



Makale / Research Paper

Alüminyum 6082 Alaşımının Pirinç Elektrot İle İşlenebilirliğinin Optimizasyonu

Ali KALYON

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük /TÜRKİYE
alikalyon@karabuk.edu.tr

Received/Geliş: 19.10.2018

Accepted/Kabul: 26.10.2018

Öz: Bu çalışmada Alüminyum 6082 alaşımının dalma erozyon tezgahında pirinç elektrot ile işlenebilirliği incelenmiştir. Deneysel çalışmada Taguchi L₉ dikey dizin deney seti kullanılmıştır. İşleme parametresi olarak boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süreleri kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü, iş parçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızı değerleri incelenmiştir. Optimum kesme parametrelerini belirlemek için Taguchi tekniği kullanılmıştır. Varyans analizi kullanılarak kontrol faktörlerinin deneysel sonuçlara etkisi hesaplanmıştır. Deneysel çalışma sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı üzerinde en etkili parametrenin boşalım akımı olduğu belirlenmiştir. Artan boşalım akım değerinin, ortalama yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediği ve elektrotun daha fazla aşınmasına neden olduğu bulunmuştur. Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan faktörlerin sırasıyla %78.73 ile boşalım akımı, %15.78 ile vurum süresi ve %1.8 ile bekleme süresi olduğu hesaplanmıştır. Vurum süresinin ve bekleme süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde önem seviyesinin olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, Pirinç, Elektro erozyon, Pürüzlülük, Taguchi.

Optimization of the Machinability of Aluminum 6082 Alloy by Brass Electrode

Abstract: In this study, the machinability of Aluminium 6082 alloy with brass electrode was investigated in the electro discharge machine. In the experimental study, Taguchi L₉ orthogonal array experimental set was used. As the processing parameter, discharge current, pulse duration and waiting period were used. As a result of the machinability tests, the average surface roughness, material removal rate and electrode wear rate were investigated. Taguchi technique was used to determine the optimum cutting parameters. The effect of control factors on experimental results was calculated by using variance analysis. As a result of the experimental study, the most effective parameter on average surface roughness, material removal rate and electrode wear rate was determined as discharge current. It was found that the increase in discharge current negatively affects the average surface roughness and causes the electrode to worn more. Factors affecting the average surface roughness were calculated as discharge current 78.73%, pulse duration 15.78% and waiting period 1.8%. It was determined that the pulse duration and waiting period were not significant on the average surface roughness.

Keywords: Aluminum, Brass, Electro erosion, Roughness, Taguchi.

1. Giriş

Hafif metaller grubunda olan alüminyum ve magnezyum alaşımları birçok üstün özelliklerinden dolayı elektronik, havacılık endüstrilerinde sıklıkla kullanılırlar. Alüminyum ve magnezyum alaşımları yüksek mukavemete, düşük yoğunluğa sahip olmakla birlikte üretim yöntemleri kolaydır [1]. Özellikle alüminyum alaşımı yüksek atmosferik korozyon direnci, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği sayesinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir [2]. Alüminyumun sahip olduğu

Bu makaleye atıf yapmak için

Kalyon, A., "Alüminyum 6082 Alaşımının Pirinç Elektrot İle İşlenebilirliğinin Optimizasyonu" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(1); 118-130.

How to cite this article

Kalyon, A., "Optimization of the Machinability of Aluminum 6082 Alloy by Brass Electrode" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2019, 6(1); 118-130.

yüksek mekanik ve korozyon özellikleri, düşük yoğunluk (2.7 g/cm^3) ve yüksek elektrik iletkenliği alüminyumun tercih edilmesini sağlamaktadır. Bahsedilen bu özellikler alüminyum hafif metaller arasında önemli bir yere sahip olmasını sağlamasının yanında başka alaşımlarla çekme dayanımı yüksek malzemeler oluşturabilme özelliği alüminyumun kullanım alanını daha da genişletmektedir. Tüm bu özelliklerinin yanında, farklı teknikler ile üretim olanakları sağlaması, şekillendirilebilme özelliği ve geri dönüşüm kabiliyeti alüminyumun kullanım alanlarının daha da artmasını sağlamıştır [2, 3].

