



## **Elektro Erozyon ile İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü ve İş Parçası İşleme Hızının Alüminyum Alaşımı İçin Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu**

### **Optimization of Surface Roughness and Material Removal Rate for Aluminum Alloy by Taguchi Technique in Electro Discharge Machining**

**Ali Kalyon** <sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Karabük, TÜRKİYE  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [alikalyon@karabuk.edu.tr](mailto:alikalyon@karabuk.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 20.12.2018  
Kabul Tarihi / Accepted: 08.01.2019

DOI:10.21205/deufmd.2019216223  
Araştırma Makalesi/Research Article

*Atıf şekli/ How to cite: KALYON, A. (2019). Elektro Erozyon ile İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü ve İş Parçası İşleme Hızının Alüminyum Alaşımı İçin Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu. DEUFMD, 21(62), 595-605.*

#### **Öz**

Bu çalışmada farklı elektrot malzemeleri kullanarak alüminyum 6082 malzemesinin elektro erozyon tezgahında işlenebilirliği incelenmiştir. İşleme parametrelerine bağlı olarak iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve iş parçası işleme hızı araştırılarak optimum işleme şartları tespit edilmiştir. Deneyler Taguchi  $L_{18}$  dikey dizilimine göre yapılmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü oranları, grafikler ve regresyon analizi kullanılmıştır. Taguchi optimizasyonu ile, optimum yüzey pürüzlülüğü ve iş parçası işleme hızı değerleri belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyeler  $A_1B_1C_1$ , iş parçası işleme hızı için optimum seviyeler  $A_2B_3C_3$  deney şartı olarak bulunmuştur. Kontrol faktörlerinin deneysel çıktılara etkisi ANOVA kullanılarak hesaplanmıştır. ANOVA analizi sonuçlarına göre, boşalım akımının yüzey pürüzlülüğüne %90,09 ve iş parçası işleme hızına % 95,54 oranında etkili olduğu bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü ve iş parçası işleme hızı için doğrulama deney sonuçlarının güven aralığı içinde yer aldığı bulunmuştur. Çalışma sonucunda Taguchi metodu ile 0.05 anlamlılık düzeyinde yapılan optimizasyon çalışmasının başarılı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** EEI, Bakır, Grafit, Taguchi, ANOVA, Regresyon

#### **Abstract**

In this study, the machinability of aluminium 6082 material in electro discharge machine was investigated with different electrode materials. According to the processing parameters, optimum processing conditions were determined by investigating workpiece surface roughness and workpiece processing speed. Experiments were carried out according to the Taguchi  $L_{18}$  orthogonal arrays. In the evaluation of the results, signal/noise ratios, graphs and regression analysis were used. With Taguchi optimization, optimum surface roughness and material removal rate are determined. Optimum levels for surface roughness  $A_1B_1C_1$ , for material removal rate  $A_2B_3C_3$  test conditions were found. The effect of control factors on experimental output was calculated using ANOVA. According to ANOVA analysis, discharge current was found to be effective at 90,09% on surface roughness and at 95,54% on material removal rate. The results of the verification experiment for surface roughness

and material removal rate were found to be within confidence interval values. As a result of the study, it was observed that the optimization study performed with Taguchi method at 0.05 significance level was successful

**Keywords:** EDM, Copper, Graphite, Taguchi, ANOVA, Regression

## 1. Giriş

Çelikten sonra günümüz endüstrisinde en fazla kullanılan demirdışı malzeme olan alüminyum ve alüminyum alaşımları, endüstriyel malzemeler arasında son keşfedilen metallere biridir. Alüminyum alaşımlarının kullanım alanının yaygınlaşmasında savunma, otomotiv ve havacılık endüstrisinin büyük katkısı olmuştur. Ayrıca sanayi, inşaat ve yardımcı imalat endüstrilerinde en çok uygulama alanı bulan ve kabul edilen yapısal, mühendislik malzemelerinden birisi alüminyum ve alaşımlarıdır. Önemli alüminyum özellikleri, hafiflik, üstün yansıtıcı görünüm, yüksek mukavemet ve ağırlık oranı, birçok ortamda mükemmel korozyon direnci, maliyet etkinliği, iyi termal ve elektriksel iletkenlikler, iyi çarpışma dayanıklılığı, geri dönüştürülebilirlik ve şekillendirilebilirlik [1,2].

Günümüzde kullanılan yüksek mukavemetli malzemeler, çok küçük işleme alanlarında çalışma gerektiren küçük ve kırılabilir parçalar, karmaşık geometrilerin işlenmesinde ortaya çıkan zorluklar gibi nedenlerden dolayı yeni üretim teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçları gidermek amacıyla ortaya çıkan alışılmamış imalat yöntemleri klasik talaş kaldırma yöntemlerinin tersine iş parçası ve takım arasında mekanik ve ısıl gerilimler gibi istenmeyen sonuçlar doğuran direk bir temas oluşturmadan enerji transferi yoluyla parçaları işlemektedir. Alışılmamış imalat yöntemleri, direk temas gerektirmeyen çalışma ortamından dolayı kullanılan fikstürlerin nispeten basit olması, geleneksel yöntemlerle ekonomik olarak işlenemeyecek parçaların yüksek kaliteli ve düşük maliyetli işlenmesini sağlaması nedeni ile hızla yaygınlaşmakta ve konvansiyonel talaş imalat yöntemlerinin yerini almaktadır [3,4].

