

Yüzey Pürüzlülüğünün Giderilmesinde Taşlama ve Manyetik Aşındırıcılar ile İşleme Yöntemlerinin Etkileri

Tuba DEMİREL¹ 

¹Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye,
tuba.demirel@hku.edu.tr (Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

Makale Bilgileri

ÖZ

Makale Geçmişi

Geliş: 25.05.2023

Kabul: 26.06.2023

Yayın: 31.12.2023

Anahtar Kelimeler:

MAİ, Taşlama, Yüzey parlaklığı.

Manyetik aşındırıcı yöntem (MAİ), metal yüzeyinin yüzey pürüzlülüklerinin azaltılmasında ve yüzeyinin parlatılmasında kullanılan özel bir işleme tekniğidir. Hassas ve karmaşık geometrilere sahip parçaların işlenmesi için etkili bir şekilde kullanılabilir. Freze ve torna işlemlerinden sonra metal yüzeyin parlatılmasında geleneksel taşlama yöntemi kullanılırken Son 10 yılda MAİ yöntemi denenmeye başlanmıştır. MAİ yöntemi, aşındırıcı taneler bir taşıyıcı aparatın içindeki miktatıslar ile manyetik olarak uyarılır ve işlenecek malzemenin yüzeyine yaklaştırılır. Manyetik alanın etkisiyle aşındırıcı taneler, malzemenin yüzeyini etkileyerek istenilen şekil, pürüzsüzlük ve parlaklık elde etmeye yardımcı olur. Literatürde şimdiye kadar karşılaştırılması yapılmamış MAİ ve taşlama yöntemlerinin, iş parçasının yüzey pürüzlülük değerlerine olan etkileri araştırılmıştır. MAİ yönteminde manyetik alan yardımı ile aşındırıcı tozlar, esnek fırça haline gelirken taşlama yönteminde ise aşındırıcı tozlar zımpara taşında yapışkan ile bir arada tutularak esneklik özelliği olmamasıdır. Inconel718 nikel alaşımının taşlama yöntemi ile yüzey parlatma işleminden önce R_a : 0,473 μm iken Ti-6Al-4V alaşımın MAİ yönteminden önce R_a : 0,153 μm değeri olmaktadır. Yüzeyi işleyen yöntemleri kendi içinde değerlendirildiğinde, Inconel718'de R_a : 0,153 μm 'ye düşmüştür. Ti-6Al-4V'de ise R_a : 0,117 μm 'ye düşmüştür. MAİ yönteminin alternatif yöntem olacağı görülmüştür. Bu yöntemle, karmaşık ve hassas iş parçalarının işlenmesini kolaylaştıracaktır. İki yöntem için kullanılan kesme kuvvetinin matematiksel modellemeleri incelenmiştir. Çalışmanın temellendirildiği fikirde literatür bulguları uyumlu bulunmuştur.

Effects of Grinding and Magnetic Abrasive Finishing Methods on Removal of Surface Roughness

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 25.05.2023

Accepted: 26.06.2023

Published: 31.12.2023

Keywords:

MAF, Grinding, Surface polishing.

Magnetic abrasive machining (MAF) is a specialized machining technique used to reduce surface roughness and polish the surface of metal. It can be effectively used for machining parts with precision and complex geometries. While the traditional grinding method is used for polishing the metal surface after milling and turning operations, the MAF method has been tried in the last 10 years. In the MAF method, abrasive grains are magnetically excited by magnets in a carrier apparatus and brought close to the surface of the material to be machined. Under the influence of the magnetic field, the abrasive grains affect the surface of the material and help to obtain the desired shape, smoothness and gloss. The effects of MAF and grinding methods, which have not been compared in the literature so far, on the surface roughness values of the workpiece were investigated. In the MAF method, the abrasive powders become flexible brushes with the help of magnetic field, while in the grinding method, the abrasive powders are held together with adhesive on the abrasive wheel and do not have flexibility. While R_a : 0.473 μm for Inconel718 nickel alloy before surface polishing with grinding method, R_a : 0.153 μm for Ti-6Al-4V alloy before MAF method. When the surface treatment methods are evaluated within themselves, R_a : 0.153 μm in Inconel718. In Ti-6Al-4V, R_a decreased to 0.117 μm . It was seen that the MAF method would be an alternative method. This method will facilitate the machining of complex and precise workpieces. Mathematical modeling of the cutting force used for the two methods was investigated. The idea on which the study was based was found to be consistent with the literature findings.

Atıf/Citation: Demirel, T. (2023). Yüzey pürüzlülüğünün giderilmesinde taşlama ve manyetik aşındırıcılar ile işleme yöntemlerinin etkileri, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 111-134.
<https://doi.org/10.47112/neufmbd.2023.13>



"This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). (CC BY-NC 4.0)"

GİRİŞ (INTRODUCTION)

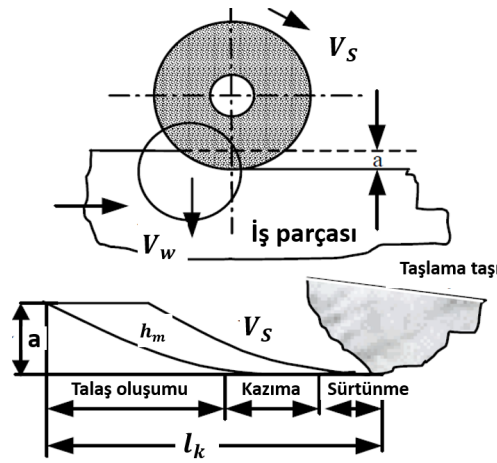
İmalat alanı içinde talaş kaldırma yönteminde üç temel yöntem bulunmaktadır. Metal iş parçasının şekillendirilmesinde talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır [1,2]. Geleneksel olan imalat yönteminde, malzemeyi kaldırmak için kesici takım kullanılmaktadır. Geleneksel olmayan talaşlı imalat yönteminde ise kesici takım yerine enerjinin çeşitli formları kullanılarak malzeme kaldırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Aşındırıcılarla talaş kaldırma yöntemleri; taşlama, honlama, lepleme, hassas işleme parlatma yöntemlerinden oluşmaktadır [1-4]. Torna ve freze tezgahlarında bulunan kesici takım ile iş malzemesi üzerinden talaş kaldırma işlemi sırasında, fiziksel temas olunca gerilme ile talaş kaldırma işlemi gerçekleşmektedir [5,6]. Geleneksel imalat (torna, freze, taşlama vb.) işlemi sırasında, malzemenin üzerinde plastik-kayma deformasyonlarından kaynaklanan talaş oluşumu gözlenip kesicinin ucunda da önemli ölçüde ısı oluşmaktadır [1,2,6].

Tornalama, frezeleme işlemlerinden sonra yüzeyin kalitesi bozularak pürüzlülük değerinin artmasıdır. Bu pürüzlenmenin önüne geçebilmek için yüzeyin parlatılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yüzeyi daha parlak hale getirmek için imalat sektöründe taşlama yöntemi kullanılmaktadır [7-11]. Sert aşındırıcılar sayesinde iş parçası üzerinden talaş kaldırılarak yüzey temizlemesi yapılmaktadır [8,9,11-15]. Taşlama yöntemindeki aşındırıcılar, yüksek hızla dönen aşındırıcı tozların bir arada bulunduğu tekerlek biçimindeki aparatlardır [7-11]. Bu aparatlar ile yüzeyden çapak alma ve pürüzlerin giderilmesi daha kolay hale gelmiştir [8,9,11-15]. İmalat sanayisinde; makine parçalarına tornalama, frezeleme vs. işleme yöntemleri kullanılarak şekil verildikten sonra yüzeyi hem parlatmak hem de Ra'yı gidermek için taşlama yöntemi önem arz etmektedir [16,17]. Geleneksel yöntemlerden taşlama yönteminde ki taşlama tezgahları 4 çeşittir; 1-Düzlem (sath) taşlama da iş parçalarının düzlem yüzeyleri taşlanmaktadır. 2-Silindirik taşlama, kendine ait delik taşlama aparatıyla yapılmaktadır. 3-Puntasız taşlama da ise sevk kızıağı üzerinde bulunan iki taş arasında bağlama yapılmadan taşlanır. 4-CNC taşlama da nümerik kontrol sağlanarak silindirik ve düzlem taşlama işlemlerinde yüksek hassasiyet işlemi yapılmaktadır [18-20].

Geleneksel olmayan (ileri aşındırıcı ile) yüzey parlatma yöntemleri iki temel grupta değerlendirilmektedir. İşlem yapılırken, dışarıdan kontrol edilemeyen birinci grup olarak değerlendirebiliriz. Birinci grupta yer alan yöntemler; aşındırıcı akışkan ile İşleme (AFM), elastik emisyon ile işleme (EMM), kimyasal-mekanik parlatma (CMP)'dir. İkinci gruba bakıldığında ise manyetik alanın önemi karşımıza çıkmaktadır. İkinci grupta yer alan yöntemler; Manyetik Aşındırıcı ile İşleme (MAİ), Manyetoreolojik İşleme (MRF), Manyetoreolojik Aşındırıcı Akışı ile İşleme (MRAFF)'dir [21,22].

Taşlamayla talaş kaldırma işlemi freze işlemine benzetilebilir. Frezede, kesici kenar kullanılırken taşlamada, çok sayıda aşındırıcı taneciklerin kesici kenarları kullanılmaktadır. Taşlama işleminde her aşındırıcı tane mikron boyutlarında talaş üretmektedir. Bu mikron boyutların birleşmesi ile yüzeyden kaldırılan talaşların hacmi artar. Talaş kaldırma işleminde kesme kuvvetlerindeki problemler tam olarak çözülememiştir. Kullanılan iş parçası malzemesi üzerinde yıllardır çalışmalar yapılmaktadır [23]. Taşlama kuvveti taşın yer değiştirmesi sonucunda belirlenmektedir [12,24,25].

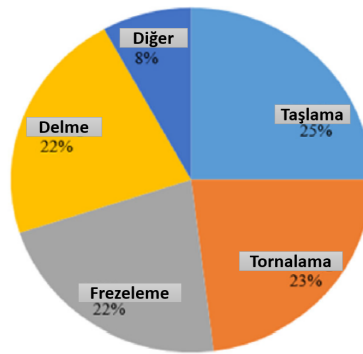
İş parçasının bir kısmını taşıyan her taş tanesinin harcadığı enerji miktarı, taşlamanın oluşum mekaniğini oluşturmaktadır. Kesici taneye uygulanan kinematik bağ, zımpara taşı ve iş parçası hareketine bağlıdır. Talaş şeklinde kesen tanenin takım yolu uzunluğu (l_k) ve maksimum kopmayan talaş kalınlığı (h_m) Şekil 1'de gösterilmiştir. Talaş geometrisine bakıldığında, taşlama sırasında sürtme, kazıma ve kesme olmak üzere üç ardışık şekilde talaş oluşumu gözlemlenmiştir. Sürtme sonucunda iki malzeme arasında elastik sınırı geçmeden kayma gerilmesi olmaktadır. Kazıma aşamasına gelindiğinde, kesici aşındırıcı tanesi ve iş parçası arasındaki kayma, gerilme elastik sınırını geçtiğinden dolayı plastik deformasyon gözlenmiştir. Talaş oluşumu aşamasında ise, kayma gerilmesine dayanamayan iş parçası kuvvetin geldiği yöne doğru malzemeyi, yanlara biriktirmeye başlayarak kendi içindeki moleküler bağları kopardığı gözlemlenmiştir. Talaş kaldırmada kinetik enerji etkili biçimde kullanılmaktadır. Sürtünme ve kazıma aşamalarında ise ısı açığa çıktığı için enerjinin verimi düşmektedir. Bazı yüzeylerde ısı miktarının artması sonucunda büyük sıcaklıklar oluşarak iş parçasından belirli bir derinlikte metalurjik hasarlar görülmüştür (Şekil 1) (V_w ; İş parçasının tabla hızı (m/dk), V_s ; Zımpara taşının çevre hızı (m/s), a ; Talaş derinliği μm) [26,27,28,29-32].



Şekil 1. Talaş oluşumunun üç aşaması (Three stages of chip formation) [26,27,28,29-32]

Demir ve Güllü, 50 HR_c sertliğindeki AISI 1050 malzemesinden yapılmış iş parçası, 1596 dev/dk taş devri ve Al₂O₃ zımpara taşı seçilerek düzlem taşlama tezgahında işlenmiştir. Taşlama işleminde, kesme derinliklerinin artırılmasıyla ortalama yüzeydeki aşınma pürüzlülük değerlerinde %44–68 artma olduğunu belirtmişlerdir [27,28]. Al₂O₃ zımpara taşını silindirik taşlama tezgahında kullanarak çeliklerin % aşınma ve yüzey pürüzlülüğü (R_a) arasındaki araştırmışlardır. Taşın tane büyüklüğü, taşın dokusu, taşın sertliği ve % taşlama oranı parametreleri yüzeyin R_a değerini etkilediğini belirtmişlerdir [11,26,27,29-34].

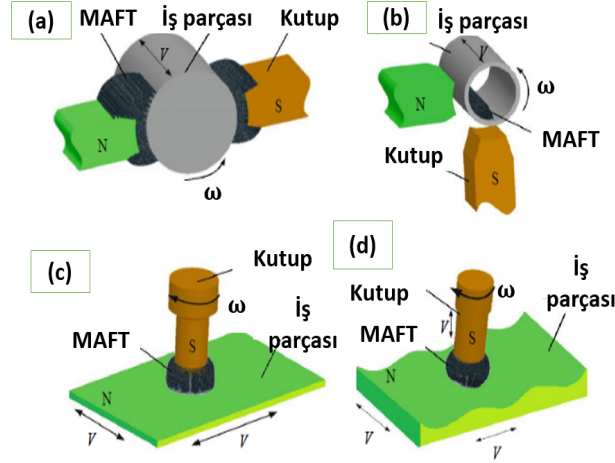
İmalat sanayisinde %25'lik pay ile taşlama ilk sıradadır. Bunu tornalama, frezeleme ve delme takip etmiştir. Taşlama işlemi, imalat endüstrilerindeki ürünün üretiminde veya fabrikasyonunda önemli bir rol oynadığı Şekil 2'de görülmüştür. Konvansiyonel taşlama uygun soğutma sıvısı olmadan gerçekleştirilemez çünkü taşlamadaki özgül enerjinin büyük bir kısmı taş-ış parçası temas bölgesinde ısıya dönüştürülür. Bu ısı üretimi, termal deformasyona, zayıf yüzey kalitesine ve yüksek takım aşınmasına neden olmaktadır. Düşük tekerlek hızına ve düşük talaş kaldırma oranına sahip geleneksel taşlama, aşırı tekerlek aşınması ile ilişkilidir. Yumuşak alaşımları veya yumuşak alaşımlı levhayı geleneksel taşlama olan zımpara taşı ile iş parçasının etkileşiminden kaynaklanan, yüksek gürültü ile birlikte büyük santrifüj kuvveti ve aşındırıcı taneciğin negatif talaş açısı nedeniyle oluşan dengesiz kuvvet, geleneksel işlem sırasında daha yüksek taşlama kuvvetine ihtiyaç göstermiştir [35].



