



## Effect of machining parameters on surface quality of w-edmed Ti6Al4V alloy in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing technique

Mahmut Çelik<sup>1\*</sup>, Hakan Gürün<sup>2</sup>, Ulaş Çaydaş<sup>3</sup>, Uğur Köklü<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Airframe and Powerplant, Faculty of Aeronautic and Astronautic, Erciyes University, 38280, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, 06500, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Fırat University, 23119, Elazığ, Türkiye

<sup>4</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Karamanoğlu Mehmetbey University, 70200, Karaman, Türkiye

### Highlights:

- Improvement of surface quality of W-EDMed Ti6Al4V
- Finishing of planar surfaces by ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process
- Measurement of material removal rate and surface roughness

### Keywords:

- Wire-EDM
- Ultrasonic assisted MAF
- Surface quality
- Ti6Al4V
- Material removal rate

### Article Info:

Research Article

Received: 30.11.2021

Accepted: 07.09.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1019422

### Acknowledgement:

This study was supported by Gazi University Scientific Research Projects Unit with the grand number 07/2020-04

### Correspondence:

Author: Mahmut Çelik

e-mail:

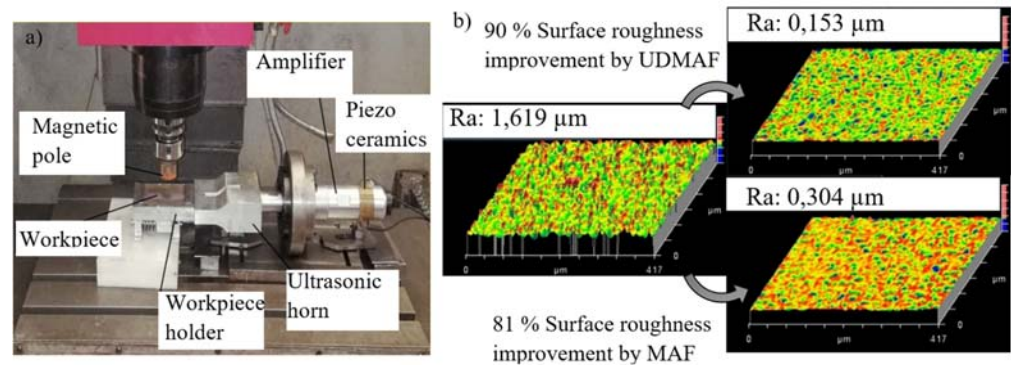
mahmutcelik@erciyes.edu.tr

phone: +90 352 207 6666 /

41110

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, a CNC milling machine was modified to include an ultrasonic system to finish Wire-EDMed Ti6Al4V alloy with Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing and the effects of machining parameters on surface quality and MRR were investigated. As seen in Figure A, improvements up to 90% occurred in surface roughness values. On the other hand, it was determined that ultrasonic support contributed 58% and 15%, respectively, in terms of surface quality and MRR.



**Figure A.** (a) Experimental setup (b) Surface topologies of the specimens before/after MAF and UDMAF process

**Purpose:** The EDM method is frequently used in the machining of difficult-to-cut metals such as titanium alloys. As a result of the EDM method, unwanted formations such as recast layer, micro cracks and craters occur on the workpiece surface. These formations negatively affect the surface quality. In order to improve the surface quality of EDMed surfaces, a secondary finishing process is required. Magnetic abrasive finishing method is a method that can be used for this purpose. In this study, it is aimed to increase the surface quality of Wire-EDMed Ti6Al4V alloy with Ultrasonic assisted MAF method.

**Theory and Methods:** In MAF technique, iron-based powders and abrasives are used together. These abrasives form a flexible magnetic brush assembly with iron powders along the magnetic field lines generated by the magnetic poles. The brush acts as a multi-point cutter. In this study, Wire - EDMed Ti6Al4V plates' surface quality was improved by ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing method. The experiments were carried out under the experimental conditions determined in the accordance of previous studies by CNC milling machine and improvement ratios of surface quality and material removal rates (MRR) were measured.

**Results:** As a result of the experiments, an average improvement of 36 % and 57 % was observed in the Ra for MAF and UDMAF respectively. This improvement was found to be up to 81 % and 90 % in the appropriate experimental conditions. Additionally, MRR ratio was measured as 4.95 mg/min and 5.74 mg/min on average for MAF and UDMAF respectively.

**Conclusion:** As a conclusion, MAF is a suitable method for improvement of surface quality of w-EDMed Ti6Al4V alloy. On the other hand, ultrasonic assist increased the efficiency of the method.



## Ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminde işleme parametrelerinin tel erozyon ile işlenmiş Ti6Al4V alaşımının yüzey kalitesi üzerindeki etkileri

Mahmut Çelik<sup>1\*</sup>, Hakan Gürün<sup>2</sup>, Ulaş Çaydaş<sup>3</sup>, Uğur Köklü<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Firat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

<sup>4</sup>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 70200, Karaman, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- TEİ ile işlenmiş Ti6Al4V alaşımının yüzey kalitesinin iyileştirilmesi
- Düzlemsel yüzeylerin ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemi ile bitirilmesi
- Yüzey pürüzlülük değeri ve talaş kaldırma oranının ölçülmesi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.11.2021

Kabul: 07.09.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1019422

### Anahtar Kelimeler:

Tel erozyonla işleme,  
ultrasonik destekli manyetik  
aşındırıcılarla işleme,  
yüzey kalitesi, Ti6Al4V,  
talaş kaldırma oranı

### ÖZ

Mühendislik uygulamalarında kullanılan bileşenlerin üstün mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra sınırları önceden belirlenmiş geometrik ve boyutsal toleranslar ile yüzey kalitesi kriterlerini de karşılaması gerekmektedir. Bu beklentilerin karşılanması için geleneksel imalat yöntemleri genelde yetersiz kalmaktadır. Özellikle talaş imalatla şekillendirilmesi zor malzemelerin işlenmesinde geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmada özellikle havacılık uzay ve tıbbi gibi yüksek teknolojinin kullandığı alanlarda sıklıkla kullanılan Ti6Al4V alaşımı, elektro erozyonla işleme (EEİ) yöntemi aracılığıyla işlenmiş ve işlenen yüzeylerin yüzey kaliteleri manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) yöntemiyle iyileştirilmiştir. Çalışmada, ultrasonik destek, işleme süresi, SiC aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı (YPIO) ve talaş kaldırma oranı (TKO) üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar varyans analizi yöntemi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda yüzey kalitelerinin MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde ortalama olarak sırasıyla %36 ve %57 oranlarında iyileştirildiği ve bu oranların uygun deney koşullarında sırasıyla %81 ve %90 değerlerine kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Öte yandan TKO değerleri MAİ ve UDMAİ yöntemleri için ortalama olarak sırasıyla 4,95 mg/min ve 5,74 mg/min olarak ölçülmüştür. MAİ ve UDMAİ yöntemleri karşılaştırıldığında ise ultrasonik desteğinin YPIO değerleri açısından ortalama %58, TKO açısından ortalama %15 oranında olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir.

## Effect of machining parameters on surface quality of w-edmed Ti6Al4V alloy in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing technique

### H I G H L I G H T S

- Improvement of surface quality of W-EDMed Ti6Al4V
- Finishing of planar surfaces by ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process
- Measurement of material removal rate and surface roughness

### Article Info

Research Article

Received: 30.11.2021

Accepted: 07.09.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1019422

### Keywords:

Wire-EDM,  
ultrasonic assisted magnetic  
abrasive finishing,  
surface quality, Ti6Al4V,  
material removal rate

### ABSTRACT

Components used in engineering applications are expected to have superior mechanical properties, as well as geometric properties such as tolerance, accuracy and surface quality. Traditional manufacturing methods are insufficient to meet these expectations. It has become mandatory to use nontraditional manufacturing methods especially in the difficult to cut materials. In this study, Ti6Al4V alloy, which is frequently used in areas where high technology is used such as aviation, space and medical, was machined by electrical discharge machining (EDM) method and the surface qualities of the machined surfaces were improved by magnetic abrasive finishing (MAF) method. In the study, the effects of ultrasonic support, machining time, SiC abrasive size, spindle speed and magnetic field amount parameters on surface roughness improvement rate (SRIR) and material removal rate (MRR) were investigated experimentally. The experimental results obtained were evaluated statistically by variance analysis method. As a result of the study, it was determined that in MAI and UDMAI methods, the surface qualities were improved by 36% and 57%, respectively and these rates increased up to 81% and 90%, respectively, under appropriate test conditions. On the other hand, MRR values were measured as 4.95 mg/min and 5.74 mg/min, respectively, for the MAI and UDMAI methods. When MAI and UDMAI methods were compared, it was determined that ultrasonic assist had a positive effect of 58% on average in terms of SRIR values and 15% on average in terms of MRR.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*mahmutcelik@erciyes.edu.tr, hgurun@gazi.edu.tr, ucaydas@firat.edu.tr, ugurkoklu@kmu.edu.tr / Tel: +90 352 207 6666 / 41110

## 1. Giriş (Introduction)

Mühendislik uygulamalarında kullanılan bir ürüne, ham maddeden nihai ürün oluşumuna kadar geçen süreçte genellikle, döküm, plastik şekil verme, talaşlı imalat ve gerekli olması halinde ısıl işlem basamakları uygulanmaktadır. Bu süreçler sonrasında oluşan ürünlerin yüzeylerinde farklı seviyelerde yüzey pürüzlülüğü, çizikler ve kılcal çatlaklar; yüzey altında ise ısınan etkilenen bölgeler gibi istenmeyen kusurlar meydana gelmektedir. Bu oluşumlar ürünleri sadece kullanılabilirliğini değil aynı zamanda aşınma dayanımı, yorulma mukavemeti ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerini de etkilemektedir.