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), alışılmamış imalat yöntemleri arasında endüstride en yaygın olarak kullanılan ve elektriksel iletkenliğe sahip çeşitli iş parçalarını işlemede başarı ile uygulanan ısıl elektriksel bir tekniktir [5]. EEİ, elektriksel iletken iş parçası ile elektriksel iletken takım arasında meydana gelen ardışık kıvılcıkların iş parçasını aşındırması ilkesine

dayanmaktadır. Bu elektriksel boşalmalar büyük miktarda ısı oluşturur ve bölgesel olarak iş parçasının ergimesine ve buharlaşmasına neden olur. İşleme esnasında, takım ve iş parçası iletken olmayan dielektrik sıvı içerisinde gömülmüş durumdadır. İş parçası ve takım arasındaki potansiyel fark yeteri kadar yüksek olduğunda, takım ile iş parçasının birbirine en yakın olduğu noktada dielektrik sıvı iyonlaşır ve geçici bir kıvılcım boşalımı olur. Bu boşalım iş parçasından küçük bir miktar parçayı ergitir ve buharlaştırır [6].

EEİ'nin en önemli üstünlüğü işleme performansının iş parçasının mekanik özelliklerinden bağımsız olması ve iş parçası ile elektrotun birbirine temas etmediğinden herhangi bir kesme kuvvetinin söz konusu olmamasıdır [7]. Bu nedenle sert, kırılabilir, yüksek mukavemetli ve yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin işlenmesinde ekonomik bir yöntemdir. EEİ yöntemi özellikle pres döküm kalıpları, soğuk şekillendirme kalıpları, dövme kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, kesme ve ezme kalıpları, toz sıkıştırma kalıpları ve takım imalatında kullanılmaktadır [5].

EEİ ile işlemede işleme parametreleri ve elektrot seçimi iş parçasının işlenebilirliğini önemli oranda etkilemektedir. Uygun işleme parametrelerinin seçimi ve doğru elektrot kullanımı iş parçası yüzey pürüzlülüğünü ( $R_a$ ), iş parçası işleme hızını ( $\dot{M}$ ) direkt olarak etkilemektedir. Payal ve arkadaşları deneysel çalışmalarında takım çeliğinin elektro erozyon yöntemi kullanılarak işlenmesinde en yüksek  $\dot{M}$  değerlerini bakır elektrot ile elde ettiklerini belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda en düşük  $R_a$  değerinin pirinç elektrotun kullanıldığı deney şartında elde edildiğini açıklamışlardır [8]. Diğer bir çalışmada Lee ve Li  $\dot{M}$ 'nin boşalım akımının artmasıyla arttığını fakat boşalım akımının artmasının yüzey pürüzlülüğünü negatif olarak etkilediğini belirtmişlerdir [9]. Guu soğuk iş takım çeliğini bakır elektrot ile işlediği çalışmalarında boşalım akımı ve vurum süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde negatif etkisi olduğunu belirtmişlerdir [10]. Raghuraman ve arkadaşları çalışmalarında optimizasyon tekniklerini kullanarak yüzey

pürüzlülüğü ve İİH için optimum işleme parametrelerini belirlemişlerdir [11]. Optimizasyon tekniğinin kullanıldığı diğer bir çalışmada boşalım akımı ve bekleme süresinin işlenebilirlik parametreleri üzerinde önemli etkileri olduğu belirtilmiştir [12]. Taguchi metodunun kullanıldığı bir başka çalışmada Lin ve arkadaşları çalışmalarını ANOVA analizi ile desteklemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda boşalım akımı ve vuruş süresinin İİH değerini arttırdığını fakat yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediğini ifade etmişlerdir [13]. Literatürde birçok çalışmada deney maliyetlerini düşürmek ve ürün kalitesini arttırmak için optimizasyon yöntemi kullanıldığı görülmektedir.

EEİ tekniğinde parametrelerinin ve parametrelere ait seviyelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Taguchi tekniği işleme parametrelerini optimize etmede sıklıkla kullanılan bir tekniktir. ANOVA analizi ile de parametrelerin işlem çıktıları üzerindeki önem seviyeleri belirlenebilmektedir. Literatürde demirdışı alaşımların elektro erozyon yöntemi ile işlenebilirliğinin araştırılması ilgili olarak sınırlı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada bu amaçla endüstriyel alanda yaygın kullanım alanı olan alüminyumun 6082 T-651 alaşımının, literatürde görülen EEİ tekniği ile işlenebilirliği üzerine olan eksikliğini gidermek için bakır ve grafit elektrotlar kullanılarak işlenebilirliği araştırılmıştır. Taguchi optimizasyon çalışması yapılarak işleme parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Deney sonuçları grafikler yardımıyla yorumlanarak işleme parametrelerinin  $R_a$  ve İİH üzerindeki etkileri incelenmiştir. ANOVA analizi ile işleme parametrelerinin  $R_a$  ve İİH üzerindeki etki seviyeleri belirlenmiştir. Regresyon analizi gerçekleştirilerek  $R_a$  ve İİH için tahmin modeli oluşturulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot

Deneyel çalışmada iş parçası malzemesi olarak alüminyum 6082-T651 alaşımı, elektrot malzemesi olarak elektrolitik bakır ve grafit kullanılmıştır. İş parçası ve elektrot ticari olarak temin edilmiştir. Tablo 1'de iş parçasına ait kimyasal içerik gösterilmektedir. Tablo 2'de elektrotlara ait fiziksel özellikler verilmektedir. Elektro erozyon deneyleri Furkan EDM M25A tipi tezgahta yapılmıştır. Deneyler sırasında dielektrik ortam sıvısı olarak gaz yağı kullanılmış olup 0.4 basınçla yanal püskürtme yapılmıştır. İşleme derinliği deneysel çalışmaların tümünde 1 mm olarak

uygulanmıştır. Her bir deney şartı için elektrotlar ayrı ayrı hazırlanmıştır. Elektrotların işleme yapacak yüzeyleri 200'lük zımparadan 1200'lük grid zımparaya kadar zımparalanarak işleme hazır duruma getirilmiştir.