Şekil 2. İmalat sanayisinde yüzey işleme yöntemlerinin kullanımı (The use of surface treatment methods in manufacturing industry) [35]

MAİ yöntemi, taşlama yöntemine rakip olmuştur. Manyetik alan yardımıyla karmaşık geometriye sahip iş parçalarının, hassas bir şekilde işlenmesi sonucunda yüzeyden talaş kaldırılması ile yüzeyin parlatılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem, geleneksel olmayan imalat çeşitleri içerisinde yer almaktadır. Sert ve keskin köşeli aşındırıcı toz taneleri, yumuşak iş parçası yüzeyine temas etmesi sonucunda yüzeyi çizerek aşındırıcı (abrasif veya abrasiv) aşınmaya neden olmaktadır [36-38]. Zehirli kimyasallar yerine yüksek sıcaklıklara dirençli aşındırıcı tozlar kullanılmaktadır [39-42]. Ferromanyetik ve aşındırıcı tozların belirli oranlardaki karışımları yüzeyden mikron boyutlarda toz kaldırmaktadır. Aşındırılacak yüzeyler metalik veya metalik

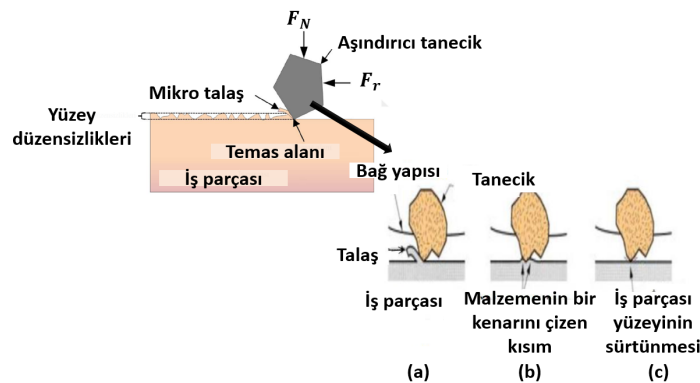
olmayan malzemelerden seçilmektedir [21,43]. MAİ'de iş parçası manyetik alanda kalmaktadır. Mıknatıs veya elektriksel bobinler yardımı ile manyetik alan oluşturulmaktadır. Esnek fırça şeklinde kullanılan aşındırıcı taneler, silindirik parçalara uygulanmaktadır (Şekil 3a,b). Aşındırıcı tozlarla birlikte Fe (demir) tozları kullanılarak esnek manyetik aşındırıcıdan oluşmuş fırça takımı (MAFT) oluşturulup düzlem ve dalgalı yüzeylere uygulanmaktadır. Yüzeyde çok noktadan kesme yapan kesici gibi davranmıştır (Şekil 3c,d) [42,44–47].



Şekil 3. MAİ yöntem çeşitleri: (a) Silindirik dış, (b) Silindirik iç, (c) Düzlemsel, (d) Serbest yüzey (Types of MAF methods: (a) Cylindrical external, (b) Cylindrical internal, (c) Planar, (d) Free surface.) [42, 44–47]

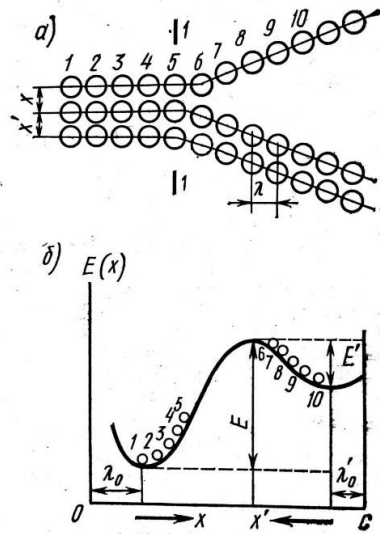
Kheelan ve Patel, MAİ yöntemindeki iş parçasında mikro-çatlak yüzey hasarını en aza indirerek neredeyse nanometre aralığına düşürmüştür. Küçük boyutlardaki aşındırıcı tozlar iş parçası yüzeyinde daha fazla etkili olmuştur. Taşlamadaki iş parçasının yüzey kalitesinin daha iyi olması için yumuşak yüzeylerde toz boyutunun büyük ve sert olması, sert yüzeylerde ise tane boyutlarının küçük olmasının gerektiğini belirtmişlerdir [32]. Daha hassas yüzeylerin üretilmesinde mikron veya nano boyutunda talaş kaldırılmaktadır. Uzay, uçak, makine, medikal gibi alanlarda yüzeyin parlatılması önemlidir [21,42,48].

Taşlama ve MAİ yönteminin ortak özelliği; aşındırıcı tane ile iş parçası arasında sürtünmeden dolayı ısı oluşmaktadır. Kullanılan aşındırıcı toz çeşitleri iki yöntem için de geçerlidir [26]. Aşındırıcı taneler; çelik ve diğer demir gibi yüksek mukavemetli iş parçası yüzeylerinin pürüzlülüklerini giderip parlatmak için kullanılmaktadır. Silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) geleneksel aşındırıcı tane olarak kullanılmaktadır. SiC taneleri Al_2O_3 tanelerine göre daha sert bir yapıya sahiptir. Bu aşındırıcı tanelerin kesme, ezme (kazıma) ve ovalama olmak üzere üç farklı etkisi vardır (Şekil 4). Yüzeyden talaş kaldırılırsa kesme etkisi olur (Şekil 4a). Yüzeyden talaş kaldırmadan yüzeyi deforme ederse ezme (kazıma) etkisi olur (Şekil 4b). Aşındırıcı taneler, yüzeye temas ederse sadece ovalama sürtünme etkisi olur ve malzeme kaldırılmaz (Şekil 4c) [42,49].



Şekil 4. Aşındırıcı taneler; (a) Kesme (b) Ezme (kazıma) ve (c) Ovalama (sürtünme) (Abrasive grains: (a) Cutting, (b) Crushing (grinding), and (c) Rubbing (friction).) [42,49]

Rasuljon ve ark., malzemelerin yüzeyinden talaş kaldırılmasını şu faktörlere bağlamıştır: Malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri; şekli, boyutu ve tanecikli yapısı, malzemedeki kusurların sayısı, mukavemeti, sertliği veya yumuşaklığı ve diğer taşlama makinelerinin yapısı ve türleridir. Dış kuvvet nedeniyle iş parçası yüzeyinde elastik deformasyon gerilmeleri birikmektedir. Atom tabakasının bağ kırma işlemi üzerindeki etkisini Şekil 5'te gösterilmiştir. Yüklü bir malzemede çekme gerilimi, bağların kırılmasını ve eski haline dönmesini engeller (Şekil 5a). Yüksüz durumda ise bağların kısa olduğu ve kırılması için büyük bir kinetik enerjiye ihtiyaç olduğu anlamına gelmektedir. Yüksek gerilimde bağ süreksizlikleri büyüktür ve mikro çatlakların büyümesine yol açmaktadır. Dış kuvvet, iş parçası yüzeyinde elastik deformasyon kuvvetlerinin birikmesine neden olmaktadır. Parçanın herhangi bir yerinde oluşan, bir kusur sonucunda konsantre gerilme meydana gelir ve bu dayanım sınırına ulaşmadan artar ve bunun bir kısmı yeni oluşan yüzeyde harcanır. Bu enerji faydalı enerji, iş parçasından talaş kaldırdıktan sonra geri kalan enerji ise parçayı sıkıştırmak için elastik deformasyon sağlar (Şekil 5b). Sonuç olarak; iki tip kırma mekanizması vardır. Birinci aşamada, termal dalgalanmalar ile çatlaklar sağlanır. İkinci aşamada ise çatlakların büyümesi ile katı cismin çekme özellikleri belirlenir ve enerji rezervi içinde depolanırlar [50].



Şekil 5 (Figure 5). Mikro çatlakların moleküler modeli (The molecular model of microcracks) [50]

Yüzeyin pürüzlülüğünün giderilip daha parlak yüzeyler elde edilebilmesi esnasında yüzeyin en az şekilde hasar alarak uygulanan geleneksel (taşlama) ve geleneksel olmayan aşındırıcılarla yüzey işleme yöntemlerinin karşılaştırılması literatürde araştırılmıştır. Taşlama ve MAİ yöntemi için literatürde karşılaştırmalı deneysel çalışmalar bulunmamaktadır. Uzman bir kişinin imalat alanında kanıta dayalı bilgiye daha kolay ulaşmasını sağlayacaktır. MAİ yöntemi ile yüzey işlemlerinin endüstrideki uygulamaları Türkiye'de fazla yaygınlaşmamıştır. Ülkemizde hassas parçaların yüzey parlatılmasında MAİ yönteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda MAİ ve taşlama yöntemlerinde yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi sonucunda literatür bulguları (SEM, kesme kuvveti modellemesi, aşındırıcı malzeme çeşitleri) karşılaştırılarak talaş kaldırma mekanizmasının işlem parametrelerinin etkileri incelenmiştir.

Hassas Yüzey İşlemedeki Aşındırıcı Malzemeler (Abrasive Materials In Sensitive Surface Finishing)

İş parçasının imalatı süresinde maliyeti az tutarak üretim veriminin daha fazla olabilmesi için kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi, aşınma değerleri, kesme parametreleri gibi işlem parametrelerinin belirlenmesi, yüzeyin kalitesini arttırmada önemli olmaktadır [12,51,52]. Literatürdeki SEM görüntülerine bakıldığında taşlama yönteminde yüzeysel hatalar olurken MAİ yönteminde yüzeysel hataların olmadığı görülmüştür. İşlem parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili de çalışmalar mevcuttur. Optimizasyon teknikleri; deneysel yolla elde edilen verilerin yorumlanmasında, etkin parametrelerin tespitinde kullanılmaktadır. Taşlama işleminde; taşın ilerleme yönünde, ilerleme yönüne dik yönde ve ilerleme yönüne 45° açılı yön doğrultusunda 3 farklı ölçüm alınarak yapılmalıdır. Daha sonra bu ölçümlerin aritmetik ortalaması da ortalama yüzey pürüzlülük değerini

vermektedir. Burada önemli olan nokta ise iş parçası üzerinde işlemin ilerleme yönleri tespit edilerek ölçümler dikkatlice alınmalıdır [11,53]. İyi bir yüzey kalitesi için honlama, taşlama, lepleme (ince parlatma), MAİ kuvveti ile hassas işleme (süper parlatma) yapılmaktadır [41,54].

Taşlama İşlemindeki Aşındırıcı Malzemeler (Abrasive Materials in the Grinding Finishing)

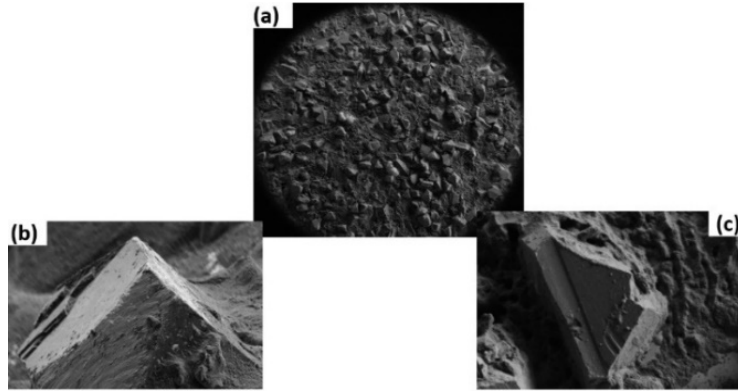
Taşlamada kullanılan zımpara taşı, geometrisi tam olarak belli olmayan binlerce aşındırıcı tanelerin bir arada bir bağlayıcı madde ile bağlanması sonucunda çok ağızlı takım olarak karşımıza çıkmaktadır. Taşlama işleminde kullanılan zımpara taşının belirlenmesinde; kesici yapısı, malzemesi ve bağlayıcı malzemeleri ve kullanılacak taşlama tipi önem arz etmektedir. Amacına uygun parametreler seçilmezse iş parçasında uygun olmayan yüzey yapıları oluşmaktadır. Zımpara, elmas, Al_2O_3 , SiC, Kübik Bor Nitrür (CBN) aşındırıcı tozları, zımpara taşlarında kullanılan aşındırıcı malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Aşındırıcı malzemeleri bir arada tutan bağlayıcı malzemeler; lastik, reçine, şelak, seramik, silikat bağları şeklinde sınıflanmaktadır [16,17,55]. Zımpara taşlarında; %54 aşındırıcı toz taneler, %26 bağlayıcı eleman ve %20 boşluk bulunmaktadır. Taşlamada bulunan boşluk, talaş kırma ve aynı zamanda talaşın uzaklaştırılması görevini yapmaktadır [12,17,52,55-57]. Korindon, zımpara ve elmas doğal aşındırıcılar grubundadır. El yapımı aşındırıcı malzemeler ise Al_2O_3 , SiC sıklıkla kullanılmaktadır. Aşındırıcı taneler ve bağlayıcılar birlikte preslendiğinde tanelerin birbirine olan uzaklığı preslenme kuvvetine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Sonuç olarak, zımpara taşın yapısında gözenekler oluşmaktadır. Aşındırıcı taneler; seyrek, orta ve sıkı şekilde zımpara taşı üzerinde dizilmektedir [58,59,60]. Zımpara taşlarını birbirinden ayırt eden özellikleri sertlikleridir. Aşındırıcı tanelerin zımpara taş üzerinden sökülebilmesi sertliği belirleyen en önemli unsurdur. Yumuşak zımpara taşı üzerinde aşındırıcı taneler kolayca taş yüzeyinden ayrılmaktadır. Aşındırıcı taneler, zımpara taş yüzeyini kolayca terk etmiyor ise buna sert zımpara taşı denilmektedir [13,14,61–63]. Sert ve gevrek iş parçalarının taşlanması sürtünme aşınmaları meydana gelmektedir. Bu aşınmadan dolayı taşa bulunan aşındırıcı tanelerin uçları körelmektedir. Yumuşak malzemelerde sürtünme aşınması daha azdır. İdeal olarak, sık dokulu sert zımpara taşlarının kullanılmasıyla iş parçasının yüzeyi daha parlak olmaktadır. A harfi en yumuşak iken Z harfi en sert zımpara taşı ifade etmektedir (Tablo 1) [57].

