
- ❖ İmplant üretiminde mikro frezelemenin önemi / The importance of micro milling in implant manufacturing
- ❖ Mikro frezelemede verimlilik / Efficiency in micro milling
- ❖ Magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesi / Micro milling of magnesium alloys

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Mg alaşımları ve mikro frezelemenin biyo-implant üretimindeki önemi, işleme parametrelerinin mikro frezelemeye etkisi ve Mg alaşımlarının mikro frezeleme ile imalatı değerlendirilmektedir. / The importance of Mg alloys and micro-milling in bio-implant manufacturing, the effect of processing parameters on micro-milling, and the manufacturing of Mg alloys by micro-milling are evaluated.



Şekil. Magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesi / Figure. Micro milling of magnesium alloys

Amaç (Aim)

Mg alaşımlarının mikro frezelenmesiyle yüksek nitelikli ve mikro cerrahiye uygun biyo-implant üretiminin sağlanması. / Ensuring the production of high-quality bio-implants suitable for microsurgery by micro-milling of Mg alloys.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Mg alaşımları ve mikro frezelemenin biyo-implant üretimindeki önemi, işlem parametrelerinin mikro frezeleme üzerindeki etkisi ve Mg alaşımlarının mikro frezeleme süreci ele alınmaktadır. / The importance of Mg alloys and micro-milling in bio-implant production, the effect of process parameters on micro-milling and the micro-milling process of Mg alloys are discussed.

Özgünlük (Originality)

Biyoçözünür Magnezyum alaşımlarının mikro frezeleme yöntemiyle işlenebilirliği bir bütün olarak ele alınmış, biyo-implant üretiminde imalat verimliliği ve kalitesinin sağlanmasına yönelik hususlar tartışılmıştır. / The machinability of the biodegradable magnesium alloys are discussed comprehensively by the micro-milling method, and issues regarding ensuring manufacturing efficiency and quality in bio-implant manufacturing are addressed.

Bulgular (Findings)

Mg bazlı biyo-implantların, mikro frezeleme ile yüzey modifikasyonu yapılarak performansları artırılabilir. / The performance of Mg-based bio-implants can be increased by surface modification using micro milling.

Sonuç (Conclusion)

Uygun işlem parametreleri ile magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesi yoluyla yüzey modifikasyonu sağlanarak ve korozyon direncinin artırılmasına artırılabilir. / By determining the process parameters, surface modification of magnesium alloys through micro milling can be achieved, thereby enhancing corrosion resistance

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Biyolojik Olarak Parçalanabilen İmplant Üretiminde Magnezyum Alaşımlarının Mikro Frezelenmesinin Değerlendirilmesi

Derleme Makalesi /Review article

Musa BİLGİN^{1,2*}, Zekai Murat KILIÇ²

¹Hacettepe ASO 1.OSB Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye
² Department of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester, Manchester, UK
(Geliş/Received : 07.04.2024 ; Kabul/Accepted : 12.06.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 06.08.2024)

ÖZ

Biyolojik olarak parçalanabilen implantların çıkarılması için ikinci bir ameliyata gerek olmaması iyileşme sürecini hızlandırırken sağlık risklerini, maliyetleri ve yara izlerini azaltmaktadır. Toksik madde bırakmadan çözünebilir kabiliyetleri ve mekanik özellikleri Magnezyum alaşımların önemini daha da artırmaktadır. Mikro cerrahideki gelişmeler ve implant üretimindeki kalite standartları göz önüne alındığında mikro frezeleme en uygun üretim yöntemidir. Mikro frezeleme ile implantın yüzey modifikasyonu sağlanarak implantın bozunma davranışı geliştirilebilmektedir. Fakat mikro işleme makro işleme ile kıyaslandığında boyut etkisi, çapak oluşumu ve takım sapması başlıca sorunlardır. Literatür incelendiğinde magnezyum alaşımlarının mikro frezelemesinin araştırılmasının sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu çalışmada magnezyum alaşımlarının implant uygulamalarındaki önemi ve mikro işleme de karşılaşılan sorunlar birlikte değerlendirilmiştir. Bu sayede mikro frezeleme yöntemi ile biyoçözünbilir magnezyum implantların üretilmesine katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum, mikro frezeleme, implant, biyoçözünür metal.

Evaluation of Micro Milling of Magnesium Alloys in Biodegradable Implant Production

ABSTRACT

Biodegradable implants eliminate the need for a second surgery to remove them, thereby accelerating the healing process and reducing health risks, costs, and scarring. The ability of these implants to dissolve without leaving toxic substances, along with their favorable mechanical properties, reinforces the significance of magnesium alloys for implant applications. Considering the advancements in microsurgery and quality standards in implant manufacturing, micro milling is the most suitable production method. Surface modification of implants by micro milling can improved the degradation behavior of the implant. However, compared to macromachining, challenges such as increased tool wear and maintaining tight tolerances persist. The literature review reveals limited research on the micro milling of magnesium alloys. This study evaluates the importance of magnesium alloys in implant applications and addresses challenges associated with micromachining them. In this way, it is aimed to contribute to the manufacturing of biodegradable magnesium implants by the micro milling method.

Keywords: Magnesium, micro milling, implant, biodegradable metal .

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tıbbi implant uygulamalarında yaygın olarak kullanılan titanyum (Ti) alaşımı, kobalt (Co) alaşımı ve paslanmaz çelik gibi metalik malzemelerin, vücutta kalıcı bir şekilde bulunmaları, bir dizi soruna neden olmaktadır [1 – 3]. Bu sorunlar, uzun süreli migrasyon, fiziksel tahriş, trombüs oluşumu, kronik iltihaplanma ve stres kalkını oluşumu gibi durumları içerirken[4], implantın çıkarılması için ikincil bir ameliyat gerekmektedir [5]. Kalıcı implantlar ayrıca gevşeme, yer değiştirme veya kırılma gibi komplikasyonlara neden olabilmektedir. Bu durumlar hastanın iyileşme sürecini etkileyerek yeniden ameliyat riskini artırır. Ayrıca, vücutta bulunan kalıcı implant tıbbi görüntüleme işlemlerini olumsuz etkilemektedir [6].

ASTM-F3160'da "emilebilir metalik malzemeler" olarak sınıflandırılan biyolojik olarak parçalanabilen metaller [7], canlı bünye içinde kademeli bir şekilde korozyona uğrayarak iyileşme sürecinde doku ile birleşir ve iyileşme tamamlandığında tamamen çözünerek doğal yollarla vücuttan atılan alerjik ve kanserojen olmayan metaller olarak tanımlanmaktadır [8]. Bu tür biyolojik olarak parçalanabilen implantlar, geleneksel implantlarla karşılaştırıldığında, ikincil bir ameliyatı önleyerek iyileşme sürecini hızlandırırken sağlık risklerini, maliyetleri ve yara izlerini azaltmaktadır[9]. Biyolojik olarak parçalanabilen implantlar; ortopedik uygulamalarda iyileşen kemiğe kademeli yük aktarımına izin vererek stres kalkını etkisi azaltmaktadır [10]. Ayrıca pediatrik, ortopedik ve kardiyovasküler uygulamalar dahil olmak üzere spesifik uygulamalarda büyük avantaj sunmaktadır [11] Biyoçözünür malzemelerin bir diğer avantajı da genç hastalarda

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : musabilgin@hacettepe.edu.tr,
musa.bilgin@manchester.ac.uk

büyümeye uyum sağlama yeteneğidir [12]. Giderek artan sayıda bilim adamı, ortopedik implantlarda biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerin uygulanmasına odaklanmaktadır [13].

Magnezyum (Mg), demir (Fe) ve çinko (Zn) gibi biyolojik olarak parçalanabilen metaller, implant uygulamalarında tercih edilen başlıca malzemelerdir [8]. Mg alaşımları, diğer alaşımlara kıyasla daha iyi bir biyoyumluluğa ve osteopromotik özelliklere sahiptir [9]. Mg alaşımlarının kemik dokusuna yakın elastikiyet modülü ve mekanik özellikleriyle insan kemiğine en yakın metal olması biyometal için önemini daha da artırmaktadır [14]. Bu avantajlarının yanında Mg alaşımları, insan vücudundaki temel elementlerden biri olduğu [15] için toksik madde bırakmadan tamamen çözünebilir [16]. Mg alaşımlarının; biyolojik olarak parçalanabilen metaller arasında sahip olduğu avantajlar [17] biyolojik olarak parçalanabilen implant araştırmalarının odak noktasında bulunmasını sağlamaktadır [18].

İmplant üretimindeki artan geometrik ve ölçü toleransları ile yüzey pürüzlülüğü gereksinimleri [19], son on yılda imalat teknolojilerine olan talebi artırmıştır [20]. İstenilen kalite standartlarına ulaşmak [21 – 22] için belirli sınırlama ve kriterler dikkate alındığında talaşlı imalat yöntemlerinin tercih edilmesi kaçınılmazdır [23 – 24]. İstenilen hassasiyet ve yüzey pürüzlülük gereksinimlerinin yanı sıra mikro cerrahideki gelişmeler dikkate alındığında bu implantların mikro frezeleme ile üretilmesi en yaygın tercih edilen üretim yöntemi olmaktadır.

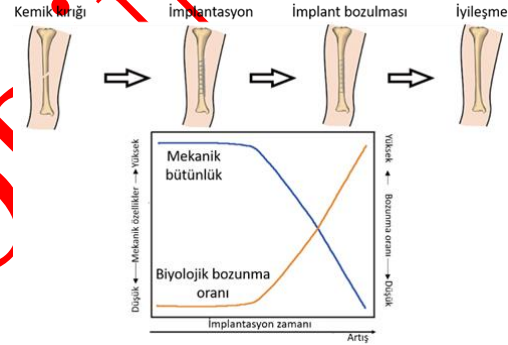
Devrim niteliğinde bir biyomalzeme olarak kabul edilen Mg alaşımları [25] ve implant üretimindeki kalite standartları göz önüne alındığında, Mg alaşımlarının mikro frezeleme ile işlenmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. İş parçasına uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi, gerekli üretim kalitesinin sağlanması ve işlem verimliliğini artırılması hayati öneme sahiptir. Bu kapsamda Mg alaşımlarının mikro frezeleme kabiliyetinin değerlendirilmesi ve mikro frezeleme ile üretilebilirliğinin geliştirilmesi için bu derleme çalışması yapılmıştır.

Derleme çalışmasının ikinci bölümünde; magnezyum alaşımlarının implant malzemesi olarak kullanıldığında

sahip olduğu olumlu yönler, olumsuz yönler ve günümüzde implant olarak tercih edildiği yerler değerlendirilmiş; üçüncü bölümünde mikro frezelemenin implant üretiminde sağladığı avantajlar incelenmiş; dördüncü bölümünde mikro işlemede üretim parametrelerinin etkileri incelenmiş ve beşinci bölümünde ise günümüze kadar magnezyum alaşımlarının mikro frezeleme üzerine yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu sayede farklı alanların bir arada değerlendirildiği bir literatür incelemesi gerçekleştirilmiştir.

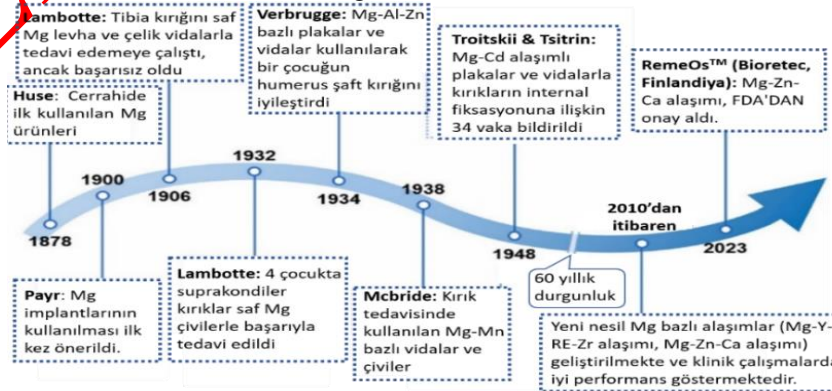
2. İMPLANT UYGULAMALARINDA MAGNEZYUM ALAŞIMLARI (MAGNESIUM ALLOYS in IMPLANT APPLICATIONS)

Mg bazlı implantların; iyileşme sürecinde canlı bünye içinde bozularak yeni doku yer ile değiştirmesi (Şekil 1) ve süreç sonunda tamamen çözünerek implantın insan vücudundan çıkarılması için ikinci ameliyat gereksinimini ortadan kaldırması, olası komplikasyonları ve tıbbi maliyeti önemli ölçüde azaltmaktadır [26].



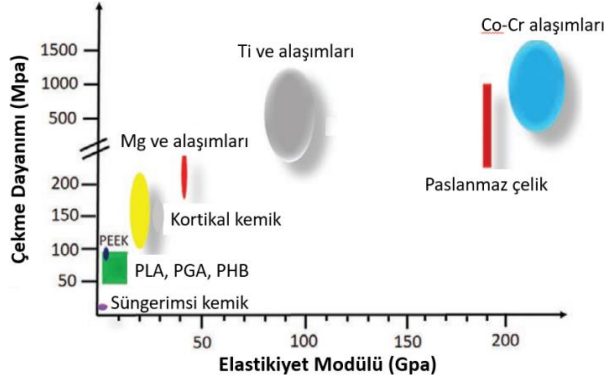
Şekil 1. Kemik kırığı iyileşmesinde magnezyum bazlı bir implantın beklenen bozunma davranışı (Expected degradation behavior of a magnesium-based implant in bone fracture healing)[27]

Magnezyumun cerrahide ilk kullanımı yaklaşık 150 yıl öncesine dayanmasına rağmen günümüze kadar geçen süreçte 60 yıllık bir duraklama dönemi olmuştur (Şekil 2). Bu durğunluğun bitmesiyle birlikte magnezyum alaşımlarının biyolojik olarak parçalanabilen implant uygulamalarında araştırılması gün geçtikçe artmıştır [6].



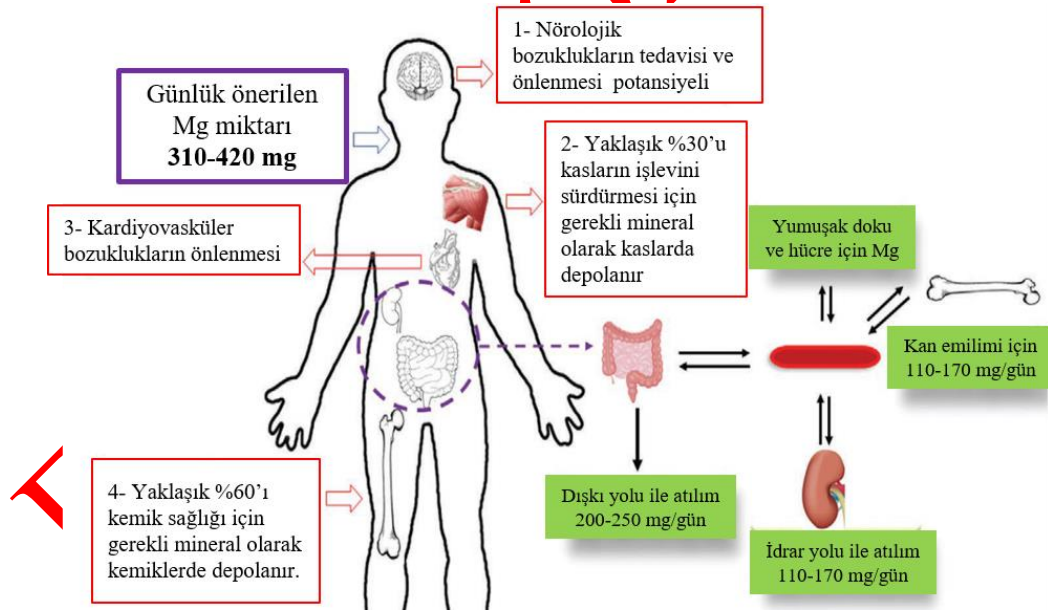
Şekil 2. Magnezyum alaşımlarının implant uygulamalarının gelişim süreci (Development process of implant applications of magnesium alloys) [6]

Magnezyum alaşımlarının elastikiyet modülü (45 GPa) ve yoğunluğu (1,74 ila 1,84 g/cm³), kemik dokusunun elastikiyet modülüne (15–25 GPa) ve yoğunluğuna (1,8–2,1 g/cm³) oldukça yakındır (Şekil 3). Bu benzerlik, Mg alaşımlarının kemik-implant ara yüzünde stres kalkını oluşumunu azaltarak biyolojik olarak parçalanabilen implant uygulamalarında önemli bir avantaj sağlamaktadır [28 -29].



Şekil 3. Kemik, magnezyum alaşımları ve diğer implant malzemelerinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of bone, magnesium alloys and other implant materials) [30]

Magnezyum (Mg) metalinin vücut içerisindeki fizyolojik sıvılarla etkileşime girmesi sonucunda doğal bir şekilde



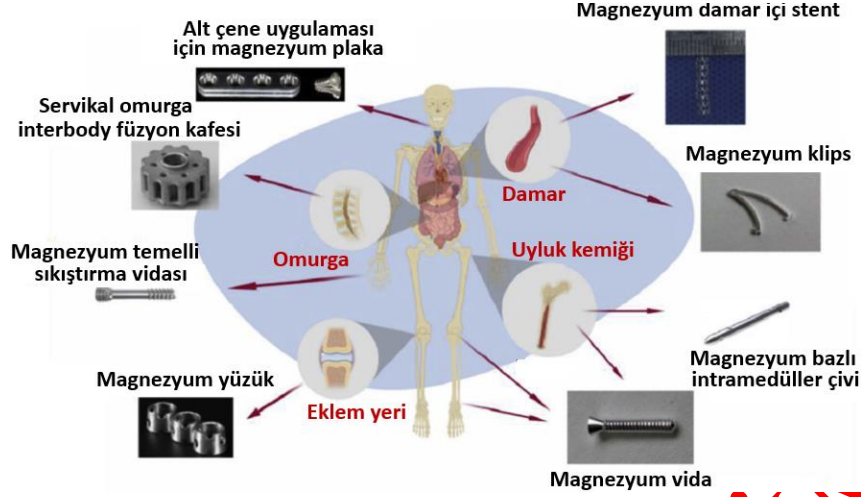
Şekil 4. Biyolojik olarak parçalanabilir Mg bazlı ortopedik implantların biyouyumluluğu (Biocompatibility of biodegradable Mg-based orthopedic implants) [30]

Günümüzde; MAGNEZIX® (Mg-Y-RE-Zr) ve RESOMET™ (Mg-Ca alaşımı) gibi markalar; Mg bazlı alaşımlardan yapılan biyolojik olarak parçalanabilen ortopedik implantların satışını gerçekleştirmektedir. Şu anda kullanılan kemik implantları arasında kemik vidaları[40], pimler, cerrahi plakalar [41], klipler, dikişler ve teller bulunmaktadır [42]. Ayrıca; koroner damar müdahalesi için Mg'den yapılmış emilebilir yapı

Mg iyonlarına (Mg²⁺) ve hidrojen gazına ayrıştığı bilinmektedir. Mg²⁺ iyonları, insan vücudundaki 300'den fazla enzimatik metabolik süreçte yoğun olarak rol oynayan ve insan vücudunda en bol bulunan iyonlardan biridir (Şekil 4) [31]. Fazla Mg iyonlarının herhangi bir yan etkiye neden olmadan idrar yoluyla hızlıca atılabilmektedir [32]. Mg'un bozunması esnasında açığa çıkan Mg iyonları; kemiğin yeniden oluşumunu desteklemekte, kemik hastalıklarının iyileşme süreçlerini hızlandırmakta [33] ve yeni kan damarlarının, kemik ve yumuşak dokuların oluşumunu teşvik etmektedir [34 -35]. Bu süreç boyunca oluşan Mg iyonlarının toksik olmaması, Mg alaşımlarının zorlu kemik hastalıklarının tedavisinde daha uygun bir seçenek olmasını sağlamaktadır [26].

Magnezyum alaşımlarının biyobozunur malzeme olarak önemli dezavantajı ise saf magnezyumun fizyolojik ortamda hızla bozularak implantların mekanik bütünlüğünün erken kaybolmasıdır [36]. Bu nedenle, potansiyel implant uygulamaları için Mg bazlı alaşımların korozyon direncini arttırmak kritik öneme sahiptir [37]. Mg bazlı implantların korozyon direnci ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için uygun alaşım elementlerinin seçimi büyük önem taşımaktadır [38]. Ayrıca, alaşımlamanın yanı sıra yüzey kaplama, ileri işleme ve yüzey modifikasyonu gibi yöntemlerle Mg bazlı implantların bozunabilirliğini iyileştirmek mümkündür [39].

iskeleleri de (Şekil 5) araştırılmaktadır [43]. Magnezyum alaşımları içinde WE43 klinik öncesi ve klinik deneylerde biyolojik olarak parçalanabilen implant uygulamalarında başarılı bir magnezyum alaşımıdır [44]. WE 43 kullanıldığı kemik vidaları ve vasküler stentler sırasıyla 2013 ve 2016 yıllarında CE sertifikası almıştır [45 -46].

