

Kriyojenik İşlem Uygulanan Elektro Erozyon Elektrot Takımının Performansının Araştırılması

Mustafa AY^{1*}, Savaş APAK²

¹ Mekatronik Müh., Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Milli Eğitim Müdürlüğü, Elazığ, Türkiye

*¹ mustafaay@firat.edu.tr, ² savas045@hotmail.com

(Geliş/Received: 22/12/2024;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

Öz: Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının elektro erozyon ile işleme (EEİ) tezgâhında kullanılan elektrot malzemesinin kriyojenik işlem sonucunda takımın işleme performansı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, pirinç malzemeden seçilen elektrotlar [Oda sıcaklığı / -184°C / Oda sıcaklığı] arasında bir çevrim ile kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Deneylerde pirinç ve kriyojenik pirinç elektrotlarla boşalım akımı (Ip), vurum süresi (Ton), bekleme süresi (Toff) ve boşluk voltajı (Vg) gibi en etkili işlem parametreleri değişken seçilmiştir. Deneyler sonucunda ürün kalitesini belirleyen, tekrar katılacak katman kalınlığı, malzeme kaldırma oranı ve koniklik açısı ölçümleri yapılarak değerlendirilmiştir. Elektrotlara uygulanan kriyojenik işlem sonucunda, EEİ işlem performansında pozitif iyileşmeler elde edildiği tespit edilmiştir. Tekrar katılacak katman kalınlığı, malzeme kaldırma oranı ve koniklik miktarı oranlarının Ip, Vg ve Ton pozitif yönde Toff ise negatif yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ), Kriyojenik işlem, Ti-6Al-4V.

Cryogenic Heat Treatment of Electro Discharge Machining Electrode Tooling Investigation of Performance

Abstract: In this study, the machining performance of the electrode material used in the Electro Discharge Machining (EDM) of Ti-6Al-4V alloy was investigated as a result of cryogenic treatment. Within the scope of the study, electrodes selected from brass material were subjected to cryogenic treatment with a cycle between [Room temperature / -184°C / Room temperature]. In the experiments, the most effective process parameters such as discharge current (Ip), pulse on time (Ton), pulse off time (Toff) and gap voltage (Vg) were selected as variables with brass and cryogenic brass electrodes. As a result of the experiments, the re-solidified layer thickness, material removal rate and taper angle, which determine the product quality, were measured and evaluated. As a result of the cryogenic treatment applied to the electrodes, it was found that positive improvements in EEI performance were obtained. It was concluded that re-solidified layer thickness, material removal rate, tool wear rate and bevel amount ratios are positively affected by discharge current, gap voltage and pulse on time and negatively affected by pulse off time.

Key words: Electrical Discharge Machining (EDM), Cryogenic treatment, Ti-6Al-4V.

1. Giriş

Ti-6Al-4V alaşımları, özellikle yüksek korozyon direnci, yorulma direnci ve yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyeti gibi birçok üstün özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, petrokimya, nükleer endüstrisinde ve özellikle türbin motorlarının farklı bileşenlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Üstün özelliklere sahip malzemeler alanındaki hızlı gelişmeler, yeni teknolojik süreçlerin geliştirilmesi, geleneksel işleme yöntemleri ile elde edilemeyen sonuçlara ulaşma arayışı modern üretim teknolojisi alanındaki araştırmalara ivme kazandırmıştır. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) yöntemi, birçok imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan ileri imalat yöntemlerinden birisidir. Bu yöntem, elektriksel arkın oluşturduğu termal enerjinin ısı üretmek için kullanıldığı, iş parçasından ve takım yüzeyinden malzemenin erimesi ve buharlaşmasıyla sonuçlanan termal enerjiye dayalı bir süreçtir [2]. EEİ, tungsten, titanyum alaşımları, nikel alaşımları, takım çelikleri, bor karbür, silisyum karbür, alüminyum ve alaşımları, germanyum, polikristalin elmaslar, kompozit malzemeler, manyetik malzemeler, metalik cam vb. gibi sertlik gibi mekanik özelliklerine bakılmaksızın iletken olan her türlü malzemeyi işleyebilir [3-6]. Bunun yanı sıra, diğer geleneksel işleme teknikleriyle karşılaştırıldığında, daha düşük malzeme kaldırma oranı, yüksek takım aşınma oranı, esas malzeme yapısını bozan yüksek ısı girdisi ve işleme süresi gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Takım veya iş parçası hareketlerinin iyileştirilmesi, farklı dielektrik akışkanların kullanılması ve toz süspansiyonlarının eklenmesi, farklı takım malzemelerinin kullanılması veya bunların takım

* Sorumlu yazar: mustafaay@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-9056-9975, ² 0009-0000-9042-5771

elektrot özelliklerinin geliştirilebilmesi için belirli işlemlere tabi tutulması gibi EEİ alanında birçok iyileştirme tekniği rapor edilmiştir [7-11].