Tablo 1 (Table 1). Zımpara taşlarının sertlik değerleri (The hardness values of abrasive stones) [57]

| Niteliği (Quality) | Sertlik Derecesi (Hardness Degree) | Kullanım Alanları (Areas of Use) |
|--|---|--|
| Çok yumuşak (Extremely soft) | A, B, C, D, E, F, G | Derin ve yan taşlama işleminin uygulandığı sert malzemelerde (In hard materials where deep and side grinding processes are applied) |
| Orta yumuşak (Medium soft) | H, I, J, K, L, M, N, O | Geleneksel metal taşlamada (In traditional metal grinding) |
| Sert veya çok sert (Hard and extremely hard) | P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z | Dış yuvarlak taşlama ve yumuşak malzemeleri (External cylindrical grinding and soft materials) |

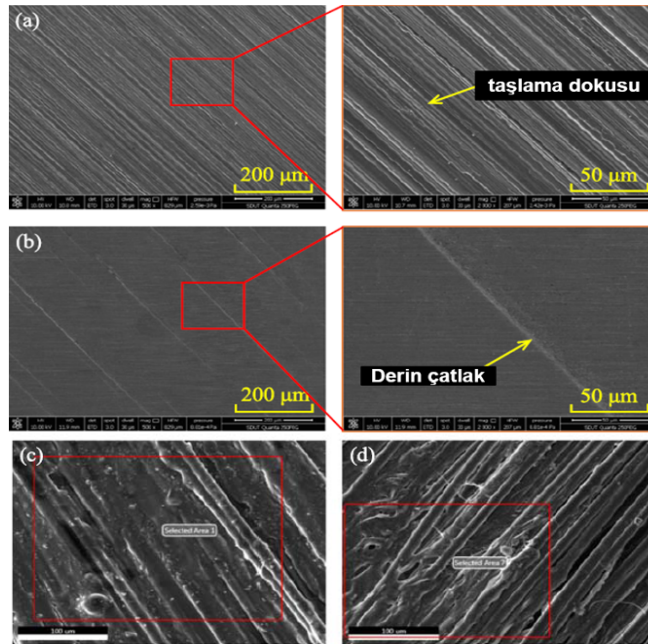
Zımpara taşı seçiminde sırası ile; parça geometrisi, taşlama çeşidi, işlenecek iş parçasının malzemesi, işlenecek yüzey parlatma işlemi, iş parçasının büyüklüğü, taş hızı, iş parçasına göre uygun zımpara taşı uygulanmalıdır [16,17]. Sık dokulu zımpara taşlarında bağlama kuvveti azalmaktadır [27]. Aşındırıcı tozlar işlenecek iş parçasının malzemesine göre belirlenmektedir. Taşlama takımlarında; Al_2O_3 , SiC, CBN ve elmas aşındırıcı tozları kullanılmaktadır. Sünek malzemelerde ise CBN veya Al_2O_3 kullanılırken, kırılğan malzemeler için de elmas ve silisyum karbür önerilmektedir. Şekil 6a'da zımpara taşının üzerindeki aşındırıcı tanelerin toplu halde bulunan SEM görüntüsü (X1250-100 μm) verilmiştir. Şekil 6b'de taşlama işlemi olmadan tek bir aşındırıcı toz tanenin görüntüsü verilmiştir. Burada görüldüğü gibi taşlama işlemi olmadan tanenin

keskin kenara sahip olduğu görülmüştür. Şekil 6c'de ise sert iş parçası yüzeyine denk geldiğinden dolayı tanenin keskin kenarı kırılmıştır. Zımpara taşının verimliliğini de düşürmektedir. Takım boyutu nedeniyle kesme verimliliğini artırmak için bazen çok yüksek 80000 dev/dk işleme hızında kullanılmalıdır. Bu işlem için de çok yüksek hacimde soğutma sıvısı gerektirdiği görülmüştür (Şekil 6) [64-66].



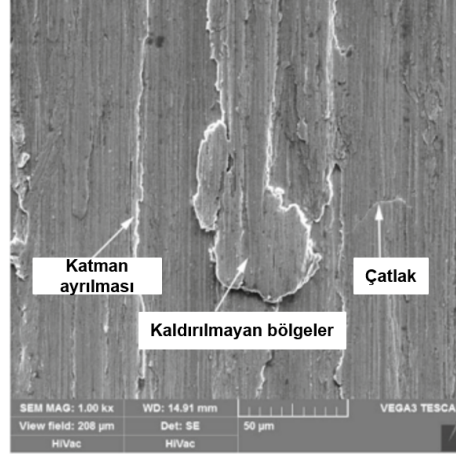
Şekil 6 (Figure 6). Elektrolizle CBN kaplı zımpara taşı SEM (X1250-100 μm): (a) Tanelerin rastgele dağılımı, (b) Taşlama öncesinde aşındırıcının keskin kenarı, (c) Taşlama sonrasında aşındırıcı tanenin kırılması (Electrolytic CBN-coated grinding wheel SEM (X1250-100 μm): (a) Random distribution of grains, (b) Sharp edge of the abrasive before grinding, (c) Breakage of the abrasive grain after grinding) [66]

Tian ve ark., Inconel718 iş parçasını taşlama yöntemini kullanarak yüksek teğetsel taşlama kuvveti ve düşük normal taşlama kuvvetini rapor etmişlerdir. Zımpara taşında Al_2O_3 aşındırıcı tanecik mevcuttur. Kesme derinliği 180 μm ve 240 dev/dk taşlama devrinde; 1 nm, $10^{-3}\mu\text{m}$ değerine eşit olduğu düşünüldüğünde, R_a : 473.7 nm (0.473 μm)'den 153 nm (0.153 μm)'ye düşmüştür. Yüzey pürüzlülük (R_a) değeri yaklaşık olarak %68 oranında azaltılmıştır. Inconel718 iş parçasının R_a zımpara taşının hızının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Taşlamada, zımpara taşının devir sayısı arttıkça iş parçasının yüzeyinin temizlenme kapasitesi artmıştır. Şekil 7(a)'da taşlama öncesinde yüzeyin pürüzlü olduğu görülürken Şekil 7(b)'de ise taşlama sonucunda baskı kuvveti ve zımpara taşının sert olmasından dolayı derin çatlaklar olmuştur. Şekil 7(c-d)'de aşındırıcı tabakaların çizikleri ayrıntılı gösterilmiştir. Taşlamanın dezavantajı, R_a değeri azalırken yüzeyde derin çatlak oluşturmasıdır [67].



Şekil 7 (Figure 7). Inconel718 iş parçasının SEM: (a) Taşlama öncesi, (b) Taşlama sonrası; Aşındırıcı tabaka SEM: (c) Taşlamadan önce, (d) Taşlamadan sonra (X1.00 kx) (Inconel718 workpiece SEM: Before (a) and After (b) grinding; Abrasive layer SEM: (c) Before grinding, (d) After grinding (X1.00 kx)) [67]

Ni_3Al -esaslı inter-metalik iş parçasının ana yüzey kusurları arasında derin çizikler, oluklar, birikintiler, tabakalara ayrılma ve temizlenmemiş alanlar yer almaktadır. Ni_3Al esaslı öğütme sıcaklığı, öğütme kuvveti ve öğütme yüzey kalitesini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Kesme derinliği, test numunesi yüzeyindeki oluklar, birikintiler, tabakalara ayrılma ve diğer kusurların oluşmasına yol açacaktır. Taşlama sıcaklığı, kesme derinliğinden derinden etkilenmiştir. Taşlama yönteminde; İlerleme hızı, kesme derinliği ve tekerlek hızının artması taşlama sıcaklığını yükseltir. Kesme derinliği ve ilerleme hızı ne kadar büyük olursa, yüzey kusurlarının da artması o kadar fazla olmaktadır. Küçük kesme derinliği ve düşük ilerleme hızı, yüzey bütünlüğünü iyileştirerek taşlama yüzeyi kusurlarını azaltabilmektedir (Şekil 8) [68].

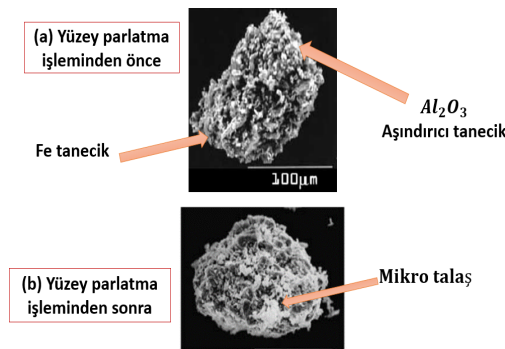


Şekil 8 (Figure 8). Taşlama işleminden sonra SEM görüntüsü (X1.00 kx) (After grinding SEM image (X1.00 kx)) [68]

MAİ Yöntemindeki Aşındırıcı Malzemeler (Abrasive Materials in the MAF Process)

MAİ yönteminde bulunan ferro-manyetik ve aşındırıcı tozların mekanik karışımı sinterlenmiş, plazma esaslı, döküme bağlı gibi farklı tiplerde olabilmektedir. Ferro-aşındırıcı kompozit tozların hazırlanması için bileşenlerin sinterlenmesi en yaygın yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozit toz karışımındaki manyetik bileşen miktarı hacimce, aşındırıcı tozlardan %60'tan yüksek olmalıdır. Bu kompozitin toz içerikleri incelendiğinde; demir tozları ve karbürler, alümina, silisyum dioksit, zirkonya, elmas vb. gibi yüksek sertlikteki malzemelerin karışımları şeklinde literatürde yapılmış çalışmaları bulunmaktadır [69-71].

Mori ve ark., sinterlenmiş olan 100 µm boyutlarındaki ferromanyetik (demir (Fe) ve Al_2O_3 karışımı) aşındırıcı tozları MAİ yönteminde kullanarak yüzey üzerindeki pürüzlülükleri gidermek için yüzey parlatma işlemi yapmışlardır. 30 dk süresince yüzey üzerinde parlatma işlemi yapıldıktan sonra mikron boyutlarda talaş kaldırılmıştır. Şekil 9 (a)'da yüzey parlatma işlemi öncesi SEM fotoğrafında (X1250-100 µm) görülen siyah taneler Fe tozunu gösterirken beyaz görünen tanecikler ise SiC tozunun karışımını temsil etmektedir. Şekil 9 (b)'de ise yüzey parlatma işleminden sonra, sinterlenmiş olan bu toz karışımı arasındaki boşluklarda ince talaşların kaldığı açıkça görülmektedir. Bu yöntemin faydalı olduğunu görülmüştür [72].

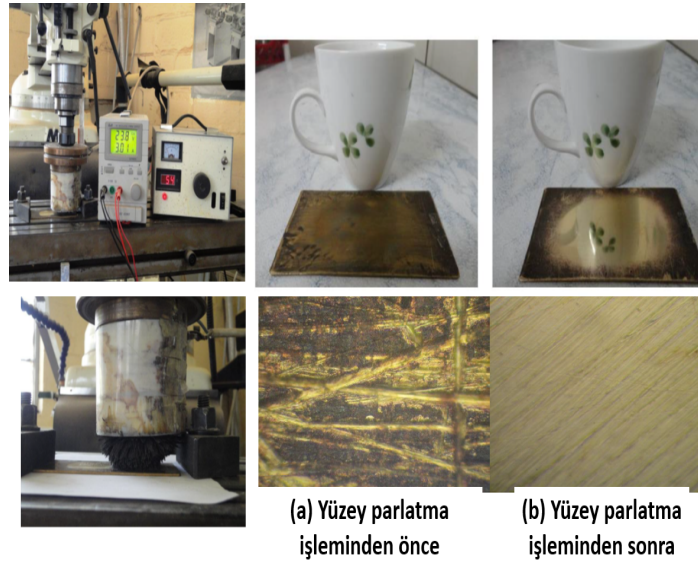


Şekil 9 (Figure 9). MAİ yöntem öncesi ve sonrası toz taneleri SEM (X1250-100 µm) (Before and after MAF method dust particles SEM (X1250-100 µm)) [72]

Kovaliova ve ark., MAİ yönteminde toz karışımı olarak sinterlenmiş Fe/elmas karışımında endüstriyel elmas tozu kullanılmıştır [73]. MAİ yönteminde manyetik alan oluşturması için yalnızca saf demir tozu değil demir esaslı tozlar da kullanılmaktadır. Aşındırıcı toz olarak elmas (PCD), Al_2O_3 , Si, CBN, karbon nano tüp (CNT) vb. malzemeler kullanılmaktadır. CNT aşındırıcıların üstün mekanik özelliklerine sahiptir. Aşındırıcı taneciklerin boyutlarının küçülmesiyle iş parçasının yüzeyi daha hassas işlenecektir [29,74–76]. Kuvars, imalatta aşındırıcı toz olarak kullanılmaktadır. Magmatik kayaçların ayrışması sonucunda oluşan SiO_2 toz tanelerinin $900^\circ C$ sıcaklıktaki kalsinasyonu sonucunda kuvars tozları üretilmektedir [77].

Jain ve ark., ferromanyetik aşındırıcı toz karışımına belirli miktarda yağlayıcı katıp mekanik yolla karıştırmıştır. MAİ yöntemi ile paslanmaz çelik yüzeyi parlatılmıştır. Karışım oranı ve işleme boşluğunun, talaş kaldırma miktarını etkilediği görülmüştür [78].