**Tablo 1.** Al 6082-T651 iş parçasına ait kimyasal kompozisyon.

Element	Ağırlık (%)
Si	1.02
Fe	0.23
Cu	0.052
Mn	0.64
Mg	0.69
Cr	0.066
Zn	0.033
Ti	0.048
Al	97.2

**Tablo 2.** Elektrotların fiziksel özellikleri.

Özellikler	Birim	Grafit	Bakır
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	1,85	8,92
Ergime noktası	°C	3350	1083
Elektriksel direnç	μΩcm	1100	9
Isıl iletkenlik	W/mK	116	391
Sertlik	HB	10	100

Deneyel çalışma sonunda işlenen yüzeyelerin  $R_a$  ölçümlerinde Mitutoyo marka SJ 410 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. İşlenen yüzeylerden toplam üç farklı bölgeden ölçüm yapılmıştır. Ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. İş parçası işleme hızı değeri Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{V}H = \frac{\text{İş parçası toplam aşınma hacmi (mm}^3\text{)}}{\text{Toplam işleme süresi (dak)}} \quad (1)$$

Deneyel çalışma Taguchi L<sub>18</sub> dikey dizilimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'te kullanılacak deney değişkenleri ve bunlara ait seviyeler görülmektedir. Bu çalışmada, iki farklı elektrot, üç farklı vuruş süresi ve üç farklı boşalım akımı değerleri kontrol faktörleri olarak kullanılmıştır. Elektrot olarak bakır ve grafit, boşalım akımı için sırasıyla 6, 12, 25 amper (A)

seviyeleri ve vurum süresi için 50, 100, 200 mikrosaniye ( $\mu\text{sn}$ ) belirlenmiştir. Bekleme süresi 200  $\mu\text{sn}$  kullanılmıştır. Tablo 4'te Minitab paket programı yardımıyla belirlenen deney değişkenlerinin matrise uygun olarak atandığı deney tasarımı görülmektedir.

**Tablo 3.** Kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Faktör	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Elektrot malzemesi	-	Grafit	Bakır	
Vurum süresi	$\mu\text{sn}$	50	100	200
Boşalım akım	A	6	12	25

**Tablo 4.** Taguchi  $L_{18}$  dikey dizilimi.

	Deney	Elektrot malzemesi	Boşalım Akımı (A)	Vurum Süresi ( $\mu\text{sn}$ )
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	Bakır	6	50
2	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	Bakır	6	100
3	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	Bakır	6	200
4	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	Bakır	12	50
5	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	Bakır	12	100
6	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	Bakır	12	200
7	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	Bakır	25	50
8	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Bakır	25	100
9	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	Bakır	25	200
10	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	Grafit	6	50
11	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	Grafit	6	100
12	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	Grafit	6	200
13	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	Grafit	12	50
14	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	Grafit	12	100
15	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	Grafit	12	200
16	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	Grafit	25	50
17	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Grafit	25	100
18	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	Grafit	25	200

### 3. Bulgular

#### 3.1. Deneysel sonuçların Değerlendirilmesi

Tablo 5'te deneysel çalışma sonucunda elde edilen  $R_a$  ve İİH değerleri gösterilmektedir. Deneysel çalışma sonucunda en düşük  $R_a$  değeri A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> deney şartında 2,51  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. En yüksek  $R_a$  değeri A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub> deney

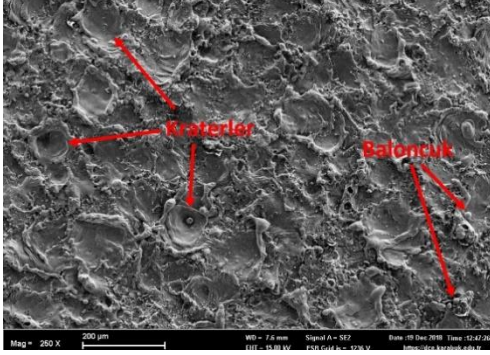
şartında 10,15  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. En düşük İİH 4,11  $\text{mm}^3/\text{dak}$  olarak A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> deney şartında elde edilmiştir. En yüksek İİH değeri 29,88  $\text{mm}^3/\text{dak}$  olarak A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub> deney şartı için hesaplanmıştır.

**Tablo 5.** Deney sonuçları

Deney	Ra ( $\mu\text{m}$ )	İİH ( $\text{mm}^3/\text{dak}$ )	
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	2,51	4,11
2	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	3,08	5,06
3	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	3,61	6,38
4	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	4,44	10,20
5	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	5,38	11,78
6	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	6,15	12,62
7	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	7,78	22,27
8	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	8,55	24,83
9	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	9,16	26,93
10	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	3,23	6,05
11	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	3,60	7,24
12	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	4,42	8,35
13	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	5,12	12,18
14	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	5,88	13,26
15	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	6,86	14,97
16	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	7,90	26,92
17	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	9,24	28,64
18	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	10,15	29,88

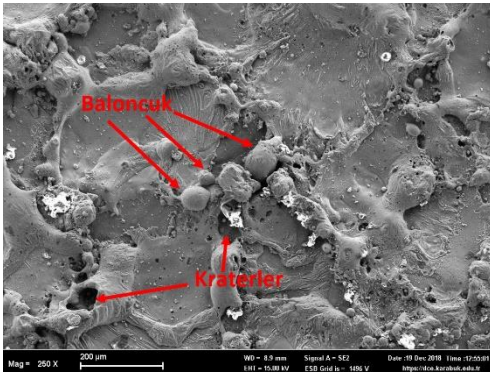
Boşalım akımı arttıkça işleme bölgesine uygulanan enerji miktarı da artmaktadır. Bu durum işleme bölgesinden daha fazla malzemenin ergimesine ve buharlaşmasına neden olmaktadır. EEİ metodunda elektrottan yüzeye gelen arklar düzensiz şekilde iş parçasına vurular yapmaktadır. Bu nedenle yüzeyin topografisi değişken bir forma sahiptir Şekil 1'de 6 A boşalım akımı ve 50  $\mu\text{sn}$  vurum süresinde grafit elektrotla işlenmiş yüzeye ait SEM görüntüsü verilmektedir. Şekil 1'de

yüzeyde ergiyen ve buharlaşan parçacıklardan dolayı oluşan krater ve baloncuklar görülmektedir. Yüzeyde oluşan baloncuklar işleme bölgesinde oluşan yüksek ısıyla beraber ergiyen parçacıkların dielektrik ortam sıvısı ile hızla soğuması sonucu oluşmaktadır [14].