Alışılmamış imalat tekniklerinden olan elektro erozyon ile işleme (EEİ) malzeme sertliğine bağlı kalmaksızın, çok karmaşık geometrileri yüksek boyut ve ölçü hassasiyeti sağlayarak ekonomik elektrot malzemeleri kullanılarak işleyebilme kabiliyetinden dolayı sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. EEİ yönteminin en önemli avantajı, işlenen malzemenin mekanik özelliklerinden bağımsız olması ve kesme kuvvetine ihtiyaç duymamasıdır. Bu sayede, yüksek sertlikte, gevrek ve kesilmesi zor olan malzemeler kolaylıkla istenilen şekillerde ve ölçülerde işlenebilmektedir [4].

EEİ, dielektrik sıvı içerisinde elektrot ve iş parçası çiftinde meydana gelen sıralı kıvılcımlarla malzeme yüzeyinden parçacıkların kaldırılmasını sağlayan elektro-termal bir yöntemdir [5]. EEİ ısınma ve soğuma olaylarının birlikte olduğu karmaşık bir süreç ile gerçekleşmektedir. Boşalım akımı, vurum süresi, bekleme süresi, dielektrik sıvı basıncı, elektrot cinsi ve malzeme özellikleri parametreler malzemede oluşan kraterlerin şeklini belirlemektedir. Oluşan kraterler yüzey yapısını ve işlem etkinliğini doğrudan belirlemektedir [6, 7]. EEİ birçok değişkenin etkili olması optimum parametre belirlemesini zorlaştırmaktadır. Bu sebepten dolayı EEİ işleminde uygun parametre seçimi sıklıkla imalatçılar tarafından tavsiye edilen durumlarda ve operatör tecrübelerine dayalı olarak yapılmaktadır [8].

EEİ'de işlenebilirlik parametrelerinin seçimi işlenen yüzey kalitesini, elektrot aşınmasını ve işleme sürelerini etkilemektedir. İş parçası ve elektrot çifti için uygun belirlenmeyen işleme parametreleri zaman ve maliyet kaybına yol açmaktadır. EEİ bakır elektrot yüksek elektrik iletkenliği sebebiyle sıklıkla kullanılmaktadır. Kiyak ve Çakır çalışmalarında AISI P20 plastik kalıp çeliğini bakır elektrot kullanarak EEİ işlemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrelerin boşalım akımı ve vurum süresi olduğu belirtmişlerdir. Boşalım akımı ve vurum sürelerinin yüksek seviyelerde kullanıldığı deney şartlarında iş parçasının yüzey pürüzlülüğünün olumsuz etkilendiğini ifade etmişlerdir [9]. Guu ve arkadaşları bakır elektrot ile AISI D2 soğuk iş takım çeliğini elektro erozyon tezgahında işlemişlerdir. Boşalım akımı ve vurum süresinin artmasının yüzey pürüzlülük değerinin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir [10]. Bakır, maliyeti açısından değerlendirildiğinde; pirinç, grafit ve diğer elektrik iletkenliği yüksek malzemeler ucuzlukları sebebiyle EEİ tekniğinde elektrot olarak tercih edilebilmektedirler. İşlenen malzeme cinsine ve işlenebilirlik parametrelerine bağlı olarak elektrotların işleme performansları değişebilmektedir. Lee ve Li çalışmalarında bakır, grafit ve bakır-tungsten elektrot kullanmışlardır. Boşalım akımının artmasıyla beraber yüzey pürüzlülüğünün olumsuz etkilendiğini belirttikleri çalışmalarında, bakır elektrot ile daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri elde etmişlerdir [11]. Fred ve Walter çalışmasında AISI P20 takım çeliğini grafit ve bakır elektrotlar ile işlemiştir. Grafit elektrot ile daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri ve işleme hızları elde ettiklerini belirtmişlerdir [12].

Özgedik ve Coğun çalışmalarında işleme parametrelerinin takım aşınmasına etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında bakır elektrot ile çelik iş parçalarını elektro erozyon tezgahında işlemişlerdir. Deneysel çalışmalarının sonucunda boşalım akımının artması ile iş parçası işleme hızı (İİH) ve elektrot aşınma hızının (EAH) arttığını belirtmişlerdir [13]. Singh ve arkadaşları çalışmalarında geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan Superni 600 iş parçasını elektro erozyon tezgahında işlemişlerdir. İİH, EAH ve bağıl aşınma (BA) için Taguchi tekniğini kullanarak optimum işleme parametrelerini belirlemişlerdir [14]. Srivastava ve Pandey yüzey yanıt tekniğini kullanarak işleme parametrelerinin İİH ve EAH etkisini incelemişlerdir. Boşalım akımı ve