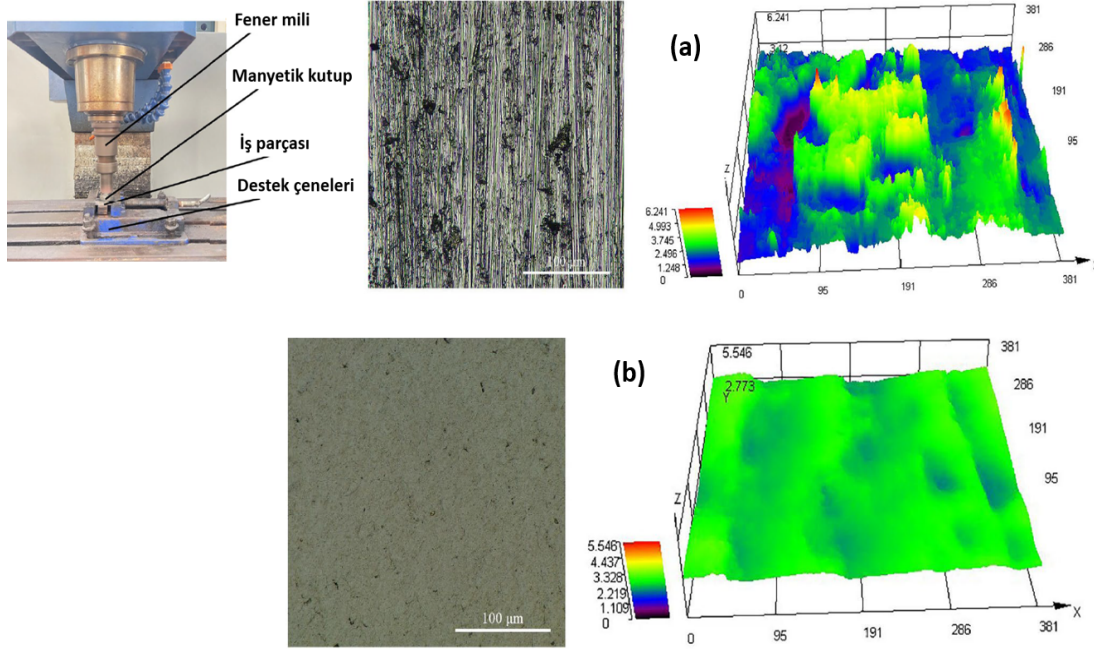
Alkarkhi ve Naif, Alaşımli pirinç ($CuZn_{33}$) malzemesinin R_a iyileştirilmesinde MAİ yöntemindeki elektromanyetik indüktörü ve tozlarda sinterleme işlemini kullanmışlardır. Sinterlenen malzeme karışımında, ağırlıkça %40 demir tozu ve ağırlıkça %60 kuvars kullanılmıştır. $1200^\circ C$ bir vakum fırınında sinterlenmiştir. Sinterleme işleminin ardından manyetik aşındırıcılar, yaklaşık $150 \mu m$ çapında küçük toz boyutlarında ezilerek aşındırıcı toz taneleri olmuştur. Demir tozu ve kuvars, sinterlemeden sonra birbirine yapıştıkları için ayrılması zordur. Sinterlenmeden kol gücünde mekaniksel olarak karışım sağlanırsa toz taneler daha fazla dağılacaktır. Deneysel çalışma parametreleri; işleme hızı 525 dev/dk, işleme boşluğu 2 mm, bobinden geçen akım 1.5 A parametrelerde yüzeyi parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işlemi sonrasında, pirinç yüzeyinin daha parlak olduğu ve R_a 'yı 1.046'den $0.131 \mu m$ 'ye azalttığı gözlenmiştir. MAİ öncesi ve sonrası SEM ($X1250-100 \mu m$) fotoğrafları verilmiştir (Şekil 10). Şekil 10(a)'da yüzey parlatma işleminden önce mat bir yüzeye sahip olup yüzeyin pürüzlü olduğu görülmektedir. Şekil 10(b)'de ise MAİ yöntemi kullanılarak yapılan yüzey parlatma işleminin etkileri görülmektedir [79].



Şekil 10 (Figure 10). MAİ önce ve sonrası iş parçası yüzeyi (MAF method before and after workpiece surface) [79]

Liu ve ark., $80 \times 80 \times 4$ mm boyutlarındaki SUS 304 plakasında MAİ yöntemi kullanarak düzlem yüzey üzerinde aşınma şekillerini gözlemlemiştirler. MAİ için gerekli Fe toz boyutu $175 \mu m$ ile aşındırıcı olarak kullanılan Al_2O_3 toz boyutu $50 \mu m$ seçilerek Polivinil alkol yapıştırıcı desteği ile 3 sa ve $1200^\circ C$ sıcaklığında sinterlenmiştir. Sinterlenen tozlar 800 dev/dk, 2 mm iş parçası ve 60 dk işleme süresinde $\varnothing 20 \times 40$ mm Nd-B-Fe mıknatısları yardımıyla MAİ yönteminde, plakalara hem sinterlenmiş tozlar hem de sinterlenmeyip mekanik yollar ile karıştırılmış tozlar uygulanmıştır. Deney sonucunda, sinterlenmiş tozların yüzey pürüzlülük değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) azaldıkça, yüzey üzerindeki daha sık sığ çizgiler oluşarak yüzeyin parlaklığının çoğaldığını gözlemlemiştirler [80].

Song ve ark., Elmas ve Fe toz karışımı ile Ti-6Al-4V alaşımından oluşan maddenin 30 dakika boyunca düzlem yüzeyi üzerinde MAİ yöntemi ile yapılan çalışmada yüzey pürüzlülükleri giderilmiştir. İş yapılacak boşluk 1 mm ve işleme hızı 1250 dev/dk ile 2000 dev/dk seçilmiştir. 2000 dev/dk işleme hızında R_a : 0.153 μm (Şekil 11a) olurken 1250 dev/dk hızda R_a : 0.117 μm (Şekil 11b) değerlerine düşmüştür. Burada Devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğünde azalma gözlenmiştir. Ti-6Al-4V'nin MAİ öncesi ve sonrası yüzey morfolojisinin karşılaştırılması, AFM fotoğrafları yardımı ile MAİ teknolojisinin Ti-6Al-4V'nin yüzey kalitesini etkili bir şekilde iyileştirebileceğini göstermiştir [81].



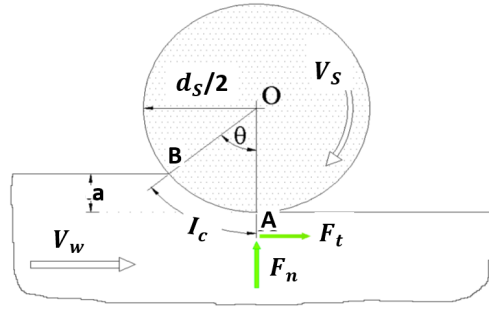
Şekil 11 (Figure 11). MAİ önce ve sonrası yüzeyin AFM ve SEM görüntüleri (100 μm)(AFM and SEM images of the surface before and after MAF method (100 μm)) [81]

Malzeme Kaldırmada Mekanizma Teorileri (Mechanism Theories In Removal Of Material)

Mikro taşlama kuvveti; hareket, malzeme ve işlem süreci parametreleri gibi yapısal parametrelerden etkilenmektedir. Yüzeyin R_a değerini azaltma konusu ile çalışan bilim insanları işlem parametrelerine göre özel denklemlerin matematiksel modellerini yapmışlardır. Bu başlık altında kesme kuvvetini bulmaya yardımcı denklemler araştırılmıştır. İşlem parametreleri ile taşlama sıcaklığı ve kuvveti arasındaki ilişkilerin ampirik formülleri ortogonal deneylerle hesaplanarak tek faktörlü deneylerin doğruluğu literatürden araştırılmıştır.

Taşlamada Kesme Teorisi (Cutting Theory in Grinding)

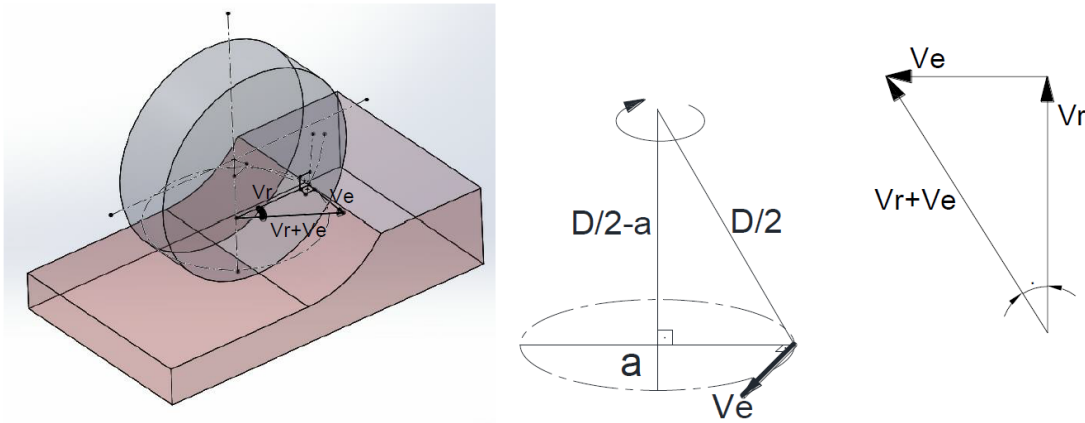
Ulaş ve Demir, taşlama işlemi esnasında yatay ve dikey kuvvet bileşenlerinin değerlerini ölçmüşlerdir. Normal kuvvetin (F_n) yaklaşık olarak 2~2,2 katı F_t olarak sonuca ulaşmışlardır. Bu değer ana unsur ise taşın üzerinde bulunan aşındırıcı taneciklerin belirli bir geometriye sahip olmadığı içindir. Bu tanecikler düzenli miktarda talaş kaldıramadığından dolayı mikron düzeyde çıkan talaş, zımpara taşı ile iş parçası arasında sıkışarak basınca neden olmaktadır. Normal (F_n), esas kesme kuvvetinden (F_t) bu nedenle daha büyük olmaktadır. Tabla hızının düşmesi sonucunda, taşlama kuvvetlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Sanayide en fazla düşey milli düzlem yüzey taşlama tezgahları kullanılmaktadır. İş parçası üzerinde doğrusal veya dairesel olarak ilerleyen zımpara taşı kullanılmaktadır [12,82,83]. Mühendislik tasarımında matematik modelleme önemlidir. Taşlama işleminde, talaş oluşumunu hesaplamak için taşlama kuvvetlerinin yönleri (F_t ve F_n) belirlenmelidir. Şekil 12'de düzlem yüzey taşlamanın geometrisi gösterilmiştir. Zımpara taşı ile iş parçası arasındaki temas uzunluğu (I_c), oluşan talaş uzunluğuna eşittir [61,63,84,85].



Şekil 12 (Figure 12). Taşlamada yüzey geometrisi (Surface geometry in grinding) [61, 63, 84, 85]

Talaş kuvveti ile derinliği doğru orantılıdır. Düşük kuvvette az miktarda talaş derinliği oluşmaktadır. Temas uzunluğunun (I_c) artması, taşlama kuvvetini daha büyük alana yayarak temas bölgesine uygulanan ısı akısını azaltmıştır [84, 86, 87]. Aşındırıcı tane, iş parçasına temas ettiği anda kesme derinliği sıfır olmaktadır. Silindirik taşlama işleminde, kesme derinliği kademeli olarak artarken en büyük kesme derinliği de zımpara taşının iş parçasını terk ettiği kısımda oluşmaktadır [76].

Adıyaman ve ark.'nın matematik modellemesinde; Düzlem yüzey taşlama yönteminde enerji oluşum ile taşlamadaki gerekli kuvvetin ($F_{taş}$) hesaplamasının matematiksel modellemesi Denklem 1 ve 15 arasında verilmiştir ve Şekil 13'te simüle edilmiştir [88,89];



Şekil 13 (Figure 13). Zımpara taşının dönme hareketine bağlı aksel, radyal, bileşke kesme hızı (The axial, radial, and resultant cutting speeds associated with the rotational motion of the grinding wheel)[88,89]

Harcanan enerji (u) Joule biriminde ve talaş işleme oranı (T.İ.O) değerleri çarpıldığında taşlamadaki gerekli güç (P) Watt biriminde bulunmaktadır (Denklem 1) [88,89];

$$P = u \cdot (T.İ.O) \quad (1)$$

$F_{taş}$ Newton biriminde ve kesme hızı ($V_{taş}$) m/dk birimindeki çarpımları sonucunda taşlama güç (P) değerini N.m/dk biriminde bulunmuştur. Burada talaş kaldırmada zımpara taşının kuvveti ve hızının önemli olduğu ortaya çıkmaktadır (Denklem 2) [88,89];

$$P = F_{Taş} \cdot V_{taş} \quad (2)$$

İş parçasının ilerleme hızını (f) mm/dk, taşın genişliği (b) mm, (a) talaş-kesme derinliği mm birimlerinde çarpılarak T.İ.O değeri mm/dk biriminde bulunmuştur (Denklem 3) [88,89];

$$T.İ.O = f \cdot a \cdot b \quad (3)$$

Denklem 1'de değerler yerine yazılarak $F_{taş}$ denklemi ortaya çıkmıştır (Denklem 4) [88,89];

$$F_{taş} \cdot V_{taş} = u \cdot f \cdot a \cdot b \Rightarrow F_{taş} = \frac{u \cdot f \cdot a \cdot b}{V_{taş}} \quad (4)$$

Harcanan enerji miktarı (u), talaş genişleme oranı (r), talaş uzunluğu (l), talaşa dönüşmüş talaş genişliği (w), talaşa dönüşmüş talaş kalınlığı veya derinliği (t) mm ile orantılıdır. U denklemi ortaya çıkmıştır. Taşlama kuvveti katsayısı K_1 'dir ve birimsizdir (Denklem 5) [88,89];

$$u = K_1 \cdot \frac{1}{t} \quad (5)$$

Denklem 4'teki u değeri çekilip Denklem 5'e eşitlenerek Denklem 6 elde edilmektedir [88,89];

$$u = \frac{F_{\text{taş}} \cdot V_{\text{taş}}}{f \cdot a \cdot b} \Rightarrow \frac{F_{\text{taş}} \cdot V_{\text{taş}}}{f \cdot a \cdot b} = K_1 \cdot \frac{1}{t} \quad (6)$$

Denklem 6'dan $F_{\text{taş}}$ çekilerek Denklem 7 elde edilmektedir. Bu formül Denklem 4'ün açılımı şeklindedir [88,89];

$$F_{\text{taş}} = K_1 \cdot \frac{1}{t} \cdot \frac{f \cdot a \cdot b}{V_{\text{taş}}} \quad (7)$$

Talaş hacmi (T_h), $F_{\text{taş}}$ için denklemde önem arz etmektedir. Denklem 8'de gösterilmiştir [88,89];

$$T_h = \frac{1}{4} \cdot w \cdot t \quad (8)$$

Taşın bileşke açısal hızı (W) rad/s birimindeki denklemi 9'da gösterilmiştir [88,89];

$$W = \frac{r}{t} \quad (9)$$

Bileşke talaş uzunluğu (l), talaş genişleme oranı (r), talaşa dönüşmüş talaş derinliği (t), iş parçasının ilerleme hızını (f) mm/dk, taşın genişliği (b) mm, talaş-kesme derinliği (a) mm biriminde, 1 mm^2 'de ki aktif (eş-zamanlı kesme yapan) tanecik sayısı (c), 7, 3, 8, 9 denklemlerinin ortak çözümünden Denklem 10 elde edilmiştir [88,89];

$$f \cdot a \cdot b = V_{\text{taş}} \cdot c \cdot b \cdot \frac{1}{4} \cdot r \cdot t \cdot l \quad (10)$$

Taşlama işleminde etkili talaş uzunluğu (l_r), fener milinin dönme hareketinin kaldırdığı talaşın uzunluğu (l_e) mm birimine bağlı olarak bileşke talaş uzunluğu (l) mm olarak hesaplanmıştır [88,89];

$$l_r = \sqrt{D \cdot a} \quad (11)$$

Fener milinin etkili açısal hızı (w_e), taşın ikinci hareketinin etkili açısal hızı (W_r) rad/s biriminde, taş çapı (D) omak üzere talaşın uzunluğu (l_e) mm biriminde olmuştur (Denklem 12) [88,89];

$$l_e = \sqrt{D \cdot a} \cdot \frac{w_e \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}}{W_r \cdot \frac{D}{2}} \quad (12)$$