İmalat endüstrisinde maliyet artışına neden olan takım ömrünü iyileştirmek için yeni yaklaşımlar geliştirilmektedir. Kriyojenik işlem, östenitin martensite dönüşümünü tamamlamak için uygun soğutma, ısıtma ve ısıtma sürelerinin seçilmesini içerir. Kriyojenik işlem ile malzemelerin fiziksel, mekanik ve termal iletkenlik özelliği de iyileştirilebilir [12-14]. Altuntaş ve diğerleri [15], sıg kriyojenik (-40 °C) ve doğal yaşlandırma işlemlerinin Al7075 alaşımındaki ikinci fazların çökmesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Özellikle kriyojenik ve doğal yaşlanma süreçleri sırasında dislokasyon yoğunlukları, düzlemlerin gerinim değerleri, doku katsayıları ve sonrasında kristal yapıya olan etkiler değerlendirilmiş, yaşlandırma öncesinde uygulanan kriyojenik işlemin malzemenin sertliğini ortalama %15 artırdığı rapor edilmiştir. Önceki çalışmalarda, geleneksel talaşlı işlemede takım veya iş parçası kriyojenik ve soğuk işleme tabi tutulduğunda takım ömrünün ve işleme performansının arttığı rapor edilmiştir [16-19]. Ancak, EEİ yönteminde takım elektrot üzerine kriyojenik işlemin etkisini belirlemek için kısıtlı sayıda araştırma yapılmıştır. Sing ve Grover, EN-31 malzemesini kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş bakır, pirinç ve grafit elektrotlar ile işleyerek kriyojenik işlemin takım aşınma oranı ve malzeme kaldırma miktarı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin malzeme kaldırma oranında önemli bir iyileşme ve takım aşınma oranında azalma sağladığını rapor etmişlerdir [20]. Kumar ve diğerleri [21], Inconel 718'in elektro erozyon ile işlemede iyonize tankına eklenen metal tozunun etkinliğini değerlendirmek için yaptıkları deneylerde kriyojenik işlem görmüş bakır elektrotlar kullanmışlar ve kriyojenik ısıl işlemin takım aşınma oranında önemli bir azalma gözlemlemişlerdir. Jafferson ve Hariharan, kriyojenik ısıl işlemler ve normal mikro elektrotların (pirinç boru, bakır boru ve tungsten çubuğu) takım aşınma oranlarını deney sonuçlarını karşılaştırmış. Kriyojenik işlemler tungsten, pirinç ve bakır elektrot için takım aşınma oranında sırasıyla % 58,% 51 ve % 35 lik bir azalma gözlemlendiğini rapor etmişlerdir [22]. Gill ve Singh [23], EEİ ile derin kriyojenik işlem görmüş Ti6246 titanyum alaşımının işlenmesi sırasında kriyojenik işlemin etkisini araştırmış ve iş parçası malzemesinin termal ve elektrik iletkenliğindeki artıştan dolayı takım aşınma oranının % 34,78 oranında azaldığını bildirmişlerdir. Yıldız ve diğ. [24], soğuk ve kriyojenik işlemin berilyum-bakırın işlenebilirliği üzerindeki etkisini araştırmış ve malzeme kaldırma oranında yaklaşık % 20 ila % 30 artış olduğunu bildirmişlerdir.

Geçmiş dönemlerde yapılan bilimsel araştırmalarda hem geleneksel imalat hem de ileri imalat endüstrisinde maliyet artışına neden olan takım ömrünü iyileştirmek için birçok yeni yaklaşımların denendiği tespit edilmiştir. Ancak, EEİ yönteminde takım elektrot olarak kullanılan pirinç malzemesine kriyojenik işlemin etkisini belirlemek için kısıtlı sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışma, kriyojenik işlemler ve ısıl işlemsiz pirinç elektrotlar ile Ti-6Al-4V titanyum alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde kriyojenik işlemin etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ek olarak, kullanılan parametre değişkenlerinin, Malzeme Kaldırma Oranı, Tekrar Katılaştıran Katman Kalınlığı ve Delik Koniklik Açısı üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır.

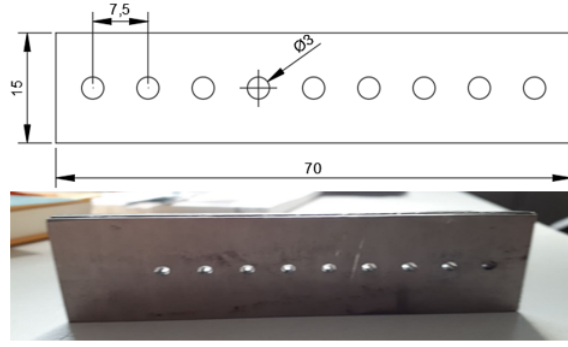
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Deney malzemeleri ve elektrotların hazırlanması

Deneyisel çalışmalarda iş parçası olarak kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1'de görülen $15 \times 70 \times 6$ boyutlarında Ti-6Al-4V titanyum alaşımı plakalar kullanılmıştır. Deney öncesinde işlem süresini kısaltmak için numunelere CNC freze tezgâhında Şekil 1'de görüldüğü gibi 2,5 mm çapında ön delme işlemi yapıldıktan sonra 3mm lik elektrotlar ile EEİ ile delik genişletme işlemi yapılmıştır. Ön delme işlemi EEİ işleminde; basınçlı dielektrik sıvı uygulaması ile ergimiş metalin ortamdan uzaklaştırmasını kolaylaştıracağı, ayrıca kör deliğe nazaran ortamdan uzaklaştırılmayan artık metal kalıntılarının elektrot-işparçası arasında kalarak kısa devre ihtimalini de zayıflatacağı düşünülmektedir.

Tablo 1. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Kimyasal bileşimi (%)							
Ti	Al	V	H	O	N	C	Fe
Kalan	6,25	4,25	0,0029	0,110	0,003	0,011	0,026
Mekanik özellikleri							
Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HRC)	Erime noktası (°C)	Çekme mukavemeti (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Elastik modül (MPa)	Elektrik direnci ($\mu\Omega \cdot m$)	Isı iletkenliği (W/mK)
4,43	36-39	1660	910	840	113	1,7	6,7



Şekil 1. EEİ ile işlenen numunelerin boyutları ve işlem sonrası görüntüsü.

Yapılan araştırmalar ışığında; Titanyum alaşımlarının farklı elektrot malzemesi ile işlenmesi sonucunda pirinç elektrot malzemesinde iyi derecede malzeme kaldırma hızının yanı sıra yüksek takım aşınması meydana geldiği rapor edilmiştir [25, 26]. Kriyojenik işlem ile pirinç elektrotlarda yüksek malzeme kaldırma hızı yanı sıra düşük elektrot aşınma oranı elde edilmesi maliyet açısından fayda sağlayacağı düşüncesi ile elektrot malzemesi olarak pirinç elektrotlar tercih edilmiştir. EEİ tezgahında delik genişletme işlemleri için Şekil 2'de verilen 3mm çap ve 70mm boyunda 18 adet pirinç elektrot kullanılmıştır.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan elektrotlar.