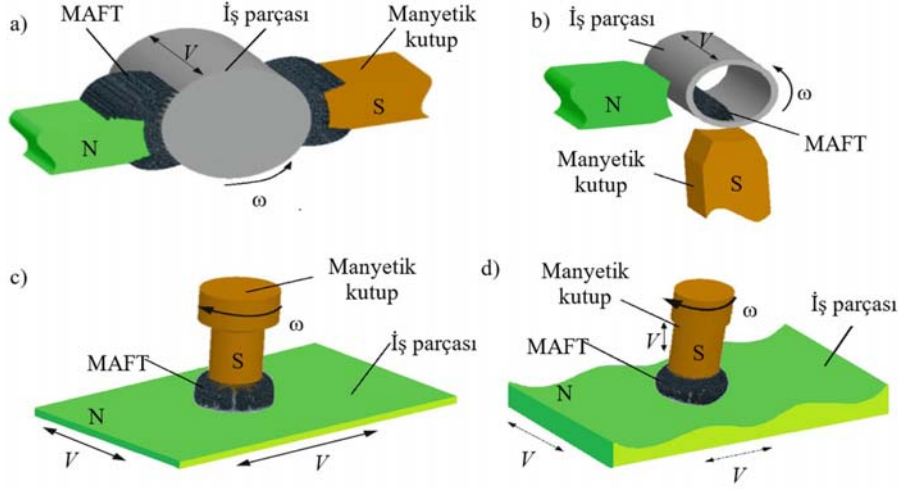
Bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte, mühendislik malzemelerinden beklenen performans ve kalite gibi özelliklere yönelik talepler artmaktadır. İmalat teknolojilerindeki yaşanan gelişmeler neticesinde, yüzey kalitesinin yanı sıra mekanik özellikler de mühendislik parçalarının ayırt edici özellikleri arasında yerini almıştır. Özellikle havacılık-uzay, biyomedikal ve otomotiv sektöründe yüksek dayanımlı ve düşük ağırlıklı malzemelere olan talep giderek artmaktadır [1]. Titanyum ve alaşımları sahip oldukları yüksek dayanım, ısı ve korozyon direnci; düşük yoğunluk gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı bu beklentilerin büyük bir kısmını karşılamaktadır [1, 2]. Titanyum alaşımları sahip olduğu bu üstün özellikler sayesinde; vücut içi implant, protez ve ameliyat ekipmanları imalatı; uçak motorlarının giriş kanatçıkları ve düşük ve yüksek basınç kompresör kanatçıklarının imalatı gibi yüksek teknolojinin kullanıldığı birçok alanda kullanılmaktadır [3-6]. Mekanik olarak beklentileri karşılayan titanyum ve alaşımlarının çalışma koşulları da dikkate alındığında, ürünlerin yüzey kalitesinin oldukça yüksek olması gerekmektedir. Özellikle medikal endüstrisinde kullanılan titanyum alaşımından imal edilen implantların yüzey kalitesinin artırılması, gerek biyo-uyumluluk açısından gerekse korozyon direnci açısından önem arz etmektedir [7]. Ayrıca havacılık alanında gaz türbinli motorların kompresör kanatçıklarında kullanılan titanyum alaşımının yüzey kalitesi, aerodinamik açıdan sistemin verimini önemli ölçüde etkilemektedir [8]. Ancak titanyum ve alaşımlarının işlenmesi sırasında birtakım sorunlarla karşılaşmaktadır [9]. Geleneksel talaşlı imalat sırasında, malzemenin sahip olduğu düşük termal iletkenlik ve yüksek mukavemet sebebiyle kesici takım ile iş parçası arasında yüksek sıcaklıklar meydana gelmekte ve talaş oluşumunu sağlayan plastik deformasyonun gerçekleşmesi zorlaşmaktadır. Öte yandan artan sıcaklıkla birlikte iş parçası ile kesici takım arasında kimyasal tepkimeler gerçekleşmekte ve sonuç olarak iş parçası kesici takımın yüzeyine yapışmakta ve hızla aşınarak işlenen yüzeyin kalitesini düşürmektedir [10]. Bu sebeple, titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde genellikle geleneksel olmayan imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Bu kapsamda kullanılan geleneksel olmayan yöntemlerden bir tanesi de elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemidir.

EEİ, dielektrik sıvısı içerisine daldırılmış olan elektriksel iletkenliğe sahip bir iş parçasına yüksek frekanslı elektrik boşalmalarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece malzeme yüzeyinin yerel olarak eriterek / buharlaştırarak talaş kaldırma esasına göre çalışan bir ileri imalat yöntemidir. Kaldırılan talaşlar ara bölgeden dielektrik sıvı basıncı yardımıyla uzaklaştırılmaktadır. Yöntemde, vurum ve vurum ara süresince, yüzey ani ısınma ve soğumaya maruz kalmakta ve elektriksel işleme parametrelerinin seviyelerine de bağlı olarak yüzey ve yüzey altında mikroyapısal değişimler meydana gelmektedir. Dolayısıyla EEİ ile işlenen yüzeylerde sert ve kırılğan bir artık tabaka oluşmakta ve bu tabakada bulunan kılcal çatlaklar, artık gerilmeler ve yeniden katılaşmış eriyikler malzemenin başta yorulma dayanımı olmak üzere çalışma ömrünü ve diğer mekanik

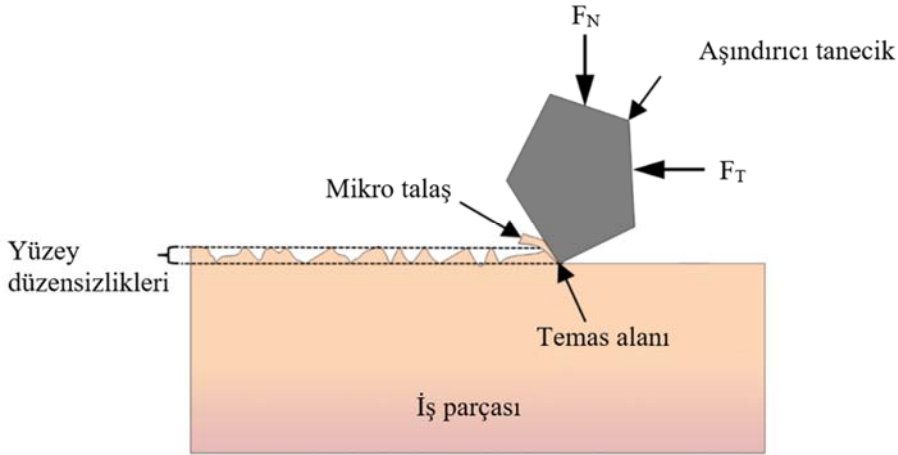
özelliklerini doğrudan etkilemektedir [11]. Bu oluşumların ortadan tamamen kaldırılabilmesi için malzeme yüzeyinin ayrıca bir bitirme işlemine tabi tutulması gerekmektedir [12]. Manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) yöntemi de kolay uygulanabilirliği, esnek yapısı, mikro talaş kaldırma ve daha düşük kesme kuvvetleri gereksinimi gibi özelliklerinden dolayı, EEİ sonrasında oluşan artık tabakanın kaldırılarak yüzey kalitesinin artırılması için tercih edilebilir bir yöntem olarak bu yöntemlerin arasına girmiştir.

MAİ yöntemi, işleme kuvvetlerinin bir manyetik alan tarafından kontrol edildiği geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Yöntemde iş parçası, bir manyetik alan kaynağının kuzey ve güney kutupları arasına yerleştirilmektedir. İş parçası ile kutuplar arasında bulunan boşluğa ise manyetik olarak demir esaslı parçacıklar; aşındırıcı olarak  $Al_2O_3$ , SiC, B4C, elmas vb. parçacıklardan oluşan bir karışım [manyetik aşındırıcı fırça takımı (MAFT)] yerleştirilmektedir. İş parçası ve/veya MAFT'in izafi hareketi neticesinde, manyetik alan etkisinde bulunan MAFT çok noktadan kesme yaparak, içerisinde bulunan aşındırıcı taneciklerin boyutlarına bağlı olarak mikro düzeyde talaş kaldırır. Bunun sonucunda iş parçası yüzeyinde; yüzey pürüzlülüğünde azalma, çapakların yok olması gibi geometrik özelliklerde; yüzey altında; gerilim katmanlarının yok olması gibi mekanik ve fiziksel özelliklerde değişiklik meydana gelerek yüzey kalitesi artmakta, yüzey tamlığı sağlanmakta, ürünün hizmet kalitesi ve süresi gelişmektedir. Yöntemde kullanılan takım esnek olduğu için, silindirik yüzeyler, düzlemsel yüzeyler, formlu yüzeyler ve karmaşık şekilli yüzeyler kolaylıkla işlenebilmektedir. Yöntemin farklı yüzeyler için çalışma prensibi şematik olarak Şekil 1'de gösterilmektedir.

Manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminde manyetik alan etkisi altında bulunan manyetik aşındırıcı tanecikler iş parçası yüzeyine basınç uygulamakta ve iş parçası ve/veya MAFT'in bağlı hareketi neticesinde yüzeyden talaş kaldırılmaktadır. Yöntemde iki tür kuvvetten söz etmek mümkün olup bunlar; manyetik aşındırıcı tanecikleri bir arada tutan ve taneciklerin iş parçası yüzeyine basınç uygulamasını sağlayan normal kuvvet ve MAFT'in hareketi neticesinde iş parçasından mikro talaş kaldırma teğetsel kuvvettir (Şekil 2) [14]. MAİ yöntemi ilk olarak 1929 yılında kullanılmış olmasına rağmen yöntemin pratik hale gelmesi 1980'li yıllara tekabül etmiştir. O zamandan günümüze kadar olan süreçte ise konuyla ilgili çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapıldığı görülmektedir. MAİ yönteminin hafif alaşımlardan [15-20] paslanmaz çeliklere [21-24], süper alaşımlardan [25, 26] seramik malzemelere [27] kadar geniş bir alanda kullanıldığı tespit edilmiştir. Öte yandan yöntem medikal alanda kullanılan otopsi iğnelerinin iç / dış yüzeylerinin işlenmesinde [24] tabanca namlularının iç yüzeylerinin işlenmesinde [28] ve süt dağıtım hattında kalıntıların giderilmesi amacıyla da kullanılmıştır [29]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde Ti6Al4V alaşımının EEİ işlemi ile işlenmesi neticesinde yüzey kalitesinin artırılmasına yönelik olarak manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminin kullanıldığı sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Li ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada Ti6Al4V alaşımının yüzey kalitesi EEİ işlemi sırasında dielektrik sıvı içerisine ilave edilen SiC tanecikler ile artırılmaya çalışılmıştır [30]. Çalışma amaç olarak bu çalışmayla benzer olsa da kullanılan yöntemler birbirinden farklıdır. Çalışmada aşındırıcı tanecikler doğrudan dielektrik sıvı içerisine eklenmek suretiyle yüzey kalitesi artırılmaktadır. Mevcut çalışmada ise EEİ işlemi bittikten sonra aşındırıcı tanecikler manyetik tanecikler ile karıştırılıp bir fırça haline getirilmekte ve yüzeyden talaş kaldırılmaktadır. Yapılan diğer bir çalışmada ise Ti6Al4V alaşımının EEİ işlemi neticesinde yüzey üzerinde bulunan beyaz tabaka MAİ yöntemiyle kaldırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada beyaz tabaka kalınlığı ile yüzey pürüzlülük değeri arasındaki ilişki grafiksel olarak aktarılmış ancak işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü



**Şekil 1.** MAİ yönteminin farklı yüzeylerde uygulanışı: a: silindirik dış yüzeyler, b: silindirik iç yüzeyler, c: düzlemsel yüzeyler, d: serbest formlu yüzeyler [13].  
(Application of MAf method on different surfaces: a: cylindrical outer surfaces, b: cylindrical inner surfaces, c: planar surfaces, d: free-form surfaces)



**Şekil 2.** MAİ yönteminde talaş kaldırma sırasında aşındırıcı taneciklere etki eden kuvvetler [13].  
(Forces acting on abrasive particles during machining in MAF method)

üzerindeki etkilerine değinilmemiştir [31]. Bu çalışmayla birlikte literatürdeki işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri hakkındaki bu açığın kapatılarak gelecek çalışmalara bir yol gösterici olunması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada tel erozyon ile işleme yöntemiyle işlenmiş Ti6Al4V alaşımından imal edilmiş olan numunelerin yüzey kalitelerinin MAİ yöntemiyle iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda MAİ yönteminde, aşındırıcı boyutu, devir sayısı, manyetik alan miktarı ve işleme süresi parametreleri farklı seviyelerde değiştirilerek işlem üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca sisteme ultrasonik titreşimler vermek suretiyle işlem performansı artırılmıştır. MAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranları (YPIÖ) ve talaş kaldırma oranları (TKO) belirlenmiştir. Deneysel ölçümler sonucu ulaşılan verilerin doğruluğunun ve hata oranlarının belirlenebilmesi için istatistiksel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bunun sonucunda işleme parametrelerinin işlem performansı üzerindeki bireysel ve birlikte izafi etkileri deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir.