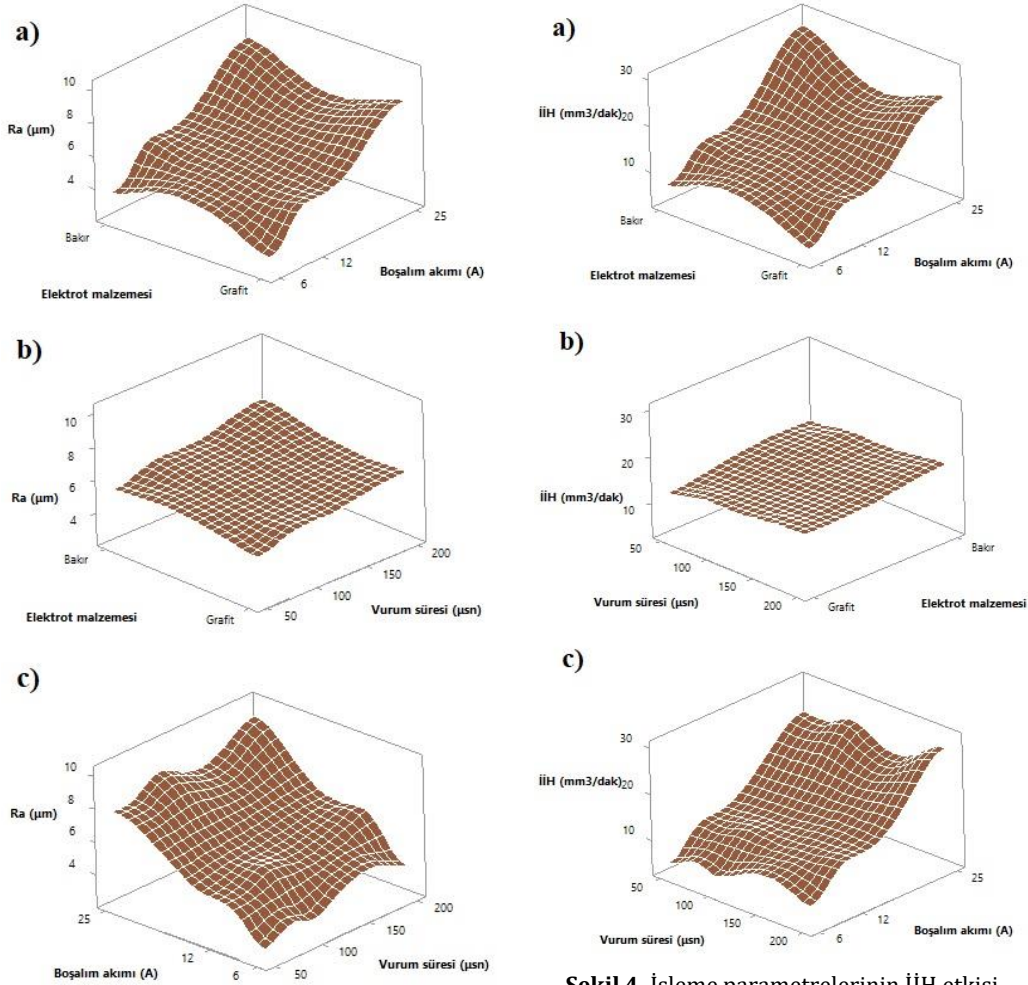
**Şekil 1.** 6 A boşalım akımı ve 50 µsn vurum süresinde grafit elektrotla işlenmiş yüzeye ait SEM görüntüsü

Boşalım akımın artması yüzeyde oluşan krater ve baloncukların boyutlarını da arttırmaktadır. Bu durum işleme sonrası oluşan yüzeyi olumsuz etkilemekte ve  $R_a$  değerini arttırmaktadır [15, 16]. Şekil 2'de 25 A boşalım akımı, 200 µsn vurum süresinde bakır elektrot ile işlenmiş yüzeye ait SEM görüntüsü verilmektedir. Şekil 2'deki krater ve baloncukların Şekil 1'deki krater ve baloncuklara göre daha büyük oldukları görülmektedir. EEI metodunda iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için düşük boşalım akımı kullanılması tavsiye edilmektedir. Fakat düşük boşalım akımı kullanımı, işleme süresinin uzamasına sebep olmaktadır.



**Şekil 2.** 25 A boşalım akımı ve 200 µsn vurum süresinde bakır elektrotla işlenmiş yüzeye ait SEM görüntüsü

Deneysel çalışma sonucunda yapılan ölçümler ve hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar Şekil 3 ve Şekil 4'te verilen grafiklerde gösterilmektedir. Şekil 3.a'da elektrot malzemesinin ve boşalım akımının  $R_a$  değerlerine etkisi gösterilmektedir. Şekilde elektrot malzemesinin  $R_a$  değerlerine etkisinin düşük seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca grafit elektrot ile daha düşük  $R_a$  değerleri elde edildiği görülmektedir. Boşalım akımının artmasının  $R_a$  değerlerini olumsuz etkilediği, boşalım akımı arttıkça  $R_a$  değerlerinin arttığı görülmektedir. Deneysel çalışma sonucunda en düşük  $R_a$  değeri grafit elektrodun kullanıldığı, 6 A boşalım akımı ve 50 µsn vurum süresinde 2,51 µm ölçülmüştür. En yüksek  $R_a$  değeri bakır elektrot ile işleme yapılan boşalım akımının 25 A ve vurum süresinin 200 µsn kullanıldığı deney şartında 10,15 µm olarak elde edilmiştir. Şekil 3.b'de elektrot malzemesinin ve vurum süresinin  $R_a$  üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Vurum süresinin  $R_a$  üzerindeki etkisinin düşük miktarlarda olduğu görülebilmektedir. Şekil 3.c incelendiğinde  $R_a$  değerinin en fazla boşalım akımdan etkilendiği görülmektedir. Vurum süresinin  $R_a$  üzerindeki etkisinin boşalım akımına oranla daha düşük seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır. Her iki parametredeki artış  $R_a$  değerini olumsuz etkilemektedir.