Bu elektrotlardan 9 adedi, özelliklerini geliştirmek için kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Kriyojenik işlem çevrimi, Dönüşüm Isıl İşlem San. Ve Tic. Ltd. Şti. bünyesinde bulunan Şekil 3 a'da görseli paylaşılan dikey kap içerisinde azot gazı kullanılarak Şekil 3 b'de gösterildiği gibi, elektrotlar 1°C / dk soğutma hızında kademeli olarak -184°C'ye düşürülmüş ve bu sıcaklıkta 24 saat süre ile kriyojenik işlemci kabında tutulmuştur. Sonra sıcaklık aynı hızda kademeli olarak tekrar oda sıcaklığına yükseltilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalarda genellikle kriyojenik sıcaklıkları -150 °C'nin altındaki sıcaklıklar olarak tanımlamışlardır. Ancak, son zamanlarda sıcaklıklar -185 °C üzerine çıkarılarak derin kriyojenik işlem etkisi de çalışılmaktadır [27,28].



Şekil 3. Pirinç elektrot için; a) kriyojenik işlem kabı, b) Kriyojenik işlem çevrimi.

Kriyojenik işlem öncesi ve sonrası, elektrotların yüzey sertliği ve elektrik iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Elektriksel iletkenlik katsayısı ölçümleri, FAYTRONX PHY2030 marka ölçüm cihazında dört nokta prob metodu

kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, oda sıcaklığında 1Hz-1MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Numunelere AC 100 MV gerilim uygulanmıştır. Mikro sertlik ölçümler Tronic DHV-1000 Micro Vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Ölçüm sırasında elektrotlara uygulanan yük 0,95 kg olup bekleme süresi 15 saniye olarak seçilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Pirinç elektrotların elektrik iletkenlik ve mikro sertlik değerleri

Elektrot	Elektrik iletkenlik	Sertlik (HV)
Pirinç Elektrot	37,091 Ω m	110,512 HV
Kriyojenik Pirinç Elektrot	80,422 Ω m	140,212 HV

2.2. EEİ İşlem Deneyleri

Deneyler, Tablo 3'te verilen parametreler ile Şekil 4'de görülen ticari CNC Elektro Erozyon Makinesi (OSCAREDM Co.Ltd., Taichung, Tayvan tarafından üretilen Model OSCARMAX) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Deney parametreleri ve seviyeleri

Deney Parametreleri	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Elektrot malzemesi	Pirinç	Kriyojenik pirinç	--
Boşalım akımı (Ip)	1 Amp	1,5 Amp	2 Amp
Vurum süresi (Ton)	10 μ s	20 μ s	30 μ s
Bekleme süresi (Toff)	10 μ s	20 μ s	30 μ s
Boşluk voltaj (Vg)	2 V	4 V	6 V
Polarite	Elektrot (+), İşparçası (-)		
Dielektrik sıvısı	Parafinol 5		
Püskürtme Basıncı (P)	0,5 bar		



Şekil 4. EEİ tezgahı ve deneysel kurulum

Çalışmada, elektrot malzemesi (EM); pirinç elektrot (PE), kriyojenik pirinç elektrot (KPE) olmak üzere iki seviyede değişirken, kontrol edilebilir tezgah parametreleri; Ip, Ton, Toff ve Vg üç seviyede değiştirilmiştir. Karma iki ve üç seviye tasarıma sahip olduğumuzdan, deneyleri tasarlamak için Tablo 4'de görüldüğü gibi beş sütun ve on sekiz sıra içeren Taguchi L₁₈ (2¹ × 3⁴) ortogonal dizi kullanılmıştır.

Tablo 4. L_{18} ($2^1 \times 3^4$) ortogonal deney tasarımı ve ölçüm sonuçları.

Deney No	EM	Ip (A)	Ton (µs)	Toff (µs)	Vg (V)	Tekrar Katılan Katman Kalınlığı (mm)	Malzeme Kaldırma Oranı (mm ³ /dk)	Koniklik Açısı (°)
1	PE	1	10	10	2	0,074	0,039	0,4333
2	PE	1	20	20	4	0,039	0,066	0,6360
3	PE	1	30	30	6	0,049	0,123	0,6922
4	PE	1,5	10	10	4	0,123	0,088	0,1933
5	PE	1,5	20	20	6	0,420	0,090	1,0794
6	PE	1,5	30	30	2	0,069	0,209	0,7994
7	PE	2	10	20	2	0,741	0,033	0,3194
8	PE	2	20	30	4	0,712	0,105	1,3300
9	PE	2	30	10	6	1,548	0,541	1,5047
10	KPE	1	10	30	6	0,045	0,064	0,2647
11	KPE	1	20	10	2	0,253	0,112	0,2719
12	KPE	1	30	20	4	0,560	0,153	0,4712
13	KPE	1,5	10	20	6	0,024	0,122	0,4001
14	KPE	1,5	20	30	2	0,595	0,153	0,2814
15	KPE	1,5	30	10	4	0,334	0,182	1,1472
16	KPE	2	10	30	4	0,068	0,252	0,6852
17	KPE	2	20	10	6	0,253	0,356	1,0612
18	KPE	2	30	20	2	0,017	0,403	1,3960

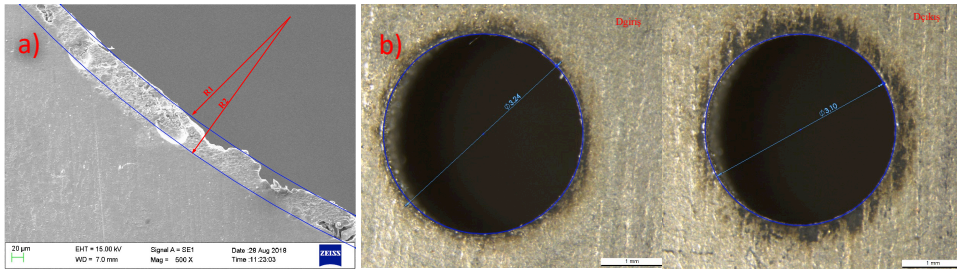
2.3. Performans özelliklerinin ölçülmesi