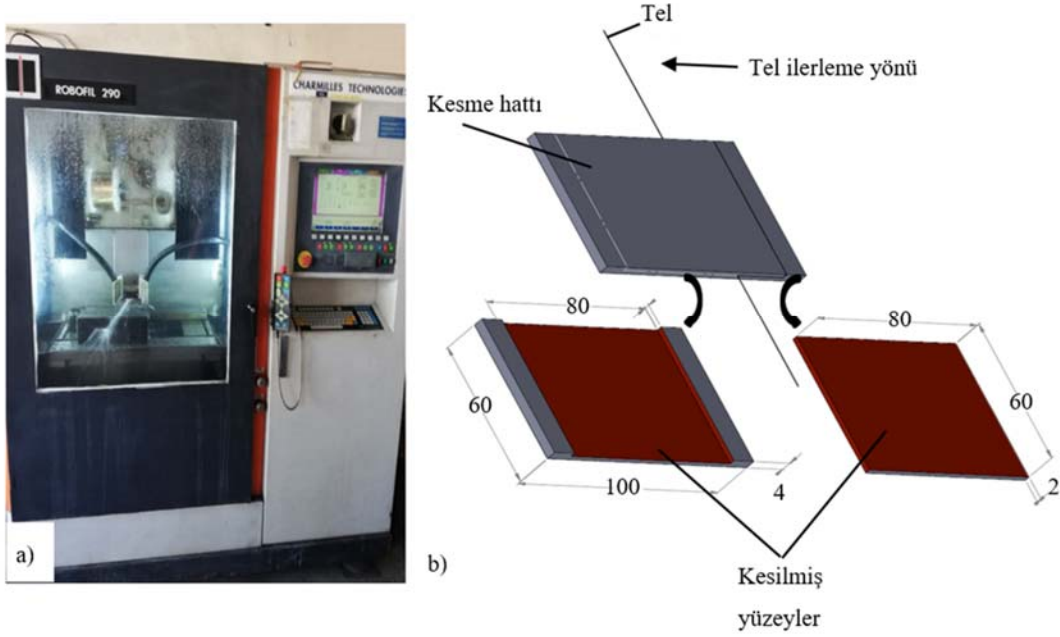
## 2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

### 2.1. Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Specimens)

Ticari olarak temin edilmiş olan  $4 \times 60 \times 100$  mm<sup>3</sup> boyutlarındaki Ti6Al4V alaşımından imal edilmiş numuneler Şekil 3a'da fotoğrafı görülen Charmilles Technologies marka Robofil 290 model tel erozyon tezgahı ile her bir numuneden 2 işlenmiş numune elde etmek amacıyla Şekil 3 (b)'de gösterilen boyutlarda kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında kullanılan parametreler Tablo 1'de görülmektedir. Ti6Al4V alaşımın mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

### 2.2. Deneysel Parametrelerinin Belirlenmesi (Determination of Experimental Parameters)

MAİ yönteminde işlem verimini etkileyen çok sayıda faktör olmasına rağmen bu faktörler arasında işleme performansını en fazla etkileyen parametreler deneysel tasarım içerisinde yer almıştır. Daha önce



Şekil 3. a) Tel erozyon tezgahı, b) numunelerin şematik gösterimi (a) Wire EDM machine, b) schematic representation of specimens)

yapılan çalışmalar ve yapılan ön deneyler neticesinde, manyetik alan kaynağı, aşındırıcı boyutu, işleme süresi ve devir sayısı parametreleri farklı seviyelerde uygulanacak şekilde deney parametreleri Tablo 4'te belirtildiği gibi planlanmıştır. Deneylere ait işleme şartları ise Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'te verilen koşullar hem MAİ hem de UDMAİ deneylerinde uygulanmak suretiyle toplam 36 deney yapılmıştır. Deneylerde işleme boşluğu 2mm, demir tozu boyutu 200 µm, demir tozu miktarı 3 g, SiC aşındırıcı miktarı 1 g, ve yağlayıcı olarak ise 0,2 g SAE 30 yağlayıcı sabit olarak tutulmuştur.

Tablo 1. TEİ işleme parametreleri (Wire EDM machining parameters)

Kesme Parametresi	
Tel çapı (mm)	0,25
Vurum süresi (ns)	500
Gerilim (V)	100
Tel ilerleme hızı (m/min)	5
Dielektrik basıncı (kg/cm <sup>2</sup> )	5,5

Tablo 2. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri [32]  
(Mechanical properties of Ti6Al4V alloy)

Özellik	
Sertlik (HRC)	36
Erim noktası (°C)	1878-1933
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	862-1200
Akma dayanımı (MPa)	848-1080
Yoğunluğu (Mg/m <sup>3</sup> )	4,42-4,51
Elastikiyet modülü (GPa)	110-119

### 2.3. Deney Düzenekinin Tasarımı (Design of Experimental Setup)

Deney sırasında iş parçasına yatay yönde ultrasonik titreşimler uygulanacağı için, iş parçasının ekstenel olarak hareketine imkân tanıyan yaylı bir iş parçası tutucusu tasarlanmıştır ve alüminyum alaşımı malzemeden imal edilmiştir. İş parçası tutucusu bağlı bulunduğu lineer rulmanlı kızak vasıtasıyla ekstenel hareket yapmakta ve ayrıca iş parçasının hemen altına yerleştirilecek ve manyetik kutuplardan çıkan manyetik alan çizgilerinin iş parçası üzerinden kendisine aktarılmasını sağlayacak bir mıknatıs yuvasını

da bünyesinde barındırmaktadır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4'te görülmektedir. Deneylerde kullanılacak üzere 3 farklı manyetik kutup sistemi hazırlanmıştır. Manyetik kutup sistemleri, Ø10 × 10 mm, Ø10 × 15 mm ve Ø10 × 20 mm ölçülerine sahip Nd-Fe-B mıknatıslar kullanılarak, her bir kutup sisteminde 4'er adet mıknatıs olacak şekilde, mıknatısların özel olarak tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcı vasıtasıyla imal edilmiş olan tutuculara yerleştirildikten sonra bir kalıba konularak polyeester reçine aracılığıyla Ø30 × 50 mm boyutlarında imalatı gerçekleştirilmiştir. Mıknatısların yerleşimi ise EMWorks 2020 paket programı aracılığıyla yapılan sonlu elemanlar analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 5a'da NSNS-S yerleşimine sahip manyetik kutup sisteminin manyetik alan çizgilerinin dağılımı 2 boyutlu olarak görülmektedir. Şekil incelendiğinde manyetik alan çizgilerinin Şekil 5b'de görülen NNNN-S yerleşimine kıyasla daha düzensiz dağıldığı görülmektedir.

Şekil 6a'da ise NSNS-S yerleşimine sahip manyetik kutup sisteminde iş parçası üzerine etki eden manyetik alan yoğunluğu dağılımı gösterilmektedir. Her ne kadar NSNS-S yerleşimi NNNN-S yerleşimine sahip manyetik kutup sistemine kıyasla daha yüksek manyetik alan yoğunluğuna sahip olsa da, NNNN-S yerleşimine sahip manyetik kutup sisteminde yoğunluk daha homojen olarak dağılmıştır (Şekil 6b). Bu sebeple deneylerde kullanılacak olan manyetik kutup sistemlerinde NNNN-S yerleşimi tercih edilmiştir.

### 2.4. Ultrasonik sistem entegrasyonu (Ultrasonic system integration)

MAİ yönteminde işleme performansının artırılması amacıyla iş parçasına yüksek frekansta titreşim uygulamak amacıyla, ticari olarak temin edilen bir adet Skymen 2000 W ultrasonik jeneratör ve ultrasonik titreşim grubu kullanılmıştır. Ultrasonik titreşim grubu, jeneratör tarafından üretilen elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektromekanik sensör gruplarını içerisinde barındıran ultrasonik kristaller; ultrasonik kristaller tarafından oluşturulan titreşimin genliğini artırmaya yarayan yükselteç ve yükselteçten elden edilen titreşimleri iş parçasına uygulayacak olan iş parçası geometrisine özel olarak imal edilmiş bir ultrasonik horn sisteminden oluşmaktadır. Ultrasonik sisteme ait özellikler Tablo 6'da görülmektedir. Ultrasonik titreşim jeneratörü 20150 Hz frekansta

**Tablo 3.** Ti6Al4V alaşımın kimyasal bileşimi [32] (Chemical composition of Ti6Al4V alloy)

Element	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
%	89,464	6,08	4,02	0,22	0,18	0,02	0,01	0,0053

**Tablo 4.** MAİ Deneysel parametreleri (Experimental parameters of MAF)

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme süresi (sec)	60	120	180	240	300	360
Aşındırıcı boyutu (µm)	75	105	150	-	-	-
Devir sayısı (dev/min)	400	600	800	-	-	-
Manyetik alan (mT)	130	145	170	-	-	-

titreşim üretmekte olup üretilen bu titreşim neticesinde iş parçası yatay ekseninde 5 µm genlik değeriyle hareket etmektedir. İş parçası genliği iş parçası tutucusu ucuna yerleştirilen 1 µm hassasiyetli bir komperatör saati aracılığıyla ölçülmüştür.

**Tablo 5.** MAİ deneysel koşulları (Experimental conditions of MAF)

Deneysel No	İşleme Süresi (sec)	Aşındırıcı Boyutu (µm)	Devir sayısı (dev/min)	Manyetik Alan (mT)
1	60	75	400	130
2	60	106	600	145
3	60	150	800	170
4	120	75	400	145
5	120	106	600	170
6	120	150	800	130
7	180	75	600	130
8	180	106	800	145
9	180	150	400	170
10	240	75	800	170
11	240	106	400	130
12	240	150	600	145
13	300	75	600	170
14	300	106	800	130
15	300	150	400	145
16	360	75	800	145
17	360	106	400	170
18	360	150	600	130

### 2.5. Deneysel Yapılması (Experimentation)

Manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) ve ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme (UDMAİ) deneyleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Johnford marka WMC 550 model CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır (Şekil 7).

Her bir deneysel numunesi, deneyler öncesinde ve sonrası üzerinde bulunan yabancı maddelerden arındırılmak amacıyla Struers marka Metason 120 T ultrasonik temizleyici aracılığıyla %80 oranındaki aseton (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) çözeltisi içerisinde temizlenmiş ve 0,0001 gr

hassasiyete sahip Precisa marka XB 220A model terazi ile tartılarak ağırlıkları ölçülmüştür. Yabancı maddelerden arındırılan ve ağırlığı ölçülen deneysel numunesi iş parçası tutucu üzerine yerleştirildikten sonra hazırlanan manyetik aşındırıcı karışımı numune üzerine dökülmüştür. Numune altında bulunan mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alanı sebebiyle numune üzerine dökülen karışım manyetik alan çizgileri boyunca dizilmek suretiyle iş parçası üzerinde bir fırça halini almıştır. Sonrasında fener mili üzerinde bağlı olan manyetik kutup CNC kontrolü ile işleme bölgesine işleme boşluğu 2 mm olacak şekilde yaklaştırılmış ve aşındırıcı karışımı üstte bulunan mıknatıslardan çıkıp altta bulunan mıknatısa yönelen manyetik alan çizgileri boyunca konumlanarak deneyler için hazır hale gelmiştir. Belirlenen parametrelere göre deneyler başarıyla gerçekleştirilmiştir.

### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

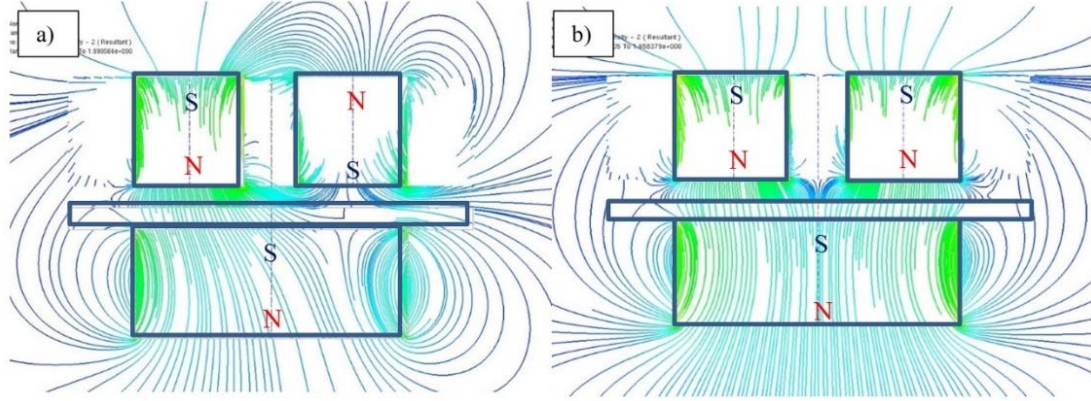
#### 3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları (Surface Roughness Measurement Results)

Numunelerin TEİ ile kesim işlemi sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve MAİ/UDMAİ işlemi sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerleri zygoZeGage marka 3 boyutlu yüzey profilometresi aracılığıyla ölçülmüştür. Ölçümler numune üzerindeki 3 farklı noktadan alınarak ortalamaları numunenin ortalama yüzey pürüzlülük değeri olarak kabul edilmiştir.

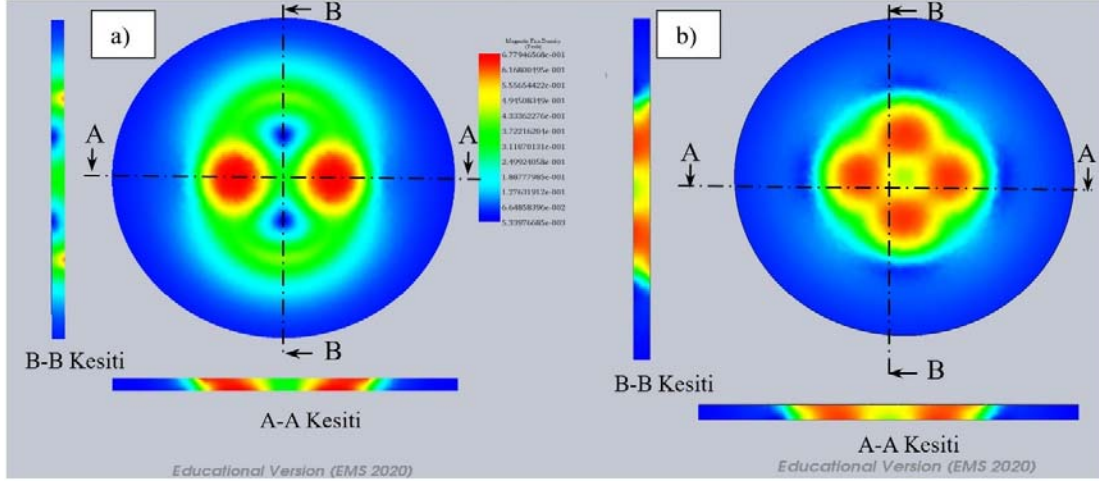
Her ne kadar TEİ ile kesim sırasında her numune aynı şartlar altında kesilmiş olsa da numunelerin yüzey pürüzlülükleri farklı olmaktadır. Dolayısıyla MAİ/UDMAİ işleminin yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek için numunelerin yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları (YPIÖ) her bir numune için Eş. 1 yardımıyla hesaplanmıştır. Burada; R<sub>ai</sub>: MAİ/UDMAİ işlemi öncesi yüzey pürüzlülük değerini, R<sub>as</sub>: MAİ/UDMAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerini ifade etmektedir.

$$\frac{R_{ai}-R_{as}}{R_{ai}} \times 100 = \%iyileşme \quad (1)$$

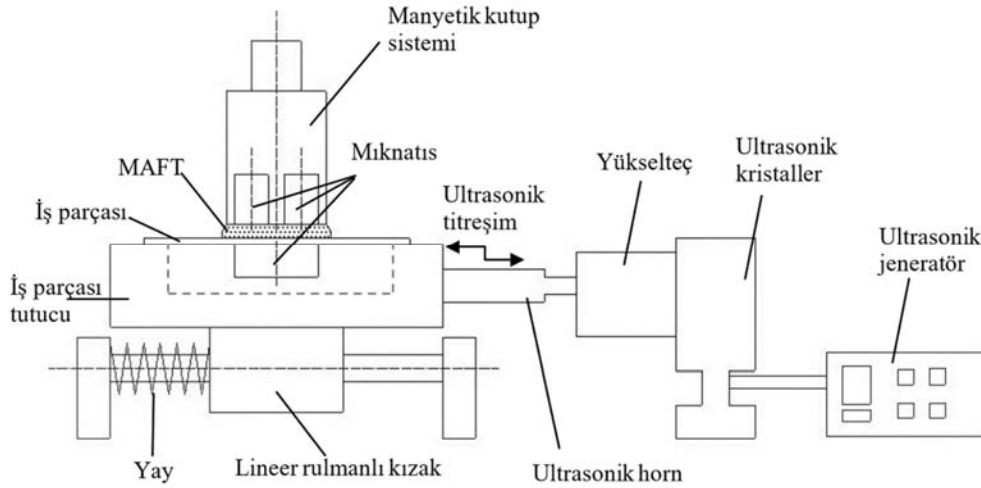
Yapılan deneyler sonucunda MAİ ve UDMAİ işlemine tabi tutulan numunelerin YPIÖ değerleri ortalama olarak sırasıyla %36,12 ve %57,26 olarak tespit edilmiştir. Deneysel parametrelerinin farklı seviyelerinde bu değer MAİ ve UDMAİ deneyler için sırasıyla %81,22 ve %90,55 değerlerine kadar yükselmektedir. Tablo 7’de MAİ ve UDMAİ deneylerine ait ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve YPIÖ değerleri görülmektedir. Şekil 8’de ise MAİ ve UDMAİ deneylerinde elde edilen YPIÖ değerleri standart hata çubuklarıyla birlikte grafiksel olarak görülmektedir. Şekil 9a, TEİ işlemi sonrası elde edilen numunelere ait yüzey topografyasını göstermektedir. Numunelerin MAİ ve UDMAİ işlemlerine tabi tutulmadan önceki



Şekil 5. a: NSNS-S manyetik kutup sistemine ait manyetik alan çizgileri, b: NNNN-S manyetik kutup sistemine ait manyetik alan çizgileri (a) Magnetic field lines of the NSNS-S magnetic pole system, (b) magnetic field lines of the NNNN-S magnetic pole system)



Şekil 6. a: NSNS-S kutup sisteminde iş parçasına etkiyen manyetik alan b: NNNN-S kutup sisteminde iş parçasına etkiyen manyetik alan (a)Magnetic field acting on the workpiece in the NSNS-S pole system, (b) Magnetic field acting on the workpiece in the NNNN-S pole system)



Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Schematic representation of experimental setup)

ortalama yüzey pürüzlülük değeri ortalama olarak 1,619  $\mu\text{m}$  olarak alınmıştır. Şekil 9b, Şekil 9c ve Şekil 9d, Şekil 9e ise sırasıyla en düşük ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranlarına sahip numunelere ait yüzey topografyasını göstermektedir. Şekiller incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına sahip

numunelerin MAİ ve UDMAİ işlemi için sırasıyla 1,591  $\mu\text{m}$  ve 1,378  $\mu\text{m}$  Ra değerlerine sahip olduğu görülmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına sahip numunelerin MAİ ve UDMAİ işlemi için sırasıyla 0,304  $\mu\text{m}$  ve 0,153  $\mu\text{m}$  Ra değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.** Ultrasonik sistem özellikleri (Properties of ultrasonic system)

Özellik	Değer
Güç (W)	2000
Frekans (Hz)	20150
Vurum süresi (min)	4
Vurum ara süresi (min)	4
İş parçası genliği (µm)	5
Horn malzemesi	Alüminyum

### 3.1.1. İşleme süresinin YPIÖ üzerindeki etkisi (Effect of machining time on SRIR)

Şekil 10a'da MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde işleme süresinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama YPIÖ değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük YPIÖ değerlerini göstermektedir. İşleme süresinin artmasıyla talaş kaldırma işlemi sırasında meydana gelen tepe ve vadi gibi yüzey oluşumları azalmakta ve yüzey pürüzlülük değeri azalmaktadır [33]. Şekil incelendiğinde işleme süresinin artması ile yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranındaki değişim MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilimleri göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde işleme süresinin 60 sec, 120 sec, 180 sec, 240 sec, 300 sec ve 360 sec değerleri için ortalama YPIÖ değerleri sırasıyla; %17,99, %25,50, %38,78, %38,74, %42,55 ve %53,13 olmaktadır. UDMAİ

yöntemiyle yapılan deneylerde aynı işleme süresi parametreleri için elde edilen ortalama YPIÖ değerleri ise sırasıyla; %36,00, %48,28, %53,24, %65,04, %67,59 ve %73,39 olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin YPIÖ üzerinde işleme süresi açısından ortalama %58,52'lik bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

### 3.1.2. Aşındırıcı boyutunun YPIÖ üzerindeki etkisi (Effect of abrasive size on SRIR)

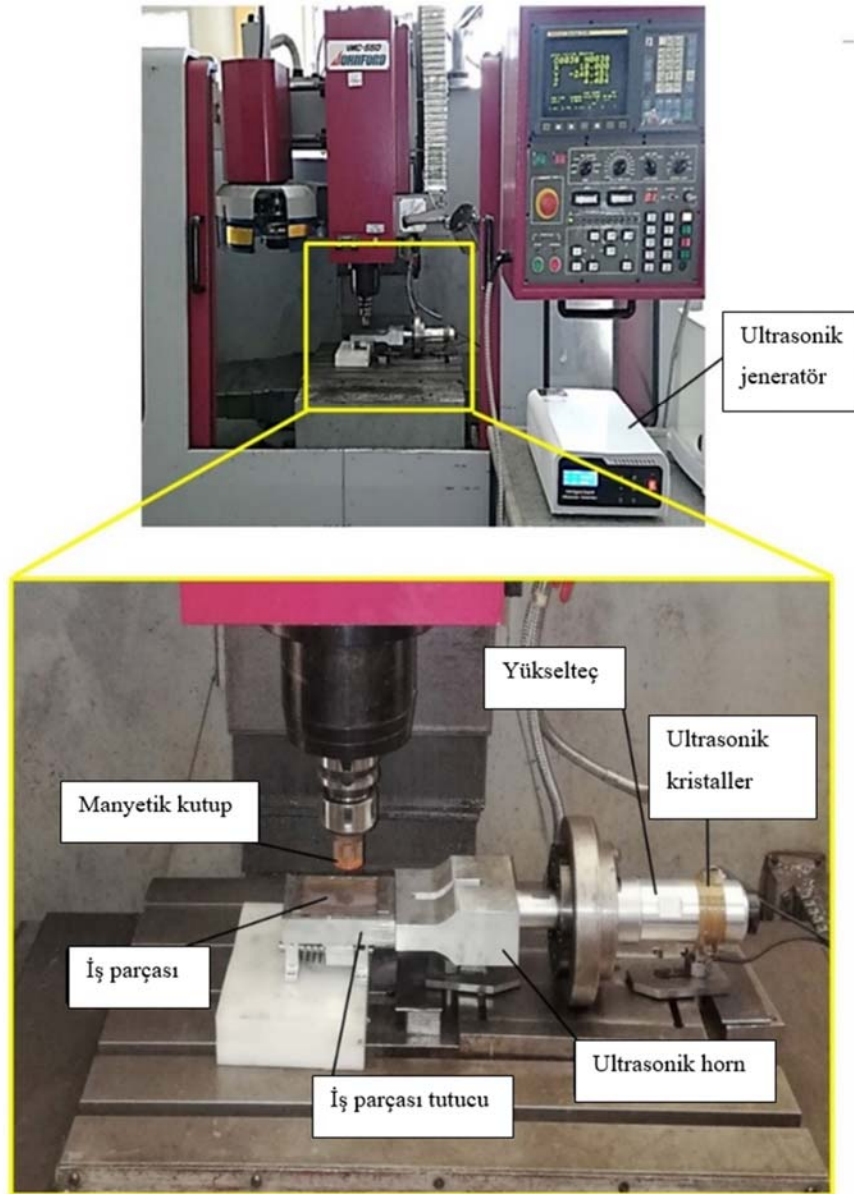
Şekil 10b'de MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde aşındırıcı boyutunun yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Aşındırıcı boyutunun artması sonucunda iş parçası ile aşındırıcı tanecikler arasındaki temas uzunluğu artmakta ve işleme neticesinde daha derin çiziklerin oluşmasına sebebiyet vermektedir Öte yandan aşındırıcı boyutunun azalmasıyla daha fazla sayıdaki küçük kesici kenar yüzeye temas etmekte ve bunun neticesinde daha kaliteli yüzeyler elde edilmektedir [34]. Dolayısıyla aşındırıcı boyutunun artmasıyla yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranlarında bir azalma meydana gelmektedir. Şekil incelendiğinde aşındırıcı boyutundaki değişim ile yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranındaki değişim MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilimleri göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aşındırıcı boyutunun 75 µm, 106 µm ve 150 µm değerleri için ortalama YPIÖ değerleri sırasıyla; %46,61, %34,60 ve %27,14 olmaktadır. UDMAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aynı aşındırıcı boyutu parametreleri için elde edilen ortalama YPIÖ değerleri ise sırasıyla; %68,61, %57,88 ve %45,28 olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin YPIÖ üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %58,54'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