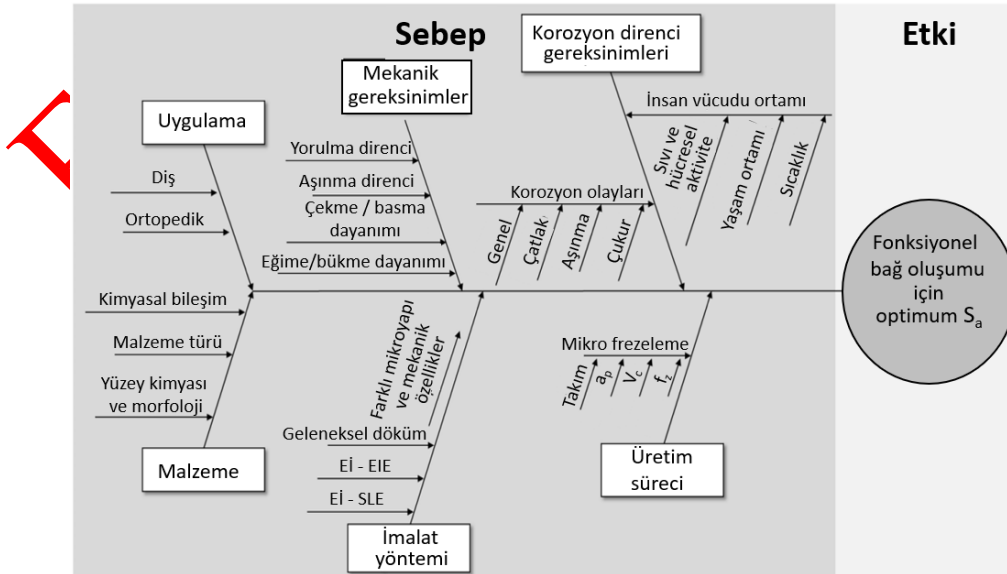


Şekil 5. Magnezyum alaşımlarının kullanıldığı implant uygulamaları (Implant applications to use magnesium alloys) [47]

Magnezyum alaşımlarının biyolojik olarak parçalanabilir implant uygulamalarında büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Ancak, saf magnezyumun fizyolojik ortamda hızla bozunarak implantların mekanik bütünlüğünü kaybetmesi önemli bir dezavantajdır. Bu nedenle, magnezyum alaşımlarının korozyon direncini artırmak ve mekanik özelliklerini geliştirmek için uygun alaşım elementlerinin seçimi, yüzey kaplama, ileri işleme ve yüzey modifikasyonu gibi yöntemler kritik öneme sahiptir. Özellikle mikro frezeleme yöntemi ile yapılacak yüzey modifikasyonu, magnezyum alaşımlarından üretilen implantların ömrünü olumlu yönde etkileyebilmektedir. Magnezyum alaşımlarının mikro frezeleme yöntemi ile işlenmesi, gelecekte daha güvenli ve etkili implant uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

3. İMPLANT UYGULAMALARINDA MİKRO FREZELEME (MICRO MILLING in IMPLANT APPLICATIONS)

İmplant üretim süreçlerinde kullanılan yöntemler arasında döküm, katmanlı imalat ve lazerle işleme gibi çeşitli teknikler bulunmaktadır [48 – 51]. Fakat bu yöntemlerle üretilen implantlarda yüzey bütünlüğü ve yüzey pürüzlülüğünü hedeflenen kalitede olmamasına ek olarak mikro çatlak ve oksit tabakası oluşumu gibi kusurlar meydana gelmektedir [52 – 54]. Bunlara ek olarak biyomedikal ürünlerin belirli bir sterilizasyonu koşullarında imalatı, implant üzerindeki detayların tolerans ve yüzey kalitesi sınırları içerisinde kalabilmesi için genellikle ikincil bitirme işlemleri (Şekil 6) gereklidir [55 – 57]. Mikro frezeleme, özellikle detaylı işleme ve yüzey kalitesinin sağlanması gereken durumlarda tercih edilen bir üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemle, implant yüzeyinde istenilen detaylar elde edilerek ve implantla kemiğin yapısal ve fonksiyonel bağ oluşumu (osseointegrasyon) süreci desteklenerek implantın biyolojik uyumluluğu artırılabilir. Ayrıca, mikro frezeleme sayesinde implantın ıslanabilirlik özelliği gibi önemli faktörler üzerinde de kontrol sağlanabilir [24, 58].



Şekil 6. İmplant üretim süreci faktörleri (Factors of implant manufacturing process) [58]

İmplantların etkili bir şekilde entegrasyonu için yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi kritik öneme sahiptir [59 - 61]. Bu iyileştirme, yüzey dokularının tasarımı, mikro/nano ölçekteki yüzey topografyası, pürüzlülük derecesi ve geometrik özelliklerin dikkatlice düzenlenmesini (Şekil 7) içerir [62, 63]. Bu yapısal modifikasyonlar, implantın yüzeyinde biyoaktif ve biyomimetik bir yapı oluşturarak hücre adezyonunu artırır [64, 65]. Bu durum, doku-implant etkileşimini güçlendirir ve mekanik stabiliteyi artırarak bağışıklık sisteminin verdiği tepkilerin azalmasına katkıda bulunur [66 - 68]. Ayrıca, implantın yüzey özellikleri, biyofonksiyonelliği, yorulma ömrünü ve Mg bazlı alaşımların bozunma davranışını önemli ölçüde etkileyerek, implantın genel performansını ve uzun vadeli kalıcılığını etkilemektedir [69 - 71]. Bu nedenle, implant tasarımında ve üretiminde yüzey özelliklerinin dikkate alınması, biyomedikal uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır [72 - 74].



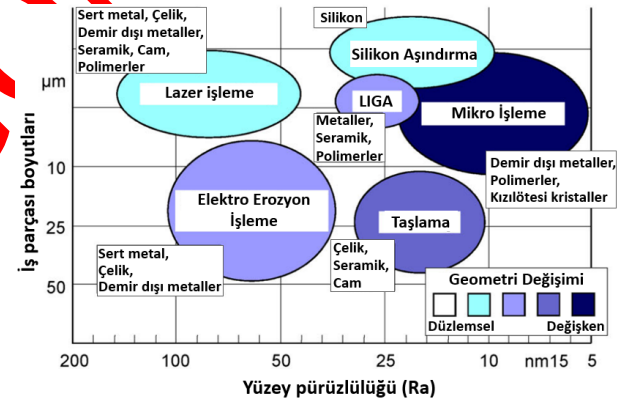
Şekil 7. İmplant başarısını etkileyen faktörler (Factors influencing implant success)[75]

Yüzey modifikasyonu için sıklıkla başvurulan fiziksel ve kimyasal teknikler (Şekil 8), implantların mekanik ve kimyasal özelliklerini etkileyerek enfeksiyon riskini artırabilir. Bu tekniklerin kullanımı sırasında yüzeylerde kalıntıların hapsolmesi ve tehlikeli bakteri üremesi gibi olumsuzluklar doğabilir [74, 76]. Mikro frezeleme, implantların temel özelliklerini bozmadan istenen yoğunluk, boyut ve şekilde yüzey topografyalarını değiştirmek biyolojik aktiviteyi artırabilir [60, 67, 74]. Yüzey pürüzlülüğü, implantasyon sürecinin başarısını doğrudan etkileyen önemli bir faktör olarak kabul edilir ve yüzey modifikasyonu ile bakteri yapışmasının önlenmesinde kritik bir rol oynar [77 - 79]. Magnezyum implantların yüzey özellikleri belirli endikasyonlara bağlı kalınarak bireysel bozunma kinetiği önceden ayarlanabilir. İşlem parametreleri veya takım geometrilerinin iş parçası özellikleri üzerindeki etkisi implantların bozunma davranışını değiştirebilmektedir [69]. Mikro frezeleme, implant tasarımında sınırlamaların kaldırılmasına olanak sağlayarak üretim esnekliği sunar.



Şekil 8. Yüzey modifikasyon yöntemleri (Surface modification methods) [80]

Şekil 9'da mikro işlemenin; lazer işleme, elektro erozyon (EDM), taşlama ve LIGA (Litografi, Elektro-kaplama, Presle kalıplama / Lithographie, Galvanoformung, Abformung) işlemi gibi diğer işleme yöntemlerine göre üstünlükleri görülmektedir. Bu üstünlükler yüzey pürüzlülüğü, ürün boyutu ve imalatı gerçekleştirilebilen geometri çeşitliğidir. Özellikle implantın yüzey pürüzlülüğü; fonksiyonel bağ oluşumu etkisinin yanı sıra yorulma, aşınma, korozyon direnci gibi diğer önemli parametreleri de direkt etkilemektedir [81]. Mikro frezeleme, implantların tribolojik performansını artırarak implant ömrünün uzatılmasında önemli bir rol oynamaktadır [76].



Şekil 9. Mikro işlemenin diğer yöntemlere göre kıyaslanması (Comparison of micromachining with other methods) [82]

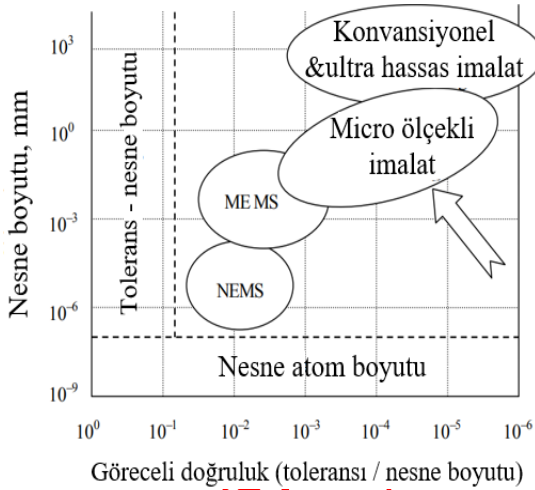
Bu işlem sırasında kesme koşulları, implantların yüzey özelliklerini etkileyen kritik faktörler arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, implant imalatında işlem verimliliğini sağlamak adına kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve çapak oluşumu üzerine detaylı çalışmalar yürütülmektedir. İmplantların istenen üç boyutlu geometrik yüzey şeklini elde etmek için mikro dokuların ve mikro desenlerin hassas ve etkin bir şekilde üretilmesi, implantların biyolojik uyumluluğunu ve fonksiyonel performansını artırarak cerrahi başarısını olumlu yönde etkiler [83, 84].

Mikro frezeleme, implant üretiminde yüzey kalitesi ve detaylı işleme gereksinimlerini karşılayan esnek ve etkili bir yöntemdir. Mikro frezeleme ile implantların biyolojik

uyumluluğu ve mekanik kararlılığı ile birlikte implantla kemiğin yapısal ve fonksiyonel bağ oluşumu artırılabilir. Mikro frezeleme ile gerçekleştirilecek; yüzey modifikasyonu sayesinde enfeksiyon riskini azaltılmasıyla birlikte, Mg alaşımının bozunması sürecini olumlu yönde etkileyerek implant ömrünü de uzatılabilir. Mikro frezeleme, biyomedikal alanda implant üretiminde hem verimliliği hem imalat kalitesinin artırılması ile implant başarısının artması için kullanılacak en ideal yöntemlerden biri olarak ortaya çıkmaktadır.

4. MİKRO FREZELEME (MICRO MILLING)

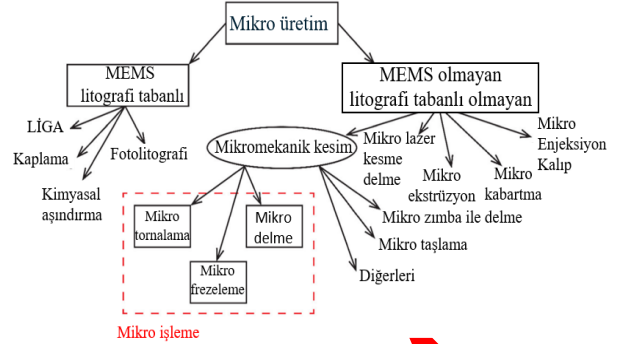
İmplant edilebilir ekipmanların, fonksiyonel ihtiyaçları ve biyolojik uyumluluk gereklilikleri göz önünde bulundurulduğunda, biyoyumlu malzemelerin karmaşık mikro ölçekli geometrilerle hassas bir şekilde işlenmesi kritik öneme sahiptir [85 – 87]. Bu sorunun üstesinden gelmek için, makro üretim ile mikro elektromekanik sistemler (MEMS) ve nano elektromekanik sistemler (NEMS) üretim arasındaki boşluğu dolduran mikro işleme yöntemleri (Şekil 10), en ideal yöntemler olarak ortaya çıkmaktadır [88, 89].



Şekil 10. Mikro işlemenin üretim sistemlerindeki yeri (The place of micromachining in production systems) [88]

İmplantlar, genellikle karmaşık bir şekil yapısına sahip olmalarının yanı sıra minyatür ve mikro boyutlara sahiptirler [61]. Bu nedenle, implant üretiminde, cerrahi gereksinimleri karşılayabilecek üç boyutlu geometrik yüzey şekillerinin hızlı ve doğru bir şekilde üretilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, implantların geometrik sınırlamalara bağlı kalınarak işlenmesi, mikro frezeleme gibi hassas işleme yöntemlerinin önemini artırmaktadır [90 – 94]. Birçok mikro işleme yöntemi olmasına karşın (Şekil 11) mikro frezeleme, yüksek talaş kaldırma oranlarına, düşük yüzey pürüzlülüğüne, yüksek işleme doğruluğuna ve esnekliğe sahip olmasıyla, karmaşık şekilli üç boyutlu (3D) minyatür bileşenlerin steril bir şekilde üretilmesinde kilit bir rol oynamaktadır [94 – 96]. Bu avantajlarının yanında sağladığı düşük maliyet nedeniyle mikro frezeleme, mikro işleme

alanında hızla gelişen ve popüler hale gelen bir yöntemdir [97 – 100].



Şekil 11. Mikro işleme teknolojileri (Micro machining technologies) [101]

Mikro frezeleme yüksek teknoloji gerektiren katma değerlerin ürünlerin üretilmesinde temel bir işleme yöntemi olarak tercih edilmektedir [102]. Ancak, magnezyum alaşımları gibi stratejik metallerin [103, 104] mikro işleme ile imalatına dair çalışmaların kısıtlı olduğu gözlemlenmektedir [105]. Magnezyumun alaşımlarının alev alma özelliği, yüksek kesme hızlarında işlenmesi sırasında talaşlı imalatı zorlaştırabilmektedir [106, 107].

Mikro frezeleme, makro frezelemeye göre belirgin farklılıklar içermekte olup, özellikle takım boyutları ve sınırlı talaş derinliği gibi temel parametrelerde ayrışmaktadır. 1 mm çapından daha küçük takımların kullanıldığı mikro frezelemede, takım boyu ve çap oranının yüksek olması, titreşim veya salgı sonucu takım kırılması gibi riskleri beraberinde getirmektedir [108]. Ayrıca mikro frezelemenin rijit işlemlerde takımın eksen değiştirmesi sırasında ivmelenme sorunları takım ömrü ve imalat kalitesini doğrudan etkileyen faktörler olarak öne çıkmaktadır. Mikro frezeleme sürecinde, talaş kalınlığı, uç yarıçapı ve iş parçasının en küçük tane boyutu gibi faktörler, işlem performansını doğrudan etkiler [109 – 112]. İşlem esnasında boyut etkisinden dolayı kesilmemiş talaş kalınlığının (h) en düşük talaş kalınlığı (h_m) değerinden düşük sürme etkisi (elastik geri toparlanma) oluşturarak talaş kaldırma mekanizmasını değiştirir. Bu durum yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemekte hatta talaş oluşumunu engellemektedir [113 – 116]. Ayrıca, mikro frezeleme esnasında kaldırılan talaş miktarı ile oluşan çapak miktarı kıyaslandığında, çapak oluşumu en önemli sorunlardan biri haline gelmektedir [110, 117, 118].

Mikro frezeleme, karmaşık şekilli üç boyutlu (3D) minyatür bileşenlerin steril bir şekilde üretilmesine olanak tanıyan yüksek talaş kaldırma oranları, düşük yüzey pürüzlülüğü, yüksek işleme doğruluğu ve esneklik avantajları sunmaktadır. Ancak, mikro frezelemenin bazı zorlukları da bulunmaktadır. Mikro frezeleme sürecinde kullanılan takım çap/boy oranının küçük olması, titreşim veya salgı sonucu takım kırılması gibi riskleri artırmaktadır. Talaş kalınlığı ve uç yarıçapı arasındaki

ilişkinin neden olduğu sürme etkisi, talaş kaldırma mekanizmasını değiştirerek yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkileyebilir ve hatta talaş oluşumunu engelleyebilir. Ayrıca, mikro frezelemede çapak oluşumu önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır.

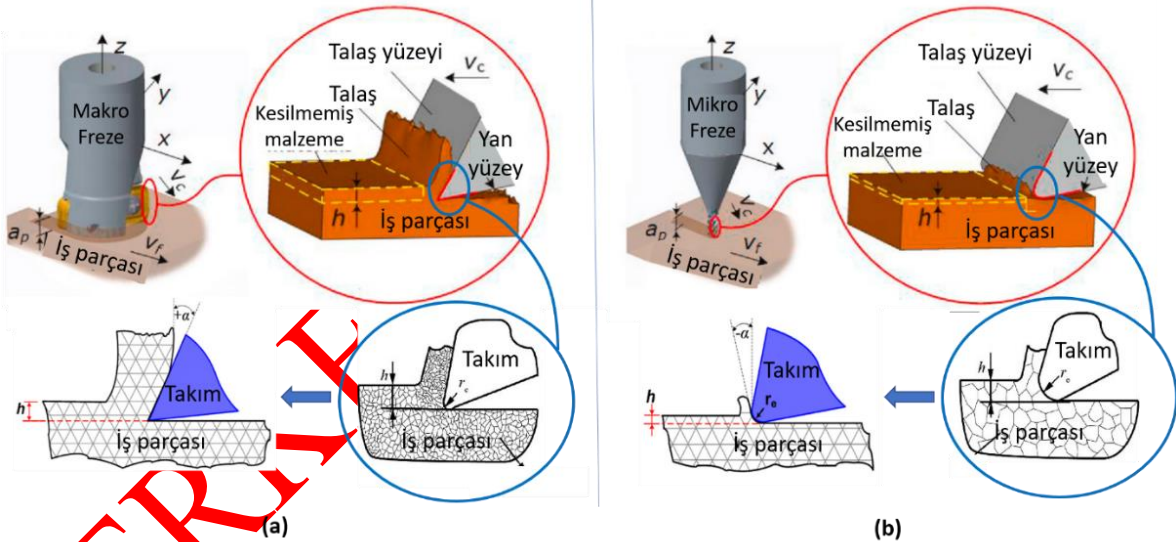
4.1. Boyut etkisi (Size Effect)

Makro işlemede, işlenen malzemeden daha sert bir kesicinin kesme kenarının keskin olduğu (Şekil 12.a) ve takım ile iş parçası arasında sürtünmenin minimal olduğu, kesme işleminin mekanik kuvvetlerle gerçekleştiği ve sonucunda talaş oluştuğu bilinmektedir. Ancak, mikro ölçekte işleme yapıldığında, boyut ölçeğinden kaynaklanan farklılık nedeniyle temel işleme mekanizmaları değişiklik gösterir. Özellikle kesici takımın kesme kenar yarıçapı, işlemede deforme olmamış talaş kalınlığı ve malzemenin tane boyutuyla karşılaştırılabilir olduğundan (Şekil 12.b) mikro frezelemede geçerli mekanik talaş kaldırma mekanizması farklı bir yapıya sahiptir. Bu sebeple, mikro işleme için özel olarak uyarlanmış işleme stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir [119 – 121]. Bu işlem stratejisi talaş kalınlığının (h) kesme kenarı yarıçapına (r_c) oranı, frezeleme yöntemi (aşağı yönlü, yukarı yönlü), takımın yan kayma değeri (a_e) ve diğer işlem parametrelerinin uygun değerlerinin seçilmesi ile bir

bütün olarak elde edilebilir. Bir sonraki süreçte; lazer destekli, ısıl destekli ve titreşim destekli üretim ortamlarının oluşturulması da yeni stratejilerin geliştirmesi için önem arz etmektedir.

Mikro işlemede, kesilmemiş talaş kalınlığı (h), kesme kenarı yarıçapı (r_c) ve iş parçası malzemesinin mikro yapısındaki tane boyutu kritik bir öneme sahiptir. Bu faktörlerin göz önünde bulundurulmasıyla, mikro işleme için radyüslü bir kesme kenarı içeren ve sürme etkisinin (veya elastik toparlanma) hesaba katıldığı kesme modelinin kullanılması gerekmektedir [89, 122].