**Şekil 3.** İşleme parametrelerinin  $R_a$  etkisi

Şekil 4'te sırasıyla elektrot malzemesinin, boşalım akımının ve vurum süresinin İİH üzerindeki etkisi gösterilmektedir. EEİ operasyonlarında boşalım akımının artması yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz etki gösterirken, deneysel çalışma sonucunda hesaplanan İİH değerlerine olumlu olarak etki ettiği görülmektedir. Deneysel çalışma sonucunda en düşük İİH değeri grafit elektrotun kullanıldığı 6 A boşalım akımı ve 50 µsn vurum süresi deney şartında 4,11 mm<sup>3</sup>/dak olarak hesaplanmıştır. En yüksek İİH bakır elektrotun kullanıldığı 25 A boşalım akımı ve 200 µsn vurum süresinin uygulandığı deneysel çalışma sonucunda 29,88 mm<sup>3</sup>/dak hesaplanmıştır.

**Şekil 4.** İşleme parametrelerinin İİH etkisi

Şekil 4.a'da elektrot malzemesinin ve boşalım akımının İİH etkisi gösterilmektedir. Grafitte elektrot malzemesinin etkisinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Boşalım akımının artmasıyla beraber İİH değerinin de arttığı görülmektedir. Boşalım akımının artması yüzeye uygulanan ark şiddetini artırarak krater ve çukurların daha derin olmasına neden olmaktadır. Artan boşalım akımı değeriyle beraber yüzeylerde oluşan krater ve çukurların büyüdüğü Şekil 3'te görülmektedir. Krater ve çukurlardan ayrılan büyük parçacıklar dielektrik sıvının yardımı ile işleme bölgesinden uzaklaşarak işlemenin gerçekleşmesini sağlamaktadır [15]. Bu durum İİH yükselmesini sağlamaktadır. Ayrıca iş parçası yüzeyine uygulanan boşalımların daha uzun süreli olması, ergitilen ve buharlaştırılan malzeme miktarını da arttırmaktadır [17].



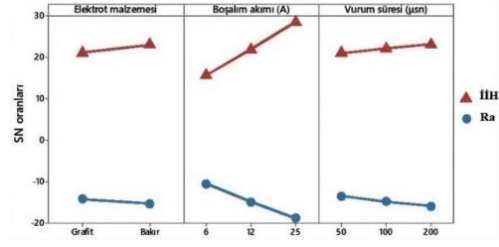
### 3.2. Sinyal – gürültü analizi (S/N)

Belirlenen parametreler ile deneylerin planlanması, elde edilen deney sonuçlarına deney parametrelerinin etki düzeylerinin tespiti ve optimum deney parametrelerinin belirlenmesi Taguchi metodu ile yapılabilmektedir [18]. Taguchi, faktörlere karşı kontrol faktörlerinin seviyelerinin performans karakteristiğini ölçmek için amaç fonksiyonu değerlerini sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürür. S/N oranı, istenilmeyen rastgele gürültü değeri için istenilen sinyal oranı olarak tanımlanmakta olup, deneysel verilerin kalite karakteristiklerini göstermektedir [19]. Elde edilen deney sonuçlarının Taguchi ile değerlendirilmesinde bazı teknikler bulunmaktadır. Bu tekniklerden biri olan “en küçük daha iyidir” bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü için tercih edilmiştir. Çünkü elektro erozyon ile işleme sırasında yüzey pürüzlülüğünün, düşük seviyede olması istenmektedir. Taguchi metodunda kullanılan “en küçük en iyi” için aşağıda verilen Eşitlik 2 kullanılmaktadır. İmalat işleminin kısa sürede tamamlanması için İİH için yüksek değerlerin elde edilmek istendiğinden İİH optimizasyonunda “en büyük en iyi” yaklaşımı kullanılmıştır. Eşitlik 3’te “en büyük en iyi” için kullanılan hesaplama gösterilmektedir [19].

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

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

Ra ve İİH için deneysel sonuçlar kullanılarak hesaplanan S/N oranları Şekil 5’teki ana etki grafiklerinde gösterilmektedir. Ayrıca Ra ve İİH için hesaplanan ortalama S/N oranlarının değişkenlere göre dağılımı Tablo 6’da verilmektedir. Tablo 6’daki S/N oranlarının maksimum ve minimum noktaları incelenecek olursa, Ra ve İİH üzerinde etkili olan en önemli değişkenin boşalım akımı olduğu açıkça görülebilmektedir. Şekil 5 ve Tablo 6 beraber incelendiğinde, Ra ve İİH üzerinde değişkenlerin önem sıralamasının boşalım akımı, vuruş süresi ve elektrot malzemesinin olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar Şekil 3 ve Şekil 4’teki grafikleri desteklediği görülmektedir.



Şekil 5. Ra ve İİH için S/N oranları.

Tablo 6. Optimum işleme parametreleri.

	Seviye	Elektrot malzemesi	Boşalım akımı (A)	Vuruş süresi (µsn)
Ra	1	<b>-14,22</b>	<b>-10,52</b>	<b>-13,52</b>
	2	-15,32	-14,94	-14,81
	3		-18,85	-15,99
	Delta	1,11	8,33	2,47
İİH	1	21,06	15,62	20,89
	2	<b>22,91</b>	21,88	22,03
	3		<b>28,45</b>	<b>23,03</b>
	Delta	1,85	12,83	2,14

\* Koyu renkler optimum değerleri ifade etmektedir.