**Tablo 7.** MAİ ve UDMAİ sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ve YPIÖ değerleri  
(Surface roughness and SRIR values after MAF and UDMAF)

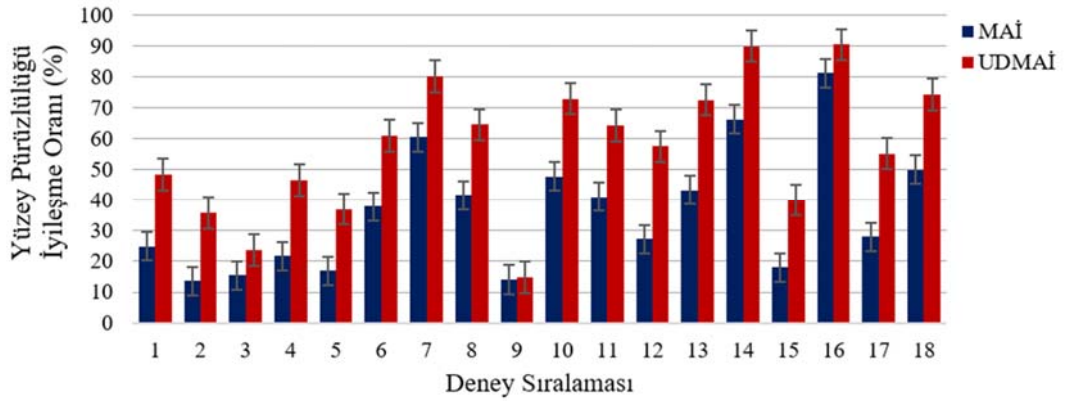
MAİ			UDMAİ		
Deney No	İşleme sonrası Ra değeri (µm)	Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı (%)	Deney No	İşleme sonrası Ra değeri (µm)	Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı (%)
1	1,215	24,95	1	0,834	48,48
2	1,400	13,52	2	1,039	35,82
3	1,368	15,50	3	1,235	23,71
4	1,268	21,68	4	0,864	46,63
5	1,346	16,86	5	1,017	37,18
6	1,004	37,98	6	0,631	61,02
7	0,638	60,59	7	0,320	80,23
8	0,944	41,69	8	0,573	64,60
9	1,391	14,08	9	1,378	14,88
10	0,845	47,80	10	0,436	73,06
11	0,952	41,19	11	0,576	64,42
12	1,178	27,23	12	0,686	57,62
13	0,916	43,42	13	0,442	72,69
14	0,546	66,27	14	0,162	89,99
15	1,328	17,97	15	0,970	40,08
16	0,304	81,22	16	0,153	90,54
17	1,164	28,10	17	0,724	55,28
18	0,808	50,09	18	0,415	74,36

\*Numunelerin MAİ/UDMAİ işlemi öncesi ortalama yüzey pürüzlülük değerleri: 1,619 µm

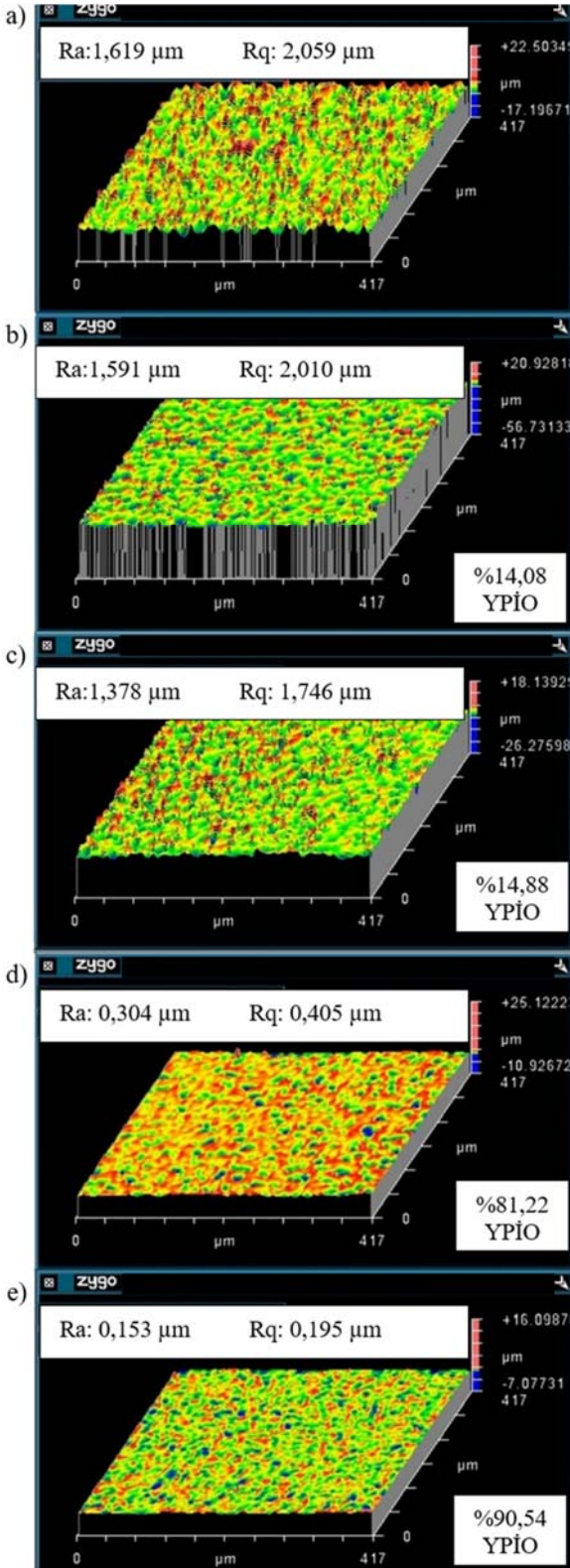




Şekil 7. Deneş düzeneği (Experimental setup)



Şekil 8. MAI/UDMAI deneşlerine ait YPIÖ grafiği (SRIR graph of MAF/UDMAF experiments)



**Şekil 9.** Yüzey profilleri a: TEİ sonrası, b: MAİ sonrası en düşük YPİO değeri, c) UDMAİ sonrası en düşük YPİO değeri, d: MAİ sonrası en yüksek YPİO değeri, e: UDMAİ sonrası en yüksek YPİO değeri

(Surface profiles a: after W-EDM, b: lowest value of SRIR after MAF, c: lowest value of SRIR after UDMAF, d: highest value of SRIR after MAF, e: highest value of SRIR after UDMAF)

### 3.1.3. Devir sayısının YPİO üzerindeki etkisi (Effect of number of revolutions on SRIR)

Şekil 11a'da MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde devir sayısının yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil incelendiğinde devir sayısının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı değerinin arttığı görülmektedir. Devir sayısının artmasıyla birlikte aşındırıcı taneciklerin birim zamanda aldıkları yol artmaktadır. Bu nedenle daha kısa sürede daha fazla talaş kaldırılmakta ve yüzey üzerindeki pürüz tepeleri aşındırılarak yüzey pürüzlülük değeri azalmaktadır [33]. Bu durum YPİO oranında bir artışa sebebiyet vermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde devir sayısının 400 dev/min, 600 dev/min ve 800 dev/min değerleri için ortalama YPİO değerleri sırasıyla; %24,66, %35,28 ve %48,41 olmaktadır. UDMAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aynı devir sayısı parametreleri için elde edilen ortalama YPİO değerleri ise sırasıyla; %44,96, %59,65 ve %67,16 olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %58,54'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

### 3.1.4. Manyetik alan miktarının YPİO üzerindeki etkisi (Effect of amount of magnetic field on SRIR)

Şekil 11b'de MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde manyetik alan miktarının yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil incelendiğinde manyetik alan miktarının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı değerinin azaldığı görülmektedir. Manyetik alan miktarının artmasıyla birlikte aşındırıcı taneciklerin üzerine etkileyen manyetik kuvvet artmakta ve aşındırıcı tanecikler iş parçası yüzeyinde daha derine batarak talaş kaldırmaktadır. Bu durum da iş parçası yüzeyinde daha derin vadilerin oluşmasına ve yüzey pürüzlülük değerinin artmasına sebebiyet vermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde manyetik alan miktarının 130 mT, 145 mT ve 170 mT değerleri için ortalama YPİO değerleri sırasıyla; %46,84, %33,88 ve %27,63 olmaktadır. UDMAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aynı manyetik alan miktarı parametreleri için elde edilen ortalama YPİO değerleri ise sırasıyla; %69,75, %55,88 ve %46,13 olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %58,54'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

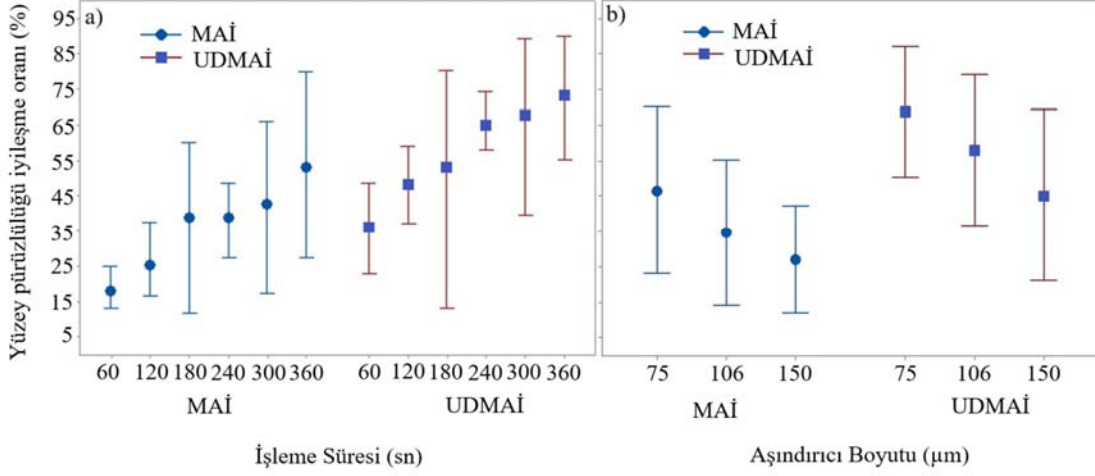
### 3.2. Talaş Kaldırma Oranı Ölçüm Sonuçları (Material Removal Rate Measurement Results)