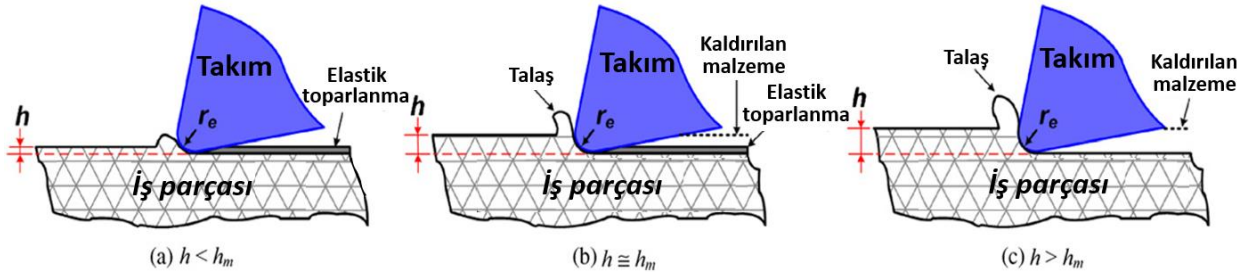
Sürme etkisi; talaş kalınlığı (h) ve kesici takım kesme kenarı yarıçapı (r_c) ile doğrudan ilişkilidir. Deforme olmamış talaş kalınlığının kesme kenarı yarıçapına oranı; etkin talaş açısını talaş kalınlığını, talaş oluşumunu ve spesifik kesme enerjisini etkilemektedir [123]. Minimum talaş kalınlığının kesici kenar uç yarıçapına eşit veya daha az olması ($h_m \leq r_c$) durumunda (Şekil 13.a ve b); kesici takım pozitif talaş açısına ($+\alpha$) sahip olmasına karşın negatif bir talaş açısı ($-\alpha$) karakteri sergilemektedir (Şekil 12.b) ve sürtünme ile sürme olayları daha belirgin hale gelecek talaş oluşumu engellenecektir. Bu durum; takımın geçtiği yerde iş parçası malzemesinin sıkıştırılarak elastik ve plastik deformasyona uğramasına neden olacaktır [115, 120, 121, 124].



Şekil 12. Makro ve mikro frezelemede işleme süreçleri (Machining process in macro and micro milling) [120, 125, 126]

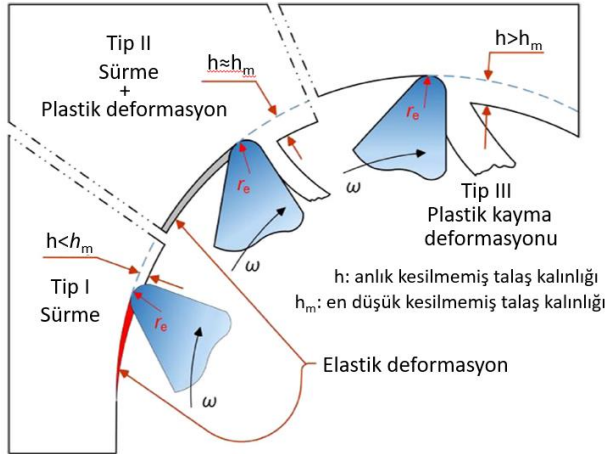
İşlem esnasında talaş kalınlığı en düşük talaş kalınlığından ($h < h_m$) küçük olduğunda, kesici takım altında kalan malzemeye baskı uygular ve talaş oluşumu engellenir (Şekil 13.a) [120] Bu süreçte, malzeme takımın altında elastik-plastik deformasyona uğrar ve takım geçtikten sonra elastik deformasyona maruz kalan kısım eski haline döner. İşlem esnasında oluşan sürme etkisi işlenen yüzeyin yapısını olumsuz yönde etkiler [89, 114, 127]. İşlem esnasında talaş kalınlığı en düşük talaş kalınlığına eşit ($h = h_m$) olduğunda (Şekil 13.b), bir miktar elastik deformasyon ve toparlanma ile birlikte birincil kesme bölgesinde kesme meydana gelir ve talaş oluşumu gözlenir. Ancak sürme etkisinin aktif olması

nedeniyle, pasif kesme kuvveti başta olmak üzere kesme kuvvetlerini önemli ölçüde artmakta ve geri toplanma yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [89, 128]. Talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığından büyük ($h > h_m$) olduğunda (Şekil 13.c), kesme bölgesinde stabil bir şekilde plastik deformasyon gerçekleşerek sürekli talaş oluşumu meydana gelir [120, 129]. Kesici takımın kenar yarıçapı ve talaş kalınlığı dışında, işlem sırasında meydana gelen takım sapması ve düşük ilerleme hızları, elastik deformasyon oranının artmasına ve talaş oluşumunun engellenmesine neden olmaktadır [116, 130].



Şekil 13. Mikro işlemede en düşük talaş kalınlığına göre talaş oluşumu (Chip formation relative to the minimum chip thickness in micro machining) [120]

Boyut etkisi mikro işleme sürecinde belirleyici bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu etkiden kaçınabilmek için işlem sırasında en düşük talaş kalınlığından daha fazla talaş kalınlığı kullanılması gerekmektedir. Fakat frezeleme işleminin doğası gereği kesici takımın işleme sırasında, talaş kalınlığının sıfırdan başlayıp en büyük talaş kalınlığına ulaştıktan sonra tekrar sıfıra düşmesidir (Şekil14) [128]. Tüm işleme yolunda en düşük talaş kalınlığından kaçınmak mümkün olmadığı için, bu durum frezeleme sürecinde genel bir zorluk olarak ortaya çıkmaktadır [131]



Şekil 14. Mikro işlemede malzeme kaldırma mekanizması (Material removal mechanism in micromachining) [131]

Kesilmemiş talaş kalınlığı, kritik talaş kalınlığından az olduğunda; (I. Bölge ve II. Bölgenin bir kısmı), sürme ve sürme-plastik deformasyonun etkin olduğu bölgede talaş kaldırma işlemi gerçekleşmez; bunun sonucunda, takım iş parçasından geçtikten sonra iş parçası tamamen veya büyük ölçüde ilk baştaki konumuna geri döner [131]. Takımın dönmesine ve ilerlemesine bağlı olarak kesme işlemi devam ettikçe kesilmemiş talaş kalınlığı h_m 'den büyük olacak ve talaş olumu gerçekleşecektir. Mikro frezelemede, kesintili talaş kaldırma işlemi ve anlık değişken talaş kalınlığına ek olarak küçük takım yarıçapı dolayısıyla çok yüksek devirli is mili dönüş hızlarına ihtiyaç duyulur; bu da kesici kenarda çok yüksek frekanslı yüklerin oluşmasına sebep olur [128]. Yüksek frekanslı yüklerin; tırlama gibi titreşimlere neden olarak, kesici takım ile iş parçası arasında yüksek sürtünme ve

gerilim oluşturması 1 mm'den daha küçük çaplı parmak frezelerin kesici kenarını en fazla yüklenen kısmı haline getirmektedir. Bu nedenle, öngörülemeden takım ömrü ve mikro parmak frezelerin erken kırılması, mikro frezelemenin başlıca sorunlarından biridir [132, 133].

Mikro işleme süreçlerinde, talaş oluşumu, yüzey kalitesi ve kesme kuvvetini doğrudan etkileyen en düşük talaş kalınlığı aynı zamanda işleme verimliliğini ve çapak oluşumunda da belirleyici bir etkidir [130, 134]. Talaş kalınlığının en düşük talaş kalınlığından düşük olması, sürme etkisinin daha belirgin hale gelmesine ve sonuç olarak daha fazla çapak oluşumuna yol açar [119].

En düşük talaş kalınlığı belirleyen temel faktör kesici takımın kenar yarıçapı olmakla birlikte, birçok araştırma minimum talaş derinliğini etkileyen diğer faktörleri de ele almıştır. Literatürde yapılan çalışmalar, takım-talaş arayüzündeki sürtünmenin belirleyici olduğunu ortaya koymuştur [135]. Bununla birlikte, iş parçasının mikro yapısının da en düşük talaş kalınlığını etkileyeceği vurgulanmıştır. Özellikle malzeme kusurları ve kompozit malzemelerde tanelerin, liflerin veya parçacıkların yoğunluğu, türü, konumu, yönelimi ve boyutu gibi etkenler önemlidir [136, 137]. İş parçası malzemesinin sertliği ve farklı fazları da minimum talaş kalınlığı üzerinde etkili olabilmektedir [120, 138 – 140]. Bununla birlikte, takım aşınmasının önlenmesi için takım kaplamasının çok katmanlı olmasından dolayı kesme kenarı yarıçapının artırılması, en düşük talaş kalınlığını etkilemektedir [141].

Mikro işlemede en düşük talaş kalınlığının azalması, sadece talaş oluşumunu engelleyerek talaş kaldırma işlemi etkilemez. Aynı zamanda malzemenin mikro yapısı ile önemli etkileşimlere de yol açar. Bu etkileşimlerin birincisi, makro işlemin daha kolay gerçekleşmesini sağlayan malzeme kusurlarının azalmasıdır, bu da işlemin daha zor hale gelmesine sebep olabilmektedir [142] İkincisi, talaş kalınlığı işlenen malzemenin tane boyutundan daha küçük olduğu durumlar göz önüne alındığında, tek bir tane kesilmeye çalışır [120, 121]. Bu etkileşimler dikkate alındığında; mikro işlemede malzemenin mikro yapısı ve talaş kalınlığı, kesici takım boyutu ile önemli bir etkileşime sahip olduğu söylenebilir [121, 143].

Mikro işlemede ortaya çıkan boyut etkisi genellikle, malzemeye özgü kesme kuvvetinin makro ölçektekinden çok daha yüksek olmasına neden olmaktadır [87]. Bu

durum, daha kötü yüzey kalitesi, daha fazla çapak oluşumu, daha hızlı takım aşınması, daha fazla titreşim oluşumu ve takım aşınmasının daha hızlı gerçekleşmesi gibi sonuçlara neden olur [115, 120, 144]. İşleme sırasında, en düşük talaş kalınlığından daha büyük kesilmemiş talaş kalınlığı kullanılarak kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu azaltılabilir. Ayrıca, bu yaklaşım aynı zamanda işlem kararlılığını da iyileştirmektedir [131].

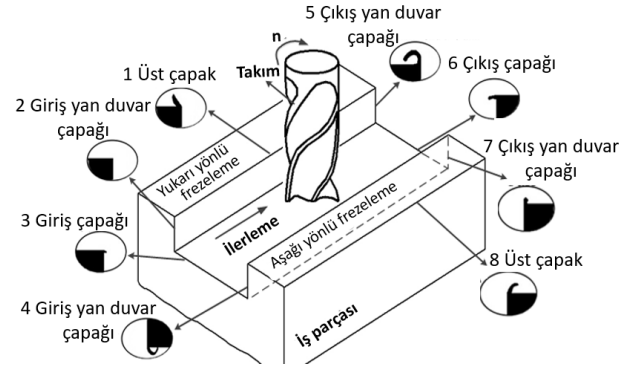
Mikro ölçekte işleme yapıldığında, boyut ölçeğinden kaynaklanan farklılıklar nedeniyle temel işleme mekanizmaları değişmektedir. Mikro işleme sürecinde boyut etkisi, kesici takımın kesme kenarı yarıçapı ve talaş kalınlığı gibi faktörler üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. İşlem sırasında en düşük talaş kalınlığından daha büyük kesilmemiş talaş kalınlığı kullanılarak kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu azaltılabilir. En düşük talaş kalınlığının belirleyici faktörü kesici takımın kenar yarıçapı olmakla birlikte, iş parçasının mikro yapısı, malzeme kusurları, sertlik ve farklı fazları gibi etkenler de en düşük talaş kalınlığını etkiler. Mikro frezeleme sürecinde boyut etkisinin göz önünde bulundurulması ve işleme stratejilerinin bu etkiye uygun şekilde geliştirilmesi, işleme verimliliğini artırmaktadır.

4.2. Çapak Oluşumu (Burr Formation)

Mikro frezeleme sürecinde, çapak oluşumu en önemli sorunlardan biridir. Mikro frezeleme ve makro frezelemede; oluşan çapak hacmi ile kaldırılan talaş hacminin oranları kıyaslandığında mikro frezelemede bu oran daha fazla olabilmektedir [145]. İşlem sırasında doğan çapaklar; iş parçası geometrisi ve toleranslarını etkileyerek imalat kalitesinin düşmesine ve montaj sırasında zayıf bir oturma yüzeyi oluşmasına neden olmaktadır [123, 143, 146, 147]. İmalat kalitesinin artırılması ve verimli bir montaj süreci için, iş parçasından çapakların uzaklaştırılması gerekmektedir [110, 118]. Ancak, mikrotan boyutunda gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminde oluşan çapak boyutlarının küçük ve erişiminin zor olması dikkate alındığında, işlem sonrası çapak temizleme işlemi zor ve maliyetli olmasının yanında iş parçasının geometrisinin bozulmasına neden olabilmektedir [121, 123, 147, 148]. İşlem sırasında çapak oluşumunu en aza indirmek ve işlem sonrası çapak giderme için yeni teknolojilerin kullanılması büyük önem arz etmektedir [149 – 151].

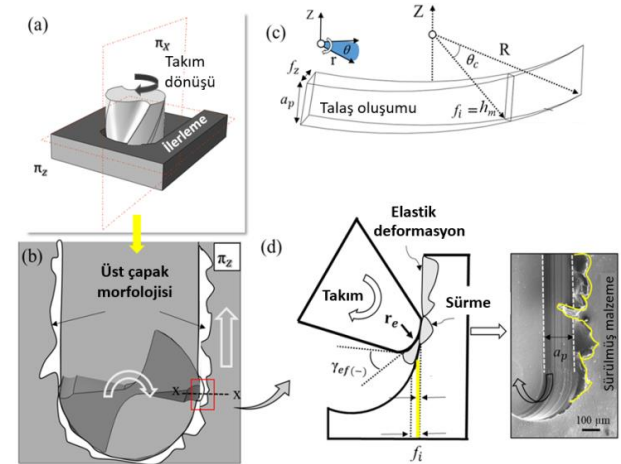
Çapaklar; şekil ve konumlarına göre sınıflandırılarak incelenir (Şekil 15). Mikro işleme sürecinde çapaklar genellikle giriş, çıkış ve üst çapak olmak üzere üç bölgeye gözlemlenmektedir [123, 151, 152].

Çapak oluşumunu etkileyen faktörler; kesme hızı, deforme olmayan talaş kalınlığı, takım keskinliği (kesme kenarı yarıçapı), takım ilerleme hızı ve iş parçası malzemesi özellikleri gibi parametrelerdir. Bunların yanı sıra, sürme etkisi, takım salgısı, titreşimler, takım aşınması, takım geometrisi, kaplamalar ve soğutma sıvısı gibi diğer faktörler de çapak oluşumunu etkileyebilir [138, 150].



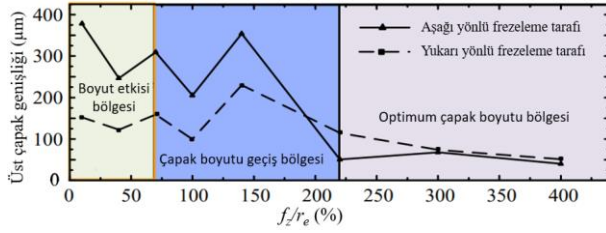
Şekil 15. Mikro frezelemede çapak tipleri (Types of burrs in micro milling) [153]

Talaş kalınlığı ya da diş başına ilerlemenin kesme kenarı yarıçapına oranı özellikler üst yüzeyde oluşan çapak boyutunu değiştiren en önemli faktördür [126]. Talaş kalınlığının, kesme kenarı yarıçapına oranının azalmasıyla birlikte, talaş açısı negatif bir değere dönüşmektedir. Bu durumda, takım aksel yönde hareket ettirildiğinde, takımın ilerisindeki malzeme itilerek ve sıkıştırılarak plastik deformasyonla çapak şeklinde deforme olur [123, 146, 149]. Frezeleme, işleminin doğası gereği kesici takımın kesintili talaş kaldırma işlemi; takımın her devirde sıfırdan iş parçasına dalmasına neden olarak belli bir talaş kalınlığına ulaşana kadar sürme etkisine neden olması üst yüzey çapak oluşumunu teşvik etmektedir. Şekil 15’de görüldüğü üzere kesici kenarın açısal konumu (θ) θ_c 'ye ulaştığında anlık kesilmemiş talaş kalınlığı değeri (f_i), talaş oluşumu için en düşük kesilmemiş talaş kalınlığına (h_m) ulaşır. $f_i < h_m$, olduğunda elastik-plastik deformasyon meydana gelir ve malzeme radyal yönde deforme olarak çapak oluşumuna neden olur [154].



Şekil 16. Mikro frezelemede üst yüzey çapak oluşum süreci (Top surface burr formation process in micro milling) [154]

Başka bir ifade ile deforme olmamış talaş kalınlığı (h) ile kesme kenarı yarıçapı (r_e) arasındaki oranın artmasıyla çapak boyutu azalmaktadır (Şekil 17) [120, 155]. Bu göstergeler; sürme etkisinin çapak oluşumunda belirgin bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 17. Boyut etkisine göre üst çapak genişliğinin azalması (Variation of top burr width according to the size effect) [155]

Kanal işlemede, iş parçasının üst yüzeyinde kanalın her iki tarafında da çapak oluşurken, çapak tipleri farklılık gösterir. Aşağı yönlü frezelemede, dalgalı tipte çapaklar meydana gelirken, yukarı yönlü frezelemede ise küçük düzensiz tipte çapak oluşur (Şekil 18). Bu nedenle, aşağı yönlü frezelemede çapak boyutu yukarı yönlü frezelemeye kıyasla daha büyük olmaktadır [151, 156, 157]. Aşağı yönlü frezelemede daha fazla çapak oluşması; ilerleme hareketi ile kesme kenarı iş parçasından çıkarken oluşan negatif kesme açısının daha fazla basınç oluşturmamasından kaynaklanmaktadır [158].



Şekil 18. Mikro kanal frezelemede frezeleme yönünün çapak tipine etkisi (Effect of milling direction on burr type in micro slot milling) [154]

Takımın aşınması, kesici kenar yarıçapı arttığından deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar yarıçapına oranını azaltır [138] ve çapak boyutunu doğrudan etkileyerek [123, 149, 151] çapak yüksekliğini artırır [159 – 161]. Takım kaplamaları özellikle takım aşınmasını geciktirir ve çapak oluşumunu azaltmaktadır [162]. Fakat takım kaplamasının çok katmanlı olması kesici kenar yarıçapını arttıracığından [141] boyut etkisinin artmasına ve dolayısıyla çapak oluşumunun artmasına neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Genel olarak, daha sünek iş parçası malzemeleri daha büyük çapak boyutlarına yol açar [149, 150]. Ancak, daha sert malzemelerde, aşınmanın daha hızlı gerçekleşmesi ve daha yüksek kesme kuvvetleri nedeniyle çapak oluşumu artabilmektedir [120]. Malzeme mikro yapısında, tane boyutunun küçülmesi ile çapak oluşumunu azalması [157]; farklı yöntemler ile üretilen aynı alaşımların birbirlerinden farklı çapak boyutlarına sahip olmasına neden olabilmektedir.

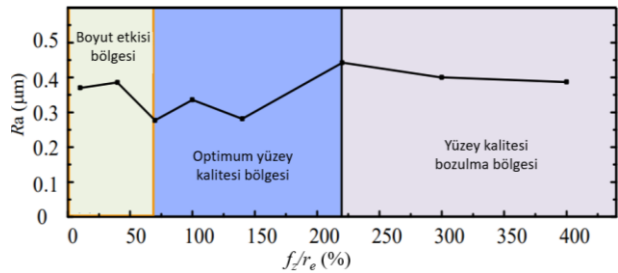
Artan diş başı ilerleme hızı, çıkış çapağının ve üst çapak yüksekliğinin azalmasına katkıda bulunmaktadır [163,

164]. Kesme hızı ve takım keskinliğinin artması da çapak oluşumunu azaltmaktadır [165]. Daha küçük kesme genişliğinin (a_e) çapak oluşum mekanizmaları üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir [164]

Mikro frezeleme sürecinde çapak oluşumunu en aza indirerek iş parçasının kalitesini artırmak ve montaj sürecini optimize etmek için, çapak oluşumunu etkileyen parametrelerin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir. Mikro işleme sürecinde çapaklar genellikle giriş, çıkış ve üst çapak olmak üzere üç bölgede gözlemlenmektedir. Talaş kalınlığı, takımın kesme kenarı yarıçapı, kesme hızı, takım ilerleme hızı ve iş parçası malzemesi gibi işlem parametrelerinin doğru bir şekilde ayarlanması, istenmeyen çapak oluşumunu en aza indirmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, sürme etkisi, takım salgısı, titreşimler, takım aşınması, takım geometrisi, kaplamalar ve soğutma sıvısı gibi diğer faktörler de çapak oluşumunu etkilemektedir. Kanal işlemede, iş parçasının üst yüzeyinde kanalın her iki tarafında da çapak oluşurken, çapak tipleri farklılık gösterir. Aşağı yönlü frezelemede, dalgalı tipte çapaklar meydana gelirken, yukarı yönlü frezelemede ise küçük düzensiz tipte çapak oluşur. Bu nedenle, aşağı yönlü frezelemede çapak boyutu yukarı yönlü frezelemeye kıyasla daha büyük olmaktadır. Aşağı yönlü frezelemede daha fazla çapak oluşması; ilerleme hareketi ile kesme kenarı iş parçasından çıkarken oluşan negatif kesme açısının daha fazla basınç oluşturmamasından kaynaklanmaktadır.