Malzeme kaldırma oranı değerleri, Denver İncubator (SI-203) marka 0,0001 g hassasiyetli bir terazi kullanılarak her bir delme işlemi sonrası malzemede oluşan kütle kaybı tartılarak eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır [29].

$$\text{Malzeme Kaldırma Oranı} = \frac{(G_a - G_b)}{\rho \times t} \text{ mm}^3 / \text{dk} \quad (1)$$

Burada G_a iş parçasının EEİ işleminden önceki kütlesi, (g); G_b EEİ işleminden sonraki kütlesi, (g); ρ , Ti6Al4V alaşımının yoğunluğu, (g/mm³); t ise işleme süresini (dak) ifade etmektedir.

Tekrar katılan katman kalınlığı ölçümleri dijital ortamda piksel boyutunda büyütme imkanı elde edilebildiği için numunelere ait SEM görüntüleri ölçek değiştirilmeden Solidworks 2015 programına taşındı. Program ara yüzü kullanılarak delik görüntüleri büyütülüp daha hassas bir çap ölçümü gerçekleştirildi ve Şekil 5 a'da görüldüğü gibi çap farkına bağlı hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 5. a) Tekrar katılan katman kalınlığı ölçümü, b) delik koniklik açısı ölçümü.

Delik giriş ve çıkışları Stereo Zoom Mikroskop (Trinoküler) yardımıyla görüntüldü. Elde edilen görüntüler üzerinde Şekil 5. b'de görüldüğü gibi giriş ve çıkış çap değerleri (D_{giris} , D_{cikis}) ölçümü yapıldıktan sonra parça kalınlığına bağlı (H) Formül 2 [30] yardımıyla bütün deliklere ait koniklik açısı hesaplandı.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D_{giris} - D_{cikis}}{2H} \right) \quad (2)$$

3. Bulgular

3.1. İşleme Parametreleri ve Çıktıların Taguchi Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Taguchi yöntemi, her türlü işleme prosesi altında işlem parametrelerini optimize etmek için en etkili istatistiksel araçlardan biridir. Taguchi tasarımında kullanılan iki önemli araç ortogonal diziler ve sinyal-gürültü (S/N) oranlarıdır. Bu çalışmada, MİNİTAB 19 İstatistiksel Yazılım programı kullanılarak her kontrol faktörünün birbirinden bağımsız olduğu ve her bir faktörün farklı sayıda seviyeleri göz önüne alınarak, Taguchi Mix L₁₈ (2¹ × 3⁴) ortogonal deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ortogonal diziler araştırmacıların veya tasarımcıların birçok tasarım parametresini aynı anda incelemesine olanak tanır ve diğer faktörlerden bağımsız olarak her faktörün etkilerini tahmin etmek için kullanılabilir. Bu nedenle tasarım parametrelerine ilişkin bilgiler minimum zaman ve kaynakla elde edilebilir. Sinyal-gürültü oranı, belirli bir tasarım parametresinin değiştirilmesinin işlem performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilebileceği bir kalite göstergesidir.

Taguchi metodolojisinde üç tür kalite özelliği vardır; daha küçük daha iyi, daha büyük daha iyi ve nominal en iyi. Bu çalışmada, EE işleminde (a) maksimum Malzeme Kaldırma Oranını (b) minimum Tekrar Katılaştıran Katman Kalınlığını ve Koniklik Açısını elde etmek için gerekli işleme koşullarını belirlemekti. Bu nedenle, bu çalışmada Eşitlik 3 ve 4'te yer alan kalite özellikleri uygulanmıştır [31].

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

$$\text{En büyük en iyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

3.2. Tekrar katılaştıran katman kalınlığı

Tablo 4'de verilen deney sonuçları Taguchi istatistiksel inceleme metodu ile analiz edildiğinde tekrar katılaştıran katman kalınlığı için S/N için yanıt tablosu Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'de verilen S/N yanıt tablosu değerlendirildiğinde tekrar katılaştıran katman kalınlığı değerleri için en etkili parametre seviyeleri sırası ile A2B3C2D1E3 dir denilebilir.

Tablo 5. Tekrar katılaştıran katman kalınlığı için S/N yanıt tablosu

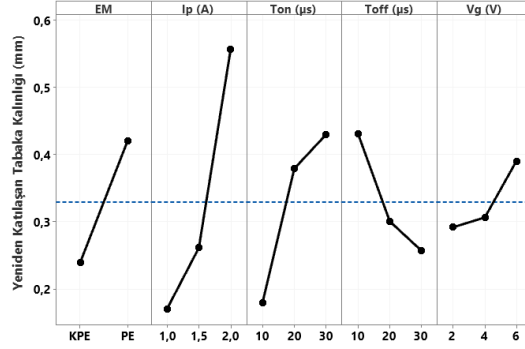
Seviye	EM	Ip(A)	Ton (µs)	Toff (µs)	Vg (V)
1	17,89	20,15	21,02	11,74	16,71
2	14,19	15,90	15,93	18,52	14,54
3		12,07		17,86	16,87
Delta	3,70	8,08	9,84	6,79	2,33
Sıralama	4	2	1	3	5

Parametre seviyelerinin optimum kombinasyonlarını doğru bir şekilde değerlendirmek için EEİ parametrelerinin çıktı performansı üzerindeki etkisi varyans (ANOVA) analizi yapılarak elde edilebilir. % 95 güven düzeyinde ($\alpha=5\%$ hata seviyesinde) yapılan ANOVA testi sonucunda elde edilen veriler Tablo 6'da verilmiştir. Burada, her bir parametrenin tekrar katılaştıran katman kalınlığı üzerindeki anlamlılık düzeyini gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi, kareler toplamı, kareler ortalaması, F değerleri görülmektedir. ANOVA tablosunda, $P < 0,05$ ise parametrelerin tekrar katılaştıran katman kalınlığı üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu kabul edilir. Tablo 6 incelendiğinde, Ip (A) nin P değeri 0,05'ten küçük olduğundan bu faktörün tekrar katılaştıran katman kalınlığı üzerinde %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi vardır denilebilir.