Talaş kaldırma oranları (TKO) numunelerin MAİ/UDMAİ işlemi öncesi ve MAİ/UDMAİ işlemi sonrası ağırlık farklarının işleme süresine bölünmeleri ile Eş. 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

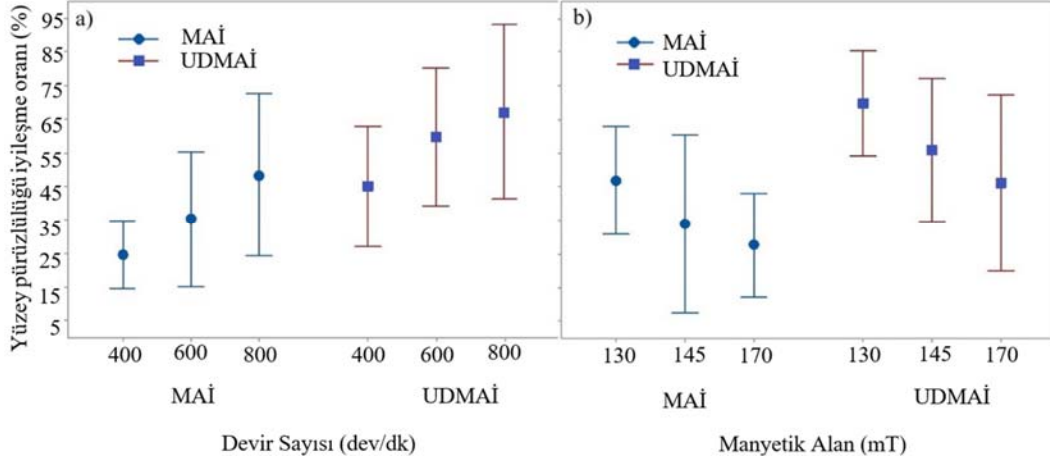
$$TKO = \frac{\Delta W}{t} \quad (2)$$

Burada;  $t$  MAİ/UDMAİ işlem süresini;  $W$  numunelerin ağırlıklarını ifade etmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda MAİ ve UDMAİ işlemine tabi tutulan numunelerde ortalama olarak sırasıyla 4,95 mg/min ve 5,74mg/min'lık talaş kaldırma oranlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Deneysel parametrelerinin farklı seviyelerinde bu değer MAİ ve UDMAİ deneyleri için sırasıyla 6,80 mg/min ve 7,20 mg/min değerlerine kadar yükselmektedir. Tablo 8'de MAİ ve UDMAİ deneylerine ait kaldırılan talaş miktarları ve TKO değerleri görülmektedir. Şekil 12'de ise MAİ ve UDMAİ deneylerinde elde edilen TKO değerleri grafiksel olarak görülmektedir.



Şekil 10. MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde parametrelerin YPİO üzerindeki etkisi a: işleme süresi, b: aşındırıcı boyutu (Effect of the parameters on SRIR in MAI and UDMAI methods a: machining time, b: abrasive size)



Şekil 11. MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde parametrelerin YPİO üzerindeki etkisi a: devir sayısı, b: manyetik alan (Effect of the parameters on SRIR in MAI and UDMAI methods a: number of revolutions, b: amount of magnetic field)

Tablo 8. MAİ ve UDMAİ deneylerine ait talaş kaldırma oranları (Material removal rates of MAI and UDMAI experiments)

MAİ				UDMAİ			
Deney No	İşleme Süresi (min)	Kaldırılan talaş miktarı (mg)	TKO (mg/min)	Deney No	İşleme Süresi (min)	Kaldırılan talaş miktarı (mg)	TKO (mg/min)
1	1	3,20	3,20	1	1	4,00	4,00
2	1	4,30	4,30	2	1	4,70	4,70
3	1	6,80	6,80	3	1	7,20	7,20
4	2	8,50	4,25	4	2	11,00	5,50
5	2	12,00	6,00	5	2	13,00	6,50
6	2	10,70	5,35	6	2	12,10	6,05
7	3	13,50	4,50	7	3	15,60	5,20
8	3	16,80	5,60	8	3	19,80	6,60
9	3	15,00	5,00	9	3	18,90	6,30
10	4	21,20	5,30	10	4	26,00	6,50
11	4	14,00	3,50	11	4	19,80	4,95
12	4	24,00	6,00	12	4	27,40	6,85
13	5	26,00	5,20	13	5	28,10	5,62
14	5	24,90	4,98	14	5	27,70	5,54
15	5	24,10	4,82	15	5	27,40	5,48
16	6	30,00	5,00	16	6	33,60	5,60
17	6	28,20	4,70	17	6	33,60	5,60
18	6	28,20	4,70	18	6	31,20	5,20

3.2.1. İşleme süresinin TKO üzerindeki etkisi  
(Effect of machining time on MRR)

Talaş kaldırma oranı Eş. 2 yardımıyla, işleme süresince kaldırılan talaş miktarının işleme süresine bölünmesi neticesinde belirlenmiştir. Dolayısıyla ölçüm sonuçları neticesinde hesaplanan değerler birim zamanda kaldırılan talaş miktarını belirttiği için işleme süresinin TKO üzerinde anlamlı bir etkisini saptanamamıştır.

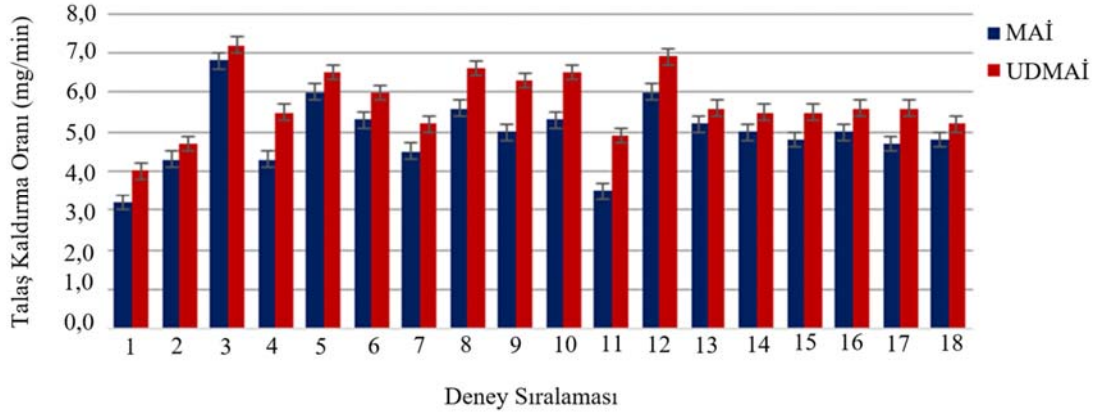
3.2.2. Aşındırıcı boyutunun TKO üzerindeki etkisi  
(Effect of abrasive size on MRR)

Şekil 13a'da MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisi grafiksel olarak görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama TKO değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük TKO değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde aşındırıcı boyutunun artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranının arttığı görülmektedir. Artan aşındırıcı boyutu ile birlikte iş parçası ile aşındırıcı temas uzunluğu artmakta ve bunun sonucu olarak iş parçası yüzeyinden birim zamanda daha büyük hacimli bir talaş kaldırılmaktadır [33]. Bu sebeple birim zamanda kaldırılan talaş miktarı olan TKO değeri de artmaktadır. Aşındırıcı boyutunun artmasıyla talaş kaldırma

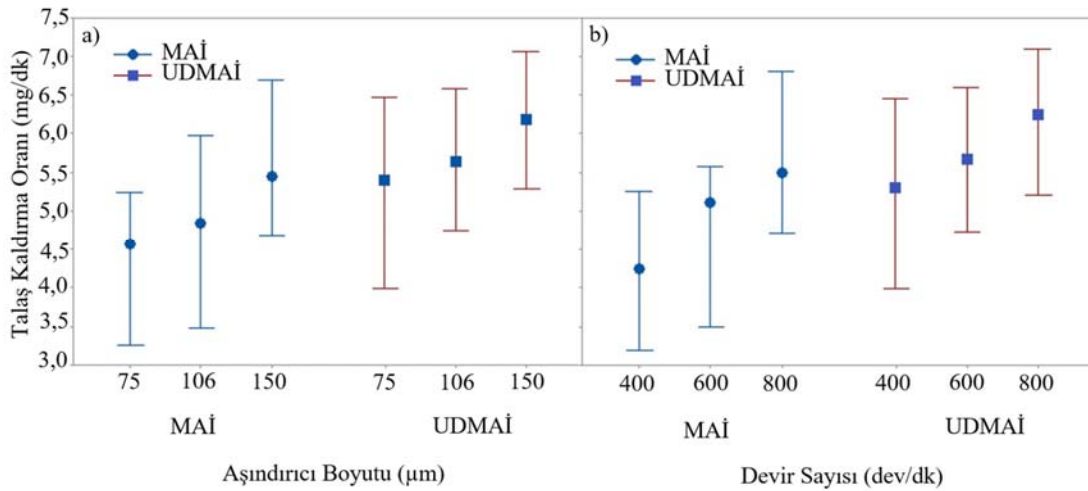
oranındaki değişim MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilim göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aşındırıcı boyutlarının 75 µm, 106 µm ve 150 µm değerleri için ortalama TKO değerleri sırasıyla; 4,57 mg/min, 4,84 mg/min ve 5,44 mg/min olmaktadır. UDMAİ yönteminde ise ortalama TKO değerleri aynı aşındırıcı boyutu değerleri için sırasıyla 5,40 mg/min, 5,65 mg/min ve 6,18 mg/min olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin TKO değerleri üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %15,79'luk bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

3.2.3. Devir sayısının TKO üzerindeki etkisi  
(Effect of number of revolutions on MRR)

Şekil 13b'de MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde devir sayısının talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil incelendiğinde devir sayısının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranının arttığı görülmektedir. Devir sayısı, aşındırıcı taneciklerin birim zamanda aldıkları yolu doğrudan etkilediği için devir sayısındaki artış talaş kaldırma oranı üzerinde de bir artışa sebep olmaktadır [35]. MAİ yönteminde devir sayısının 400 dev/min'den 600 dev/min değerine çıkmasıyla talaş kaldırma oranındaki artış 600 dev/min'den 800 dev/min değerine çıkmasıyla meydana gelen artışa kıyasla daha fazladır. Bu durum devir sayısının artmasıyla MAFT üzerine etki eden merkezci



Şekil 12. MAİ/UDMAİ deneylerine ait TKO grafiği (MRR graph of MAF/UDMAF experiments)