4.3. Yüzey Kalitesi (Surface Quality)

Yüzey pürüzlülüğü, imalat kalitesinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Bu nedenle mikro sistem bileşenlerinin performansını doğrudan etkiler. Mikro işlemede kesme kenarı yarıçapı ve talaş kalınlığı ile ortaya çıkan sürme etkisi yüzey pürüzlülüğü ve yüzey yapısının belirlenmesinde en önemli etkendir (Şekil 19) [166, 167].

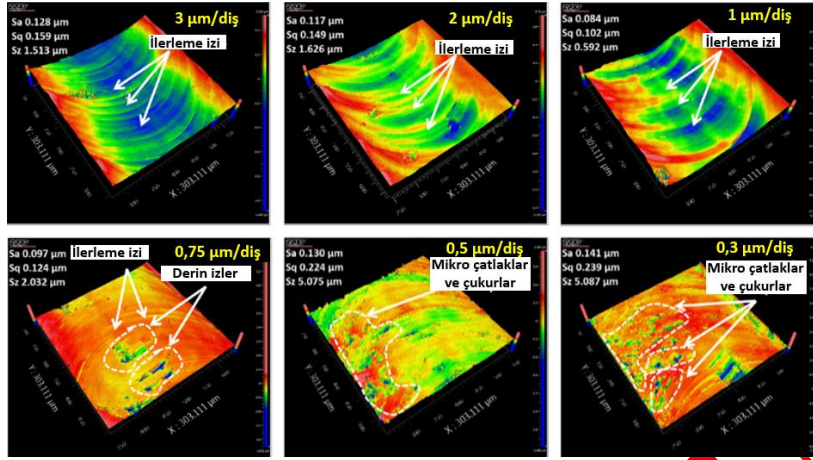


Şekil 19. Diş başına ilerleme (f_z) / kesme kenarı yarıçapı (r_e) oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Effect of feed/cutting edge radius on surface roughness) [155]

Diş başına ilerleme (f_z), talaş kalınlığını (h) belirlemektedir. Diş başına ilerleme değeri kesme kenarı yarıçapından düşük olduğundan sürme mekanizması etkisiyle; elastik toparlanma sonucu hem talaş oluşmaz hem de sürme ve elastik toparlanma, iş parçası ile parmak freze arasında daha fazla sürtünmeye neden olur, bunun sonucunda yüzey kusurları oluşur ve işlenen yüzeyin yüzey pürüzlülük değeri artar (Şekil 20) [111, 138, 151]. Yüzey pürüzlülüğünü optimize etmek için, diş başına

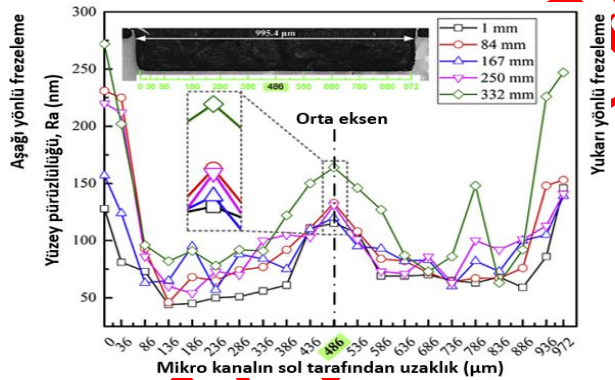
ilerleme değerini kesme kenarı yarıçapından daha yüksek bir değere ayarlamak ya da keskin bir takım kullanılarak sürme mekanizması azaltılması için tercih edilebilir [120,

135, 161]. Fakat belirli bir değerden sonra talaş kalınlığının (diş başı ilerlemenin) artması talaş yükünü artırarak yüzeyi daha pürüzlü hale getirmektedir [168].



Şekil 20. Diş başı ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne ve yüzey kalitesine etkisi (Effect of feed per tooth on surface roughness and quality) [111]

Aşağı yönlü frezelemede, yukarı yönlü frezeleme ile karşılaştırıldığında, işlenen malzemenin yüzeyinde daha fazla basınç deformasyonu meydana gelir ve bu, farklı frezeleme stratejilerinde farklı yüzey kalitelerinin oluşmasına yol açar [169]. Bu farklılık, genellikle yukarı yönlü frezelenmiş yüzeyin kalitesinin, aşağı yönlü frezelenmiş yüzeyin kalitesine göre daha iyi olmasına neden olur (Şekil 21) [170].



Şekil 21. Mikro kanal merkezinden duvarlara yüzey pürüzlülüğü değişimi (Surface roughness change from the microchannel from center to the walls) [170]

Artan takım aşınması, yüzey pürüzlülüğünde artışa neden olmaktadır. Mikro işlemede, takım aşınmasıyla ilgili yüzey pürüzlülüğü etkisi, sadece kesici kenarın keskinliğiyle sınırlı değildir. Artan aşınma, tipik olarak kesme kenarı yarıçapını artırır ve bu, doğrudan yüzey pürüzlülüğüne yansımaktadır [171]. Takım aşınması ayrıca yüzey bütünlüğünü ve ürün geometrisini de etkilemektedir [172].

Kesme hızının da yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi vardır [173]. Artan kesme hızıyla birlikte genellikle yüzey kalitesinde iyileşme sağlanmaktadır [126, 160]. Çünkü kesme hızının, artmasıyla birlikte kesme sıcaklığında artış meydana gelir [174, 175] ve talaş

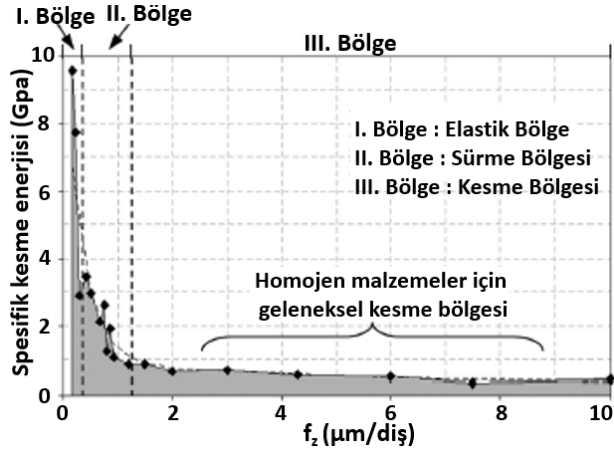
oluşumu daha kolay olur. Fakat ısıl iletim katsayısı düşük olan alaşımlarda bu etki daha az görülmektedir. Kesme hızının çok fazla artırılması takım aşınmasını hızlandıracağı için yüzeyi olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca kesme hızının çok fazla artırılması takımında daha fazla titreşim oluşmasına ve iş parçası yüzeyinde tırlama meydana gelmesine neden olarak boyutsal yüzey hatalarına neden olabilmektedir.

Yüzey kalitesi, imalat kalitesini belirleyen kritik bir faktördür. Kesme kenarı yarıçapı, talaş kalınlığı, ilerleme ve kesme hızı parametreleri, yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkiler. Diş başına ilerleme değerini kesme kenarı yarıçapından daha yüksek olması sürme mekanizması etkisinin en aza inmesini sağlayarak yüzey pürüzlülüğünü olumlu yönde etkilemektedir. Ancak, belirli bir değerden sonra talaş kalınlığının artması, talaş yükünü artırarak yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Artan kesme hızıyla birlikte genellikle yüzey kalitesinde iyileşme sağlanır. Kesme hızının artmasıyla birlikte kesme sıcaklığında artış meydana gelir ve talaş oluşumu daha kolay olur. Ancak, kesme hızının çok fazla artması, takım aşınmasını hızlandıracağı için yüzeyi olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, mikro işlemede yüzey kalitesini optimize etmek için tüm bu faktörlerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu optimizasyonlar, daha kaliteli mikro sistem bileşenlerinin üretimine katkıda bulunur.

4.4. Kesme Kuvvetleri (Cutting Forces)

Kesme kuvvetlerinin izlenmesi ve anlaşılması, mikro işleme süreçlerinin temel bir parçasıdır çünkü kesme kuvvetleri; talaş oluşumu, talaş kaldırma mekanizması, titreşimler ve takım performansı gibi birçok önemli parametreyi etkilemektedir [176 – 178]. Kesme kuvvetlerinin bilinmesi, işlemin daha öngörülebilir hale gelmesine, takımın aşınma hızının azaltılmasına ve işlemin genel güvenilirliğinin artırılmasına katkıda bulunur.

Mikro frezelemede kesme kuvvetlerinin analizinde, özellikle pasif kuvvetin artışı dikkat çekmektedir. Pasif kuvvetleri; sürme etkisi ve malzemenin tane yönelimi direkt olarak etkilemektedir. Kesme kenarı yarıçapına (re) bağlı olarak en düşük talaş kalınlığının (hm) altındaki talaş kalınlıklarında (h) ortaya çıkan sürme etkisi kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi ve eşit olmayan stres dağılımını artırırken, işlenmiş yüzeyin tekrar kesilmesine neden olur. Sonuç olarak, işlenmiş yüzeyin bozulmasına (Şekil 22), daha yüksek kesme kuvvetine ve daha kısa takım ömrüne yol açar [128, 131, 179 – 183]. Sürme etkisi ile malzemenin takımın alt yüzeyine sıkışması pasif kuvveti artırır [184]. İlerleme hızının iki katına çıkarılmasıyla spesifik kesme kuvveti ortalama %22 oranında azaltılabilir [115]. Mikro frezelemede kuvvetlerin davranışı, kesme ve sürme etkilerinden dolayı dik dalgalanmalarla karakterize edilir [124]. Kaldırılan talaş miktarı çok küçük olduğundan aynı koşullarda yapılmış iki farklı işlemde bile ilerleme kuvveti %10 ila %30 arasında değişebilmektedir [185].



Şekil 22. Saf magnezyumun diş başı ilerlemeye göre kesme enerjisi (Cutting energy of pure magnesium according to feed per tooth) [186]

Sürme etkisinin kesme enerjisine olan etkisi, kesme işleminin farklı bölgelerinde gözlemlenebilir. I ve III bölgelerindeki kesme enerjisi, diş başına nominal ilerlemeyle doğrusal bir ilişki gösterir. Bölge I, elastik toparlanma bölgesini temsil ederken, bölge III geleneksel kayma bölgesini temsil eder. Bölge II'de ise, küçük bir elastik toparlanma olgusuyla birlikte sürme etkisi en önemli rolü oynamaktadır [186].

Mikro işlemede diğer değişkenlerin sabit tutulması ile kesme kenarı yarıçapının artırılması işlem esnasında oluşan talaş açısının negatif yönde büyümesine neden olduğu için talaş kaldırmada önemli bir rol oynar çünkü en düşük talaş kalınlığını ve aynı zamanda malzeme kaldırma mekanizmalarını etkiler. Kesme kenarı yarıçapının artması pasif kesme kuvvetinin diğer kesme kuvvetlerine kıyasla daha çok artmasına neden olmaktadır [113, 187, 188]. Takım aşınmasına bağlı olarak kesme kenarı yarıçap değeri ve takımın diğer özellikleri sürekli değiştiği için aşınmanın kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi birçok araştırmaya konu

olmaktadır. Yan yüzey aşınması kesme kuvvetlerini direkt etkilerken [189], Takımdaki aşınma oranına bağlı olarak kesme kuvvetleri lineer bir şekilde artmaktadır [168].

Kesme hızının artması, esas olarak talaş yükünü azaltarak kesme kuvvetinin azalmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak yüksek kesme hızlarında kesme kuvvetlerindeki dinamik değişiklikler prosesi kararsız hale getirebilmektedir [190]. Kesme hızının artmasıyla birlikte kesme sıcaklığının yükselmesi [174, 175] takım aşınmasının hızlanmasına ve kesme kuvvetlerinde artışlara neden olmaktadır [191]. İşlem esnasında kesme genliğinin artması, kesme kuvvetlerini arttırmaktadır [108, 192].

Ayrıca, kesme kuvvetleri frezeleme stratejilerine de bağlıdır: genellikle yukarı yönlü frezelemede oluşan kesme kuvvetlerinin, aşağı yönlü frezelemeye göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [193].

Kesme kuvvetleri; talaş oluşumu, talaş kaldırma mekanizması, titreşimler ve takım performansı gibi birçok önemli parametreyi etkilemektedir. Mikro frezelemede kesme kuvvetlerinin analizinde, özellikle pasif kuvvetin artışı dikkat çekmektedir. Pasif kuvvetleri; sürme etkisi ve malzemenin tane yönelimi direkt olarak etkilemektedir. Mikro frezelemede kuvvetlerin davranışı, kesme ve sürme etkilerinden dolayı dik dalgalanmalarla karakterize edilir. Kesme hızının artması, esas olarak talaş yükünü azaltarak kesme kuvvetinin azalmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak yüksek kesme hızlarında kesme kuvvetlerindeki dinamik değişiklikler prosesi kararsız hale getirebilmektedir.

4.5. Kesme Sıcaklığı (Temperature During Cutting)

Mikro frezeleme işleminde kaldırılan talaş miktarının mikron boyutlarında olması nedeniyle oldukça düşük sıcaklık değerleri beklenir [143]. Kesme sıcaklığındaki artış nedeniyle meydana gelen termal genleşme; talaş kaldırma mekanizmasının değişimine neden olarak takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu gibi önemli parametreleri etkileyerek işlenen malzemenin geometrik doğruluğunun düşmesine neden olur [143, 171, 174, 175].

Ayrıca, mikro işlemede ortam sıcaklığının sabit olması da büyük önem arz etmektedir kaldırılan talaş miktarının mikron boyutlarında olması; kesme sıvısının sıcaklığı ile takım tezgahı çerçevesinin sıcaklığı arasındaki fark kesme derinliğini etkileyerek tolerans sapmalarına neden olabilmektedir [130].

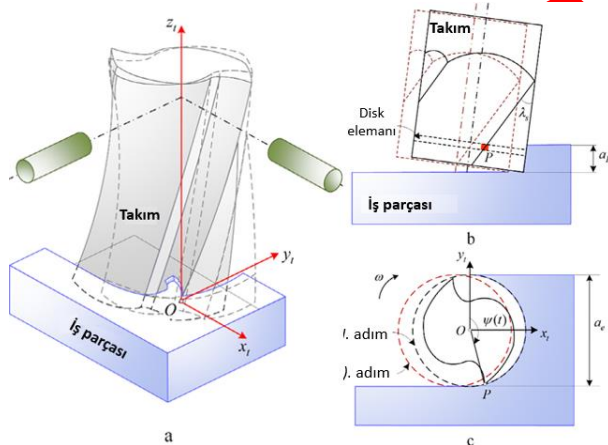
Kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin artmasıyla birlikte kesme sıcaklığında artış meydana gelir [174, 175]. Malzemenin mekanik özellikleri, özellikle akma dayanımı gibi faktörler, kesme sıcaklığının oluşumunu etkileyerek bu süreçte belirleyici bir rol oynar [171].

Mikro frezelemede; talaş kaldırma işlemi mikron boyutlarında olduğundan düşük sıcaklık değerleri beklenir. Ancak kayma gölgelerinde ısı girdisinin artması talaş kaldırma mekanizmasını değiştirerek malzemenin geometrik doğruluğunun düşmesine neden olur.

4.6. Titreşim ve Takım Sapması (Vibration and Tool Deflection)

Makro frezelemeye göre daha hassas bir süreç olan mikro frezelemede; takım çapı/boyu oranının düşük olması takım mukavemetini azaltmaktadır. Bu hassasiyet, takımın işlem esnasında değişen kuvvetlere karşı koyma yeteneğini azaltarak takımın sapmasının ve salgisının göreceli olarak daha yüksek olmasına yol açar ve mikro işlemin karmaşıklığını artırır (Şekil 23) [194 – 195]. İşlem esnasında düşük takım tokluğu, işlem sırasında meydana gelen dinamik olaylar nedeniyle ekseninden sapan takım, dönme ve ilerleme hareketini yaptıkça kesme mekanizmaları farklılık göstermektedir [194 – 197]. Bu durum her bir dişte farklı kesme kuvvetlerinin oluşmasına neden olarak sapma miktarının daha fazla artmasına sebebiyet vermektedir; takım aşınmasını/kırılmasını, yüzey kalitesini, geometrik doğruluğu, ölçü hassasiyetini ve işleme verimliliğini olumsuz etkilemektedir [198, 199].

Takım sapması, sadece statik bir etkiden ziyade, frezeleme işlemi sırasında çeşitli kesme kuvvetleri nedeniyle takımın dinamik olarak hareket etmesiyle de ortaya çıkar. [201] Bu hareket genellikle, sapmanın statik bir bileşeni etrafında gerçekleşir. Elde edilen bulgular, takım çapının frezeleme işleminin doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve özellikle küçük çaplı takımların kullanıldığı durumlarda takım sapmasının boyutlarının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir [119]



Şekil 23. Mikro frezelemede takım sapması (Tool deflection in micro milling) [200]

Kesme kuvvetlerinin düşük seviyelerde tutacak ve dolayısıyla takım sapmasını azaltacak uygun kesme parametrelerinin seçilmesi kritiktir [119]. Ayrıca, daha kısa takımların kullanılması da takım sapmasını azaltabilir. Yukarı yönlü frezeleme, aşağı yönlü frezelemeye kıyasla genellikle daha kötü sonuçlar verebilmektedir [119]. Bu nedenle, takım sapması boyutlarını en aza indirmek için kesme işlemlerinin dikkatlice planlanması ve uygun parametrelerin seçilmesi gerekmektedir. Takım kararlılığı ve işleme doğruluğu arasındaki dengenin sağlanmasının kesici takımının olabildiğince kısa bağlanması yanında

uygun devir sayısı ve aksel kesme derinliğinin uygulanması birincil öncelik olmalıdır [202].

Takımın ve kesme işleminin kararlılığı, işleme hızlarının artırılması ile sağlanabilmektedir [163]. Yüksek kesme hızı ile takımdaki talaş yükü azaltılabilir ancak bu durum sürme etkisine neden olarak titreşimi artırabileceği vurgulanmaktadır [194].

Kendi kendine uyarılan titreşimin en yaygın şekli, kesme işleminde kararsızlığa neden olan rejeneratif tırlamadır [190]. Biermann ve Baschin'e göre [203], teorik talaş kalınlığının küçük olması ve kesme kenarının talaş oluşumu üzerindeki etkisi nedeniyle, rejeneratif etkiler makro boyutlarda olduğundan daha güçlüdür.

Mikro frezeleme işleminde, takım çapı/boyu oranının düşük olması takımın mukavemetini azaltır ve işlemin karmaşıklığını artırır. Düşük takım tokluğu, işlem sırasında meydana gelen dinamik olaylar nedeniyle takım sapmasının ve salgisının artmasına sebep olur. Bu durum, işlenen parçanın geometrik doğruluğunu, yüzey kalitesini ve ölçü hassasiyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Uygun işleme parametreleri ile kesme kuvvetlerinin en düşük seviyede tutulması, takım sapmasını azaltmada kritik öneme sahiptir. Daha kısa takımların kullanılması ve kesme hızının artırılması kesme işleminde kararlılığı artırmaktadır. Ancak, uygun kesme hızından sonra kesme hızının artırılmasıyla titreşimin artması işlem kararlılığını olumsuz etkilemektedir.

5. TALAŞLI İMALATTA MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ TUTUŞMA RİSKİ (IGNITION RISK of MAGNESIUM ALLOYS in MACHINING)

Talaşlı imalat proseslerinde kesme alanında oluşan ısı, imalat verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Magnezyum alaşımlarının yüksek termal iletkenliği, ısının hızla dağılmasını sağlayarak işlem sırasında sıcaklığın düşmesine sağlar [204]. Ancak, magnezyum alaşımlarının işlenmesinde işlem sıcaklığı önemli bir sorun teşkil etmektedir. Çünkü magnezyum alaşımlarının işlenmesinde işlem sıcaklığı 450 °C'yi aştığında önemli bir tutuşma riski ortaya çıkar ve magnezyum alaşımları yanmaya başladığında 3.000 °C sıcaklıklara ulaşabilir [205]. Magnezyumun tutuşması, işlem parametreleri, takım geometrisi ve işlem ortamı değişkenlerinin bir kombinasyonu olarak meydana gelir [206].