Tablo 6. Tekrar katılaştıran katman kalınlığı için ANOVA analizi sonuçları

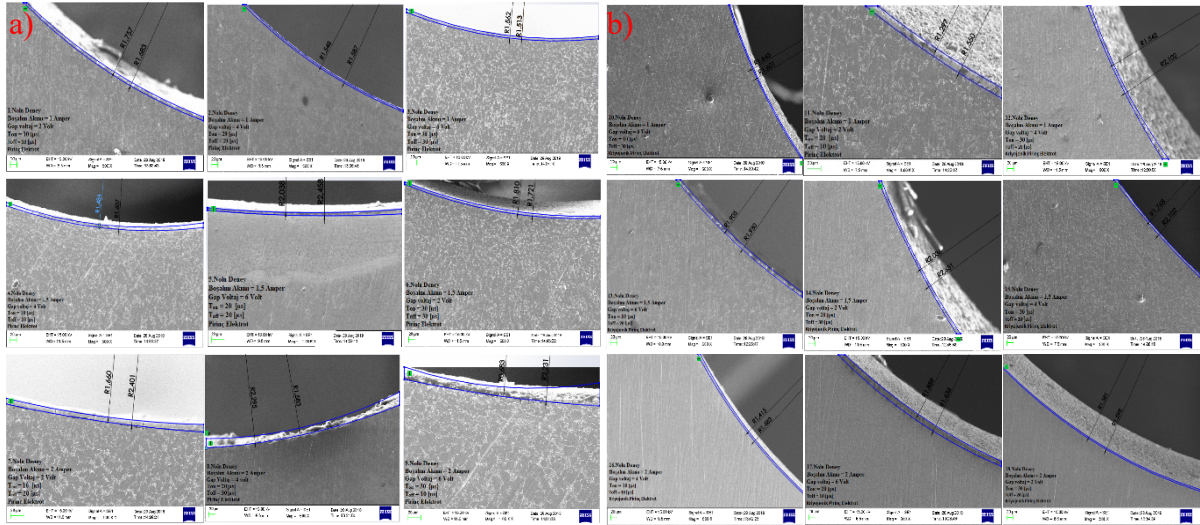
Deney Parametreleri	Serbestlik Derececi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
EM	1	0,274	0,274	0,01	0,929
Ip(A)	2	577,452	288,726	8,93	0,009
Ton(µs)	2	39,497	19,749	0,61	0,566
Toff(µs)	2	74,566	37,283	1,15	0,363
Vg(V)	2	36,311	18,155	0,56	0,591
Hata	8	258,593	32,324		
Toplam	17	986,693			

Deneylerde kullanılan her bir işlem parametresinin tekrar katılan katman kalınlığı üzerindeki etkilerini gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. İşleme parametrelerinin tekrar katılan katman kalınlığı üzerindeki etkileri.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, yeniden katılan tabaka kalınlıkları, ısı işlem görmüş elektrotlara nazaran ısı işlemiz elektrotlarla yapılan işlemler sonunda daha yüksek çıkmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda kriyojenik işlemin malzemede dislokasyonlar, artık gerilmeler gibi olumsuz durumları ortadan kaldırarak metalin termal iletkenliğini artırdığı rapor edilmiştir. Malzemelerin elektriksel iletkenlikleri de Wiedemann-Franz-Lorenz Yasası uyarınca ısı iletkenliklerinde artışa neden olur [32]. Bu durum daha kararlı arkların oluşmasına ve ideal ergimenin oluşmasına yol açar. Basınçlı dielektrik sıvı sayesinde eriyik malzemenin ortamdaki tam anlamıyla uzaklaştırılması ile tekrar katılan katman kalınlığının azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Tekrar katılan katman görüntüleri a) pirinç elektrot, b) kriyojenik pirinç elektrot

Ayrıca, tepe akımı, Ton ve Vg nin artışı ile tekrar katılan katman kalınlığı önemli derecede artmaktadır. Akımdaki artışla, takım-iş parçası ara yüzünde mevcut olan etkin enerji artar ve daha fazla malzeme ergitilir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak yeniden katılan tabaka kalınlıkları da artmaktadır. Yeniden katılan tabaka kalınlıkları, pirinç elektrotlarla ile işlenmiş yüzeylerde bu aralık 0,029 – 2,102 mm ve kriyojenik pirinç elektrotlarla ile işlenmiş yüzeylerde bu aralık 0,025 – 0,334 mm olan değerler elde edilmiştir. Toff un artmasıyla elektrotların ısı, sıcaklık değerlerinde dielektrik sıvının etkisiyle çok hızlı düşüşler görülmektedir. Buda yeniden katılan tabakanın istenilen yönde malzemede daha dar bir bölgede ısı etkisinde kalmasına ve tekrar katılan katman kalınlığında nispeten azalmasına yol açmaktadır. Vg nin artması malzeme üzerinde ısı, sıcaklık artışına

sebeplerle beraber akım ve Ton a kıyasla etkisinin az olduğu sonucuna ulaşılabilir. Şekil 7’de deney parametrelerinin tekrar katılacak katman kalınlığı üzerindeki etkilerini gösteren TEM görüntüleri verilmiştir.