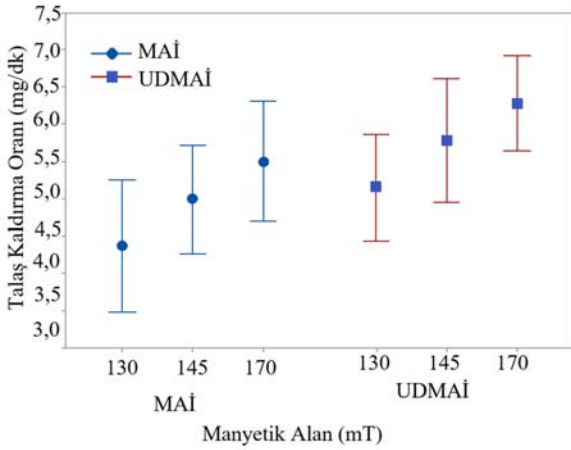


Şekil 13. MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde parametrelerin TKO üzerindeki etkisi a: aşındırıcı boyutu, b: devir sayısı  
(Effect of the parameters on MRR in MAF and UDMAF methods a: abrasive size, b: number of revolutions)

kuvvetin artması neticesinde aşındırıcı taneciklerin işleme bölgesine daha düşük kuvvetlerle temas etmesi ile açıklanabilir. UDMAİ yönteminde devir sayısının artması neticesinde TKO değerleri lineer bir şekilde artmaktadır. Ultrasonik desteği ile devir sayısının artmasıyla birlikte artan merkezci kuvvetin etkisi azaltılmış ve etkin bir talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde devir sayısı parametresinin 400 dev/min, 600 dev/min ve 800 dev/min değerleri için ortalama TKO değerleri sırasıyla; 4,24 mg/min, 5,12 mg/min ve 5,50 mg/min olmaktadır. UDMAİ yönteminde ise ortalama TKO değerleri aynı devir sayısı değerleri için sırasıyla 5,31 mg/min, 5,68 mg/min ve 6,25 mg/min olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin TKO değerleri üzerinde devir sayısı açısından ortalama %16,23'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

### 3.2.4. Manyetik alanın TKO üzerindeki etkisi (Effect of magnetic field on MRR)

Şekil 14'te MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde manyetik alan miktarının talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil incelendiğinde manyetik alan miktarının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranının arttığı görülmektedir. Manyetik kuvvet, aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine etkiyen baskı kuvvetini etkilediği için, artan manyetik kuvvetle birlikte aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine uyguladığı kuvvet artmakta ve bunun neticesinde daha etkin bir talaş kaldırma gerçekleşmektedir [35,36]. Manyetik alan miktarının artmasıyla talaş kaldırma oranındaki değişim MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilim göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde manyetik alan miktarının 130 mT, 145 mT ve 170 mT değerleri için ortalama TKO değerleri sırasıyla; 4,37 mg/min, 5,00 mg/min ve 5,50 mg/min olmaktadır. UDMAİ yönteminde ise ortalama TKO değerleri aynı manyetik alan değerleri için sırasıyla 5,16 mg/min, 5,79 mg/min ve 6,29 mg/min olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin TKO değerleri üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %15,76'lık bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.



Şekil 14. MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde manyetik alan miktarının TKO üzerindeki etkisi  
(Effect of the magnetic field on MRR in MAF and UDMAF methods)

Tablo 9. MAİ/UDMAİ deney parametreleri ve seviyeleri (Experimental parameters and levels of MAF/UDMAF)

Sembol	Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
A	İşleme Süresi (sec)	60	120	180	240	300	360
B	Aşındırıcı boyutu (µm)	75	105	150	-	-	-
C	Devir sayısı (dev/min)	400	600	800	-	-	-
D	Manyetik Alan (mT)	130	145	170	-	-	-

## 4. Varyans Analizi (Anova) (Analysis of Variance)

Varyans analizi yöntemi bir deneysel tasarımda bulunan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki istatistiksel etkisini belirlemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Yöntemde grupların ortalama değerden ne kadar uzaklaştığını tanımlayan varyanslar karşılaştırılmaktadır.

Varyans analizinde olması beklenen değerler ile deneysel değerler arasındaki sapma miktarı bir kayıp fonksiyonu aracılığıyla hesaplanır. Yöntemde kullanılan bu kayıp fonksiyonu işaret/gürültü (S/N) oranına dönüştürülerek sürecin optimizasyonu sağlanır. Genellikle S/N oranının analizinde 3 farklı yaklaşım söz konusu olup, bunlar “daha düşük olan daha iyidir”, “daha yüksek olan daha iyidir” ve “ortalama olan daha iyidir” yaklaşımlarıdır. Elde edilmek istenilen çığrıya göre bu yaklaşımlardan bir tanesi seçilmektedir [3].

### 4.1. MAİ/UDMAİ deneylerinin varyans analizi (Analysis of variance of MAF/UDMAF experiments)

Bu çalışmada tel erozyonla işleme yöntemi kullanılarak işlenen titanyum alaşımının yüzey kalitesinin MAİ/UDMAİ yöntemiyle iyileştirilmesi neticesinde talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğünde iyileşme oranı gibi performans çıktılarının analizinde “daha yüksek olan daha iyidir” yaklaşımı esas alınmıştır ve Eş. 3 yardımıyla S/N oranları hesaplanmıştır.

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

burada,

n, deney sayısını,

y, ölçülen değeri ifade etmektedir.

MAİ ve UDMAİ deney sonuçlarının S/N değerlerinin tespitinde kullanılan faktör ve seviyeleri Tablo 9'da görülmektedir. MAİ ve UDMAİ deneyleri için, işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı bağımsız değişkenlerdir. Aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı faktörleri 3'er farklı seviyeye sahipken işleme süresi faktörü 6 farklı seviyeye sahiptir. Talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranı ve beyaz tabaka kalınlığı ise bağımlı değişkenleri oluşturmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler, Minitab Release 17 paket programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

### 4.1.1. Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranının istatistiksel analizi (Statistical analysis of surface roughness improvement ratio)

Tablo 9'da verilen MAİ/UDMAİ deney parametrelerinin her bir seviyesine göre MAİ ve UDMAİ deneyleri için yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına ait S/N değerleri sırasıyla Tablo 10 ve Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 10 ve Tablo 11'den görüldüğü gibi MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin her ikisi için de maksimum yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı değeri aşındırıcı boyutu ve manyetik alan

parametrelerinin 1. seviyelerinde elde edilmekte iken, işleme süresi ve devir sayısı parametrelerinde sırasıyla 6. ve 3. seviyelerde elde edilmiştir. Aşındırıcı boyutunun artması taneciklerin temas uzunluklarını artırmakta ve yüzey üzerinde daha kaba bir işleme yapılmasına sebep olmaktadır.

Manyetik alan miktarı aşındırıcıların yüzeye batma miktarlarını kontrol etmektedir. Artan manyetik alan ile tanecikler daha derine nüfuz etmekte ve yüzey üzerinde derin çiziklere sebebiyet vermektedir.

İşleme süresinin artması yöntemde oluşan tepe ve vadilerin daha fazla aşınarak daha küçük hale gelmesini sağlamaktadır.

Devir sayısının artmasıyla birlikte aşındırıcıların birim zamanda aldıkları yol artmakta ve aynı sürede daha fazla aşındırma yapmaktadır. Tüm bu sebepler istatistiksel sonuçların fiziksel gerçeklerle örtüştüğünü göstermektedir.

MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Tablo 12 ve 13'te görülmektedir. Tablolar incelendiğinde MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin her ikisi için de en büyük katkıyı işleme süresi parametresinin sağladığı görülmektedir.

4.1.2. Talaş kaldırma oranının istatistiksel analizi  
(Statistical analysis of material removal rate)

Tablo 9'da verilen MAİ/UDMAİ deney parametrelerinin her bir seviyesine göre MAİ ve UDMAİ deneyleri için talaş kaldırma oranına ait S/N değerleri sırasıyla Tablo 14 ve Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo 14 ve Tablo 15'ten görüldüğü gibi MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin her ikisi için de maksimum talaş kaldırma oranı değeri aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan parametrelerinin 3. seviyelerinde elde edilmekte iken, işleme süresi parametresinde maksimum talaş kaldırma oranı MAİ ve UDMAİ yöntemi için sırasıyla 2. ve 4. seviyelerde elde edilmiştir.

**Tablo 10.** MAİ deneyleri için faktörlerin YPİO açısından S/N değerleri (S/N values of factors in terms of SRIR for MAF)

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	24,79	27,62	30,34	31,53	31,42	33,72 <sup>a</sup>
Aşındırıcı boyutu (B)	32,47 <sup>a</sup>	29,54	27,69	-	-	-
Devir sayısı (C)	27,77	29,71	32,67 <sup>a</sup>	-	-	-
Manyetik Alan (D)	32,98 <sup>a</sup>	28,96	27,77	-	-	-
Toplam ortalama S/N değeri = 29,93 dB						
<sup>a</sup> Optimum seviyeler						

**Tablo 11.** UDMAİ deneyleri için faktörlerin YPİO açısından S/N değerleri (S/N values of factors in terms of SRIR for UDMAF)

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	30,77	33,65	32,26	36,45	36,16	37,48 <sup>a</sup>
Aşındırıcı boyutu (B)	36,67 <sup>a</sup>	35,05	32,17	-	-	-
Devir sayısı (C)	32,34	35,44	36,10 <sup>a</sup>	-	-	-
Manyetik Alan (D)	37,07 <sup>a</sup>	34,77	32,05	-	-	-
Toplam ortalama S/N değeri = 34,56 dB						
<sup>a</sup> Optimum seviyeler						

**Tablo 12.** MAİ yönteminde YPİO için ANOVA sonuçları (ANOVA results for SRIR in MAF technique)

Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS <sub>A</sub> )	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	2359	471,8	1,34	0,313	35,82
Aşındırıcı boyutu (B)	2	1157	578,7	1,60	0,235	17,58
Devir sayısı (C)	2	1698	849,2	2,61	0,107	25,79
Manyetik Alan (D)	2	1153	576,6	1,59	0,236	17,51
Hata	6	2102	147,5	-	-	3,3
Toplam	17	8469	-	-	-	100

**Tablo 13.** UDMAİ yönteminde YPİO için ANOVA sonuçları (ANOVA results for SRIR in UDMAF technique)

Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS <sub>A</sub> )	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	2928	585,7	1,42	0,286	37,16
Aşındırıcı boyutu (B)	2	1636	818,0	1,97	0,175	20,76
Devir sayısı (C)	2	1529	764,7	1,81	0,198	19,41
Manyetik Alan (D)	2	1690	845,0	2,05	0,164	21,45
Hata	6	2102	147,5	-	-	1,22
Toplam	17	9885	-	-	-	100

Aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan parametrelerinin artması birim zamanda kaldırılan talaş miktarını doğrudan arttıracığı için istatistiksel sonuçlar tutarlıdır.

MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde talaş kaldırma oranı için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Tablo 16 ve Tablo 17’de görülmektedir.

Tablo 16 ve Tablo 17 incelendiğinde MAİ yönteminde devir sayısı parametresinin ve UDMAİ yönteminde manyetik alan parametresinin P değerinin 0,05 olan anlamlılık düzeyi değerinden

daha küçük olduğu ve dolayısıyla bu parametrelerin sırasıyla MAİ ve UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. P değeri bir karşılaştırmada gruplar arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir farkın olup olmadığını belirleyen bir hata değeridir. Bu hata değeri anlamlılık düzeyinden büyük ise gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı kabul edilir. Diğer parametrelerin MAİ ve UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı ancak işlem üzerinde belirli oranlarda katkılarının bulunduğu görülmektedir. Bu katkılar grafiksel olarak Şekil 15’te verilmiştir.