vurum sürelerinin İİH ve EAH üzerinde en önemli parametreler olduğunu belirtmişlerdir [15]. Singh ve arkadaşları elektro erozyon tezgahında dielektrik ortam sıvısına titanyum aşındırıcılar ilave ederek deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Bakır elektrotun kullanıldığı çalışmada elektrot polaritesi ve boşalım akımının takım aşınmasında etkili faktörler olduğunu belirtmişlerdir [16]. Özerkan ve Çoğun EEİ metodu kullanarak metal tozu karışımı dielektrik sıvı kullanımında iş parçası yüzey pürüzlülüğü, İİH, EAH , bağıl aşınma (BA), işparçası yüzey sertliği ve mikroyapısı gibi performans çıktılarının işleme parametreleri ile gösterdiği farklılıkları deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler sonucunda vurum süresinin ve dielektrik sıvıya karıştırılan tozların ve konsantrasyonlarının EEİ yönteminin sonuçları üzerinde etkili olduğu bulmuşlardır [17]. Assarzadeh ve Ghoreishi, deneylerinde tungsten karbür-kobalt kompozit malzemeyi bakır elektrot kullanarak elektrot erozyon yöntemi ile işlemişlerdir. Deneylerinde güç seviyesi, ark süresi, çalışma çevrimi, aralık voltajı parametrelerini kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarının sonucunda güç seviyesi ve çalışma çevrimi arttıkça işleme hızının arttığını belirtmişlerdir. Ark süresi azaltıldıkça ve akım düştükçe elektrot aşınma hızının azalmakta olduğunu gözlemlemişlerdir [18]. Khan çalışmasında bakır ve pirinç elektrot ile düşük karbonlu çelik ve alüminyum iş parçalarını işlemiştir. Akım değerinin artmasının iş parçası işleme hızını artırırken, aynı zamanda elektrotun daha fazla aşınmasına neden olduğunu belirtmiştir [19].

Deneysel çalışmalarda optimizasyon tekniği kullanılarak, işleme parametreleri için ideal seviyeler belirlenebilmektedir. Bu amaçla EEİ yönteminde son yıllarda optimizasyon teknikleri, istatistiksel analizler ve tahmin modelleri kullanılarak birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Deney sayısını azaltmaya ve optimum işleme parametrelerini belirlemeye yönelik yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Keskin ve arkadaşları bakır elektrot ile çelik malzemeyi işlemişlerdir. Yüzey pürüzlülük değeri için matematiksel model oluşturdukları çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımı ve vurum süresinden en fazla etkilendiği belirtmişlerdir [20]. Raghuraman ve arkadaşları EEİ için optimizasyon tekniklerini kullanarak, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, iş parçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızı için ideal seviyelerini belirlemişlerdir [21]. Gopalakannan ve arkadaşları alüminyum hibrit metal matrisli malzemenin EEİ için optimizasyon tekniklerini kullanarak ideal işlenebilirlik parametrelerini belirlemişlerdir. Boşalım akımı ve bekleme süresinin işlenebilirlik üzerinde en etkili parametreler olduğunu belirtmişlerdir [22]. Thillaivanan ve arkadaşları EEİ yöntemi için Taguchi tekniği kullanmışlardır. Aynı zamanda yapay sinir ağları kullanılarak deneysel sonuçlar için tahmin modeli oluşturmuşlardır. Çalışmalarının zaman ve maliyet açısından olumlu etkileri olduğunu belirtmişlerdir [23]. Tzeng ve Chen çalışmalarında takım çeliğini, bakır elektrot kullanarak işlemişlerdir. Taguchi deney tasarımında faydalanarak yaptıkları deneysel çalışmada, işleme parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemişlerdir. İşlenebilirlik çıktıları için oluşturdukları tahmin modelinde ile deney sonuçlarına yakın değerler elde etmişlerdir [24].