Bileşke talaş uzunluğu (l) mm olarak hesaplanmıştır (Denklem 13) [88,89];

$$l = \frac{\sqrt{D \cdot a + 4w_e^2 \cdot a^2 \cdot (D - a)}}{W_r \cdot \frac{D}{2}} \quad (13)$$

Denklem 7'yi açarak t'yi açarız. Talaşa dönüşmüş talaş kalınlığı t, l_e değeri ile bileşke talaş uzunluğu l arasında, ihmal edilebilecek düzeyde küçük olduğundan, denklemde bileşke talaş uzunluğu l'nin değeri esas alınmıştır. Talaş uzunluğuna, taş çapına, talaş derinliğine, 1 mm^2 'de aşındırıcı tanecik sayısına, talaş genişleme oranına, taşın açısal hızlarına bağlı yazılabilir (Denklem 14) [88,89];

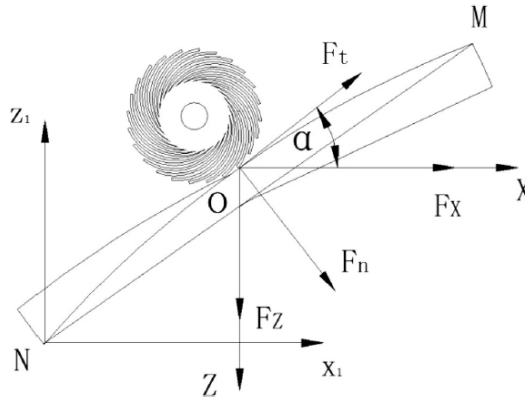
$$t = \sqrt{\frac{4 \cdot f \cdot a}{V_{\text{taş}} \cdot c \cdot r \cdot \sqrt{\frac{D \cdot a + 4w_e^2 \cdot a^2 \cdot (D - a)}{W_r^2 \cdot D}}} \quad (14)$$

F_n ve F_t kuvvetlerinin bileşkesi $F_{\text{taş}}$ 'ı vermektir. Toplam taşlama kuvveti ($F_{\text{taş}}$) birimi Newton'dur. Denklem (1)'de bulunmaktadır. Taşlanacak malzemenin ve kullanılacak taşın özelliklerine bağlı olarak; taşlama kuvveti (K_1) sabitinin değeri 3-11 arasında seçilmektedir (b: Taş genişliği (mm), f: Zımpara taşının ilerlemesi

(mm/dk), a: kesme derinliği (mm), D: Taş çapı (mm), $V_{\text{taş}}$: Zımpara taşının kesme hızı (mm/dk), c: 1 mm^2 'de aynı anda kesme yapan tanecik sayısı, r: Talaş genişleme oranı, W_e : Fener milinin etkili açısal hızı (rad/sn), W_r : Taşın ikinci hareketinin etkili açısal hızı (rad/sn) [88,89];

$$F_{\text{taş}} = K_1 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot f \cdot a}{V_{\text{taş}} \cdot c \cdot r \cdot \sqrt{\frac{(D \cdot a) + (4 \cdot W_e^2 \cdot a^2 \cdot (D - a))}{W_r^2 \cdot D}}}} \quad (15)$$

Xian ve ark. Yüzeyi parlatma kuvveti modellemesinde; yüzeyi parlatma kuvveti, mekanizmanın incelenmesinde çok önemlidir. Parlatma kuvveti, kesme kuvveti ve sürtünme kuvveti adı altında ayrıştırılarak matematiksel modellenmesi verilmiştir. Parlatma kuvveti 10 N'den az olduğunda, taşlama yöntemi bu matematiksel modellemeye uygulanabilmektedir. F_x ve F_z sırasıyla zımpara taşa etki eden X ve Z yönü kuvvetlerini temsil etmektedir. Diferansiyel geometri teorisine göre; MN'nin normal çizgisi yüzeyin normal çizgisiyle çakışır. Böylece normal parlatma kuvvetinin yönü, MN üzerindeki parlatma noktasının normal yönü ile aynıdır. Teğetsel parlatma kuvveti yönü ise MN üzerindeki parlatma noktasının teğet yönü ile aynıdır. Normal yüzeyi parlatma kuvveti F_n 'dir ve teğetsel parlatma kuvveti F_t 'dir. Denklem 16 ve 17'de verilerek Şekil 14'te simüle edilmiştir [90].



Şekil 14 (Figure 14). Normal ve teğetsel parlatma kuvvetlerinin hesaplanması için şematik diyagramı (Schematic diagram for calculating normal and tangential polishing forces) [90]

Düzgün olmayan rasyonel temelli eğri türevlenebilmektedir. x_1N_{z1} kordinat sisteminde $z_1 = f(x_1)$ ve $\tan \alpha = f'(x_1)$ alınarak F_t ve F_n yeniden türetilmiştir. Kuvvetlerin bileşimi ve ayrışmasına göre, normal parlatma kuvveti F_n ve teğet parlatma kuvveti F_t şu şekilde verilebilir [90];

$$F_t = F_x \cdot \cos \alpha - F_z \cdot \sin \alpha \quad (16)$$

$$F_n = F_x \cdot \sin \alpha + F_z \cdot \cos \alpha \quad (17)$$

Meng ve ark., taşlama kuvveti, talaş kaldırma oranı, boyut ve şekil doğruluğu, yüzey ve yüzey altı bütünlüğü üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu ve taşlama kuvvetinin modellemesinde kullanıldığını literatürde araştırmışlardır. Taşlama kuvvetlerinin doğru tahmini, taşlama parametrelerinin ve taşlama makinelerinin yapısının optimize edilmesi için önemlidir. Taşlama mekaniği üzerine önemli araştırma makaleleri olmasına rağmen literatürde taşlama mekaniğinin modellenmesi üzerine kapsamlı bir inceleme bulunmamaktadır. Bu boşluğu doldurmak için bu çalışma modelleme ilkeleri, sınırlamalar ve gelecekteki olası eğilimler açısından taşlamada mekaniğin teorik yöntemlerini ve uygulamalarını inceleyip sunmuşlardır. Aynı sorun Jamshidi ve ark.'nın modellemesine de yansımıştır. Kuvvet modeli, kırılğan malzemeler için iyi çalışılmamıştır [91].

Hecker ve ark., sünek malzemelerin kesme kuvveti denklemini aktif aşındırıcı tane sayısına göre modellemiştir ancak aşındırıcı tanelerin geometrik şekilleri tam olarak belli olmadığından dolayı yapısal analiz modellemeleri basitleştirilmiştir. Kesme kuvveti (F_n) Denklem 18'de verilmiştir [91-93];

$$F_n = df \frac{H_b \pi D}{2} (D - (D^2 - d^2)^{1/2}) \cdot (\cos \alpha - f \sin \alpha) \quad (18)$$

Jamshidi ve ark., kesme ve sürtünme kuvvetini (F_n) olarak Denklem 19'da tanımlamışlardır [91,94];

$$F_n = K_{nc} w_c h_{ij}(\theta_{ij}) + K_{ne} w_c \quad (19)$$

Li ve arkadaşlarının kesme teorisi ile ilgili yaptığı çalışmada; taşlama kuvvetlerinin ayrıntılı modelleme metodolojisi, analitik olarak oluşturulup deneysel olarak doğrulanmıştır. Taşlama işlemi sırasında sürtünme, zımpara taşı ile aşınma düzlükleri arasındaki arayüzlerde meydana gelir ve iş parçasının elastik ile plastik deformasyonları ile karakterize edilmektedir. Hemen kesme kuvveti meydana gelmemektedir. Sırtı ile sürtünme, kazıma ve kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Daha sonra da yüzeyden malzeme kopması olmaktadır. Şekil 15 (a)'nın $F_{nr}^{(i)}$ ve $F_{tr}^{(i)}$ bileşenleri i tanesinin normal/teğet sürtünme kuvvetini (N) Denklem 20 ve 21 de verilmiştir. C_1 ve C_2 deneysel katsayıları denklemlerde kullanılmıştır. HB: İş parçasının Brinell sertlik değeri ($N \cdot m^{-2}$), $d_g^{(i)}$: Tanenin çapı (m), $h_t^{(i)}$: i tanesinin anlık talaş kalınlığı (m) [95];

$$F_{nr}^{(i)} = 2^{3/2} \cdot HB \cdot [d_g^{(i)}]^{3/2} \cdot [h_t^{(i)}]^{1/2} \quad (20)$$

$$F_{tr}^{(i)} = (2^{3/2} \cdot HB \cdot [d_g^{(i)}]^{3/2} \cdot [h_t^{(i)}]^{1/2}) \cdot (C_1 \cdot \frac{\pi [\%1 \cdot d_g^{(i)}]^2}{F_{nr}^{(i)}} + C_2) \quad (21)$$

Şekil 15 (b)'de kazıma kuvvetini hesaplamak için Denklem 22 ve 23 kullanılmaktadır. H_s : iş parçasının çizilme sertliği ($N \cdot m^{-2}$)'dir.

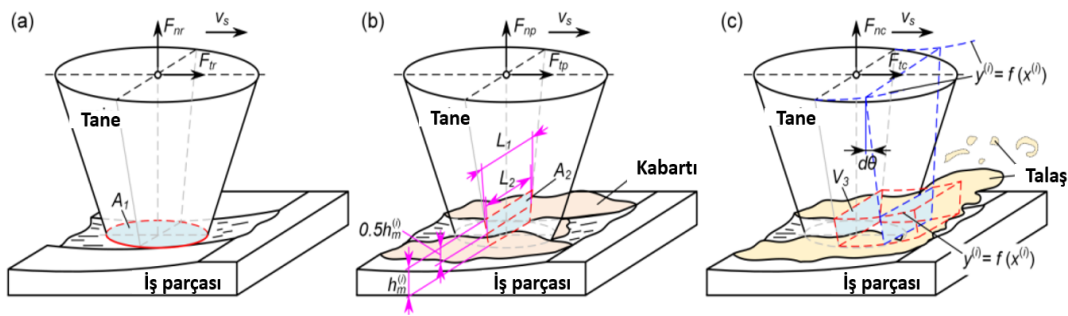
$$F_{tp}^{(i)} = H_s \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{3} h_t^{(i)} + \%2 \cdot d_g^{(i)} \right] \cdot h_t^{(i)} \quad (22)$$

$$F_{np}^{(i)} = \frac{H_s \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{3} h_t^{(i)} + \%2 \cdot d_g^{(i)} \right] \cdot h_t^{(i)}}{\frac{2}{\pi} \left(\left[\frac{\frac{\sqrt{3}}{3} h_t^{(i)} + \%2 d_g^{(i)}}{d_g^{(i)}} \right]^{-2} \cdot \sin^{-1} \left[\frac{\frac{\sqrt{3}}{3} h_t^{(i)} + \%2 d_g^{(i)}}{d_g^{(i)}} \right] - \left[\frac{\frac{\sqrt{3}}{3} h_t^{(i)} + \%2 d_g^{(i)}}{d_g^{(i)}} \right]^{-2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (23)$$

Şekil 15(c)'te kesme aşamasının talaş oluşumu ve iş parçası malzemesinin uzaklaştırılması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Kesme aşaması sırasında hareketli kesici tarafından indüklenen normal kuvvetler şu şekilde temsil edilebilir (Denklem 24 ve 25):

$$F_{nc}^{(i)} = \frac{\sqrt{28}}{3} \cdot [h_t^{(i)}]^2 \cdot HB \quad (24)$$

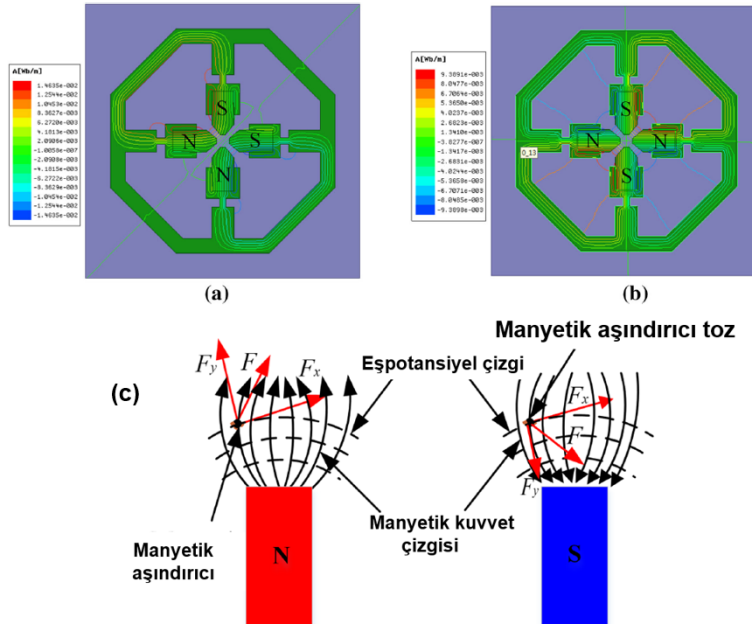
$$F_{tc}^{(i)} = \frac{\sqrt{28}}{3} \cdot [h_t^{(i)}]^2 \cdot HB \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \tan 60^\circ} \quad (25)$$



Şekil 15 (Figure 15). Tane-iş parçası taşlama modeli; (a) sürtünme, (b) kazıma, (c) kesme aşamaları (Particle-workpiece grinding model; (a) friction, (b) abrasion, (c) cutting stages) [95]

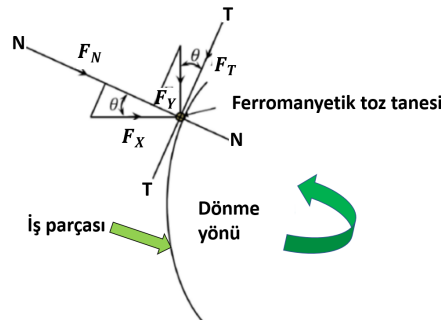
MAİ İşlemindeki Kesme Teorisi (Cutting Theory in the MAF Process)

Manyetik yoğunluk, işleme verimliliğini doğrudan belirlemektedir. Maxwell yazılımı kullanılarak manyetik alan içinde kuvvet simülasyonları gerçekleştirilmektedir. Şekil 16'da manyetik kutuplar fan şeklinde dizilmiştir. Şekil 16(a)'da N-N-S-S düzenlemesi sonucunda iki kapalı döngüde manyetik alan ortaya çıkmıştır. Şekil 16(b)'de ise N-S-N-S düzenlemesi ortaya çıkmıştır. Dört kapalı döngüdeki manyetik akı yoğunluğu daha fazla olduğundan dolayı bünyesinde daha fazla aşındırıcı toz bulunduracaktır. Şekil 16(c)'de ise manyetik akı yoğunluğunda bulunun aşındırıcı tanecik yapı, N ve S kutupları arasında olursa kesme kuvvetinin bileşenlerinin konumlarının görünümü verilmiştir [96].