3.2. Malzeme Kaldırma Oranı

Tablo 4’te verilen 18 deney sonucunda ölçülen malzeme kaldırma oranı için en büyük en iyidir kalite kriterine göre S/N oranları hesaplandı. Seviye 1, 2 ve 3’teki her bir parametre için malzeme kaldırma oranının S/N değerleri Tablo 7’de verilmiştir. S/N değerlerinin analizi, malzeme kaldırma oranı için optimum performansın A1B3C3D1E3 parametre seviyeleri ile elde edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 7. Malzeme kaldırma oranı için S/N yanıt tablosu

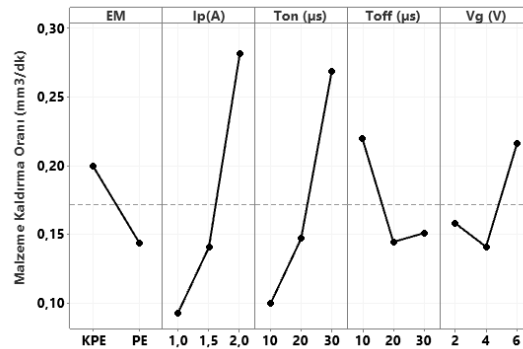
Seviye	EM	Ip(A)	Ton (µs)	Toff (µs)	Vg (V)
1	-15,27	-21,53	-22,17	-16,24	-19,10
2	-20,02	-17,50	-18,07	-19,44	-17,90
3		-13,90	-12,69	-17,25	-15,93
Delta	4,75	7,63	9,48	3,20	3,17
Sıralama	3	2	1	4	5

Tercih edilen performans özelliklerine ilişkin ANOVA analizi Tablo 8’de gösterilmektedir. Analizden, EM’nin malzeme kaldırma oranı için önemli işlem değişkeni olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 8. Malzeme kaldırma oranı için ANOVA analizi sonuçları

Deney Parametreleri	Serbestlik Dereceleri	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
EM	1	52,551	52,5512	10,48	0,012
Ip(A)	2	9,371	4,6854	0,93	0,432
Ton(µs)	2	1,709	0,8546	0,17	0,846
Toff(µs)	2	9,469	4,7345	0,94	0,429
Vg(V)	2	14,152	7,0761	1,41	0,299
Hata	8	40,134	5,0168		
Toplam	17	127,387			

Şekil 8’de işlem parametrelerinin malzeme kaldırma oranına etkilerini gösteren grafik verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, kriyojenik işlem görmüş elektrotlar ile birim zamanda daha fazla malzeme kaldırıldığı görülmektedir. Kriyojenik işlem sonrasında, elektrot malzemesinin elektriksel ve termal iletkenliği arttığı birçok çalışmada bildirilmiştir, Kalsi vd. [33], kriyojenik işlem sonucunda, elektrot malzemesinde termal iletkenlikteki artışın takım malzemelerinin ısı yayma kapasitesini artırdığını bildirmişlerdir. Kriyojenik işlem takımında meydana gelecek aşırı ısınmayı azaltırken iş parçasına ısı iletimini artırır ve nispeten daha yüksek malzeme kaldırma oranı elde edilir. Malzeme kaldırma oranının akım ve darbe açık süresindeki artışla arttığı görülmektedir. İşleme alanında mevcut olan etkili kıvılcım enerjisinin Ip ve Ton ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Yüksek akım seviyesinde enerji seviyesi yüksektir ve kıvılcım boşalması fazladır. Bu durum, iş malzemesinin erimesini ve buharlaşmasını artırarak birim zamanda malzeme kaldırma oranının artırdığı söylenebilir [34].



Şekil 8. İşleme parametrelerinin malzeme kaldırma oranı üzerindeki etkileri.

3.3. Koniklik Açısı

Delik koniklik açısı, "daha düşük, daha iyi" tipi bir kalite özelliğidir. Bu nedenle, S/N oranını hesaplamak için En küçük en iyi yanıt türü kullanıldı ve her parametrenin her seviyesi için koniklik açısının S/N değerleri hesaplanmış ve Tablo 9'da verilmiştir. S/N oranının analizi, koniklik açısı için optimum performansın A2B3C3D2E3 parametre seviyeleri ile elde edileceğini ortaya koymaktadır.

Tablo 9. Koniklik açısı için S/N yanıt tablosu

Seviye	EM	Ip(A)	Ton (µs)	Toff (µs)	Vg (V)
1	5,2267	7,2972	9,0397	4,5989	6,4250
2	3,7594	5,5556	3,7666	4,1292	4,0593
3		0,6262	0,6727	4,7509	2,9947
Delta	1,4673	6,6710	8,3669	0,6216	3,4303
Sıralama	4	2	1	5	3

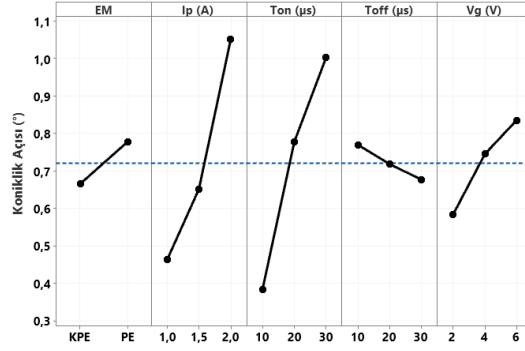
Koniklik açısı'nın S/N verilerine ilişkin ANOVA sonucu Tablo 10'da verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi $P < 0,05$ şartını sağlayan Ip (A) ve Ton(µs) parametreleri Koniklik açısı üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir denilebilir.