Uygun kesici takım tipi ve proses parametrelerinin kombinasyonu ile magnezyum alaşımlarının tutuşma riski engellenebilir [207]. Magnezyum alaşımlarının kuru ortamda işlenmesiyle elde edilen talaşların ekonomik değeri, kimyasal kalıntı içeren talaşlara göre çok daha yüksek olmaktadır [208]. Magnezyumun işlenmesinde gaz ile soğutma uygulanabilir ve bu durumda argon gazı veya nitrojen gazı kullanılabilir [208]. Ancak, soğutma sıvısı kullanıldığında özellikle su bazlı soğutma sıvılarından kaçınılması gerekir [209]. Magnezyum su ile reaksiyona girerek magnezyum hidroksit ve hidrojen gazı oluşturur. Gözenekli bir şekilde oluşan hidroksit tabaka yüzey modifikasyonu için

yapılan kaplamaların yüzeye yapışmasını zorlaştırmaktadır [210]. Hidrojen, yanıcı ve potansiyel olarak patlayıcı olması nedeniyle işleme sırasında büyük riskler barındırmaktadır [208, 211]. Magnezyum alaşımlarının işlenmesinde mineral bazlı soğutma yağları tercih edilebilir [204, 208, 212]. Bu yağların yeterli soğutma sağlaması için düşük viskoziteye sahip olması gerekir. Korozyonun önlenmesine yardımcı olmak ve hidrojen gazı oluşumunu engellemek için serbest yağ asidi içeriği $<0,2\%$ olmalıdır. Ayrıca, yağ buharının yangın ve patlama riskini azaltmak için yüksek parlama noktası ve düşük buharlaşma özelliklerine sahip yağlar seçilmelidir [208].

Magnezyum alaşımlarının kuru işlenmesinde talaş ve kopan parçacıklar ne kadar küçük olursa tutuşma ihtimali o kadar artmaktadır [213]. Magnezyum alaşımlarının işlenmesinde tutuşmayı engellemek için aşağıdaki önlemler alınmalıdır [208, 213]:

- Frezeleme işleminde dişler arasında daha büyük talaş oluşumu sağlanarak sürtünmeyi azaltılması için kesici takımın ağız sayısı olabildiğince az olmalıdır,
- Tozların sürtünme ile alev almasını engellemek için büyük boşluk açalarına sahip keskin takımlar tercih edilmelidir,
- İlerleme hızını mümkün olduğunca yüksek tutarak talaş kesit alanının artırılmasıyla tutuşma riski azaltılmalıdır,
- Kesimden sonra takımların iş parçası üzerinde kalmasına ve sürtünmesine müsaade edilmemelidir,
- Talaşlar sık sık toplanarak ve doğru şekilde muhafaza edilmelidir,
- Zemin ve tüm makinalar, kuru ve temiz tutularak talaş birikmesi önlenmelidir,
- Uygun yangın söndürme malzemeleri (D sınıfı yangın söndürücü, kuru kum, dökme demir talaşı ya da argon gazı) hızlı ve kolay ulaşılabilecek konumda bulundurulmalıdır.

Magnezyum alaşımlarının işlenmesinde, tutuşma riski önemli bir sorundur. Uygun kesici takım tipi ve proses parametrelerinin kombinasyonu ile bu risk

engellenebilmektedir. Özellikle kuru ortamda işlemede talaş ve parçacık boyutlarının büyük olması gerekmektedir. Kuru ortamda işlemenin yanı sıra gaz ile soğutma ve mineral bazlı soğutma yağları kullanılarak da tutuşma riski en aza düşürülebilir. Fakat; su bazlı soğutma sıvılarının magnezyumla reaksiyona girdiği için kullanılmamalıdır. Tüm bu faktörlerin dikkate alınması, magnezyum alaşımlarının güvenli ve verimli bir şekilde işlenmesini sağlamaktadır.

6.MAGNEZYUM ALAŞIMLARIN MİKRO FREZELENMESİ (MICRO MILLING of MAGNESIUM ALLOYS)

Mikro işleme prosesinde, talaş oluşum mekanizması geleneksel işlemlerden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu farklılık, boyut etkisi, takım salgısı ve iş parçası malzemesinin elastik şekil değiştirmesi gibi temel unsurlarla ortaya çıkar [79]. Magnezyum hegzagonal sıkı paket (HSP) kristal yapıya sahip bir metaldir. HSP yapıya sahip metaller yüzey merkezli kübik (YMK) ve hacim merkezli kübik (HMK) yapılar ile kıyaslandığında; daha az kayma sistemine sahiptir. Bu durum HSP yapıya sahip malzemelerin anizotropik davranışını arttırmakta ve sünekliğini azaltmaktadır [180, 184]. Mikro frezelemede kesici takımının sürekli dönme hareketi gerçekleştirdiğinden uygun talaş kalınlığına ulaşana kadar boyut etkisi nedeniyle talaş oluşumu gerçekleşmeyecektir. Bu süreçte malzemede elastik deformasyon meydana geldiğinden özellikle HSP yapıya sahip malzemelerde dislokasyon hareketlerinin sınırlı olması bu bölgelerde dislokasyonların çoğalmasına ve birikmesine neden olarak imalat prosesi için gerekli olan plastik deformasyonun başlaması için daha yüksek kesme kuvvetlerine ihtiyaç duyulacaktır [180]. Ayrıca magnezyum alaşımlarının alev alma özelliği imalat sürecini zorlaştıran bir diğer etkidir.

Magnezyum alaşımlarının mikro frezeleme üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Magnezyum alaşımlarının mikro frezelemeyle etkin bir şekilde işlenebilmesi için bugüne kadar yapılan çalışmalar Çizelge 1 ve Çizelge 2 de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Mg alaşımları ve Mg matrisli kompozitlerin mikro frezeleme ile ilgili araştırmalar – I (Research on micro-milling of Mg alloys and Mg matrix composites – I)

Malzeme	Takım çapı (µm)	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (µm/diş)	Talaş derinliği (µm)
TZ54[219]	508	47,1	0,05; 0,07; 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2,5; 5;10; 20	250
		47,1	5	50; 100; 150; 250; 350; 500
		7,85; 15,7; 31,4; 47,1; 54,95; 78,5; 94,2	5	150
Mg13Sn [79]	508	7,9; 15,7; 31,4; 62,8	1; 2,5; 5; 10	200; 400
AZ 91 matrisli hacimce % 12 Ti takviyeli kompozit [220]	500	60; 120; 180	0,5; 1; 1,5	50; 150; 250
Mg matrisli hacimce %1,98 Ti takviyeli [128]	500	31,4; 62,8; 125,6	0,75; 1,5; 3	100

Çizelge 2. Mg alaşımları ve Mg matrisli kompozitlerin mikro frezelenmesi ile ilgili araştırmalar – II (Research on micro-milling of Mg alloys and Mg matrix composites – II)

Malzeme	Takım çapı (µm)	Devir (dev/dak)	İlerleme	Talaş derinliği (µm)
WE43[214]	100	20000; 25000; 30000; 35000	150; 200; 250; 300 mm/dak	10; 20; 40; 60
AZ91 [215]	1000	10000; 11000; 12000	170; 200; 230 mm/dak	100; 200; 300
AZ91[216]	800; 1000	10000; 11000; 12000	170; 200; 230 mm/dak	100; 200; 300
Mg-3.0Zn-0.7Zr- 1.0Cu / Mg-3.0Zn-0.7Zr-1.0Cu Matrisli %3 Al ₂ O ₃ takviyeli kompozit [217]	500	8000; 10000; 12000	0,5 ;1 ;1,5 µm/dış	30; 60; 90
Mg matrisli % 1,98 Ti ve TiB ₂ takviyeli kompozit [179]	1000	20000; 40000; 60000	1; 2 ;3 ;4 µm/dış	150; 300
Saf Mg / Mg matrisli %5, %10 ve % 15 SiC takviyeli kompozit [186]	1000	1500; 2000; 2500; 3500; 4000; 6000; 6500; 7500; 9000; 20000; 25000; 30000; 35000; 40000; 50000; 65000; 70000	0,2; 0,4; 0,5; 1,0 (mm/s)*	20
Saf Mg/ Mg matrisli % 0,5; %1,5 ve 2,5 ZnO ve BNO takviyeli kompozit [180]	500	6000; 8000; 1000	1; 2; 3; 4 µm/dış	30; 60
Saf Mg / Mg matrisli %5, %10 ve 15 SiC takviyeli kompozit [218]	1016	20000; 40000; 60000	0,5; 1; 1,5 (µm/dış)	10
AZ31B [131]	1000	40000	0,1 (µm/dış)	50

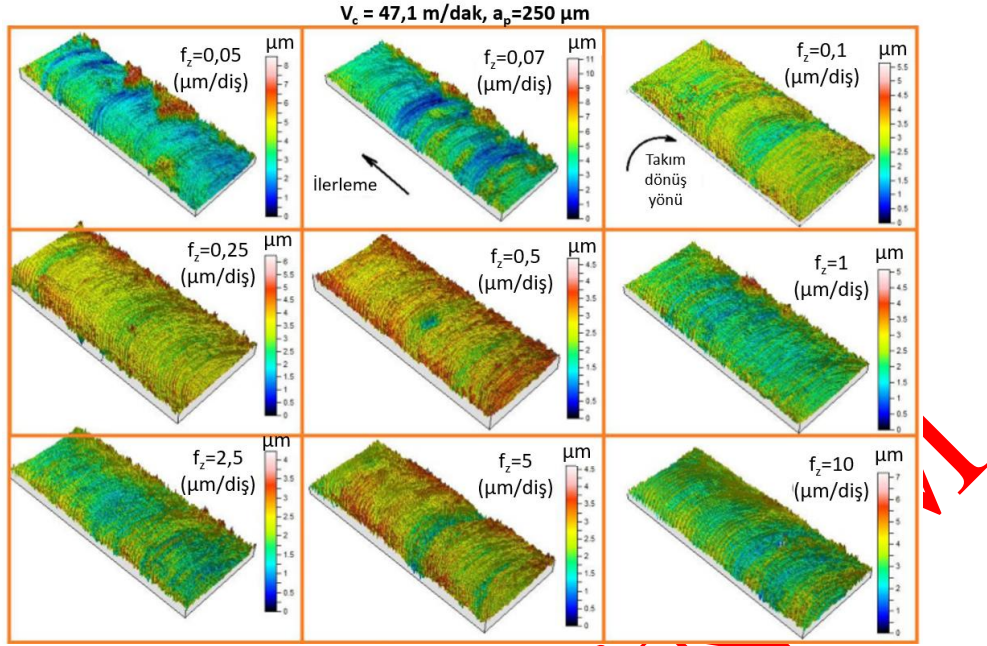
* Dönüşüm yapılmıştır.

Magnezyum alaşımlarının mikro frezelemede, kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği gibi değişken parametrelerin etkisinin incelendiği çalışmada, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne %83, radyal yöndeki (F_x ve F_y) kuvvetleri %50 oranında etkilediği tespit edilmiştir [217]. Ancak, magnezyum alaşımları ve magnezyum matrisli kompozitlerin mikro frezelemesi üzerine yapılan diğer çalışmalarda farklı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, farklı çaplardaki takımlarla (1,0 mm ve 0,8 mm) yapılan çalışmada, 1,0 mm çapındaki takım ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine en etkili parametre ilerleme hızı iken; 0,8 mm çapına sahip takımında kesme kuvvetine ve yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre kesme derinliği olmuştur [216]. Bununla birlikte, bir diğer çalışmada ise kesme kuvvetlerinin oluşumunda kesme hızının, ilerleme hızına göre daha belirgin bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [215] Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliği oluşumunda ise en büyük etkinin kesme genişliği tarafından sağlandığı ve bunu kesme derinliği, iş mili hızı ve ilerleme hızının takip ettiği belirlenmiştir [214] İş mili hızı, dış başına ilerleme ve kesme derinliği takım aşınmasına etkisi sırasıyla %57,2, %4,5 ve %12,7 olarak belirtilmiştir. [217]

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, çıktı parametrelerini doğrudan en yüksek etkiye sahip işlem

parametresini belirlemeyi zorlaştırmaktadır. Bu durum, mikro işlemede işlem parametrelerinin etki faktörlerinin çok değişken olması, talaş miktarının çok küçük olması ve boyut etkisinin yanı sıra işlem sırasında oluşan ısı girdisinin de etkili olmasından kaynaklanmaktadır.

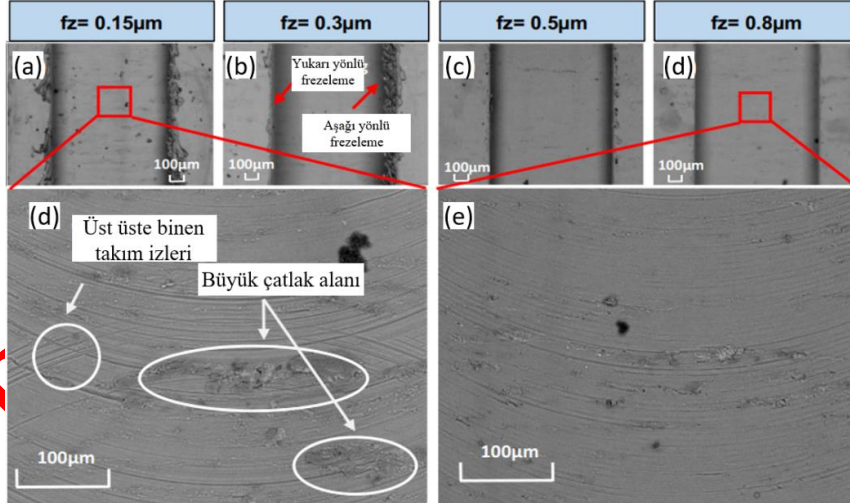
İlerleme hızının değişimi ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki, mikro frezeleme sürecinde oldukça karmaşıktır ve doğrudan bir çıkarım yapmak zordur. Özellikle düşük ilerleme hızları, talaş kalınlığının azalmasıyla birlikte boyut etkisinin belirgin hale gelmesine ve kesme kenarında boyut etkisinin hakim olmasına yol açar. Bu durum, sürme etkisiyle oluşan elastik deformasyonun yüzeyi bozmasına ve sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına katkıda bulunur (Şekil 24) [128, 179]. Düşük ilerleme hızlarında oluşan, sürme etkisiyle, talaş oluşmaması ve takım geçtikten sonra malzemenin elastik olarak sıyrılması neden olmaktadır [179]. Kesme işleminin gerçekleşmediği devirden sonra ilerlemenin devam etmesiyle artan talaş kalınlığı bir sonraki devirde talaş oluşumunu sağlayacaktır [79]. Bu durum iş parçasının aynı noktadan birden fazla kez kesilmesiyle üst üste binen takım izlerinin oluşması gibi olumsuz etkiler de neden olmaktadır [179].



Şekil 24. TZ54 magnezyum alaşımının farklı ilerleme hızlarında yüzey yapısı (Surface structure of different feed rates in TZ54 magnesium alloy) [219]

İlerleme hızı arttıkça, daha stabil bir kesme işlemi gerçekleşir, yüksek ilerleme hızlarıyla kesme mekanizması daha baskın hale gelir [79, 128, 179, 219]. Bu kapsamda ilerleme hızının mümkün olduğu kadar yüksek seçilmesi ve yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre

en uygun ilerleme hızının belirlenmesi (Şekil 25) daha doğru olacaktır [79]. İşlem esnasında yüksek ilerleme hızlarının kullanılması imalat verimliliğini de artırmaktadır.

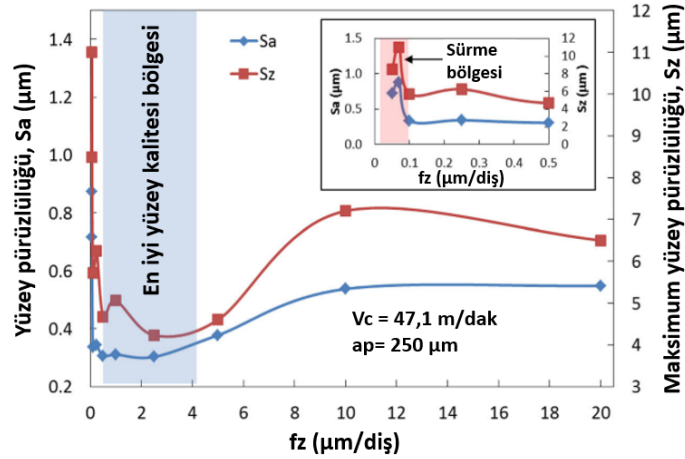


Şekil 25. Mg/TiB₂ kompozit malzemenin kanal açama işleminde ilerlemenin yüzey yapısına etkisi (N: 40000 dev/dak, ap: 200 μm) (Effect of feed rate on the surface structure in the grooving process of Mg/TiB₂ composite material) (N: 40000 R.P.M, ap: 200 μm) [179]

Diş başına ilerlemenin artması; daha büyük miktarda malzemenin kesilmesine ve talaş kaldırma oranının artması neden olarak yüzey pürüzlülüğünü de artırmaktadır (Şekil 26) [79, 214, 217]. Dolayısıyla, uygun yüzey pürüzlülüğü elde etmek için ilerleme hızının deneysel çalışmalar ışığında belirlenmesi gereklidir.

Benzer şekilde, devir sayısının artması, dolayısıyla kesme hızının artması işlem sırasında oluşan ısı girdisinin artmasını sağlayarak talaş oluşumunu

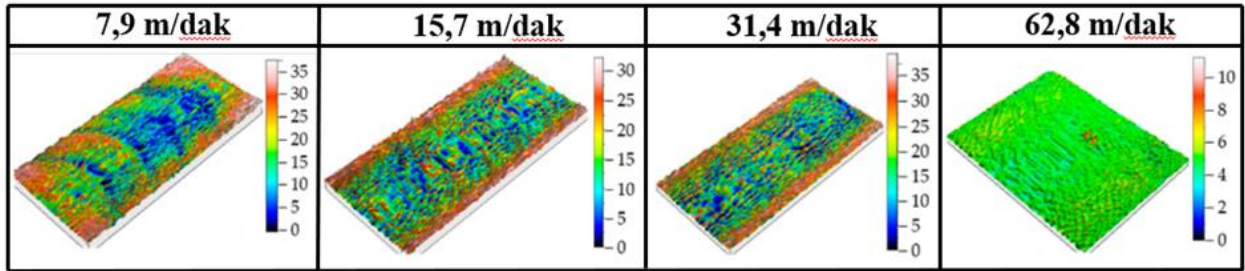
kolaylaştırır ve yüzey pürüzlülüğünü olumlu yönde etkiler (Şekil 27) [179, 214, 217, 219]. Kesme hızının artması ile oluşan uzun talaş takım ile iş parçası ara yüzüne girerek mikro kusurların oluşmasına neden olarak yüzeyde sürekliliği bozar ve yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkiler [180]. Kesme genişliği ve derinliğinin artmasıyla birim zamanda kaldırılan talaş miktarını arttırdığından yüzey pürüzlülük değeri artmaktadır; ayrıca bu iki değer artması yüzey sertliğini de artırmaktadır [214].



Şekil 26. TZ54 Magnezyum alaşımının diş başı ilerlemeye bağlı olarak Sa ve Sz değerleri ($V_c = 47,1$ m / dak, $a_p = 250$ µm) (Sa and Sz values of TZ54 Magnesium alloy depending on feed per tooth) ($V_c = 47,1$ m / min, $a_p = 250$ µm) [219]

Kesme hızındaki artışlar, kesme bölgesindeki sıcaklığın yükselmesine ve iş parçasında termal yumuşamaya yol açarak kesme kuvvetlerinde azalmaya neden olmaktadır

(Şekil 28) [79, 179, 180, 218]. Bu etki, özellikle mikro frezeleme operasyonlarında, talaş kesitinin son derece küçük olması nedeniyle daha belirgindir [79].

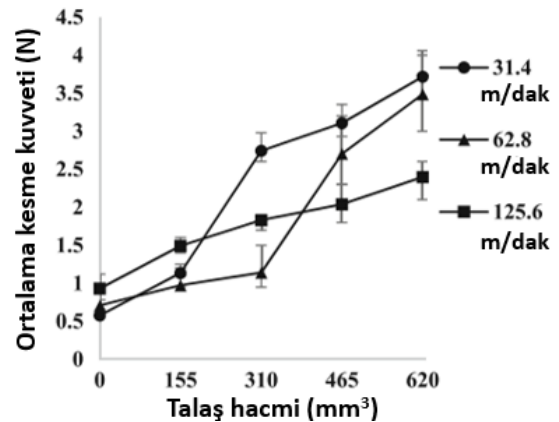


Şekil 27. Mg13Sn alaşımının kesme hızına bağlı yüzey pürüzlülüğü ($f_z = 1$ µm/diş, $a_p = 400$ µm) Surface roughness of Mg13Sn alloy depending on cutting speed ($f_z = 1$ µm/tooth, $a_p = 400$ µm) [79]

Diş başına ilerlemenin en düşük talaş kalınlığından küçük olması durumunda kesme kuvvetleri artmaktadır [219]. Uygun ilerleme değerinden sonra artan ilerleme hızı kesici takımın birim zamanda kaldıracağı malzeme miktarını artırır, bu da talaş kesit alanının genişlemesine ve dolayısıyla takıma daha fazla direnç uygulanmasına sebep olarak kesme kuvvetlerinde, özellikle radyal bileşenlerde (F_x ve F_y), artış gösterir. Benzer şekilde, kesme derinliğinin artması da talaş kesitini dolayısıyla kesme kuvvetlerini artırır [79, 180, 217 – 219]. Ancak, kesme derinliğinin kesme kuvvetine etkisi ilerleme hızına kıyasla çok daha düşüktür [217]. İlerleme hızı arttıkça kesme kuvvetinin genliği de artmaktadır [218]. Küçük takım çaplarından dolayı takım rijitliğinin sağlanamaması takımda titreşim ve sapmalara neden olarak radyal yönde oluşan kesme kuvvetlerinin stabil kalmasını engellemektedir [186] Tüm bu faktörler, kesme işlemi sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerini karmaşık bir şekilde etkiler ve magnezyum alaşımlarının mikro frezeleme operasyonlarının optimize edilmesi için dikkate alınması gereken önemli unsurları oluşturur.