Şekil 16 (Figure 16). Dört manyetik kutup; (a) N-N-S-S, (b) N-S-N-S düzenlemesi, (c) alan çizgileri (Four magnetic poles; (a) N-N-S-S arrangement, (b) N-S-N-S arrangement, (c) field lines) [96]

Aşındırıcı tane manyetik kuvveti, işleme kuvveti olarak görev yapmaktadır. Manyetik alan oluşturan kutup uçları (N, S) arasında yüksek hızda dönen silindirik iş parçası yerleştirildiğinde manyetik aşındırıcı toz karışımı iş parçası yüzeyinden aşındırma işlemi yapmaktadır. Düzlem yüzeyin MAİ yönteminde teğetsel kuvvetin yerine merkezkaç kuvvet yer almaktadır [21,97,98]. Yüzey pürüzlülüğünün azaltılması işleminde; iş parçası yüzeyi üzerindeki aşındırıcı taneciğe normal doğrultuda bir F_N kuvveti gelmektedir. Talaş kaldırma direnç kuvveti (R_T) oluşmuştur. Direnç kuvvetine ters yönde etki eden teğetsel kuvvet (F_T), mikro talaş kaldırmak için R_T 'den büyük olmalıdır [42,47,49]. MAİ işleminde aşındırıcı toza etki eden mekanik kuvvet (F_x ve F_y) vektörleri Şekil 17'de gösterilmiştir. İş parçası yüzeyinden talaş kaldırmayı F_x kuvvet vektörü sağlamaktadır. Eş potansiyel kuvvet çizgileri boyunca ise F_y kuvvet vektörü sağlamaktadır [42,99,100].



Şekil 17 (Figure 17). Manyetik kuvvet vektörleri (Magnetic force vectors) [42,99,100]

Judal ve Yadava'nın MAİ yöntemindeki kesme kuvvetinin matematiksel modellenmesinde, F_x ve F_y

manyetik alan kuvvet vektörlerinin matematiksel modellenmesi Denklem 2 ve 3'te verilmiştir. χ^{FP} ; aşındırıcı taneciğin manyetik hassasiyetini, μ_0 ; havanın manyetik geçirgenlik katsayısını, V ; manyetik aşındırıcı tanelerin hacmini, H ; işleme bölgesindeki manyetik alan yoğunluğunu simgelemektedir. (Φ) düğüm değerleri; H , d_H/d_x ve d_H/d_y değerleri ile temas yüzeyine yakın Gauss noktalarında hesaplanmaktadır. X ve Y yönü boyunca ferromanyetik parçacık (FP) üzerine etki eden kuvvetlerin manyetik alanda FP'ye etki eden kuvvetler olarak şu şekilde bulunmuştur: μ_0 : Yerin geçirgenliği, χ_m : Manyetik aşındırıcı parçacıkların duyarlılığı, V : ferromanyetik parçacık hacmi, H : Manyetik akı yoğunluğu (Denklem 26 ve 31 arası) (Şekil 18). [100-102];

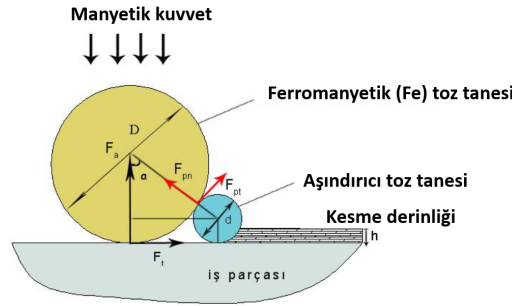
$$F_x = \chi_m^{FP} \mu_0 V H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (26)$$

$$F_y = \chi_m^{FP} \mu_0 V H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (27)$$

μ_m : Manyetik aşındırıcı parçacıkların bağıl geçirgenliği, μ_{ABR} : Aşındırıcıların bağıl geçirgenliği, μ_{FP} : Ferromanyetik parçacığın bağıl geçirgenliği (Şekil 18) [21,103];

$$\chi_m = \mu_m - 1 \quad (28)$$

$$\mu_m = \alpha \mu_{FP} + (1 - \alpha) \cdot \mu_{ABR} \quad (29)$$



Şekil 18 (Figure 18). Ferromanyetik tozun mekanik modeli (The mechanical model of ferromagnetic powder) [21,103]

H ve türevlerinin değerleri, gauss noktalarında düğüm noktalarından daha doğrudur. Bu nedenle, sekiz düğümlü dörtgen elemanın yaklaşık uzunluğu, temas yüzeyindeki her bir FP'nin merkezi yaklaşık olarak gauss noktası üzerinde olacak şekilde, FP boyutunun bir fonksiyonu seçilir. Asıl amaç; kesme kuvvetinin bileşenleri olan F_N (normal kesme kuvveti) ve F_T (teğetsel kesme kuvveti) bileşenlerini bulan Denklem (30 ve 31): Hem F_N hem de F_T , büyüklük ve yön olarak doğası gereği uzlamsaldır (Şekil 18) [21,103].

$$F_N = F_x \cdot \cos\theta + F_y \cdot \sin\theta \quad (30)$$

$$F_T = -F_x \cdot \sin\theta + F_y \cdot \cos\theta \quad (31)$$

Chen ve ark.'nın MAİ yöntemindeki kesme kuvvetinin modellenmesinde, ferromanyetik ve aşındırıcı toz karışımı kullanılarak iş parçası üzerinde sürtünme kuvvetinin mekaniksel Denklemler 32 ve 35'in arasında verilmiştir. Şekil 18'de görüldüğü gibi ferromanyetik ve aşındırıcı parçacığın sürtünme katsayısı dikkate alındığında kuvvetin denge denklemi x eksenini ve y eksenini yönünde sonraki denklemlerle birlikte yazılmalıdır. (F_a : Yüzeyin uyguladığı dik kuvvet, F_i : Yüzeyin uyguladığı yatay kuvvet, F_{pn} : Aşındırma kuvveti, F_{pt} : Sürtünme kuvveti) [89]. Sürtünme katsayısı, ferromanyetik ve aşındırıcı tozların x ve y eksen yönlerindeki kuvveti kullanarak sürtünme kuvvetin (F_{pt}) ve yüzeyin uyguladığı yatay kuvvet (F_i)'nin matematiksel modeli Denklem 32 ve 33'te verilmiştir. (μ_p ; iş parçası ve aşındırıcı toz arasındaki sürtünme katsayısını, μ_w ; ferromanyetik toz ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını simgelemektedir) [21,103]. μ_p : aşındırıcı parçacık ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısıdır; μ_w : ferromanyetik parçacık ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısıdır. F_0 : ilk kuvettir.

$$F_{pt} = F_{pn} \times \mu_p \quad (32)$$

$$F_i = F_a \times \mu_w \quad (33)$$

F_x ve F_y manyetik alan kuvvet vektörlerinin matematiksel modellenmesi Denklem 34 ve 35'te verilmiştir.

$$\sum F_x = F_t - F_{pn} \sin \alpha + F_{pt} \cdot \cos \alpha = 0 \quad (34)$$

$$\sum F_y = F_0 - F_a \cos \alpha + F_{pt} \cdot \sin \alpha = 0 \quad (35)$$

MAİ VE TAŞLAMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Okuyucu tarafından daha iyi anlaşılır olmasını sağlamak amacıyla literatür çalışmaların özetlenmesi Tablo 2 ve 3'te verilmiştir. Burada; kullanılan malzemeler, kesme kuvvetlerinin matematiksel modellemeleri vb. konularını izah ederek kapsamlı bir şekilde anlatılması yapılmıştır. Matematiksel modellemeler deneylerin sonucunda ortaya çıkmaktadır. Buradaki kesme kuvvet denklemlerinde deneylerin işlem tekniklerinin etkili olduğu görülmektedir [1-104].

Tablo 2. Matematiksel modellemelerin karşılaştırılması (Comparison of mathematical models) [88, 89, 92-94, 101-104]

| Parametre(Parameter) | MAİ Yöntemi(MAF Method) | Taşlama Yöntemi(Grinding Method) |
|--|---|---|
| | Judal ve Yadava , F_N (normal kesme kuvveti) ve F_T (teğetsel kesme kuvveti) bileşenlerinin denklemleri (The equation for F_N (normal cutting force) and F_T (tangential cutting force) components) [101]: | Adıyaman ve ark. , F_n ve F_t kuvvetlerinin bileşkesi Taşlama kuvveti; $F_{taş}$ (The resultant of F_n and F_t forces is the grinding force; F_{grind}) [88, 89]; |
| Kesme kuvveti matematiksel modeli (The mathematical model of cutting force) | $F_N = F_x \cdot \cos \theta + F_y \cdot \sin \theta$ $F_T = -F_x \cdot \sin \theta + F_y \cdot \cos \theta$ | $K_1 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot f \cdot a}{V_{taş} \cdot c \cdot r \cdot \sqrt{\frac{(D \cdot a) + (4 \cdot W_g^2 \cdot a^2 \cdot (D - a))}{W_f^2 \cdot D}}}}$ |
| | Chen ve ark. , F_x ve F_y manyetik alan kuvvet vektörleri (F_x and F_y magnetic field force vectors) [103]: | Xian ve ark. , normal parlatma kuvveti F_n ve teğet parlatma kuvveti F_t (Normal polishing force F_n and tangential polishing force F_t) [98]; |
| | $\sum F_x = F_t - F_{pn} \sin \alpha + F_{pt} \cdot \cos \alpha = 0$ $\sum F_y = F_0 - F_a \cos \alpha + F_{pt} \cdot \sin \alpha = 0$ | $F_t = F_x \cdot \cos \alpha - F_z \cdot \sin \alpha$ $F_n = F_x \cdot \sin \alpha + F_z \cdot \cos \alpha$ |
| | | Hecker ve ark. , Kesme kuvveti (F_n) (Cutting force (F_n)) [92, 93]; |
| | | $F_n = df \frac{H_b \pi D}{2} (D - (D^2 - d^2)^{1/2}) \cdot (\cos \alpha - f \sin \alpha)$ |
| | | Jamshidi ve ark. , kesme ve sürtünme kuvveti (F_n) (Cutting and friction force (F_n)) [94, 104]; |
| | | $F_n = K_{nc} W_c h_{ij}(\theta_{ij}) + K_{nc} W_c$ |
| | | Li ve ark. [103], Kesme kuvveti (Cutting force); |
| | | $F_{nc}^{(i)} = \frac{\sqrt{28}}{3} \cdot [h_t^{(i)}]^2 \cdot HB$ |
| | | $F_{tc}^{(i)} = \frac{\sqrt{28}}{3} \cdot [h_t^{(i)}]^2 \cdot HB \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \tan 60^\circ}$ |

Tablo 3'te her iki yöntemde de kullanılan aşındırıcı malzemeler verilmiştir. Aynı aşındırıcı tanecikleri taşlamada kullanırken, taşlamada aşındırıcı taneler zımpara taşına yapışırken MAİ yönteminde manyetik alanın etkisi ile esnek hale dönmektedir [1-104].

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

2020 yılının imalat sektörü verilerine göre %25'lik pay ile taşlama yöntemi diğer yöntemlere göre ilk sırada yer almıştır. Ferro-aşındırıcı kompozit toz karışımındaki manyetik bileşen miktarı, hacimce aşındırıcı tozlara göre %60 'tan yüksek olmalıdır. Tian ve ark., taşlama yöntemini kullanarak Inconel718 iş parçasının işlenmesinde dönüş hızı 240 dev/dk olduğunda R_a : 0,473'ten 0,153 μm 'ye düşmüştür [67]. Song ve ark., MAİ yöntemini kullanarak elmas ve Fe toz karışımı ile 30 dk boyunca Ti-6Al-4V alaşımından oluşan 2000 dev/dk işleme hızında R_a : 0,53 μm olurken 1250 dev/dk hızda R_a : 0,117 μm değerlerine düştüğünü gözlemiştir [82]. Burada, uçak ve uzay endüstrisinde, ticari kullanımı olan süper alaşımlar arasında en çok kullanılan malzeme olan Inconel718 nikel alaşımının daha pürüzlü bir yüzey olduğu görülmektedir. Bu nedenden dolayı hassas işlemenin olması önem arz etmektedir. MAİ yönteminde R_a değerlerinin, taşlama yöntemine göre düşmesi de yöntemin önemini arttırmaktadır. Kaplama yapılan parçalara da MAİ yöntemi uygulanabilir. MAİ yöntemi,

Tablo 3. Malzeme ve yüzey işleme yöntemlerin karşılaştırılması (Comparison of materials and surface processing methods) [12,16-18,42,72]

| Parametreler (Parameters) | MAİ Yöntemi (MAF method) | Taşlama Yöntemi (Grinding method) |
|---|--|---|
| Kullanılan aşındırıcı malzemeler (The abrasive materials used) | Ferromanyetik (demir (Fe) ve Al ₂ O ₃) aşındırıcı tozları kullanılır (Ferromagnetic (iron (Fe) and Al ₂ O ₃) abrasive powders are used) [72] | Zımpara taşında; elmas, Al ₂ O ₃ , SiC, CBN aşındırıcı tozları, %54 aşındırıcı toz taneler, %26 bağlayıcı eleman ve %20 boşluk vardır (In the grinding wheel; there are diamond, Al ₂ O ₃ , SiC, and CBN abrasive powders with 54% abrasive grains, 26% bonding agents, and 20% porosity) [16-18] |
| Yüzey işleme çeşitleri (Types of Surface Treatment) | Elektro-mıknatıs veya Sabit mıknatıs <i>etkisiyle</i> silindirik iç yüzey, silindirik dış yüzey, düzlem yüzey, serbest formlu yüzey işleme (Cylindrical internal surface, cylindrical external surface, flat surface, and free-form surface machining using electro-magnet or permanent magnet effects) [42] | Silindirik, konik, krank, Puntasız, Düzlem yüzey, Dalma, Profil, Elektrokimyasal taşlama (Cylindrical, conical, crank, centerless, flat surface, plunge, profile, electrochemical grinding) [12] |

hassas ve karmaşık parçalarda olumlu sonuçlar vermekle beraber bazı sınırlamaları da mevcuttur. Manyetik alan dışına çıkan aşındırıcı tozlar ise parlaklığın elde edilmesinde olumsuz etki etmektedir. Yüzeyin pürüzlü olması istenmeyen durum olmuştur. MAİ yönteminde esnek fırça şeklinde talaş kaldırma yaparak, yüzeyin daha az hasar görmesi sağlanmaktadır.