### 3.3. ANOVA analizi

Deneysel verilerin yorumlanmasında ve parametrelerin etki oranlarının belirlenmesinde varyans analizi (ANOVA) istatistiksel metotları kullanılmaktadır. ANOVA test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistiğe dayalı bir araçtır. ANOVA ile hangi işlem üzerinde hangi faktörlerin ne derecede etkili oldukları istatistiksel olarak ortaya konur. Varyans analizinde amaç, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerlerini ne oranda etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe neden olduklarını ortaya koyabilmektir [20].

İşleme değişkenlerinin Ra ve İİH üzerindeki etki seviyelerini belirlemek amacıyla yapılan ANOVA analizi sonuçları Tablo 7’de gösterilmektedir. Burada, her bir değişkenin sonuçları üzerindeki anlamlılık düzeyin gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT),

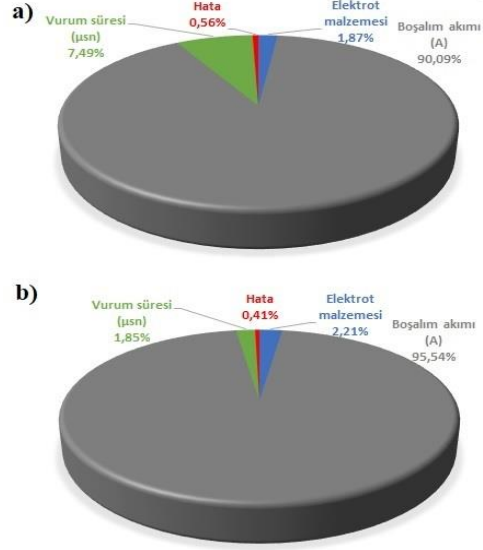
kareler ortalaması (KO), F değerleri ve yüzde katkı oranları (PCR) görülmektedir. ANOVA tablosuna göre,  $P < 0,05$  ise değişkenlerin Ra ve İİH üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilir [21]. Tablo 7'den anlaşılacağı üzere değişkenlerin her birinin Ra ve İİH üzerindeki etkisi önemlidir.

**Tablo 7.** ANOVA analizi sonuçları

Faktörler	SD	KT	KO	F	P
Ra					
Elektrot malzemesi	1	1,827	1,827	40,47	0
Boşalım akımı (A)	2	87,961	43,980	973,98	0
Vurum süresi ( $\mu$ sn)	2	7,309	3,654	80,93	0
Hata	12	0,541	0,045		
Toplam	17	97,639			
İİH					
Elektrot malzemesi	1	30,19	30,186	64,59	0
Boşalım akımı (A)	2	1306,46	653,22	1397,7	0
Vurum süresi ( $\mu$ sn)	2	25,25	12,623	27,01	0
Hata	12	5,61	0,467		
Toplam	17	1367,5			

Şekil 6'da değişkenlerin Ra ve İİH üzerindeki etki oranları grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.a'da boşalım akımının Ra üzerindeki etki oranı %90,09 olarak hesaplanmıştır. Vurum süresinin Ra üzerindeki etki oranının %7,94 olduğu görülmektedir. Elektrot malzemesinin Ra üzerindeki etki oranının çok düşük seviyede (%1,87) olduğu görülmektedir. Şekil 6. b'de değişkenlerin İİH üzerindeki etki oranları gösterilmektedir. Boşalım akımının etki oranı İİH üzerinde oldukça yüksek seviyede olup, %95,54 olarak hesaplanmıştır. Vurum süresi ve elektrot malzemesinin etki oranları sırasıyla, %1,85 ve %2,21 olarak hesaplanmıştır. Vurum

süresi ve elektrot malzemesinin İİH üzerindeki etkilerinin oldukça düşük oldukları görülebilmektedir.



**Şekil 6.** Değişkenlerin etki oranları a) Ra b) İİH

### 3.4. Regresyon analizi

Regresyon analizi deneysel çalışmalarda kontrol faktörleri ile deneysel faktörler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, elektrot malzemesi (EM), boşalım akımı (BA) ve vurum süresi (VS) kontrol faktörü olarak kullanılmıştır. Ra ve İİH deney çalışmadaki işlem çıktılarıdır. Ra ve İİH değerlerini tahmin etmek amacıyla doğrusal regresyon modeli oluşturulmuştur. Ra ve İİH değerleri için oluşturulan doğrusal regresyon modelleri Eşitlik 4 ve 5'te sırasıyla gösterilmektedir.

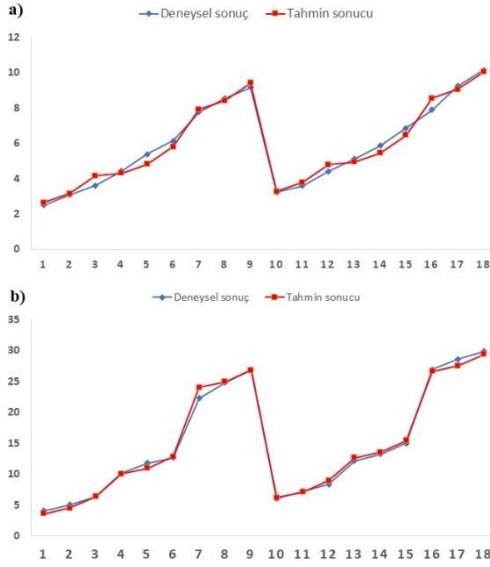
$$R_a = -0,148 + 0,637 x EM + 0,2771 x BA + 0,01002 x VS \quad (4)$$

$$İİH = -6,335 + 2,59 x EM + 1,0743 x BA + VS x 0,01855 \quad (5)$$

Belirleme katsayısı ( $R^2$ ), regresyon denkleminin başarısını ölçen bir istatistiktir. Aynı zamanda  $R^2$  regresyon denkleminin tahmin gücünü yansıtmaktadır. Bu çalışmada Ra için oluşturulan tahmin modelinin belirleme katsayısı 96,75, İİH için oluşturulan tahmin modelinin belirleme katsayısı 99,13'tür. Elde edilen yüksek belirleme katsayısı oluşturulan tahmin modellerinin başarılı



bir şekilde  $R_a$  ve İİH hesaplamaları için kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 7'de deneysel sonuçlar ile tahmin değerleri grafik üzerinde gösterilmektedir. Şekil 7.a'da  $R_a$  için Şekil 7.b'de İİH gösterilen sonuçların birbirlerine oldukça yakın değerler olduğu görülmektedir. Bu durum oluşturulan modellerin  $R_a$  ve İİH tahmini için başarılı bir şekilde kullanılabilceğini göstermektedir.