Tablo 10. Koniklik açısı için ANOVA analizi sonuçları

Deney Parametreleri	Serbestlik Dereceleri	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
EM	1	0,0829	0,0829	0,05	0,827
Ip(A)	2	47,6795	23,8398	14,69	0,002
Ton(µs)	2	27,7637	13,8819	8,56	0,010
Toff(µs)	2	1,5462	0,7731	0,48	0,637
Vg(V)	2	9,5320	4,7660	2,94	0,111
Hata	8	12,9796	1,6224		
Toplam	17	99,5840			

EEI' de takım aşınması, işlenmiş parçaların boyut ve şekil hassasiyetini olumsuz etkileyen önemli bir sorundur. Delikte meydana gelen koniklik, işlem süresince takım ucunda meydana gelen aşınmaya bağlı oluşmaktadır. Şekil 9'daki grafikler incelendiğinde farklı işlem parametreleri ile Ti6Al4V malzemesine pirinç elektrotla açılan deliklerin koniklik açısı kriyojenik pirinç elektrotla açılan deliklere nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem, malzemenin kristal yapısının homojenliğini artırarak, boşlukları ve dislokasyonları çözer ve böylece malzemenin elektrik direncini arttırdığı söylenebilir. Malzemelerin elektriksel iletkenliklerindeki artışlar da termal iletkenliklerde artışa neden olur. Termal iletkenlikteki artışın takım malzemelerinin ısı yayma kapasitesini artırır ve böylece takım sıcaklığı düşer ve sonuç olarak takım aşınmasının yavaşladığı düşünülmektedir [11]. Aşınmanın az olduğu kriyojenik işlem görmüş takımlarla daha dik delikler elde edilmiştir.

Pirinç elektrotla işleme hızına en fazla etki eden parametre olan akımın, pirinç elektrotta daha fazla malzeme kopardığının göstergesi olarak kabul edilebilir. Dolayısı ile kriyojenik pirinç elektrotun ısı ve elektriksel iletkenliğinin pirinç elektrot göre daha yüksek olması, koniklik miktarı oranın daha düşük çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 9'deki grafikler incelendiğinde koniklik miktarı oranı, akım ve vurum süresi ve boşluk voltaj değerlerine paralel artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 9. İşleme parametrelerinin koniklik açısı üzerindeki etkileri.

Tablo 4 ve Şekil 9’da elde edilen veriler ışığında pirinç elektrotlar ile yapılan deneyler sonucunda, en küçük koniklik miktarı 1 no’lu deneyde (1 A boşalım akımı, 10 µs Ton, 10 µs Toff ve 2 V Vg değerlerinde) 0,4333° ölçülmüş. En büyük koniklik miktarı ise 9 no’lu deneyde (2 A boşalım akımı, 30 µs Ton, 18 µs Toff ve 6 V Vg değerlerinde) 1,5047° ölçülmüştür. Kriyojenik pirinç elektrotlar ile yapılan deneyler sonucunda en küçük koniklik miktarı 10 no’lu deneyde elde edilirken, en büyük koniklik miktarı ise 18 no’lu deneyde (2 A boşalım akımı, 30 µs Ton, 20 µs Toff ve 2 V Vg değerlerinde) elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada EEİ tezgâhında kullanılan pirinç elektrot malzemesine uygulanan Kriyojenik işlem sonucunda takımın işleme performansı araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında pirinç elektrot’ a uygulanan Kriyojenik ısıl işlemin takımın performansını arttırdığı tespit edilmiştir. Isıl işlemsiz pirinç elektrotların elektrik iletkenlik ve mikrosertlik değerlerinin kriyojenik işlem sonucunda arttığı belirlenmiştir. Bu durum, EEİ tezgahlarında çok önemli bir takım malzeme parametresi olan ısıl ve elektriksel iletkenlik değerinin iyileşmesi ile daha üstün bir işleme performansının elde edilmesini sağladığı söylenebilir. Ek olarak Ip (A) nin tekrar katılacak katman kalınlığı üzerinde, EM’nin malzeme kaldırma oranı üzerinde ve Ip (A) ve Ton(µs) parametrelerinin de koniklik açısı üzerinde %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu yapılan ANOVA testleri sonucunda tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, FÜBAP TEKF.17.11 numaralı proje kapsamında desteklenen, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Doç. Dr. Mustafa AY danışmanlığında, Savaş APAK tarafından hazırlanmış yüksek lisans tezinden üretilmiştir. SA, deney tasarımının ve deneylerin yapılması, verilerin elde edilmesi, verilerin analiz edilmesi ile sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması. MA, çalışma konusunun belirlenmesi, fikir sahibi, kontrol, tez danışmanı ve sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması.

Kaynaklar

- [1] Ay M, Yücelişi F. Ti-6Al-4V Alaşımının Fiber Lazer ile Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin Araştırılması. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi 2018; 30 (2): 215-223
- [2] Hasçalık A, Caydas U. A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V alloy machined by EDM and AECG. Journal of Materials Processing Technology 2007;190: 173–180. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.02.048
- [3] Jafferson JM, Hariharan P. Machining Performance of Cryogenically Treated Electrodes in Microelectric Discharge Machining: A Comparative Experimental Study, Materials and Manufacturing Processes 2013; 28: 397–402. Doi: 10.1080/10426914.2013.763955
- [4] Bhaduri, D, Kuar AS, Sarkar S, Biswa SK, Mitra S. Electro discharge machining of titanium nitride-aluminium oxide composite for optimum process criteria yield. Materials and Manufacturing Processes 2009; 24: 1312–1320.
- [5] Seo YW, Kim D, Ramulu M. Electrical discharge machining of functionally graded 15–35 vol% SiCp/Al Composites. Materials and Manufacturing Processes 2006; 21 (5): 479–487. Doi: 10.1080/10426910500471482