Taşlamada kullanılan sert taş yüzeyi olduğundan dolayı yüzey deformasyonlarının MAİ yöntemine göre daha fazla olacağı literatürde görülmüştür. Yüzeydeki kesme kuvvetlerinin doğru tahmini, taşlama parametrelerinin ve taşlama makinelerinin optimize edilmesi için önemlidir. MAİ yönteminde; düzgün ve doğrusal olmayan manyetik alanın bir bölgesinde bulunan bir para-manyetik topa benzer yapıya etki eden manyetik kuvveti hesaplamak için denklemin türetilmesini sunmaktadır. Taşlama ve MAİ yöntemi de yüzey üzerinde hassas şekilde parlatma yaptığı için yüzey pürüzlülük, talaş kaldırma oranı, işleme boşluğu, tanecik şeklindeki taş çapı, parlatma hızı deneysel parametreler her iki işleme yönteminde de benzer etkileri yapmaktadır. Kesici aşındırıcı taneler, sert çelik yüzeylerin parlatılmasında kullanılmaktadır. Geleneksel ve geleneksel olmayan parlatma işlemlerinde kullanılan aşındırıcı malzemeler aynıdır. Sadece birisinde sabitken diğerinde esnektir. Geleneksel malzemelerin ileri teknoloji uygulamalarına uyumlu olarak performanslarının artırılması sonucunda imalat sektöründe, yüzey pürüzlülüğü azalarak hassas yüzey parlatma işlemlerindeki bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri, zengin bir kaynakçaya dayandırılıp aktarılarak bu konu üzerinde çalışanlara da kolaylık sağlanması amacıyla yazılmıştır. Yüzeyi parlatma işlemindeki kesme kuvveti üzerine önemli araştırma makaleleri olmasına rağmen, literatürde MAİ ve taşlama yöntemlerindeki kesme kuvvetinin modellenmesi üzerine kapsamlı bir inceleme bulunmamaktadır. Bu boşluğu doldurmak için bu çalışma modelleme ilkeleri, sınırlamalar ve uygulamaları inceleyip sunulmuştur. Her bilimsel çalışmada, zaman içinde görülen eksikliklerin ileri ki çalışmalarda görülmemesi için sunulabilecek öneriler aşağıda verilmiştir;

- Kuvvetin ölçülmesine yönelik deneysel bir ayar açıklanmaktadır. Çok kutuplu bir sistem durumunda manyetik alan kuvveti hesaplaması için analitik ifadeler literatürde deneysel yollarla türetilmiştir. Onların yardımıyla, bu durumda manyetik alan davranışının farklı önemli özellikleri açıklanabilecektir.
- Taşlamada kuvvetli rulman seçimi ve buna bağlı olarak daha hassas yataklamanın yapılması sonucunda talaş derinliklerindeki kararsızlıklar giderilebilir.
- Taşlamadaki zımpara taşı devirleri ile iş parçaları işlenerek numunelerin yüzey pürüzlülüklerine taş devrinin etkilerine bakılabilir.
- Taşlama ve MAİ yönteminde; aynı parametrelerde işlenmiş numunelerin yorulma ve aşınma dayanımı mekanik özellikleri karşılaştırılabilir. Farklı aşındırıcı tanecikler de kullanılarak etkileri değerlendirilebilir.
- MAİ yönteminde sabit yerine elektro-mıknatıslar kullanılarak manyetik alan şiddeti kontrol edilebilir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Talaş Kaldırma Yöntemlerinin Sınıflandırılması, (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://docplayer.biz.tr/4688114-Talashi-imalat-talas-kaldirma-yontemlerinin-siniflandirilmesi-1-geleneksek-talashi-imalat-la-tornalama-ve-iliskili-operasyonlar.html>
- [2] M. P. Groover, 21. Chapter; Theory of Metal Machining, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 7th ed., New Jersey, USA: John Wiley & Sons, (2020), 485-500. ISBN: 978-0470-467002. (Date of Access: 24 June 2023);* <https://www.fcusd.org/cms/lib/CA01001934/Centricity/Domain/4529/Fundamentals%20of%20Modern%20Manufacturing%20Materials%20Processes%20and%20Systems%204th%20Edition.pdf>
- [3] Talaşlı İmalat, (Erişim: 11 Nisan 2023); <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/eminerdin@hititedutr110520185B2N4W5Y.pdf>
- [4] V. K. Jain, V. Sidpara, M.R. Sankar, M. Das, Nano-Finishing Techniques: A Review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 226(1) (2011), 327-346. Doi: 10.1177/0954406211426948
- [5] H. Demir, A. Güllü, U. Şeker, Düzlem Taşlama İşleminde Taşlama Kuvvetlerinin Ölçülmesi için Bir Dinamometre Tasarımı ve İmalatı, *Teknoloji*, 9(2) (2006), 111-118. Doi: 10.12739/NWSA.2017.12.4.2A0127
- [6] R. Rekha, S. Vinoth Kumar, V. Aravindh Raj, B. Aswin Baboo, P. Gokul Raj, A. Jai Vignesh, Optimization of Cylindrical Grinding Process Parameters on Austenitic Stainless Steel 304 Using Taguchi Based Grey Relational Analysis, *Materials Today: Proceedings*, 72(4) (2023), 2569-2573, Doi: [10.1016/j.matpr.2022.10.120](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.120)
- [7] S. Jha, V. K. Jain, 8. Chapter; Nano-Finishing Techniques, *Micro-manufacturing and Nanotechnology, Springer Publishing, Berlin, Heidelberg, (2006), 171-195. (Date of Access: 24 June 2023);* https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-29339-6_8
- [8] H. K. Tonshoff, B. Karpuschewski, T. Mandrysch, Grinding Process Achievements and Their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities, *Annals of CIRP*, 47(2) (1998), 651-668. Doi: 10.1016/S0007-8506(07)63247-8
- [9] H. Ding, J. Yang, W. Wang, J. Guo, Q. Liu, Characterization and Formation Mechanisms of Rail Chips from Facing Grinding by Abrasive Wheel, *Journal of Manufacturing Processes*, 73(1) (2022), 544-554. Doi: 10.1016/j.jmapro.2021.11.032
- [10] V. Gopan, K. L. D. Wins, A. Surendran, Integrated ANN-GA Approach for Predictive Modeling and Optimization of Grinding Parameters with Surface Roughness as the Response, *Materials Today: Proceedings*, 5(5) (2018), 12133-12141. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.191
- [11] O. Adıyaman, F. Sönmez, Yeni Tip Taşlama Yönteminde Taşlama Parametrelerinin Deneysel Tasarım Yöntemi ile Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin İncelenmesi, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1) (2020), 215-225. Doi: 10.17798/bitlisfen.544248
- [12] O. Adıyaman, Geliştirilen İkincil Dönel Eksenli Taşlama Mekanizması ile Düzlem Yüzey Taşlama İşleminde Kesme Parametrelerinin Araştırılması, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, Türkiye, 2015.*
- [13] J. Zhang, J. Liu, S. Yang, C. Ju, J. Li, Z. Qiao, A Model for Material Removal of Robot-Assisted Blade Polishing Using Abrasive Cloth Wheel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(7-8) (2022), 1-13. Doi: 10.1007/s00170-022-10239-7
- [14] S. Cai, W. Liu, J. Song, K. Deng, Y. Tang, Research and Progress on Truing and Sharpening Process of Diamond Abrasive Grinding Tools, *Applied Sciences*, 12(9) (2022), 4683-4694. Doi: 10.3390/app12094683
- [15] L. Lv, Z. Deng, T. Liu, Z. Li, W. Liu, Intelligent Technology in Grinding Process Driven by Data: A Review, *Journal of Manufacturing Processes*, 58(17) (2020), 1039-1051. Doi: 10.1016/j.jmapro.2020.09.018
- [16] M. Zeyveli, A. Gültaş, Taşlama Operasyonları için Uzman Sistem Destekli Zımpara Taşı Seçimi, *Teknoloji*, 7(2) (2004), 241-249. (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://jstech.karabuk.edu.tr/arsiv/1302->

0056/2004/Cilt%287%29/Sayi%282%29/241-249.pdf

- [17] Md Amir, R. Sharma, V. Mishra, S. Wazed Ali, G. S. Khan, Polishing Performance of Magnetic Nanocomposites Based Nanoabrasive, *Materials Today Proceedings*, 56(1) (2022), 549-554. Doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.276
- [18] A. Wahab Hashmi, H. Singh Mali, et al., Understanding the Mechanism of Abrasive-Based Finishing Processes Using Mathematical Modeling and Numerical Simulation, *Metals*, 12(8) (2022), 3-65. Doi: 10.3390/met12081328
- [19] Fundamentals of Hard Turning, (Date of Access: 24 June 2023); http://cdn2.hubspot.net/hub/139128/file-17761415-pdf/docs/gos_wp_hardturning_f.pdf4
- [20] Taşlama İşlemleri, (Erişim: 11 Nisan 2023); https://tf.selcuk.edu.tr/dosyalar/files/033003/5_taslama_islemleri.pdf
- [21] Ö. Salman, Manyetik Aşındırıcılar ile Yüzey İşleme, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11(1) (2014), 1-10. (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://docplayer.biz.tr/15702465-Manyetik-asindiricilar-ile-yuzey-isleme.html>
- [22] V. K. Jain, Magnetic Field Assisted Abrasive Based Micro/Nano Finishing, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(20) (2009), 6022-6038. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.08.015
- [23] H. Demir, Alüminyum Oksit Zımpara Taşlarıyla Silindirik Taşlamada Çeşitli Çelikler için Taşlama Oranlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Ankara, Türkiye, 1998.
- [24] M. J. Jackson, C. J. Davis, M. P. Hitchiner, B. Mills, High-Speed Grinding with CBN Grinding Wheels – Applications and Future Technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 110(1) (2001), 78-88. Doi: [10.1016/S0924-0136\(00\)00869-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00869-4)
- [25] L. Slătineanu, O. Dodun, G. Nagîț, M. Coteață, I. Beșliu, A Review on Magnetic Abrasive Machining, *Romanian Association of Nonconventional Technologies Review*, 21(2) (2017), 10-21. (Date of Access: 24 June 2023); <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/184>
- [26] H. Demir, A. Güllü, Taşlamada Parametrelerin Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2) (2001), 189-198. (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20536/218801>
- [27] H. Demir, A. Güllü, Taş Dokusunun Yüzey Pürüzlülüğü ve Taşlama Kuvvetlerine Etkilerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimmarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1) (2008), 77-83. (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/75510>
- [28] H. Demir, A. Güllü, İ. Çiftci, U. Şeker, An Investigation into the Influences of Grain Size and Grinding Parameters on Surface Roughness and Grinding Forces when Grinding, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 56(7-8) (2010), 447-454. (Date of Access: 24 June 2023); <https://www.sv-jme.eu/article/an-investigation-into-the-influences-of-grain-size-and-grinding-parameters-on-surface-roughness-and-grinding-forces-when-grinding/>
- [29] X. Chen, W. Brian, Analysis and Simulation of The Grinding Process, Part III: Comparasion With Experiment, *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, Pergaman, 36(8) (1996b) 897-906. (Date of Access: 24 June 2023); <https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/7083/9/Analysis%20of%20grinding%20surface%20creation%20by%20single%20grit%20approach.pdf>
- [30] H. Masoumi, S. M. Safavi, M. Salehi, Grinding Force, Specific Energy and Material Removal Mechanism in Grinding of HVOF-Sprayed WC–Co–Cr Coating, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(3) (2014), 321-330. Doi:10.1080/10426914.2013.872261
- [31] E. Brinksmeier, J. C. Aurich, et al., Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes, *CIRP Annals*, 55(2) (2006), 667-696. Doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.003
- [32] J. Kopac, P. Krajnik, High-Performance Grinding—A Review, *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1–3) (2006), 278-284. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.010
- [33] Y. Li, Y. Liu, Y.Tian, Y. Wang, J. Wang, Application of Improved Fireworks Algorithm in Grinding

- Surface Roughness Online Monitoring, *Journal of Manufacturing Processes*, 74(1) (2022), 400-412. Doi: 10.1016/j.jmapro.2021.12.046
- [34] Ş. Baday, H. Başak, F. Sönmez, The Assessment of Cutting Force with Taguchi Design in Medium Carbon Steel–Applied Spheroidization Heat Treatment, *Measurement and Control*, 50(4) (2017), 89-96. Doi: [10.1177/0020294017713767](https://doi.org/10.1177/0020294017713767)
- [35] A. Kumar Singh, A. Kumar, V. Sharma, P. Kala, Sustainable Techniques in Grinding: State of The Art Review, *Journal of Cleaner Production*, 269(1) (2020), 121876-121892. Doi: [10.1016/j.jclepro.2020.121876](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121876)
- [36] F. Hashimoto, H. Yamaguchi, P. Krajnik, K. Wegener, R. Chaudhari, H. W. Hoffmeister, F. Kuster, Abrasive Fine-Finishing Technology, *CIRP Ann.-Manufacturing Technology*, 65(2) (2016), 597-620. Doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.003
- [37] M. Çelik, Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yönteminde İç Yüzeylerin İşlenebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği İmalat Teknolojileri Anabilim Dalı*, Elazığ, Türkiye, 2017.
- [38] Aşınma Çeşitleri, (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://insapedia.com/asinma-nedir-asinma-cesitleri-ve-etki-eden-faktorler/>
- [39] B. Singh, C. Kalra Singh, Optimization of Magnetic Abrasive Finishing Parameters During Finishing of Brass Tube, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(4) (2015), 1810-1817. Doi: 10.1007/978-81-322-1859-3_25
- [40] B. Girma, S. S. Joshi, M. V. G. S. Raghuram, An Experimental Analysis of Magnetic Abrasives Finishing of Plane Surfaces, *Machining Science and Technology*, 10(3) (2006), 323–340. Doi: 10.1080/10910340600902140
- [41] M. Sharma, D. P. Singh, To Study the Effect of Various Parameters on Magnetic Abrasive Finishing, *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology-IJRMET*, 3(2) (2013), 212-215. (Date of Access: 24 June 2023); <https://typeset.io/pdf/to-study-the-effect-of-various-parameters-on-magnetic-2fporj133p.pdf>
- [42] M. Çelik, Elektro-erozyon Yöntemiyle İşlenmiş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Kalitesinin Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yöntemiyle İyileştirilmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara, 2021.
- [43] M. Fox, K. Agrawal, T. Shinmura, R. Komanduri, Magnetic Abrasive Machining of Rollers, *Annals of the CIRP*, 43(1) (1994), 181-184. Doi: 10.1016/S0007-8506(07)62191-X
- [44] X. Sun, Y. Zou, Development of Magnetic Abrasive Finishing Combined with Electrolytic Process for Finishing SUS304 Stainless Steel Plane, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1) (2017), 3373–3384. Doi:10.1007/s00170-017-0408-9
- [45] T. Mori, K. Hikota, Y. Kawashim, Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism, *Journal of Material Processing Technology*, 143(20) (2003), 682-686. Doi:10.1016/S0924-0136(03)00410-2
- [46] H. Yamaguchi, T. Shinmura, M. Takenaga, Development of a New Precision Internal Machining Process Using an Alternating Magnetic Field, *Precision Engineering*, 27(1) (2003), 51-58. Doi:10.1016/S0141-6359(02)00177-0
- [47] Z. Song, Y. Zhao, G. Liu, Y. Gao, X. Zhang, C. Cao, D. Dai, Y. Deng, Surface Roughness Prediction and Process Parameter Optimization of Ti-6Al-4V by Magnetic Abrasive Finishing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(1) (2022), 219–233. Doi:10.1007/s00170-022-09354-2
- [48] İmalat İşlemleri, (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://www.fikriyat.com/akademik-haberler/2018/03/27/imalat-islemleri-ders-notlari>
- [49] B. P. Kheelan, K. M. Patel, Magnetic Abrasive Finishing of AISI52100, *International Journal of Trend in Research and Development*, 1(1) (2014), 1-8. Doi: 10.1007/s00170-010-3102-8
- [50] T. Rasuljon, A. Sulaymanov, G. Madaminova, S.U Agzamov, Grinding of Materials: Main Characteristics, *International Journal of Advance Scientific Research*, 2(11) (2022), 25-34, Doi: 10.37547/ijasr-02-11-05
- [51] P. Gondi, G. Mattogno, A. Sili, G. Foderaro, Structural Characteristics at Surface and Barkhausen Noise in