**Tablo 14.** MAİ deneyleri için faktörlerin TKO açısından S/N değerleri (S/N values of factors in terms of MRR for MAF)

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	13,14	14,23 <sup>a</sup>	14,00	13,64	13,98	13,62
Aşındırıcı boyutu (B)	13,09	13,58	14,64 <sup>a</sup>	-	-	-
Devir sayısı (C)	12,44	14,10	14,77 <sup>a</sup>	-	-	-
Manyetik Alan (D)	12,67	13,90	14,74 <sup>a</sup>	-	-	-
Toplam ortalama S/N değeri = 13,77 dB						
<sup>a</sup> Optimum seviyeler						

**Tablo 15.** UDMAİ deneyleri için faktörlerin TKO açısından S/N değerleri (S/N values of factors in terms of MRR for UDMAF)

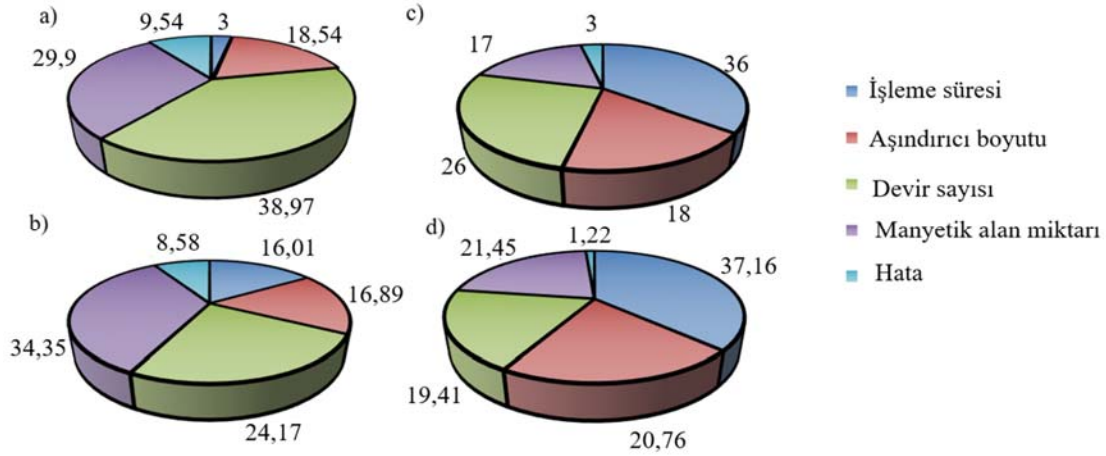
Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	14,21	15,57	15,57	15,62 <sup>a</sup>	14,88	14,75
Aşındırıcı boyutu (B)	14,56	14,97	15,76 <sup>a</sup>	-	-	-
Devir sayısı (C)	14,41	15,01	15,88 <sup>a</sup>	-	-	-
Manyetik Alan (D)	14,18	15,18	15,93 <sup>a</sup>	-	-	-
Toplam ortalama S/N değeri = 15,09 dB						
<sup>a</sup> Optimum seviyeler						

**Tablo 16.** MAİ yönteminde TKO için ANOVA sonuçları (ANOVA results for MRR in MAF technique)

Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS <sub>A</sub> )	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	0,3844	0,0768	0,07	0,995	3,00
Aşındırıcı boyutu (B)	2	2,377	1,1887	1,71	0,215	18,54
Devir sayısı (C)	2	4,996	2,4982	4,79	0,025	38,97
Manyetik Alan (D)	2	3,833	1,9167	3,20	0,070	29,90
Toplam Hata	6	4,1787	0,2974	-	-	9,59
Toplam	17	15,7691	-	-	-	100

**Tablo 17.** UDMAİ yönteminde TKO için ANOVA sonuçları (ANOVA results for MRR in UDMAF technique)

Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS <sub>A</sub> )	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	1,793	0,3587	0,46	0,800	16,01
Aşındırıcı boyutu (B)	2	1,892	0,9459	1,52	0,250	16,89
Devir sayısı (C)	2	2,708	1,3542	2,39	0,125	24,17
Manyetik Alan (D)	2	3,848	1,9242	3,92	0,043	34,35
Hata	6	3,639	0,2591	-	-	8,58
Toplam	17	13,88	-	-	-	100



**Şekil 15.** MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde işleme parametrelerinin YPİO ve TKO üzerindeki katkıları (a: YPİO için MAİ, b: YPİO için UDMAİ, c: TKO için MAİ, d: TKO için UDMAİ) (Contributions of machining parameters of MAF and UDMAF methods in SRIR and MRR: a: MAF for SRIR, b: UDMAF for SRIR, c: MAF for MRR, d: UDMAF for MRR)

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımından imal edilmiş ve tel erozyon yöntemiyle kesilmiş plakalar, yüzey kalitelerinin artırılması amacıyla manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemiyle işlenmiştir. Çalışmada MAİ yönteminin verimini artırmak amacıyla iş parçasına yüksek frekanslarda titreşim verilmiş ve yöntemin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı ve talaş kaldırma oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. TEİ yöntemi ile kesilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 1,60-1,63  $\mu\text{m}$  aralığında değişmektedir.

MAİ deneyleri neticesinde ortalama %36,12'lik bir YPİO değeri elde edilirken UDMAİ deneylerinde ortalama %57,26'lık bir değer elde edilmiştir. YPİO değerleri uygun işleme parametreleriyle MAİ ve UDMAİ yöntemleri için sırasıyla %81,22 ve %90,55 değerlerine kadar yükselmektedir.

Ultrasonik desteği aşındırıcıların fırça içerisindeki yerlerinin değişimine katkı sağlayarak nispeten daha keskin kenarlara sahip daha yeni aşındırıcıların işleme katılarak işleme performansını artırmaktadır. Bu artış YPİO açısından %58,54'lük bir ortalama iyileşmeye denk gelirken TKO açısından ortalama %15,92'lik bir artışa denk gelmektedir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 07/2020-04 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

## Kaynaklar (References)

1. Çaydaş U., Çelik M., Köklü U., Investigation of material removal rate and surface roughness in finishing of internal surfaces of AISI 304 L austenitic stainless steel pipes by magnetic abrasives, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1213–1225, 2019.
2. Chen, S. L., Yan, B. H., and Huang, F. Y., Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V, J. Mater. Process. Technol., 87 (1–3), 107–111, 1999.
3. He, P., Zhang, J., Zhou, R., and Li, X., Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with an Ni interlayer, Mater. Charact., 43 (5), 287–292, 1999.

4. Uzun, İ. H., ve Bayındır, F., Dental Uygulamalarda Titanyum ve Özellikleri, Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, 20 (2), 213–220, 2010.
5. Murr, L. E., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Rodela, A., Martinez, E. Y., and Wicker, R. B., Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications, J. Mech. Behav. Biomed. Mater., 2 (1), 20-32, 2009.
6. Ulutan, D., and Ozel, T., Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, Int. J. Mach. Tools Manuf., 51 (3), 250-280, 2011.
7. Krishna Alla, R., Gijupalli, K., Upadhy, N., Shammam, M., Krishna Ravi, R., and Sekhar, R., Surface Roughness of Implants: A Review, Trends Biomater. Artif. Organs, 25 (3), 112-118, 2011.
8. Bai, T., Liu, J., Zhang, W., and Zou, Z. Effect of surface roughness on the aerodynamic performance of turbine blade cascade, Propulsion and Power Research, 3 (2), 82–89, 2014.
9. Çelik, Y. H., ve Kiliçkap, E. Titanyum Alaşımlarından Ti-6Al-4V'nin İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar: Derleme, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (1), 163–175, 2018.
10. Minton, T., Ghani, S., Sammler, F., Bateman, R., Fürstmann, P., and Roeder, M. Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium, Int. J. Mach. Tools Manuf., 75, 27–35, 2013.
11. Manjaiah, M., Narendranath, S., and Basavarajappa, S., A review on machining of titanium based alloys using EDM and WEDM, Rev. Adv. Mater. Sci., 36 (2), 89–111, 2014.
12. Çaydaş U., Ti6Al4V Alaşımının Elektro Erozyon Ve Elektro Kimyasal İşleme Yöntemleriyle İşlenebilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
13. Yang, S., and Li, W., Magnetic Abrasive Finishing Technology, Surface finishing theory and new technology. China. National Defense Industry Press, 225-334, 2017.
14. Singh, D. K., Jain, V. K., and Raghuram, V., Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 30 (7–8), 652–662, 2006.
15. Li, W., Li, X., Yang, S., and Li, W., A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal behavior and finishing performance, J. Mater. Process. Technol., 260, 20–29, 2018.
16. Wu, J. Z., & Zou, Y. H., Study on an ultra-precision plane magnetic abrasive finishing process by use of alternating magnetic field, Applied Mechanics and Materials 395–396, 985–989, 2013.
17. Kim, T. W., and Kwak, J. S., A study on deburring of magnesium alloy plate by magnetic abrasive polishing, Int. J. Precis. Eng. Manuf., 11 (2), 189–194, 2010.
18. Vahdati, M., and Rasouli, S. A., Evaluation of Parameters Affecting Magnetic Abrasive Finishing on Concave Freeform Surface of Al Alloy via RSM Method, Adv. Mater. Sci. Eng., 2016, 1-14, 2016.



19. Yin, S., and Shinmura, T., Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 44 (12–13), 1297–1303, 2004.
20. Liu, G. Y., Guo, Z. N., Jiang, S. Z., Qu, N. S., and Li, Y. B., A study of processing Al 6061 with electrochemical magnetic abrasive finishing, *Procedia CIRP*, 14, 234–238, 2014.
21. Jiao, A. Y., Quan, H. J., Li, Z. Z., and Zou, Y. H., Study on improving the trajectory to elevate the surface quality of plane magnetic abrasive finishing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 80 (9–12), 1613–1623, 2015.
22. Kanish, T. C., Narayanan, S., Kuppan, P., and Denis Ashok, S., Investigations on wear behavior of Magnetic Field Assisted Abrasive Finished SS316L material, *Mater. Today: Proc.*, 5, 12734–12743, 2018.
23. Lin, C. T., Yang, L. D., and Chow, H. M., Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 34 (1–2), 122–130, 2007.
24. Kang, J., George, A., and Yamaguchi, H., High-speed internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing, In *Procedia CIRP*, 1, 414–418, 2012.
25. Singh, G., Kumar, H., Kansal, H. K., and Srivastava, A., Effects of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on material removal of inconel 625 tubes, *Procedia Manuf.*, 48, 466–473, 2020.
26. Singh, G., and Kumar, H., Influence of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on external roundness of Inconel 625 tubes. *Mater. Today: Proc.*, 37 (2021), 3283-3288, 2021.
27. Yamaguchi, H., & Shinmura, T., Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process, *Precis. Eng.*, 28 (2), 135–142, 2004.
28. Kajal, S., Jain, V. K., Ramkumar, J., and Nagdeve, L., Experimental and theoretical investigations into internal magnetic abrasive finishing of a revolver barrel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 100 (5–8), 1105–1122, 2019.
29. Ihara, I., Nakano, E., McLamore, E., Schueller J. K., Toyoda, K., Umetsu, K., Yamaguchi, H., Cleanability of milk deposits on inner stainless steel tubing surfaces prepared by magnetic abrasive finishing, *Eng. Agric. Environ. Food*, 10 (1), 63-68, 2017.
30. L. Li, L. Zhao, Z. Y. Li, L. Feng and X. Bai., Surface characteristics of Ti-6Al-4V by SiC abrasive-mixed EDM with magnetic stirring, *Materials and Manufacturing Processes*, 32 (1), 83-86, 2017.
31. Celik, M., Gürün, H., and Caydas, U., Surface modification of wire-EDMed Ti6Al4V alloy by ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing technique. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 10 (2), 025011, 2022
32. Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5. AZO Materials. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>, Yayın tarihi Temmuz 2002. Erişim tarihi Mart 11, 2021.
33. Misra, A., Pandey, P. M., and Dixit, U. S., Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *Int. J. Mech. Sci.*, 133, 344–356, 2017.
34. Kanish, T. C., Narayanan, S., Kuppan, P. and Denis, A., S., Experimental Investigations on Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing of SS 316L. *Procedia Manuf.*, 30, 276-283, 2019.
35. Buj-Corral, I., Álvarez-Flórez, J. and Domínguez-Fernández, A., Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes. *Metals*, 9 (8):860, 2019.
36. Misra, A., M. Pandey, P., and Dixit, U. S., Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *Int. J. Mech. Sci.*, 131–132, 853–867, 2017.