Optimizasyon teknikleri zaman ve maliyet açısından kazanım sağladığı için, optimizasyon tekniklerinin uygulandığı deneysel çalışmalarda hızlı ve ekonomik bir şekilde işleme parametrelerinin ideal seviyeleri belirlenebilmektedir. Bu amaçla bu çalışmada Taguchi L₉ deney seti kullanılarak alüminyum 6082-T651 malzemesi, ekonomik bir elektrot malzemesi olan pirinç kullanılarak dalma erozyon tezgahında işlenmiştir. İşleme parametreleri olarak kullanılan boşalım akımı, vurum ve bekleme süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri istatistiksel metotlar kullanılarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Deneysel çalışma, FURKAN EDM M25A tipi elektro erozyon tezgahında yapılmıştır. İş parçası olarak Alüminyum 6082-T651 alaşımı ve elektrot olarak pirinç malzeme kullanılmıştır. İş parçası ve elektrot ticari olarak elde edilmiştir. Alüminyum 6082-T651 iş parçasına ait kimyasal kompozisyon Tablo 1'de gösterilmektedir. Deneylerde kullanılan iş parçası malzemesinin boyut

ölçüleri 300x50X15 mm'dir. Ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) ölçümü yapılabilmesi için işleme esnasında elektrot parçasının 3 mm dışında bırakılmıştır. Kullanılan elektrolitik pirinç ölçüleri 15x15x100 mm ölçülerindedir. Tablo 2'de pirinç elektrotta ait kimyasal içerik gösterilmektedir. İşleme sırasında yıkama sıvısı olarak gaz yağı kullanılıp 0.4 bar basınçta yanıl püskürtme uygulanmıştır. İşleme derinliği deney setinin tümünde 1 mm olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo marka SJ 410 model cihaz ile ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değeri ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) olarak ölçülmüştür. İşlenen yüzeylerden toplam üç farklı bölgeden ölçüm yapılmıştır. Ölçülen değerlerin ortalaması alınarak yüzeylere ait yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır.

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

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

Tablo 2. Pirinç elektrotta ait kimyasal kompozisyon

Element	Cu	Al	Fe	Ni	Pb	Sn	Zn
Ağırlık (%)	57.62	0.028	0.236	0.201	3.22	0.25	38.14

Alüminyum 6082-T651 malzemesinin pirinç elektrot ile işlenmesinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelendiği bu çalışmada üç farklı boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresi kullanılmıştır. Taguchi L_9 deney düzeni kullanılarak elektro erozyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'te işlenebilirlik parametreleri ve seviyeleri gösterilmektedir. Boşalım akımı için sırasıyla 6, 12, 25 amper (A) seviyeleri, vurum süresi için 50, 100, 200 mikrosaniye (μ sn) ve bekleme süresi için 200, 400, 800 mikrosaniye (μ sn) seviyeleri belirlenmiştir.

Tablo 3. İşlenebilirlik parametreleri ve seviyeleri

	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Boşalım Akımı (A)	6	12	25
Vurum süresi (μ sn)	50	100	200
Bekleme süresi (μ sn)	200	400	800

Deneyel çalışma sonucunda elde edilen veriler kullanılarak İİH ve EAH hesaplanmıştır. İİH ve EAH eşitlik 1 ve eşitlik 2 kullanarak hesaplanmıştır.

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

$$EAH (mm^3/dak) = \frac{\text{Elektrot toplam aşınma hacmi (mm}^3\text{)}}{\text{Toplam işleme süresi (dak)}} \quad (2)$$

Taguchi tekniği kaliteyi arttıran, maliyetleri düşüren, deney çalışmaları hızlandıran bir uygulamadır. Taguchi tekniği kullanılarak sisteme etki eden parametrelerin etki dereceleri verimli bir şekilde hesaplanabilmektedir [25]. Deneyel çalışmada seçilen üç parametrenin değişik şartları ile Taguchi deneyel tasarım tekniğine göre dokuz farklı işlenebilirlik deney seti (L_9) yapılmıştır. Tablo 4'te deney planı gösterilmektedir.

Taguchi deney uygulaması kullanılarak elde edilen deney sonuçları sinyal gürültü (S/N) oranlarına çevrilmektedir. Deneyel çalışma sonucunda elde edilen değerler S/N oranına çevrilirken yapılacak

çalışmanın amacına göre büyük değer iyi, küçük değer iyi ve nominal değer iyi şeklinde hesaplanmaktadır.