- [6] Chakravorty R, Kumar Gauri S, Chakraborty S. Optimization of correlated responses of EDM process. *Materials and Manufacturing Processes* 2012; 27: 337–347. Doi: 10.1080/10426914.2011.577875
- [7] Rajurkar KP, Yu ZY. 3D micro-EDM using CAD/CAM. *CIRP Annals–Manufacturing Technology* 2000; 49(1): 127-130. Doi:10.1016/S0007-8506(07)62911-4
- [8] Pandey A, Singh S. Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review. *International Journal of Engineering Science and Technology* 2010; 2(6): 2172–2191
- [9] Medellin HI, DeLange DF, Morales J, Flores A. Experimental study on electro discharge machining in water of D2 tool steel using two different lectrode materials. *Proc.Inst.Mech.Eng.,PartB:J.Eng.Manuf* 2009; 223(11): 1423–1430. Doi:10.1243/09544054JEM1573
- [10] Yan BH, Tsai HC, Huang FY. The effect in EDM of a dielectric of aurea solution in water on modifying the surface of titanium. *Int. J. Mach.Tools Manuf* 2005; 45: 194–200. Doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.07.006
- [11] Chow HM, Yan BH, Huang FY, Hung JC. Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of Titanium alloy using electro-discharge machining. *J.Mater.Process Technol* 2000;101: 95–103. Doi:10.1016/S0924-0136(99)00458-6
- [12] Altuntaş G, Kaplan ÖF, Bostan B. Investigation of the Effect of Tempering and Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of Boron Steels. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 2023; 11(2): 300-308. Doi: 10.29109/gujsc.1271368
- [13] Reitz W, Pendray J. Cryo-processing of materials: A review of current status, *Journal of materials and Manufacturing process* 2001; 16(6): 829-840. Doi:10.1081/AMP-100108702
- [14] Altuntaş G, Altuntaş O, Bostan B. Evaluation of the Effect of Shallow Cryogenic Treatment on Tribological Properties and Microstructure of High Manganese Steel. *International Journal of Metalcasting* 2023; 1-12. Doi: 10.1007/s40962-023-01131-5
- [15] Altuntaş, G., Özdemir, A. T., & Bostan, B. A survey of the effect of cryogenic treatment and natural ageing on structural changes and second-phase precipitation in Al–Zn–Mg–Cu alloy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2023; 148(20):10713-10725. Doi:10.1007/s10973-023-12414-8
- [16] Zhirafar S, Rezaeian A, Pugh M. Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel. *J. Mater. Process. Technol* 2007; 186 (1): 298– 303. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.046
- [17] Yong AYL, Seah KHW, Rahman M. Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide tools in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2006; 46(15): 2051–2056. Doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.01.002
- [18] Seah KHW, Rahman M, Yong KH. Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide cutting tool inserts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B–Journal of Engineering Manufacture* 217 (1) (2003) 29–43. Doi:10.1243/095440503762502260
- [19] Nalbant M, Yıldız Y. Effect of cryogenic cooling in milling process of AISI 304 stainless steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2011; 21(1): 72-79. Doi:10.1016/S1003-6326(11)60680-8
- [20] Sing A, Grover NK. Wear Properties of Cryogenic Treated Electrodes on Machining Of En-31. *Materials Today: Proceedings* 22015; 2: 1406 – 1413. Doi:10.1016/j.matpr.2015.07.060
- [21] Kumar A, Maheshwari S, Sharma C, Beri N. Machining Efficiency Evaluation of Cryogenically Treated Copper Electrode in Additive Mixed EDM. *Materials and Manufacturing Processes* 2012; 27(10): 1051–1058. Doi:10.1080/10426914.2011.654151
- [22] Jafferson JM, Hariharan P, Machining performance of cryogenically treated electrodes in micro electric discharge machining: a comparative study. *Mater Manuf. Process* 2013; 28(4): 397–402. Doi:10.1080/10426914.2013.763955
- [23] Gill SS, Singh J. Effect of deep cryogenic treatment on machinability of titanium alloy (Ti-6246) in electric discharge drilling, *Mater. Manuf. Process* 2010; 25(6): 378–385. Doi:10.1080/10426910903179914
- [24] Yıldız Y, Sundaram MM, Rajurkar KP, Nalban M. The Effects of Cold and Cryogenic Treatments on the Machinability of Beryllium-Copper Alloy in Electro Discharge Machining. *Proceedings of 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*; 1-3 June 2011; Madison, Wisconsin, USA.
- [25] Naveed A, Kashif I, Khaja M, Rafaqat A, Naif AS. Machinability of titanium alloy through electric discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes* 2019; 34 (1): 93-102 Doi: 0.1080/10426914.2018.1532092
- [26] S. Dhanabalan, K. Sivakumar, C. Sathya Narayanan. *Journal of Engineering Science and Technology* 2015; 10 (1): 72-80
- [27] Kumar S, Batish A, Sing, Singh T P. A hybrid Taguchi-artificial neural network approach to predict surface roughness during electric discharge machining of titanium alloys. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2014; 28: 2831-2844.
- [28] Datta S, Biswal BB, Mahapatra SS. Electrical discharge machining of Inconel 825 using cryogenically treated copper electrode: emphasis on surface integrity and metallurgical characteristics. *Journal of Manufacturing Processes* 2017; 26: 188-202.

- [29] Govindan P, Joshi Suhas S. Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2010; 50.5: 431-443. Doi: 10.1016/j.ijmachtools.2010.02.004
- [30] Dave HK, Mathai VJ, Desai KP, Raval HK. Studies on quality of microholes generated on Al 1100 using micro-electro-discharge machining process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2015, 76: 127-140. Doi: 10.1007/s00170-013-5542-4
- [31] Kalyon A. Elektro Erozyon ile İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü ve İş Parçası İşleme Hızının Alüminyum Alaşımı İçin Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 2019; 21(62): 595-605. Doi:10.21205/deufmd.2019216223
- [32] Isaak CJ, Reitz W. The effects of cryogenic treatment on the thermal conductivity of GRCo-84. *Mater Manuf Processes* 2008;23(1):82-91. Doi:10.1080/10426910701524626
- [33] Kalsi NS, Sehgal R, Sharma VS. Cryogenic treatment of tool materials: a review. *Mater Manuf Processes* 2010; 25(10): 1077-100. Doi:10.1080/10426911003720862
- [34] Manivannan R, Kumar MP. Multi-response optimization of Micro-EDM process parameters on AISI304 steel using TOPSIS. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2016; 30 (1): 137-144. Doi: 10.1007/s12206-015-1217-4