- AISI 4340 Steel After Grinding, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 10(1) (1993), 255-267. Doi: /10.1080/10589759308952800
- [52] Z.W. Zhong, V.C. Venkatesh, Recent Developments in Grinding of Advanced Materials, *Int J Adv Manuf Technol*, 41(1) (2009), 468–480 Doi:10.1007/s00170-008-1496-3
- [53] O. Adıyaman, V. Savaş, İkincil Dönel Eksenli ile Klasik Düzlem Yüzey Taşlama Mekanizmalarının Deneysel Araştırılması, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11(4) (2014), 21-36. Doi: 10.29130/dubited.994072
- [54] T. Shinmura, K. Takazawa, E. Hatano, M. Matsunaga, T. Matsuo, Study on Magnetic Abrasive Finishing, *CIRP Annals*, 39(1) (1990), 325-328. Doi: 10.1016/S0007-8506(07)61064-6
- [55] H. Dilipak, M. Gülesin, Torna Operasyonları için Uzman Sistem Tekniklerine Dayalı Kesici Seçimi, Mamkon'97, *İ.T.Ü. Makine Fakültesi 1. Makina Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 1997, 349-357.
- [56] H. Demir, Alüminyum Oksit Zımpara Taşlarıyla Silindirik Taşlamada Çeşitli Çelikler için Taşlama Oranlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Ankara, 1998.
- [57] Milli Eğitim Bakanlığı, Makine Teknolojisi, Temel Taşlama İşlemleri, 521MMI652 Ders modülü, (2012), 1-30. (Erişim: 11 Nisan 2023); http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Temel%20Ta%C5%9Flama%20%C4%B0%C5%9Flemleri.pdf
- [58] H. Demir, A. Güllü, Taşlamada Parametrelerin Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2) (2001), 189-198. (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20536/218801>
- [59] M. C. Shaw, A Production Engineering Approach to Grinding Temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, 44(3-4) (1994), 59-169. Doi: [10.1016/0924-0136\(94\)90428-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90428-6)
- [60] Anonim, 1977. TS 291. Taşlama Taşları, Türk Standartları, Ankara, (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://www.scribd.com/document/409306951/TS-291-14-ISO-603-11-2001-Ta%C5%9Flama-Ta%C5%9Flar%C4%B1-Boyutlar-Bolum-11>
- [61] A. S. Khatri, Surface Topology and Forces in Grinding, MSC Thesis, Dalhousie University Master of Applied Science, Department of Mechanical Engineering, Canada, 2006. (Date of Access: 24 June 2023); https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/thesescanada/vol2/002/MR27589.PDF?oclc_number=461541942
- [62] Y. Ma, Z. Liang, Z. Cai, R. Cai, Z. Su, Y. Du, T. Zhou, X. Wang, Grinding Damage in the Fabrication of Polycrystalline Cubic Boron Nitride Micro-drill, *Journal of Manufacturing Processes*, 101(1) (2023), 469-479. Doi: 10.1016/j.jmapro.2023.05.106
- [63] U. Köklü, Değişik Şekillerde Aralıklı (Kesikli) Yüzeylerin Taşlanması Oluşan Şekil Hatalarının Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [64] H. Deng, Z. Xu, Dressing Methods of Superabrasive Grinding Wheels: A Review, *Journal of Manufacturing Processes*, 45(2) (2019), 46-69. Doi: 10.1016/j.jmapro.2019.06.020
- [65] A. Azizi, S. M. Rezaei, A. Rahimi, Study on The Rotary Cup Dressing of CBN Grinding Wheel and The Grinding Performance, *International Advance Manufacturing Technology*, 47(9) (2010), 1053-1063. Doi: 10.1007/s00170-009-2227-0
- [66] B. Yastıkçı, Investigation of Tool Wear in Grinding Processes, Yüksek Lisans Tezi, *Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Üretim Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, Türkiye, 2016.
- [67] Y. Tian, L. Li, B. Liu, J. Han, Z. Fan, Experimental Investigation on High-Shear and Low-Pressure Grinding Process for Inconel718 Super Alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(1) (2020), 3425–3435. Doi: [10.1007/s00170-020-05284-z](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05284-z)
- [68] X. Zhu, W. Wang, R. Jiang, X. Liu, K. Lin, Performances of Ni₃Al-based Intermetallic IC10 in Creep-feed Grinding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(5) (2020), 809–820, Doi:10.1007/s00170-020-05408-5

- [69] L. Singh, S. S. Khangura, P. S. Mishra, Performance of Abrasives Used in Magnetically Assisted Finishing: A State of The Art Review, *Int. J Abras Technol.*, 3(3), (2010), 215–227. Doi: 10.1504/IJAT.2010.034052
- [70] S. Feygin, G. Kremen, L. Lgelstyn, Magnetic-Abrasive Powder and Method of Producing The Same, US Patent 5846270, 1998.
- [71] S. R. Mulik, P. M. Pandey, Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing of Hardened AISI 52100 Steel Using Unbonded SiC Abrasives, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29 (1), (2011), 68-77. Doi: 10.1016/j.ijrmhm.2010.08.002
- [72] T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima, Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism, *Journal of Materials Processing Technology*, 143 (1), (2003), 682–686. Doi: 10.1016/S0924-0136(03)00410-2
- [73] S. Kovaliova, V. Sepelak, et al., Mechanosynthesis of Composites in Chemically Non-reacting and Exothermically Reacting Systems for Magnetic Abrasive Media, *Journal of Materials Science*, 53 (1), (2018), 13560–13572. Doi: 10.1007/s10853-018-2463-5
- [74] L. Heng, Y. J. Kim, S. D. Mun, Review of Superfinishing by The Magnetic Abrasive Finishing Process, *High Speed Machining*, 3 (1), (2017), 42-55. Doi:10.1515/hsm-2017-0004
- [75] L. Heng, G. E. Yang, R. Wang, M. S. Kim, S. D. Mun, Effect of Carbon Nano Tube (CNT) Particles in Magnetic Abrasive Finishing of Mg Alloy Bars, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29 (12), (2015), 5325–5333. Doi:10.1007/s12206-015-1134-6
- [76] T. T. Öpöz, X. Chen, Experimental Investigation of Material Removal Mechanism in Single Grit Grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 63 (1), (2012), 32-40. Doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.07.010
- [77] Kuvars Kumu, (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://www.kuvarskumu.com/kuvarstozu/#:~:text=Kuvars%20Tozu%2C%20Kuvarsca%20zengin%20magmatik,bir%C3%A7ok%20alanda%20%C3%B6nemli%20rol%20oynar>
- [78] V. K. Jain, et al., Effect of Working Gap and Circumferential Speed on The Performance of Magnetic Abrasive Finishing Process, *Wear*, 250 (1-2), (2001), 384-390. Doi:10.1016/S0043-1648(01)00642-1
- [79] N. K. Alkarkhi, M. Naif, Study on The Parameter Optimization in Magnetic Abrasive Polishing for Brass CUZN₃₃ Plate Using Taguchi Method, *The Iraqi Journal for Mechanical and Materials Engineering*, 12 (3), (2012), 596-615. (Date of Access: 24 June 2023); <https://www.iasj.net/iasj/article/64598>
- [80] Z. Q. Liu, Y. Chen, Y. J. Li, X. Zhang, Comprehensive Performance Evaluation of the Magnetic Abrasive Particles, *Int J. Adv. Manuf Technol.*, 68 (1-4), (2013), 631–640. Doi:10.1007/s00170-013-4783-6
- [81] Z. Song, Y. Zhao, G. Liu, Y. Gao, X Zhang, C. Cao, D. Dai, Y. Deng, Surface Roughness Prediction and Process Parameter Optimization of Ti-6Al-4V by Magnetic Abrasive Finishing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122 (1), (2022), 219–233, Doi:10.1007/s00170-022-09354-2
- [82] H. Demir, A. Güllü, U. Şeker, Düzlem Taşlama İşleminde Taşlama Kuvvetlerinin Ölçülmesi İçin Bir Dinamometre Tasarımı ve İmalatı, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Teknoloji Dergisi*, 9(2), (2006), 111-118. (Erişim: 11 Nisan 2023); <https://eds.p.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=0bea71ac-4b2d-4107-9695-c1b6bcfaf3b2%40redis>
- [83] S. C. Salmon, “Modern Grinding Process Technology”, McGraw-Hill, New York, 103-109, 1992.
- [84] J. S., Heo, Y. Koo, S. S. Choi, Grinding Characteristics of Conventional and ELID Methods in Difficult-to-Cut and Hardened Brittle Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156 (1), (2004), 1196–1200. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.394
- [85] D. Anderson, Thermal Modeling and Temperature Measurement of Dry Grinding, MSC Thesis, Dalhousie University, Canada, 2006.
- [86] S. Lachance, A. Warkentin, R. Bauer, Development of An Automated System for Measuring Grinding Wheel Wear Flats, *Journal of Manufacturing Systems*, 22 (2), (2003), 130-135. Doi: 10.1016/S0278-6125(03)90010-0
- [87] I. D. Marinescu, W.B. Rowe, B. Dimitrov, I. Inasaki, H. Ohmori “Tribology of Abrasive Machining Processes”, Elsevier, USA, 2nd ed., 2013.

- [88] O. Adiyaman, Z. Demir, Model and Formulation in Grinding Mechanism Having Advanced Secondary Rotational Axis, *Measurement and Control*, 52(5-6) (2019), 326–337. Doi: 10.1177/0020294019837988
- [89] O. Adiyaman, Z. Demir, V. Savas, Matematiksel Modelleme Yöntemiyle İkincil Dönel Eksenli Taşlamada Motor Gücünün Hesaplanması Araştırılması, *7th International Symposium On Machining, 3. November*, Marmara University, Istanbul, Turkey, 2016, 91-103.
- [90] C. Xian, Y. Shi, X. Lin, D. Liu, 2020. Force Modeling for Polishing Aero-engine Blades with Abrasive Cloth Wheels, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1) (2020), 5255–5267. Doi: 10.1007/s00170-020-05016-3
- [91] Q. Meng, B. Guo, Q. Zhao, H. Nan Li, M. J. Jackson, B. S. Linke, X. Luo, Modelling of Grinding Mechanics: A Review, *Chinese Journal of Aeronautics, In Press, Corrected Proof*, (2022), [Doi: 10.1016/j.cja.2022.10.006](https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.10.006)
- [92] R. L. Hecker, S. Y. Liang, X. J. Wu, et al. Grinding Force and Power Modeling Based on Chip Thickness Analysis, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(5) (2007), 449–459. Doi: 10.1007/s00170-006-0473-y
- [93] R.L. Hecker, I.M. Ramoneda, S.Y. Liang, Analysis of Wheel Topography and Grit Force for Grinding Process Modeling, *Journal of Manufacturing Processes*, 5(1) (2003), 13–23. Doi: 10.1016/S1526-6125(03)70036-X
- [94] H. Jamshidi, M. Gurtan, E. Budak, Identification of Active Number of Grits and Its Effects on Mechanics and Dynamics of Abrasive Processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 273(116239) (2019), 1-12. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.05.020
- [95] H. Nan Li, T. Biao Yu, Z. Wang, L. Da Zhu, W. Shan Wang, Detailed Modeling of Cutting Forces in Grinding Process Considering Variable Stages of Grain-workpiece Micro Interactions, *International Journal of Mechanical Sciences*, 126(1) (2016), 1-45. Doi: [10.1016/j.ijmecsci.2016.11.016](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.016)
- [96] C. Qian, Z. Fan, Y. Tian, Y. Liu, J. Han, J. Wang, A Review on Magnetic Abrasive Finishing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(11) (2021), 619–634. Doi:10.1007/s00170-020-06363-x
- [97] B. Girma, S. Joshi, M. V. G. S. Raghuram, An Experimental Analysis of Magnetic Abrasives Finishing of Plane Surfaces, *Machining Science and Technology*, 10(3) (2006), 323–340. Doi: 10.1080/10910340600902140
- [98] P. Singh, P. S. Samra, L. Singh, Internal Finishing of Cylindrical Pipes Using Sintered Magnetic Abrasives, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(7) (2011), 5747-5753.
- [99] M. R. Smolkin, R. D. Smolkin, Calculation and Analysis of The Magnetic Force Acting on A Particle in The Magnetic Field of Separator Analysis of The Equations Used in The Magnetic Methods of Separation, *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(11) (2006), 3682–3693. Doi: 10.1109/TMAG.2006.8806889
- [100] K. B. Judal, V. Yadava, Modeling and Simulation of Cylindrical Electro-Chemical Magnetic Abrasive Machining of AISI-420 Magnetic Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12) (2013), 2089–2100. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.011
- [101] A. R. Chaudhari, K. B. Judal, Development and Experimentation of Modified Electro-chemical Magnetic Abrasive Finishing, *Materials and Manufacturing Processes*, 37(4) (2022), 448-457, Doi: 10.1080/10426914.2021.2016822
- [102] M. R. Smolkin, R. D. Smolkin, Calculation and Analysis of the Magnetic Force Acting on a Particle in the Magnetic Field of Separator, Analysis of the Equations Used in the Magnetic Methods of Separation, *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(11) (2006), 3682–3693.
- [103] Y. Chen, A. Shimamoto, X. Gao, M.M. Zhang, Study of Friction Coefficient and Friction Force on Magnetic Abrasive Finishing, *Materials Science Forum*, 675(1) (2011), 663-666. Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.675-677.663
- [104] H. Jamshidi, E. Budak, An Analytical Grinding Force Model Based on Individual Grit Interaction, *Journal of Materials Processing Technology*, 283(116700) (2020), 1-15. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116700