Şekil 7. Deneysel sonuçlar ve regresyon modeli sonuçları a)  $R_a$  b) İİH

### 3.5. Optimum parametrelerin tahmini

Taguchi tekniği kullanılarak elde edilen optimum işleme parametrelerinin doğruluğunun test edilmesi için doğrulama deneylerinin yapılması gerekmektedir. Doğrulama deneyleri Tablo 6'da  $R_a$  ve İİH için hesaplanan optimum seviyelerdir.  $R_a$  için optimum deney şartı  $A_1B_1C_1$  şeklindedir. İİH için optimum işleme şartları  $A_2B_3C_3$  şeklindedir.  $R_a$  ve İİH için optimum deney şartını hesaplamak için Eşitlik 6 ve 7 kullanılmaktadır.

$$R_{a_{opt}} = (A_1 - T_{R_a}) + (B_1 - T_{R_a}) + (C_1 - T_{R_a}) + T_{R_a} \quad (6)$$

$$\text{İİH}_{opt} = (A_2 - T_{\text{İİH}}) + (B_3 - T_{\text{İİH}}) + (C_3 - T_{\text{İİH}}) + T_{\text{İİH}} \quad (7)$$

Bu eşitliklerde kullanılan  $(A_1, B_1, C_1)$  ve  $(A_2, B_3, C_3)$  değerleri Tablo 8'de gösterilen SN oranlarının ortalama değerleridir.  $T_{R_a}$  ve  $T_{\text{İİH}}$

değerleri ise deney seti sonuçlarının ortalama değerleridir.

Tablo 8. Ortalama SN oranları.

	Seviye	Elektrot malzemesi	Boşalım akımı (A)	Vurum süresi ( $\mu\text{sn}$ )
$R_a$	1	5,629	3,408	5,164
	2	6,267	5,639	5,955
	3		8,797	6,725
	Delta	0,637	5,388	1,561
İİH	1	13,798	6,198	13,622
	2	16,388	12,502	15,135
	3		26,578	16,522
	Delta	2,59	20,38	2,9

Optimum değişken seviyeleri ile yapılan doğrulama deneyi sonuçları Eşitlik 8 ve 9 kullanılarak hesaplanan güven aralığı (CI) değeri dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Eşitliklerde bulunan  $F_{0,05}(1, v_e)$  değeri hata serbestlik derecesi dikkate alınarak F tablosundan alınmaktadır.  $V_e$  hata serbestlik derecesini,  $n_{eff}$  deney tekrar sayısını,  $r$  doğrulama deney sayısını,  $N$  toplam deney sayısını,  $v_T$  değişkenlerin serbestlik derecelerinin toplamını ifade etmektedir.

$$CI = \sqrt{F_{0,05}(1, v_e) V_e \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (8)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1+v_T} \quad (9)$$

Eşitlik 8 ve 9 da kullanılarak hesaplanan güven aralığı değeri  $R_a$  için 0,378 İİH için 1,216 olarak bulunmuştur. %95 güvenlilikte tahmini  $R_a$  ve İİH değerlerine ait güven aralığı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$(R_{a_{opt}} - CI) < R_{a_{deney}} < (R_{a_{opt}} + CI)$$

$$= 1,921 < 2,51 < 2,678$$

$$(\text{İİH}_{opt} - CI) < \text{İİH}_{deney} < (\text{İİH}_{opt} + CI)$$

$$= 28,083 < 29,88 < 30,516$$

Doğrulama deney sonucunda ölçülen  $R_a$  ve İİH değeri güven aralığı değerleri içinde yer aldığı için, Taguchi metodu ile 0,05 anlamlılık düzeyinde yapılan optimizasyon çalışmasının başarılı olduğu görülmüştür.

#### 4. Sonuçlar

Elektro erozyon tezgahında alüminyum 6082-T651 malzemesinin bakır ve grafit elektrotlar kullanılarak işlenebilirliğinin deneysel ve istatistiksel olarak incelendiği çalışmada, elde edilen sonuçlar maddeler halinde belirtilmiştir.

- $R_a$  ve İİH üzerinde en etkili işleme parametresinin boşalım akımı olduğu belirlenmiştir.
- Elektrot malzemesi ve vuruş süresinin  $R_a$  ve İİH üzerindeki etkilerinin düşük olduğu bulunmuştur.
- Grafit elektrot ile daha düşük  $R_a$  değerleri elde edilirken, bakır elektrot ile daha yüksek İİH değerleri elde edilmiştir.
- $R_a$  için optimum işleme parametreleri grafit elektrot ile 6 A boşalım akımı ve 50  $\mu$ sn vuruş süresi olarak belirlenmiştir.
- İİH için optimum işleme parametreleri bakır elektrotun kullanıldığı 25 A boşalım akımı ve 200  $\mu$ sn vuruş süresi olduğu deney şartıdır.
- ANOVA analizi sonucuna göre boşalım akımının  $R_a$  üzerindeki etki oranı %90,09'dur. İİH üzerinde boşalım akımının etki oranı %95,54 olarak bulunmuştur.
- $R_a$  ve İİH için oluşturulan regresyon modellerinin tahmin katsayısı sırası ile 96,75 ve 99,13 bulunmuştur. Yüksek belirleme katsayısı oluşturulan tahmin modellerinin başarılı bir şekilde kullanılabilirliğini göstermektedir.
- Güven aralığı içinde hesaplanan  $R_a$  ve İİH değerleri optimizasyon çalışmasının başarılı olduğunu göstermiştir.