Takım kaplaması, takım aşınmasını azaltmanın yanı sıra daha az kesme kuvveti oluşumuna da katkı sağlar [220]. Mikro frezeleme sürecinde, magnezyum alaşımlarının işlenmesinde kaplanmış takımların kaplama

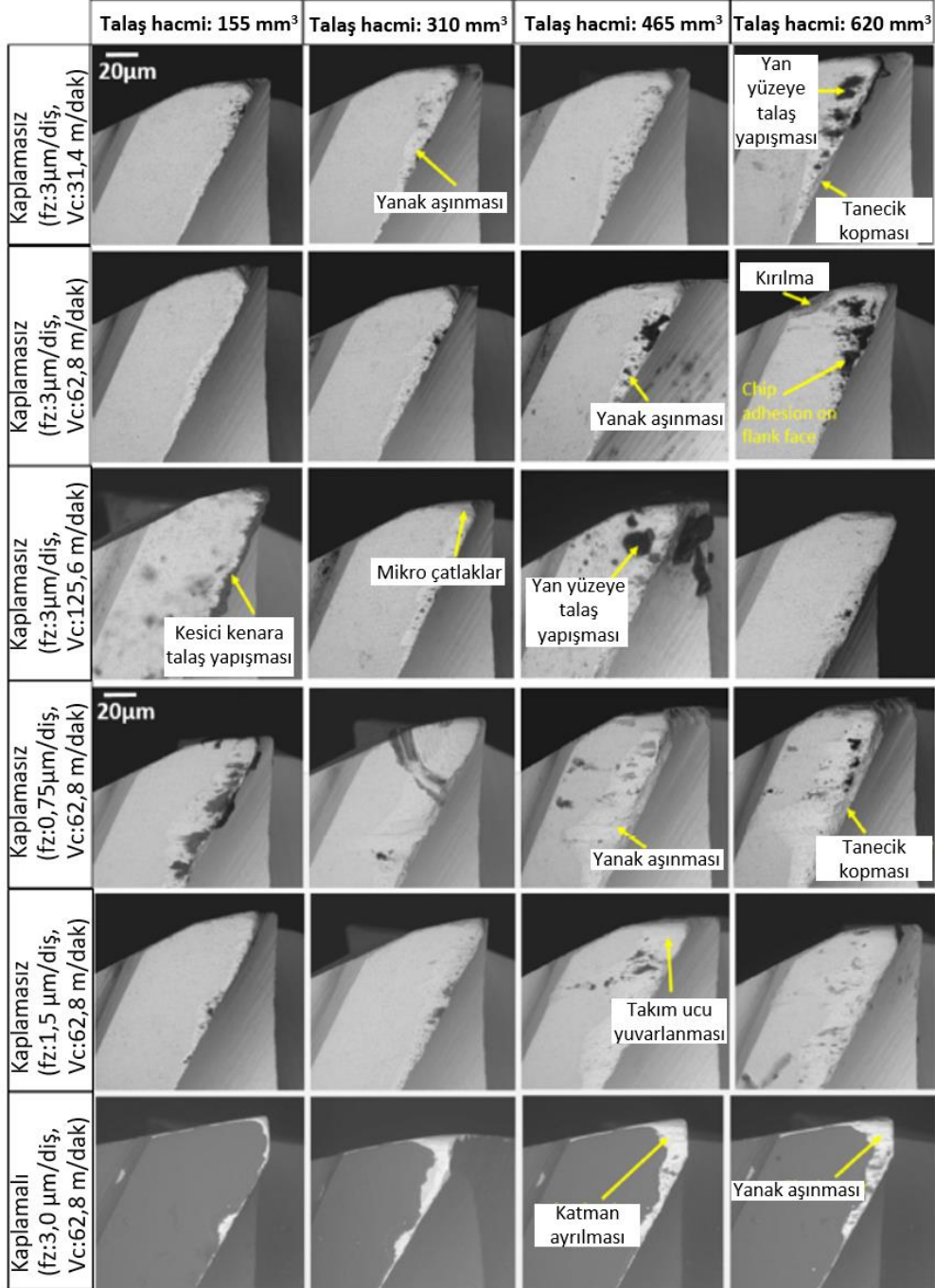
katmanlarından ayrılma ve yan yüzey aşınması gözlenirken, kaplanmamış takımlarda yan yüzey aşınması ve çentik aşınması meydana gelmektedir (Şekil 29) [128]. En fazla aşınan alan takım ucudur ve takımın yan yüzüne kadar uzanır [131]. Bu aşınma mekanizmaları, işlem esnasında kademeli bir aşınma sürecinin gerçekleştiğini göstermektedir [128].



Şekil 28. Mg/Ti kompozit malzemesinin mikro frezelemede kesme hızının kesme kuvvetine etkisi ($f_z = 3$ µm/diş, $a_p = 100$ µm) Effect of cutting speed on cutting force in micro milling Mg/Ti composite ($f_z = 3$ µm/tooth, $a_p = 100$ µm) [128]

Kesici takımın yan yüzeyi ile iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklı yığıntı talaş (BUE, Built-Up Edge) oluşumu gözlenmektedir [179, 218]. Yığıntı talaş oluşumu, takım ömrünü etkilemesinin yanı sıra özellikle mikro işlemede kesici kenar yarıçapının artmasına ve dolayısıyla kritik kesilmemiş talaş kalınlığının artmasına yol açarak kesme işlemi sırasında sürme mekanizmasını daha belirgin hale getirmektedir [179]. Ayrıca, işlem

esasnda takımın oluşmuş yığıntı talaşın büyüyen dayanımının azalması ile takımın koparak tekrardan mikro kanalların alt yüzeyine yapıştığı ve bunun da yüzey pürüzlülüğünün bozulmasına neden olduğu düşünülmektedir [128]. Düşük veya orta kesme hızları ve artan talaş yükü, yığıntı talaş oluşumunu artırır ve bu oluşumdan daha fazla malzeme kopacağından işlenen yüzeye malzeme yapışma olasılığını artırır [219].



Şekil 29. Mg/Ti kompozit malzemenin mikro frezelenmesinde oluşan takım aşınmaları (Tool wear in micro milling of Mg/Ti composite material) [128]

Takım aşınmasıyla birlikte takım çapında azalma meydana gelirken, yan yüzey aşınmasının ilerlemesiyle birlikte sürme etkisinin hakim olduğu talaş kaldırma

mekanizması belirginleşmektedir [128]. İş mili hızı, diş başına ilerleme ve kesme derinliğinin artmasıyla sıcaklık ve aşınma miktarının arttığı gözlenirken [217], çok düşük

ilerleme hızlarının kesme kuvvetlerinin artmasına ve takım aşınmalarının artmasına neden olabileceği belirtilmektedir [128]. Yüksek kesme hızları ise artan sıcaklık sayesinde yığıntı talaş oluşumu engellenebilirken daha düzgün bir yüzey kalitesi sağlanabilmektedir [79].

İlerleme hızının ve kesme derinliğinin artmasıyla çapak yüksekliğinde, kesme hızının artmasıyla çapak genişliğinde azalma meydana gelmektedir [219, 220]. Artan ilerleme hızı yukarı yönlü frezeleme tarafındaki çapak önemli ölçüde azalır ve aşağı frezeleme tarafına kıyasla daha küçük bir çapak genişliği oluşmasını sağlamaktadır [219]. Kaplamasız takımlarda gözlenen fazla çapak oluşumu, özellikle takım aşınmasıyla ilişkilendirilebilir ve bu durum özellikle aşağı yönlü frezeleme tarafında çapak oluşumunu artırmaktadır [128]. Bununla birlikte, kesme derinliği ve ilerleme hızı arttırılırken, orta büyüklükte kesme hızı kullanılmasının çapak yüksekliğini en aza indirilebileceği görülmektedir [220].

Magnezyum alaşımların ve magnezyum matrisli kompozitlerin mikro frezeleme işlemi; iş parçası malzemesinin özellikleri, kesme parametreleri ve kesici takım özellikleri gibi çeşitli faktörlerin etkileşimleriyle oluşan; yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu ve kesme kuvvetlerinin yanı sıra takım aşınması değerlendirme kriterleri için en uygun verilerin elde edilmesi gerekmektedir. Mikro işlemenin makro işlemeye göre farklı bir talaş kaldırma mekanizmasına sahip olması ve magnezyum alaşımlarının mikro işlenmesi üzerine yapılan çalışmaların sınır kalmaması bu alanda bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır. Bu kapsamda, farklı magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesinin araştırılarak işlem verimliliğinin artırılması ve üretim kalitesinin geliştirilmesi için farklı magnezyum alaşımlarının mikro işleme kabiliyetlerinin değerlendirildiği çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS and RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada Magnezyum alaşımlarının biyolojik olarak çözülebilir implant üretimi ve bu implantların imalatının mikro frezeleme yöntemi ile üretilebilirliği üzerine geniş çaplı bir literatür incelemesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur:

1. Biyolojik olarak parçalanabilen implantlar, geleneksel implantlara kıyasla ikincil bir ameliyatı önleyerek iyileşme sürecini hızlandırırken, sağlık risklerini, maliyetleri ve yara izlerini azaltmaktadır.
2. Mg alaşımların hem toksik olmaması hem de mekanik özelliklerinin insan kemiğine yakın olması biyolojik olarak parçalanabilen metaller içerisinde önemini artırmaktadır.
3. Mikro cerrahi gereksinimleri ve istenilen imalat kaliteleri, implant üretiminde mikro frezelemeyi en uygun yöntem olarak öne çıkarmaktadır.

4. Saf Magnezyumun fizyolojik ortamda hızla bozunması implantların mekanik bütünlüğünü erken kaybetmesine yol açar. Mg bazlı implantların korozyon direncinin artırılması için yüzey modifikasyonu yapılabilir. Bunun için en ideal yöntemlerden birisi mikro frezelemedir.
5. Mikro frezeleme, implantların ömrünü uzatmada kritik bir rol oynar. Kesme koşulları, yüzey özelliklerini belirler. Kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve çapak oluşumunun iyileştirilmesi; işlem verimliliğini artıracak, elde edilecek üç boyutlu geometrik yüzeylerden oluşan implantın uygulanma başarısını olumlu etkileyecektir.
6. Mikro frezelemede; cep boşaltma gibi işlemlerde takım ekseninin değişmesi sırasında ivmelenme sorunları ortaya çıkarak takımın ömrünü ve imalat kalitesini etkiler.
7. Mikro frezeleme, karmaşık üç boyutlu minyatür bileşenlerin steril üretiminde yüksek talaş kaldırma oranları, üretim hassasiyeti ve düşük maliyetiyle diğer işleme yöntemleri arasında ön plana çıkmaktadır.
8. Stratejik bir metal grubu olan magnezyum alaşımların mikro frezeleme ile imalatına dair çalışmaların literatürde kısıtlı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum büyük bir boşluk oluşturmaktadır.
9. Mikro frezelemede; talaş kalınlığı, uç yarıçapı ve minimum tane boyutu gibi faktörler kritiktir. Uygun olmayan talaş kalınlığı sürme etkisi yaratır ve talaş kaldırma mekanizmasını değiştirir. Talaş kalınlığı (h), en düşük talaş kalınlığından (hm) küçük olduğunda, kesici takım malzemeye baskı uygular ve talaş oluşumunu engeller. Takım sapması ve düşük ilerleme hızları, talaş oluşumunun engellenmesine neden olmaktadır.
10. Öngörülemez takım ömrü ve mikro parmak freze takımlarının erken kırılması, mikro frezelemenin başlıca sorunlarından birisidir.
11. Magnezyum alaşımları üzerine yapılan çalışmalar mikro frezelemede işlem parametrelerinin çok çeşitli etkilere sahip olmasının yanı sıra boyut etkisi, talaş miktarının az olması ve işlem sırasında oluşan ısı girdisi mikro frezelemede en etkin işlem parametresinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır.
12. Magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesinde kademeli bir aşınma süreci izlenmekle birlikte yığıntı talaş (BUE) oluşumları da gerçekleşmektedir.

Öneriler;

Magnezyum alaşımlarının insan vücudunda hızlı korozyona uğraması implant ömrünün kısalmasına neden olmaktadır, korozyon direncinin artırılması için farklı yüzey modifikasyonları araştırılması gerekmektedir;

Yüzey modifikasyonun sağlanabilmesi için mikro frezeleme üretim esnekliği, imalat kalitesi ve maliyet açısından en uygun yöntemlerden biri olmasına karşın standart magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Bu

eksiklik; magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesinin daha fazla araştırılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

İmplant başarısının artırılması için magnezyum alaşımlarının mikro frezelenmesinde öncelikli olarak yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi ve çapak oluşumunun azaltılmasına edilmesine yönelik çalışmalara odaklanılmalıdır. Düzlemsel mikro frezeleme ile elde edilecek veriler devamında daha kompleks şekillerinin üretilmesi için 3 eksenli mikro frezeleme çalışmalarını desteklemelidir.

Mikro frezeleme ile ilgili yapılacak çalışmalarda lazer destekli ve vibrasyon destekli hibrit yaklaşımların araştırılması mikro frezeleme çalışmalarına farklı bakış açısı kazandıracaktır.

Mikro frezelemede; farklı takım yollarının (düz, helisel, zigzag) üretim kalitesine ve takım aşınmasına etkisinin incelenmesi farklı imalat stratejilerinin geliştirilmesini sağlayacaktır.

Mikro frezelemede birçok çalışmada boyut etkisinden dolayı araştırma talaş kalınlığı odaklı yapılmıştır fakat işlem verimliliğinin artırılması için takımın yanıl kayma oranı üzerine yapılan çalışmaların artırılması gerekmektedir.

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

α : Talaş açısı

θ : Kesici kenarın açılal konumu

μm : mikrometre

Al: Alüminyum

a_p : Kesme derinliğı

BUE : Yığıntı talaş (Built up edge)

Ca: Kalsiyum

Co : Kobalt

Cr: Krom

EDM: Elektro erozyon

EIE (EBM): Elektron ışını eritme (Electron Beam Melting)

Eİ (AM): Ekllemeli imalat (Additive manufacturing)

f_1 : Anlık kesilmemiş talaş kalınlığı

f_z : Diş başı ilerleme

h: Talaş kalınlığı

h_m : en düşük (minimum) talaş kalınlığı

LIGA: Lithographie (Litografi), Galvanoformung (Elektro-kaplama), Abformung (Presle kalıplama)

Mg: Magnezyum

MEMS: Mikro Elektrik Mekanik Sistemler

NEMS: Nanoelektromekanik Sistemler

PEEK: Polieter eter keton

PGA: Poliglikolik asit

PHB: Poli(hidroksi bütirat)

PLA: Polilaktik Asit

RE: Nadir toprak elementleri (Rare-Earths)

Ra: Ortalama yüzey pürüzlülüğü

re: Kesici takım kesme kenarı yarıçapı

Sa: Yüzey boyunca Ra değeri

Sq: Yüzey boyunca Rq değeri

SLM (SLE): Seçici Lazer Ergitme (Selective laser melting)

Sz: Yüzey boyunca Rz değeri

Ti: Titanyum

Vc: Kesme hızı

Y : İtiryum

Zn: Çinko

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırma TÜBİTAK 2219 Yurt Dış Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı tarafından desteklenmiştir. Araştırma sürecine verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Musa BİLGİN: Fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması ve yazımda katkıda bulunmuştur.

Z. Murat KILIÇ: İçerik açısından makalenin kontrol edilmesi, sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesinde katkıda bulunmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Niinomi, M., Nakai, M., and Hieda, J., "Development of new metallic alloys for biomedical applications", *Acta Biomaterialia*, 8 (11): 3888–3903, (2012).
- [2] Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R., and Gogia, A.K., "Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - A review", *Progress in Materials Science*, 54 (3): 397–425, (2009).
- [3] Mutlu, İ., and Dizdar, A., "Geleneksel total kalça protezine alternatif epifiz protezinin mekanik değerlendirmesi", *Politeknik Dergisi*, 26 (1): 73–79, (2023).
- [4] Kamachimudali, U., Sridhar, T.M., and Raj, B., "Corrosion of bio implants", *Sadhana*, 28 (3–4): 601–637, (2003).
- [5] Hermawan, H., Ramdan, D., and P. Djuansjah, J.R., "Metals for biomedical applications, biomedical

- engineering - from theory to applications", *InTech*, (2011).
- [6] Huang, B., Yang, M., Kou, Y., and Jiang, B., "Bioactive materials absorbable implants in sport medicine and arthroscopic surgery: A narrative review of recent development", *Bioactive Materials*, 31 (11): 272–283, (2024).
- [7] Qin, Y., Wen, P., Guo, H., Xia, D., Zheng, Y., Jauer, L., Poprawe, R., Voshage, M., and Schleifenbaum, J.H., "Additive manufacturing of biodegradable metals: Current research status and future perspectives", *Acta Biomaterialia*, 98: 3–22, (2019).
- [8] Zheng, Y.F., Gu, X.N., and Witte, F., "Biodegradable metals", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 77: 1–34, (2014).
- [9] Chen, Q., and Thouas, G.A., "Metallic implant biomaterials", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 87: 1–57, (2015).
- [10] Ulum, M.F., Arafat, A., Noviana, D., Yusop, A.H., Nasution, A.K., Abdul Kadir, M.R., and Hermawan, H., "In vitro and in vivo degradation evaluation of novel iron-bioceramic composites for bone implant applications", *Materials Science and Engineering: C*, 36 (1): 336–344, (2014).
- [11] Purnama, A., Hermawan, H., Couet, J., and Mantovani, D., "Assessing the biocompatibility of degradable metallic materials: State-of-the-art and focus on the potential of genetic regulation", *Acta Biomaterialia*, 6 (5): 1800–1807, (2010).
- [12] Ma, J., Zhao, N., and Zhu, D., "Endothelial cellular responses to biodegradable metal zinc", *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 1 (11): 1174–1182, (2015).
- [13] Seitz, J., Durisin, M., Goldman, J., and Drelich, J.W., "Recent advances in biodegradable metals for medical sutures: a critical review", *Advanced Healthcare Materials*, 4 (13): 1915–1936, (2015).
- [14] Eddy Jai Poinern, G., Brundavanam, S., and Fawcett, D., "Biomedical magnesium alloys: A Review of material properties, surface modifications and potential as a biodegradable orthopaedic implant", *American Journal of Biomedical Engineering*, 2 (6): 218–240, (2013).
- [15] Sanchez, A.H.M., Luthringer, B.J.C., Feyerabend, F., and Willumeit, R., "Mg and Mg alloys: How comparable are in vitro and in vivo corrosion rates? A review", *Acta Biomaterialia*, 13: 16–31, (2015).
- [16] Niu, J., Xiong, M., Guan, X., Zhang, J., Huang, H., Pei, J., and Yuan, G., "The in vivo degradation and bone-implant interface of Mg-Nd-Zn-Zr alloy screws: 18 months post-operation results", *Corrosion Science*, 113: 183–187, (2016).
- [17] Yusop, A.H., Bakir, A.A., Shaharom, N.A., Abdul Kadir, M.R., and Hermawan, H., "Porous biodegradable metals for hard tissue scaffolds: A Review", *International Journal of Biomaterials*, 2012: 1–10, (2012).
- [18] Berglund, I.S., Brar, H.S., Dolgova, N., Acharya, A.P., Keselowsky, B.G., Santinoranont, M., and Manuel, M. V., "Synthesis and characterization of Mg-Ca-Sr alloys for biodegradable orthopedic implant applications", *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100B (6): 1524–1534, (2012).
- [19] Li, H., Zheng, Y., and Qin, L., "Progress of biodegradable metals", *Progress in Natural Science: Materials International*, 24 (5): 414–422, (2014).
- [20] Bauer, S., Schmuki, P., von der Mark, K., and Park, J., "Engineering biocompatible implant surfaces Part I: Materials and surfaces", *Progress in Materials Science*, 58 (3): 261–326, (2013).
- [21] Sezer, N., Evis, Z., Kayhan, S.M., Tahmasebifar, A., and Koç, M., "Review of magnesium-based biomaterials and their applications", *Journal of Magnesium and Alloys*, 6 (1): 23–43, (2018).
- [22] Prakasam, M., Locs, J., Salma-Ancane, K., Loca, D., Largeteau, A., and Berzina-Cimdina, L., "Biodegradable materials and metallic implants—A Review", *Journal of Functional Biomaterials*, 8 (4): 44, (2017).
- [23] Sommer, D., Götzendorfer, B., Esen, C., and Hellmann, R., "Design rules for hybrid additive manufacturing combining selective laser melting and micromilling", *Materials*, 14 (19): 5753, (2021).
- [24] Oliveira, D., Carla, A., Kapoor, S.G., de Oliveira Campos, F., Araujo, A.C., Jardim Munhoz, A.L., and Kapoor, S.G., "The influence of additive manufacturing on the micromilling machinability of Ti6Al4V: A comparison of SLM and commercial workpieces", *Journal of Manufacturing Processes*, 60 (November): 299–307, (2020).
- [25] Yun, Y., Dong, Z., Lee, N., Liu, Y., Xue, D., Guo, X., Kuhlmann, J., Doepke, A., Halsall, H.B., Heineman, W., Sundaramurthy, S., Schulz, M.J., Yin, Z., Shanov, V., Hurd, D., Nagy, P., Li, W., and Fox, C., "Revolutionizing biodegradable metals", *Materials Today*, 12 (10): 22–32, (2009).
- [26] Zhao, D., Witte, F., Lu, F., Wang, J., Li, J., and Qin, L., "Current status on clinical applications of magnesium-based orthopaedic implants: A review from clinical translational perspective", *Biomaterials*, 112: 287–302, (2017).
- [27] Lu, Y., Deshmukh, S., Jones, I., and Chiu, Y.L., "Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications", *Biomaterials Translational*, 2 (3): 214–235, (2021).
- [28] Ang, H.Q., Abbott, T.B., Zhu, S., Gu, C., and Easton, M.A., "Proof stress measurement of die-cast magnesium alloys", *Materials and Design*, 112: 402–409, (2016).
- [29] Antoniac, I., Miculescu, M., Mănescu (Păltănea), V., Stere, A., Quan, P.H., Păltănea, G., Robu, A., and Earar, K., "Magnesium-based alloys used in orthopedic surgery", *Materials*, 15 (3): 1148, (2022).
- [30] Wang, J., Xu, J., Hopkins, C., Chow, D.H., and Qin, L., "Biodegradable magnesium-based implants in orthopedics—A general review and perspectives", *Advanced Science*, 7 (8): (2020).
- [31] Song, G.L., and Atrens, A., "Corrosion mechanisms of magnesium alloys", *Advanced Engineering Materials*, 1 (1): 11–33, (1999).
- [32] Yamamoto, A., and Hiromoto, S., "Effect of inorganic salts, amino acids and proteins on the degradation of pure magnesium in vitro", *Materials Science and Engineering C*, 29 (5): 1559–1568, (2009).
- [33] Zhang, Y., Xu, J., Ruan, Y.C., Yu, M.K., O'Laughlin, M., Wise, H., Chen, D., Tian, L., Shi, D., Wang, J., Chen, S., Feng, J.Q., Chow, D.H.K., Xie, X., Zheng, L., Huang, L., Huang, S., Leung, K., Lu, N., Zhao, L., Li, H., Zhao, D., Guo, X., Chan, K., Witte, F., Chan, H.C., Zheng, Y., and Qin, L., "Implant-derived magnesium induces local neuronal production of CGRP to improve bone-fracture healing in rats", *Nature Medicine*, 22 (10): 1160–1169, (2016).
- [34] Witte, F., Kaese, V., Haferkamp, H., Switzer, E., Meyer-Lindenberg, A., Wirth, C.J., and Windhagen, H., "In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated

- bone response", *Biomaterials*, 26 (17): 3557–3563, (2005).
- [35] Kong, X., Wang, L., Li, G., Qu, X., Niu, J., Tang, T., Dai, K., Yuan, G., and Hao, Y., "Mg-based bone implants show promising osteoinductivity and controllable degradation: A long-term study in a goat femoral condyle fracture model", *Materials Science and Engineering C*, 86 (July 2017): 42–47, (2018).
- [36] Song, G., and Song, S., "A possible biodegradable magnesium implant material", *Advanced Engineering Materials*, 9 (4): 298–302, (2007).
- [37] Wang, X.J., Xu, D.K., Wu, R.Z., Chen, X.B., Peng, Q.M., Jin, L., Xin, Y.C., Zhang, Z.Q., Liu, Y., Chen, X.H., Chen, G., Deng, K.K., and Wang, H.Y., "What is going on in magnesium alloys?", *Journal of Materials Science & Technology*, 34 (2): 245–247, (2018).
- [38] Ding, Y., Wen, C., Hodgson, P., and Li, Y., "Effects of alloying elements on the corrosion behavior and biocompatibility of biodegradable magnesium alloys: a review", *J. Mater. Chem. B*, 2 (14): 1912–1933, (2014).
- [39] Jia, B., Yang, H., Han, Y., Zhang, Z., Qu, X., Zhuang, Y., Wu, Q., Zheng, Y., and Dai, K., "In vitro and in vivo studies of Zn-Mn biodegradable metals designed for orthopedic applications", *Acta Biomaterialia*, 108: 358–372, (2020).
- [40] Biber, R., Pauser, J., Geßlein, M., and Bail, H.J., "Magnesium-Based absorbable metal screws for intra-articular fracture fixation", *Case Reports in Orthopedics*, 2016: 1–4, (2016).
- [41] Naujokat, H., Seitz, J.M., Açil, Y., Damm, T., Möller, I., Gülses, A., and Wiltfang, J., "Osteosynthesis of a cranio-osteoplasty with a biodegradable magnesium plate system in miniature pigs", *Acta Biomaterialia*, 62: 434–445, (2017).
- [42] Han, H.S., Loffredo, S., Jun, I., Edwards, J., Kim, Y.C., Seok, H.K., Witte, F., Mantovani, D., and Glyn-Jones, S., "Current status and outlook on the clinical translation of biodegradable metals", *Materials Today*, 23 (March): 57–71, (2019).
- [43] Seetharaman, S., Jayalakshmi, S., Arvind Singh, R., and Gupta, M., "The potential of magnesium based materials for engineering and biomedical applications", *Journal of the Indian Institute of Science*, 102 (1): 421–437, (2022).
- [44] Liu, D., Yang, D., Li, X., and Hu, S., "Mechanical properties, corrosion resistance and biocompatibilities of degradable Mg-RE alloys: A review", *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (1): 1538–1549, (2019).
- [45] Watzky, H., Diekmann, J., Weizbauer, A., Reifenrath, J., Bartsch, T., Neubert, V., Schavan, R., and Windhagen, H., "In vivo study of a biodegradable orthopedic screw (MgYREZr-alloy) in a rabbit model for up to 12 months", *Journal of Biomaterials Applications*, 28 (5): 667–675, (2014).
- [46] Liu, J., Liu, B., Min, S., Yin, B., Peng, B., Yu, Z., Wang, C., Ma, X., Wen, P., Tian, Y., and Zheng, Y., "Biodegradable magnesium alloy WE43 porous scaffolds fabricated by laser powder bed fusion for orthopedic applications: Process optimization, in vitro and in vivo investigation", *Bioactive Materials*, 16 (February): 301–319, (2022).
- [47] Sun, Y., Wu, H., Wang, W., Zan, R., Peng, H., Zhang, S., and Zhang, X., "Bioactive materials translational status of biomedical Mg devices in China", *Bioactive Materials*, 4 (November 2019): 358–365, (2020).
- [48] Sealy, M.P., Guo, Y.B., Liu, J.F., and Li, C., "Pulsed laser cutting of magnesium-calcium for biodegradable stents", *Procedia CIRP*, 42 (Isem Xviii): 67–72, (2016).
- [49] Sealy, M.P., Guo, Y.B., Caslaru, R.C., Sharkins, J., and Feldman, D., "Fatigue performance of biodegradable magnesium-calcium alloy processed by laser shock peening for orthopedic implants", *International Journal of Fatigue*, 82: 428–436, (2016).
- [50] Edelmann, A., Riedel, L., and Hellmann, R., "Realization of a dental framework by 3D printing in material cobalt-chromium with superior precision and fitting accuracy", *Materials*, 13 (23): 5390, (2020).
- [51] Merklein, M., Junker, D., Schaub, A., and Neubauer, F., "Hybrid additive manufacturing technologies – An analysis regarding potentials and applications", *Physics Procedia*, 83: 549–559, (2016).
- [52] Allwood, J.M., Childs, T.H.C., Clare, A.T., De Silva, A.K.M., Dhokia, V., Hutchings, I.M., Leach, R.K., Leal-Ayala, D.R., Lowth, S., Majewski, C.E., Marzano, A., Mehnen, J., Nassehi, A., Ozturk, E., Raffles, M.H., Roy, R., Shyha, I., and Turner, S., "Manufacturing at double the speed", *Journal of Materials Processing Technology*, 229: 729–757, (2016).
- [53] Greco, S., Kieren-Ehse, S., Kirsch, B., and Aurich, J.C., "Micro milling of additively manufactured AISI 316L: impact of the layerwise microstructure on the process results", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112 (1–2): 361–373, (2021).
- [54] Bruschi, S., Tristo, G., Rysava, Z., Bariani, P.F., Umbrello, D., and De Chiffre, L., "Environmentally clean micromilling of electron beam melted Ti6Al4V", *Journal of Cleaner Production*, 133: 932–941, (2016).
- [55] Bartolo, P., Kruth, J.-P., Silva, J., Levy, G., Malshe, A., Rajurkar, K., Mitsuishi, M., Ciurana, J., and Leu, M., "Biomedical production of implants by additive electrochemical and physical processes", *CIRP Annals*, 61 (2): 635–655, (2012).
- [56] Demir, A.G., Previtali, B., Ge, Q., Vedani, M., Wu, W., Migliavacca, F., Petrini, L., Biffi, C.A., and Bestetti, M., "Biodegradable magnesium coronary stents: material, design and fabrication", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27 (10): 936–945, (2014).
- [57] Demir, A.G., Maressa, P., and Previtali, B., "Fibre laser texturing for surface functionalization", *Physics Procedia*, 41: 759–768, (2013).
- [58] Cappellini, C., Malandrucolo, A., Abeni, A., and Attanasio, A., "A feasibility study of promoting osseointegration surface roughness by micro-milling of Ti-6Al-4V biomedical alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126 (7–8): 3053–3067, (2023).
- [59] Trueba, P., Navarro, C., Rodríguez-Ortiz, J.A., Beltrán, A.M., García-García, F.J., and Torres, Y., "Fabrication and characterization of superficially modified porous dental implants", *Surface and Coatings Technology*, 408 (December 2020): 126796, (2021).
- [60] Jain, A., and Bajpai, V., "Alteration in Ti6Al4V implant surface properties with micro textures density", *Surface Engineering*, 38 (2): 174–182, (2022).
- [61] Kumar, S.P.L., and Avinash, D., "Experimental biocompatibility investigations of Ti-6Al-7Nb alloy in micromilling operation in terms of corrosion behavior and surface characteristics study", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and*

- Engineering*, 41 (9): 1–11, (2019).
- [62] Szewczenko, J., Marciniak, J., Kajzer, W., and Kajzer, A., "Evaluation of corrosion resistance of titanium alloys used for medical implants", *Archives of Metallurgy and Materials*, 61 (2): 695–700, (2016).
- [63] Chehroudi, B., McDonnell, D., and Brunette, D.M., "The effects of micromachined surfaces on formation of bonelike tissue on subcutaneous implants as assessed by radiography and computer image processing", *Journal of Biomedical Materials Research*, 34 (3): 279–290, (1997).
- [64] Chandra, G., and Pandey, A., "Biodegradable bone implants in orthopedic applications: a review", *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40 (2): 596–610, (2020).
- [65] Vadiraj, A., and Kamaraj, M., "Effect of surface treatments on fretting fatigue damage of biomedical titanium alloys", *Tribology International*, 40 (1): 82–88, (2007).
- [66] Wang, H., and Shi, Z., "In vitro biodegradation behavior of magnesium and magnesium alloy", *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 98B (2): 203–209, (2011).
- [67] Wan, Y., Wang, T., Wang, Z., Jin, Y., and Liu, Z., "Construction and characterization of micro/nano-topography on titanium alloy formed by micro-milling and anodic oxidation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98 (1–4): 29–35, (2018).
- [68] Buser, D., Nydegger, T., Oxland, T., Cochran, D.L., Schenk, R.K., Hirt, H.P., Snétivy, D., and Nolte, L.P., "Interface shear strength of titanium implants with a sandblasted and acid-etched surface: A biomechanical study in the maxilla of miniature pigs", *Journal of Biomedical Materials Research*, 45 (2): 75–83, (1999).
- [69] Denkena, B., Lucas, A., Thorey, F., Waizy, H., Angrisani, N., and Meyer-Lindenberg, A., "Biocompatible magnesium alloys as degradable implant materials - machining induced surface and subsurface properties and implant performance, special issues on magnesium alloys" *InTech*, (2011).
- [70] Klocke, F., Schwade, M., Klank, A., and Kopp, A., "EDM machining capabilities of magnesium (Mg) alloy WE43 for medical applications", *Procedia Engineering*, 19: 190–195, (2011).
- [71] Virtanen, S., "Degradation of titanium and its alloys, Degradation of implant materials. Springer, New York, (2012).
- [72] Lauro, C.H., Ribeiro Filho, S.L.M., Brandão, L.C., and Davini, J.P., "Analysis of behaviour biocompatible titanium alloy (Ti-6Al-7Nb) in the micro-cutting", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 93: 529–540, (2016).
- [73] Roushan, A., Srinivas Rao, U., Patra, K., and Sahoo, P., "Multi-characteristics optimization in micro-milling of Ti6Al4V alloy", *Journal of Physics: Conference Series*, 1950 (1): 012046, (2021).
- [74] Jain, A., Kumari, N., Jagadevan, S., and Bajpai, V., "Surface properties and bacterial behavior of micro conical dimple textured Ti6Al4V surface through micro-milling", *Surfaces and Interfaces*, 21 (September): 100714, (2020).
- [75] Pandey, L.M., and Hasan, A., "Nanoscale engineering of biomaterials: properties and applications", *Springer Nature Singapore*, Singapore, (2022).
- [76] O'Toole, L., Kang, C.W., and Fang, F.Z., "Precision micro-milling process: state of the art", *Advances in Manufacturing*, 9 (2): 173–205, (2021).
- [77] Chrzanowski, W., "Corrosion study of Ti6Al7Nb alloy after thermal, anodic and alkali surface treatments", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 31 (2): 203–211, (2008).
- [78] Babik, O., Czán, A., Holubják, J., Kameník, R., and Pilc, J., "Non-destructive analysis of basic surface characteristics of titanium dental implants made by miniature machining", *Technological Engineering*, 13 (2): 28–30, (2016).
- [79] Ercetin, A., Aslantaş, K., Özgün, Ö., Perçin, M., and Chandrashekarappa, M.P.G., "Optimization of machining parameters to minimize cutting forces and surface roughness in micro-milling of Mg13Sn alloy", *Micromachines*, 14 (8): 1590, (2023).
- [80] Li, J., Zhou, P., Attarilar, S., and Shi, H., "Innovative surface modification procedures to achieve micro/nano-graded ti-based biomedical alloys and implants", *Coatings*, 11(6): 647, (2021).
- [81] Erwin, N., Sur, D., and Basim, G.B., "Remediation of machining medium effect on biocompatibility of titanium-based dental implants by chemical mechanical nano-structuring", *Journal of Materials Research*, 37 (16): 2686–2697, (2022).
- [82] Byrne, G., Dornfeld, D., and Denkena, B., "Advancing cutting technology", *CIRP Annals*, 52 (2): 483–507, (2003).
- [83] Filiz, S., Xie, L., Weiss, L.E., and Ozdoganlar, O.B., "Micromilling of microbarbs for medical implants", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48 (3–4): 459–472, (2008).
- [84] Liu, H., Sun, Y., Geng, Y., and Shan, D., "Experimental research of milling force and surface quality for TC4 titanium alloy of micro-milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79 (1–4): 705–716, (2015).
- [85] Davis, J. *Materials for medical devices, ASM Handbook Series*, (2012).
- [86] Ratner, B.D., and Bryant, S.J., "Biomaterials: Where we have been and where we are going", *Annual Review of Biomedical Engineering*, 6 (1): 41–75, (2004).
- [87] Shen, N., and Ding, H., "Thermo-mechanical coupled analysis of laser-assisted mechanical micromilling of difficult-to-machine metal alloys used for bio-implant", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14 (10): 1677–1685, (2013).
- [88] Huo, D., and Cheng, K. "Overview of Micro Cutting, Micro-Cutting", Cheng, K., and Huo, D., *Wiley*, Chichester, (2013).
- [89] Chae, J., Park, S.S., and Freiheit, T., "Investigation of micro-cutting operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (3–4): 313–332, (2006).
- [90] Wang, G., Wan, Y., Ren, B., and Liu, Z., "Bioactivity of micropatterned TiO₂ nanotubes fabricated by micro-milling and anodic oxidation", *Materials Science and Engineering C*, 95 (June 2018): 114–121, (2019).
- [91] Jain, A., and Bajpai, V., "Mechanical micro-texturing and characterization on Ti6Al4V for the improvement of surface properties", *Surface and Coatings Technology*, 380 (July): 125087, (2019).
- [92] Janssen, P.J.M., Hoefnagels, J.P.M., de Keijser, T.H., and Geers, M.G.D., "Processing induced size effects in plastic yielding upon miniaturisation", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56 (8): 2687–2706,

- (2008).
- [93] Jin, X., and Altintas, Y., "Slip-line field model of micro-cutting process with round tool edge effect", *Journal of Materials Processing Technology*, 211 (3): 339–355, (2011).
- [94] Leo Kumar, S.P., Jerald, J., Kumanan, S., and Prabakaran, R., "A review on current research aspects in tool-based micromachining processes", *Materials and Manufacturing Processes*, 29 (11–12): 1291–1337, (2014).
- [95] Asad, A.B.M.A., Masaki, T., Rahman, M., Lim, H.S., and Wong, Y.S., "Tool-based micro-machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193: 204–211, (2007).
- [96] Sun, Y., Gong, Y.D., Wen, X.L., Yin, G.Q., and Meng, F.T., "Micro milling characteristics of LS-WEDM fabricated helical and corrugated micro end mill", *International Journal of Mechanical Sciences*, 167 (October 2019): 105277, (2020).
- [97] Chen, N., Li, L., Wu, J., Qian, J., He, N., and Reynaerts, D., "Research on the ploughing force in micro milling of soft-brittle crystals", *International Journal of Mechanical Sciences*, 155 (November 2018): 315–322, (2019).
- [98] Boswell, B., Islam, M.N., and Davies, I.J., "A review of micro-mechanical cutting", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (1–4): 789–806, (2018).
- [99] Koç, M., and Özel, T., "Fundamentals of micro-manufacturing, *Micro-Manufacturing: Design and manufacturing of micro-products*", Wiley, U.S.A. (2019).
- [100] Guckenberger, D.J., de Groot, T.E., Wan, A.M.D., Beebe, D.J., and Young, E.W.K., "Micromilling: a method for ultra-rapid prototyping of plastic microfluidic devices", *Lab on a Chip*, 15 (11): 2364–2378, (2015).
- [101] Piljek, P., Keran, Z., and Math, M., "Micromachining", *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 12 (1): 1–27, (2014).
- [102] Dimov, S. S., Matthews, C. W., Glanfield, A., and Dorrington, P., "A roadmapping study in multi-material micro manufacture", In *4M 2006-Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, pp: xi-xxv, Elsevier, (2006).
- [103] Bilgin, M., "AZ31B magnezyum alaşiminin sürtünmeli delme işlemi üzerine deneysel çalışma Experimental study on the friction drilling process of AZ31B magnesium alloy", *Politeknik Dergisi*, 24 (4): 1655–1666, (2021).
- [104] Aktüz, B., "A comparative study on wear and machinability behaviors of AM20, AJ21 and AS21 magnesium alloys", *Politeknik Dergisi*, 26 (1): 243–248, (2023).
- [105] Balázs, B.Z., Geier, N., Takács, M., and Davim, J.P., "A review on micro-milling: recent advances and future trends", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112 (3–4): 655–684, (2021).
- [106] Pu, Z., Outeiro, J.C., Batista, A.C., Dillon, O.W., Puleo, D.A., and Jawahir, I.S., "Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 56: 17–27, (2012).
- [107] Sunil, B.R., Ganesh, K. V., Pavan, P., Vadapalli, G., Swarnalatha, C., Swapna, P., Bindukumar, P., and Pradeep Kumar Reddy, G., "Effect of aluminum content on machining characteristics of AZ31 and AZ91 magnesium alloys during drilling", *Journal of Magnesium and Alloys*, 4 (1): 15–21, (2016).
- [108] Wang, F., Cheng, X., Liu, Y., Yang, X., and Meng, F., "micromilling simulation for the hard-to-cut material", *Procedia Engineering*, 174: 693–699, (2017).
- [109] Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Yang, S., Cooke, K.E., and Teer, D.G., "Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48 (14): 1578–1584, (2008).
- [110] Kumar, P., Bajpai, V., and Singh, R., "Burr height prediction of Ti6Al4V in high speed micro-milling by mathematical modeling", *Manufacturing Letters*, 11: 12–16, (2017).
- [111] Sahoo, P., Patra, K., Szalay, T., and Dyakonov, A.A., "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 (11–12): 4675–4691, (2020).
- [112] Balázs, B.Z., and Takács, M., "Experimental investigation and optimisation of the micro milling process of hardened hot-work tool steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (11–12): 5289–5305, (2020).
- [113] Gao, S., Pang, S., Jiao, L., Yan, P., Luo, Z., Yi, J., and Wang, X., "Research on specific cutting energy and parameter optimization in micro-milling of heat-resistant stainless steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89 (1–4): 191–205, (2017).
- [114] Dib, M.H.M., Duduch, J.G., and Jasinevicius, R.G., "Minimum chip thickness determination by means of cutting force signal in micro endmilling", *Precision Engineering*, 51 (July 2017): 244–262, (2018).
- [115] De Oliveira, F.B., Rodrigues, A.R., Coelho, R.T., and De Souza, A.F., "Size effect and minimum chip thickness in micromilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89: 39–54, (2015).
- [116] Wojciechowski, S., Matuszak, M., Powalka, B., Madajewski, M., Maruda, R.W., and Królczyk, G.M., "Prediction of cutting forces during micro end milling considering chip thickness accumulation", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 147 (2019): 103466, (2019).
- [117] Hajiahmadi, S., "Burr size investigation in micro milling of stainless steel 316L", *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2 (4): 296–304, (2019).
- [118] Zhang, T., Liu, Z., and Xu, C., "Influence of size effect on burr formation in micro cutting", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68 (9–12): 1911–1917, (2013).
- [119] Biermann, D., and Kahnis, P., "Analysis and simulation of size effects in micromilling", *Production Engineering*, 4 (1): 25–34, (2010).
- [120] Aramcharoen, A., and Mativenga, P.T., "Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel", *Precision Engineering*, 33 (4): 402–407, (2009).
- [121] de Oliveira, D., Gomes, M.C., de Oliveira, G.V., dos Santos, A.G., and da Silva, M.B., "Experimental and computational contribution to chip geometry evaluation when micromilling Inconel 718", *Wear*, 476 (September 2020): 203658, (2021).
- [122] Kim, J.-D., and Kim, D.S., "Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision

- machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 49 (3–4): 387–398, (1995).
- [123] Lee, K., and Dornfeld, D.A., "Micro-burr formation and minimization through process control", *Precision Engineering*, 29 (2): 246–252, (2005).
- [124] Özel, T., Liu, X., and Dhanorker, A., "Modelling and simulation of micro-milling process", *4th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS*, Çeşme/Türkiye, 21–23, (2007).
- [125] Chen, N., Li, H.N., Wu, J., Li, Z., Li, L., Liu, G., and He, N., "Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 160 (November 2020): 103670, (2021).
- [126] Fang, B., Yuan, Z., Li, D., and Gao, L., "Effect of ultrasonic vibration on finished quality in ultrasonic vibration assisted micromilling of Inconel718", *Chinese Journal of Aeronautics*, 34 (6): 209–219, (2021).
- [127] Altıng, L., Kimura, F., Hansen, H.N., and Bissacco, G., "Micro engineering", *CIRP Annals*, 52 (2): 635–657, (2003).
- [128] Teng, X., Huo, D., Shyha, I., Chen, W., and Wong, E., "An experimental study on tool wear behaviour in micro milling of nano Mg/Ti metal matrix composites", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (5–8): 2127–2140, (2018).
- [129] Trent E.M., and Wright P.K. "Metal cutting", *Butterworth-Heinemann*, Boston, (2004).
- [130] Bissacco, G., Hansen, H.N., and De Chiffre, L., "Micromilling of hardened tool steel for mould making applications", *Journal of Materials Processing Technology*, 167 (2–3): 201–207, (2005).
- [131] Chen, W., Zheng, L., Teng, X., Yang, K., and Huo, D., "Finite element simulation and experimental investigation on cutting mechanism in vibration assisted micro-milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105 (11): 4539–4549, (2019).
- [132] Li, P., Oosterling, J.A.J., Hoogstrate, A.M., Langen, H.H., and Munnig Schmidt, R.H., "Design of micro square endmills for hard milling applications", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57 (9–12): 859–870, (2011).
- [133] Tansel, I., Rodríguez, O., Trujillo, M., Paz, E., and Li, W., "Micro-end-milling—I. Wear and breakage", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38 (12): 1419–1436, (1998).
- [134] Malekian, M., Mostofa, M.G., Park, S.S., and Jun, M.B.G., "Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum", *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (3): 553–559, (2012).
- [135] Yuan, Z.J., Zhou, M., and Dong, S., "Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 62 (4): 327–330, (1996).
- [136] Liu, J., Li, J., and Xu, C., "Interaction of the cutting tools and the ceramic-reinforced metal matrix composites during micro-machining: A review", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7 (2): 55–70, (2014).
- [137] Anand, R.S., and Patra, K., "Mechanistic cutting force modelling for micro-drilling of CFRP composite laminates", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16: 55–63, (2017).
- [138] Weule, H., Hüntrup, V., and Tritschler, H., "Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization", *CIRP Annals*, 50 (1): 61–64, (2001).
- [139] Sooraj, V.S., and Mathew, J., "An experimental investigation on the machining characteristics of microscale end milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56 (9–12): 951–958, (2011).
- [140] H. Tschätsch, "Applied machining technology", *Springer Berlin Heidelberg*, Berlin, (2009).
- [141] Uhlmann, E., Oberschmidt, D., Kuche, Y., and Löwenstein, A., "Cutting edge preparation of micro milling tools", *Procedia CIRP*, 14: 349–354, (2014).
- [142] Shaw, M.C., "The size effect in metal cutting", *Sadhana*, 28 (5): 875–896, (2003).
- [143] Câmara, M.A., Rubio, J.C.C., Abrão, A.M., and Davim, J.P., "State of the art on micromilling of materials, a review", *Journal of Materials Science & Technology*, 28 (8): 673–685, (2012).
- [144] Liu, K., and Melkote, S.N., "Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process", *International Journal of Mechanical Sciences*, 49 (5): 650–660, (2007).
- [145] Silva, L.C., and da Silva, M.B., "Investigation of burr formation and tool wear in micromilling operation of duplex stainless steel", *Precision Engineering*, 60 (July): 178–188, (2019).
- [146] Chern, G.-L., Wu, Y.-J.E., Cheng, J.-C., and Yao, J.-C., "Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM", *Precision Engineering*, 31 (2): 122–129, (2007).
- [147] Yadav, R., Chakladar, N.D., and Paul, S., "Micro-milling of Ti-6Al-4 V with controlled burr formation", *International Journal of Mechanical Sciences*, 231 (July): 107582, (2022).
- [148] Kumar, P., Kumar, M., Bajpai, V., and Singh, N.K., "Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling", *Manufacturing Letters*, 13: 1–5, (2017).
- [149] Schaller, T., Bohn, L., Mayer, J., and Schubert, K., "Microstructure grooves with a width of less than 50 µm cut with ground hard metal micro end mills", *Precision Engineering*, 23 (4): 229–235, (1999).
- [150] Fang, F.Z., and Liu, Y.C., "On minimum exit-burr in micro cutting", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14 (7): 984–988, (2004).
- [151] Filiz, S., Conley, C.M., Wasserman, M.B., and Ozdoganlar, O.B., "An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (7–8): 1088–1100, (2007).
- [152] Zhang, X., Yu, T., Wang, W., and Zhao, J., "Improved analytical prediction of burr formation in micro end milling", *International Journal of Mechanical Sciences*, 151 (December 2018): 461–470, (2019).
- [153] Kou, Z., Wan, Y., Cai, Y., Liang, X., and Liu, Z., "Burr controlling in micro milling with supporting material method", *Procedia Manufacturing*, 1: 501–511, (2015).
- [154] Yadav, R., Chakladar, N.D., and Paul, S., "Modelling and experimental validation of burr control in micro milling of metals", *Materials Today Communications*, 35 (March): 106205, (2023).
- [155] Chen, Y., Wang, T., and Zhang, G., "Research on parameter optimization of micro-milling al7075 based on edge-size-effect", *Micromachines*, 11 (2): 197, (2020).

- [156] Schmidt, J., and Tritschler, H., "Micro cutting of steel", *Microsystem Technologies*, 10 (3): 167–174, (2004).
- [157] Attanasio, A., Gelfi, M., Pola, A., Ceretti, E., and Giardini, C., "Influence of material microstructures in micromilling of Ti6Al4V alloy", *Materials*, 6 (9): 4268–4283, (2013).
- [158] Wan, M., Ye, X.Y., Wen, D.Y., and Zhang, W.H., "Modeling of machining-induced residual stresses", *Journal of Materials Science*, 54 (1): 1–35, (2019).
- [159] Lekkala, R., Bajpai, V., Singh, R.K., and Joshi, S.S., "Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling", *Precision Engineering*, 35 (4): 625–637, (2011).
- [160] Uhlmann, E., Piltz, S., and Schauer, K., "Micro milling of sintered tungsten-copper composite materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 167 (2–3): 402–407, (2005).
- [161] K, V., and Mathew, J., "Wear behavior of TiAlN coated WC tool during micro end milling of Ti-6Al-4V and analysis of surface roughness", *Wear*, 424–425 (February): 165–182, (2019).
- [162] Swain, N., Venkatesh, V., Kumar, P., Srinivas, G., Ravishankar, S., and Barshilia, H.C., "An experimental investigation on the machining characteristics of Nimonic 75 using uncoated and TiAlN coated tungsten carbide micro-end mills", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16: 34–42, (2017).
- [163] Gilbin, A., Fontaine, M., Michel, G., Thibaud, S., and Picard, P., "Capability of tungsten carbide micro-mills to machine hardened tool steel", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14 (1): 23–28, (2013).
- [164] Piquard, R., D'Acunto, A., Laheurte, P., and Dudzinski, D., "Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation", *Precision Engineering*, 38 (2): 356–364, (2014).
- [165] Biermann, D., and Steiner, M., "Analysis of micro burr formation in austenitic stainless steel X5CrNi18-10", *Procedia CIRP*, 3 (1): 97–102, (2012).
- [166] Uhlmann, E., Oberschmidt, D., Löwenstein, A., and Kuche, Y., "Influence of cutting edge preparation on the performance of micro milling tools", *Procedia CIRP*, 46: 214–217, (2016).
- [167] Vogler, M.P., DeVor, R.E., and Kapoor, S.G., "On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling. Part I: Surface generation", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126 (4): 685–694, (2004).
- [168] Aslantas, K., Hopa, H.E., Percin, M., Uzun, İ., and Çicek, A., "Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy", *Precision Engineering*, 45: 55–66, (2016).
- [169] Ahmadi, M., Karpat, Y., Acar, O., and Kalay, Y.E., "Microstructure effects on process outputs in micro scale milling of heat treated Ti6Al4V titanium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 252 (September 2017): 333–347, (2018).
- [170] Wang, Y., Zou, B., Wang, J., Wu, Y., and Huang, C., "Effect of the progressive tool wear on surface topography and chip formation in micro-milling of Ti-6Al-4V using Ti(C7N3)-based cermet micro-mill", *Tribology International*, 141 (August 2019): 105900, (2020).
- [171] Yang, K., Liang, Y., Zheng, K., Bai, Q., and Chen, W., "Tool edge radius effect on cutting temperature in micro-end-milling process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52 (9–12): 905–912, (2011).
- [172] Zhu, K., and Yu, X., "The monitoring of micro milling tool wear conditions by wear area estimation", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 93: 80–91, (2017).
- [173] Mian, A.J., Driver, N., and Mativenga, P.T., "Identification of factors that dominate size effect in micro-machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51 (5): 383–394, (2011).
- [174] Mamedov, A., and Lazoglu, I., "Thermal analysis of micro milling titanium alloy Ti-6Al-4V", *Journal of Materials Processing Technology*, 229: 659–667, (2016).
- [175] Wissmiller, D.L., and Pfefferkorn, F.E., "Technical paper: Micro end mill tool temperature measurement and prediction", *Journal of Manufacturing Processes*, 11 (1): 45–53, (2009).
- [176] Geier, N., Davim, J.P., and Szalay, T., "Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125 (February): 105552, (2019).
- [177] Geier, N., and Szalay, T., "Optimisation of process parameters for the orbital and conventional drilling of uni-directional carbon fibre-reinforced polymers (UD-CFRP)", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 110: 319–334, (2017).
- [178] A. Masrani, "Identification of internal process parameters of micro milling considering machined surface", *Bilkent University*, Master's thesis, (2022)
- [179] Teng, X., Huo, D., Wong, E., Meenashisundaram, G., and Gupta, M., "Micro-machinability of nanoparticle-reinforced Mg-based MMCs: an experimental investigation", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87 (5–8): 2165–2178, (2016).
- [180] Teng, X., Huo, D., Wong, W.L.E., Sankaranarayanan, S., and Gupta, M., "Machinability investigation in micro-milling of Mg based MMCs with nano-sized particles, Magnesium Technology 2017", Solanki, K.N., Orlov, D., Singh, A., and Neelameggham, N.R., *Springer*, Cham, (2017).
- [181] Simoneau, A., Ng, E., and Elbestawi, M.A., "Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (5): 467–481, (2006).
- [182] Yun, H.T., Heo, S., Lee, M.K., Min, B.K., and Lee, S.J., "Ploughing detection in micromilling processes using the cutting force signal", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51 (5): 377–382, (2011).
- [183] Lai, X., Li, H., Li, C., Lin, Z., and Ni, J., "Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48 (1): 1–14, (2008).
- [184] Kieren-Ehse, S., Böhme, L., Morales-Rivas, L., Lösch, J., Kirsch, B., Kersch, E., Kopnarski, M., and Aurich, J.C., "The influence of the crystallographic orientation when micro machining commercially pure titanium: A size effect", *Precision Engineering*, 72 (April): 158–171, (2021).
- [185] Tansel, I., Nedbouyan, A., Trujillo, M., and Tansel, B., "Micro-end-milling—II. extending tool life with a smart workpiece holder (SWH)", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38 (12): 1437–1448, (2000).

- (1998).
- [186] Liu, J., Li, J., and Xu, C., "Cutting force prediction on micromilling magnesium metal matrix composites with nanoreinforcements", *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 1 (1): 1–10, (2013).
- [187] Afazov, S.M., Zdebski, D., Ratchev, S.M., Segal, J., and Liu, S., "Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability", *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (5): 671–684, (2013).
- [188] Wu, X., Li, L., He, N., Yao, C., and Zhao, M., "Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting", *Precision Engineering*, 45: 359–364, (2016).
- [189] Lu, X., Wang, F., Jia, Z., Si, L., Zhang, C., and Liang, S.Y., "A modified analytical cutting force prediction model under the tool flank wear effect in micro-milling nickel-based superalloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91 (9–12): 3709–3716, (2017).
- [190] Mittal, R.K., Kulkarni, S.S., and Singh, R.K., "Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V", *Journal of Manufacturing Processes*, 28: 413–421, (2017).
- [191] Pratap, T., Patra, K., and Dyakonov, A.A., "Modeling cutting force in micro-milling of Ti-6Al-4V titanium alloy", *Procedia Engineering*, 129: 134–139, (2015).
- [192] Sun, Q., Cheng, X., Liu, Y., Yang, X., and Li, Y., "Modeling and simulation for micromilling mechanisms", *Procedia Engineering*, 174: 760–766, (2017).
- [193] Takács, M., Balázs, B.Z., and Jáuregui, J.C., "Dynamical aspects of micro milling process", IN-TECH 2017 *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies*, 181–184, (2017).
- [194] Singh, K.K., Kartik, V., and Singh, R., "Via velocity and chip load dependent cutting coefficients", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 96: 56–66, (2015).
- [195] Moges, T.M., Desai, K.A., and Rao, P.V.M., "Modeling of cutting force, tool deflection and surface error in micro-milling operation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98 (9–12): 2865–2881, (2018).
- [196] Uriarte, L., Herrero, A., Zatarain, M., Santiso, G., López de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., and Albizuri, J., "Error budget and stiffness chain assessment in a micromilling machine equipped with tools less than 0.3 mm in diameter", *Precision Engineering*, 31 (1): 1–12, (2007).
- [197] Singh, K.K., and Singh, R., "Chatter stability prediction in high-speed micromilling of Ti6Al4V via finite element based microend mill dynamics", *Advances in Manufacturing*, 6 (1): 95–106, (2018).
- [198] Ma, L., Howard, I., Pang, M., Wang, Z., and Su, J., "Experimental investigation of cutting vibration during micro-end-milling of the straight groove", *Micromachines*, 11 (5): 494, (2020).
- [199] Yilmaz, E.E., Budak, E., and Özgüven, H.N., "Modeling and measurement of micro end mill dynamics using inverse stability approach", *Procedia CIRP*, 46: 242–245, (2016).
- [200] Zhang, X., Yu, T., and Wang, W., "Prediction of cutting forces and instantaneous tool deflection in micro end milling by considering tool run-out", *International Journal of Mechanical Sciences*, 124–133, (2018).
- [201] Baschin, A., Kahnis, P., and Biermann, D., "Dynamikanalyse des mikrofräsprozesses - einfluss von werkzeugschwingungen auf die qualität von mikrostrukturen", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39 (9): 616–621, (2008).
- [202] Wang, D., Wang, X., Liu, Z., Gao, P., Ji, Y., Löser, M., and Ihlenfeldt, S., "Surface location error prediction and stability analysis of micro-milling with variation of tool overhang length", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99 (1–4): 919–936, (2018).
- [203] Biermann, D., and Baschin, A., "Influence of cutting edge geometry and cutting edge radius on the stability of micromilling processes", *Production Engineering*, 3 (4–5): 375–380, (2009).
- [204] Richter, L.E., Carlos, A., and Beber, D.M. "Machining", *ASM International*, (1989).
- [205] Weinert, K., Inasaki, T., Sutherland, J.W., and Wakabayashi, T., "Dry machining and minimum quantity lubrication", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53 (2): 511–537, (2004).
- [206] Zhao, N., Hou, J., and Zhu, S., "Chip ignition in research on high-speed face milling AM50A magnesium alloy", *2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE 2011 - Proceedings*, 1102–1105, (2011).
- [207] Akyuz, B., "Influence of Al content on machinability of AZ series Mg alloys", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23 (8): 2243–2249, (2013).
- [208] Luxfer, "Machining magnesium," *Luxfer Machining Magnesium*. [Online]. Available: <https://www.luxfermeltechnologies.com/wp-content/uploads/2021/07/Luxfer-MEL-Technologies-DS-254-Machining-Magnesium.pdf>
- [209] Catherine, L.D.K., and Hamid, D.A., "Mechanical properties and machinability of magnesium alloy AZ31 and AZ91 - A Comparative review", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1062 (1): 0–6, (2021).
- [210] Gül, C., Albayrak, S., Çömez, N., and Durmuş, H., "WE43 Magnezyum alaşımının soğuk sprey kaplama yöntemi ile Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ kaplanması ve aşınma davranışlarının incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 25 (4): 1791–1798, (2022).
- [211] Kulekci, M.K., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry", *Int J Adv Manuf Technol*, 39: 851–865, (2008).
- [212] Villeta, M., Rubio, E.M., Sáenz De Pipaón, J.M., and Sebastián, M.A., "Surface finish optimization of magnesium pieces obtained by dry turning based on taguchi techniques and statistical tests", *Materials and Manufacturing Processes*, 26 (12): 1503–1510, (2011).
- [213] Geng, H., "Manufacturing engineering handbook. 2nd ed", *McGraw-Hill Education*, New York, (2016).
- [214] Pang, S., Zhao, W., Qiu, T., Liu, W., Jiao, L., and Wang, X., "Study on surface quality and mechanical properties of micro-milling WE43 magnesium alloy cardiovascular stent", *Journal of Manufacturing Processes*, 101 (February): 1080–1090, (2023).
- [215] Ay, M., Etyemez, A., and Aydin, U., "Milling of magnesium alloy with micro cutting tools", *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 3 (1): 30–34, (2019).
- [216] Etyemez, A., and Aydin, U., "Investigation of the effects of machining parameters on surface integrity in micromachining", *Open Chemistry*, 20 (1): 212–224,

- (2022).
- [217] Suneesh, E., and Sivapragash, M., "Multi-response optimisation of micro-milling performance while machining a novel magnesium alloy and its alumina composites", *Measurement*, 168 (March 2020): 108345, (2021).
- [218] Li, J., Liu, J., and Xu, C., "Machinability study of SiC nano-particles reinforced magnesium nanocomposites during micro-milling processes", *ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 2*, 391–398, (2010).
- [219] Erçetin, A., Aslantas, K., and Özgün, Ö., "Micro-end milling of biomedical TZ54 magnesium alloy produced through powder metallurgy", *Machining Science and Technology*, 24 (6): 924–947, (2020).
- [220] Tharaknath, S., and Rahamathullah, I., "Mechanical, chemical, metallurgical characteristics under HBSS solution and optimization of AZ91D-Ti functional graded composites using TOPSIS", *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 37 (1): 77–89, (2022).

ERKEN GÖRÜNÜM