#### Kaynakça

- [1] Chen, W. F., Lui, E. M. 2005. Handbook of Structural Engineering, CRC press, 1768s. DOI: 10.1201/9781420039931.
- [2] Dwight, J. 2002. Aluminium Design and Construction, CRC Press, 295s.
- [3] Youssef, H. A., El-Hofy, H. A. 2008. Machining technology: machine tools and operations, CRC Press, 672s. DOI: 10.1201/9781420043402
- [4] Yao, Y. L., Cheng, G. J., Rajurkar, K. P., Kovacevic, R., Feiner, S., Zhang, W. 2005. Combined Research and Curriculum Development of Nontraditional Manufacturing, European Journal of Engineering Education, Cilt. 30, s. 363-376. DOI: 10.1080/03043790500114581
- [5] Ho, K. H., Newman, S. T. 2003. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM), International Journal of Machine Tools and Manufacture, Cilt 43, s. 1287-1300. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7
- [6] Ergün, Z. E., Çoğun, C. 2006. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) İş Parçası Yüzey Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 21, s.427-441. DOI: 10.17341/GUMMFD.08210
- [7] Çaydaş, U. 2008. Ti6Al4V Alaşımının Elektro Erozyon ve Elektro Kimyasal İşleme Yöntemleriyle İşlenebilirliğinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 195s, Elazığ.
- [8] Payal, H. S., Choudhary, R., Singh, S. 2008. Analysis of Electro Discharge Machined Surfaces of EN-31 Tool Steel, Journal of Scientific and Industrial Research, Cilt 67, s. 1072-1077.
- [9] Lee, S. H., Li, X. P. 2001. Study of the Effect of Machining Parameters on the Machining Characteristics in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide, Journal of Materials Processing Technology, Cilt 115, s. 344-358. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00992-X.
- [10] Guu, Y. H. 2005. AFM Surface Imaging of AISI D2 Tool Steel Machined by the EDM Process, Applied Surface Science, Cilt 242, s. 245-250. DOI: 0.1016/j.apsusc.2004.08.028
- [11] Raghuraman, S., Thirupathi, K., Panneerselvam, T., Santosh, S. 2013. Optimization of EDM Parameters Using Taguchi Method and Grey Relational Analysis For Mild Steel IS 2026, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Cilt 2, s. 3095-3104.
- [12] Gopalakannan, S., Senthilvelan, T., Ranganathan, S. 2013. Statistical Optimization of EDM Parameters on Machining of Aluminium Hybrid Metal Matrix Composite by Applying Taguchi Based Grey Analysis, Journal of Scientific and Industrial Research, Cilt 72, s. 358-365.
- [13] Lin, Y. C., Wang, A. C., Wang, D. A., Chen, C. C. 2009. Machining Performance and Optimizing Machining Parameters of Al2O3-TiC Ceramics Using EDM Based on the Taguchi Method, Materials and Manufacturing Processes, Cilt 24, s. 667-674. DOI: 10.1080/10426910902769285
- [14] Lee, H. T., Hsu, F. C., Tai, T. Y. 2004. Study of Surface Integrity Using the Small Area EDM Process With A Copper-Tungsten Electrode, Materials Science and Engineering: A, Cilt 364, s. 346-356. DOI: 10.1016/j.msea.2003.08.046
- [15] Singh, S., Maheshwari, S., Pandey, P. C. 2004. Some Investigations Into the Electric Discharge Machining of Hardened Tool Steel Using Different Electrode Materials, Journal of Materials Processing Technology, Cilt 142, s. 107-114. DOI: 10.1016/j.jmpt.2003.08.001

Cilt 149, s. 272-277. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.046

- [16] Abhishek, K., Datta, S., Biswal, B. B., Mahapatra, S. S. 2017. Machining Performance Optimization For Electro-Discharge Machining of Inconel 601, 625, 718 and 825: An Integrated Optimization Route Combining Satisfaction Function, Fuzzy Inference System and Taguchi Approach, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Cilt 39, s. 3499-3527. DOI: 10.1007/s40430-016-0659-7.
- [17] Unune, D. R., Mali, H. S. 2016. Artificial Neural Network-Based and Response Surface Methodology-Based Predictive Models For Material Removal Rate and Surface Roughness During Electro-Discharge Diamond Grinding of Inconel 718, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Cilt 230, s. 2082-2091. DOI: doi:10.1177/0954405415619347
- [18] Erdem, V., Belevi, M., Koçhan, C. 2010. Taguchi Metodu ile Plastik Enjeksiyon Parçalarda Çarpılmanın En Aza İndirilmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, Cilt 12 s. 17-29.
- [19] Nas, E., Akıncıoğlu, S. 2019. Kriyojenik İşlem Görmüş Nikel Esaslı Süper Alaşımın Elektro- Erozyon İşleme Performansı Optimizasyonu, Academic Platform Journal of Engineering and Science, Cilt 6, s. 1. DOI: 10.21541/apjes.412042
- [20] Yıldız, Y. 2017. Biyomedikal Uygulamalar İçin Magnezyum-Kalsiyum (Mg-0.8Ca) Alaşımının Dalma Elektro Erozyon ile İşlenmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, Cilt 55, s. 147-168. DOI: 10.21205/deufmd
- [21] Nas, E., Gökkaya, H. 2017 Experimental and Statistical Study on Machinability of the Composite Materials with Metal Matrix Al/B4C/Graphite. Metallurgical and Materials Transactions A, Cilt 48, s. 5059-5067. DOI: 10.1007/s11661-017-4237-0