Tablo 4. Taguchi L₉ deney tasarımına göre deney planı

Deney No	Değişkenler	Boşalım Akımı (A)	Vurum Süresi (µsn)	Bekleme Süresi (µsn)
1	A ₁ B ₁ C ₁	6	50	25
2	A ₁ B ₂ C ₂	6	100	200
3	A ₁ B ₃ C ₃	6	200	800
4	A ₂ B ₁ C ₂	12	50	200
5	A ₂ B ₂ C ₃	12	100	800
6	A ₂ B ₃ C ₁	12	200	25
7	A ₃ B ₁ C ₃	25	50	800
8	A ₃ B ₂ C ₁	25	100	25
9	A ₃ B ₃ C ₂	25	200	200

Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğünde ve elektrot aşınma hızında, en düşük değerleri elde edilmek istendiğinde, hesaplamalarda küçük değer iyi şeklinde uygulanmıştır. İş parçası işleme hızında büyük değerler elde etmek amaçlandığı için hesaplamalarda “en büyük en iyi” prensibi kullanılmıştır. Taguchi optimizasyon çalışmasına ek olarak, varyans analizi (ANOVA) ile işleme parametrelerinin ve seviyelerinin deney sonucuna % etki oranları hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu

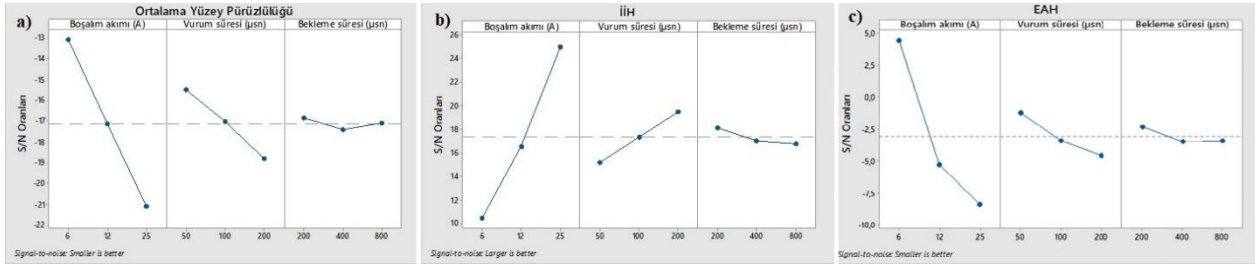
Deneyler sonucunda ölçülen ortalama yüzey pürüzlük değerleri ve deneyler sonucunda hesaplanan İHH, ve EAH değerleri ve bunların S/N oranları Tablo 5’te gösterilmektedir. Tablo 5 incelendiğinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri, İHH ve EAH A₁B₁C₁ kodlu deneyde sırasıyla 3.74 µm, 2.91 mm³/dak ve 0,36 mm³/dak olarak ölçülmüştür. Bu deneyde şartında boşalım akımı 6 A, vurum süresi 50 µsn ve bekleme süresi 200 µsn olarak belirlenmiştir. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değeri, İHH ve EAH A₃B₃C₂ kodlu deneyde sırasıyla 14.67 µm, 22,38 mm³/dak ve 2,95 mm³/dak olarak ölçülmüştür. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerinin ölçüldüğü deney şartında boşalım akımı 25 A, vurum süresi 200 µsn ve bekleme süresi 400 µsn olarak belirlenmiştir.

Tablo 5. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ve S/N oranları.

Deney No	Değişkenler	Ra (µm)	S/N (dB)	İHH (mm ³ /dak)	S/N (dB)	EAH (mm ³ /dak)	S/N (dB)
1	A ₁ B ₁ C ₁	3.74	-11.45	2,91	9,27	0,36	8,87
2	A ₁ B ₂ C ₂	4.81	-13.63	3,4	10,61	0,68	7,95
3	A ₁ B ₃ C ₃	5.12	-14.18	3,76	11,50	0,78	7,53
4	A ₂ B ₁ C ₂	5.78	-15.24	4,74	13,50	1,66	1,83
5	A ₂ B ₂ C ₃	7.31	-17.27	6,43	16,16	1,80	0,72
6	A ₂ B ₃ C ₁	8.84	-18.93	9,85	19,86	2,08	-1,65
7	A ₃ B ₁ C ₃	9.81	-19.83	13,75	22,76	2,32	-8,13
8	A ₃ B ₂ C ₁	10.22	-20.18	18,3	25,24	2,66	-9,06
9	A ₃ B ₃ C ₂	14.67	-23.32	22,38	27,03	2,95	-10,47

Şekil 1’de, ortalama yüzey pürüzlülüğü, İHH ve EAH için işleme parametrelerinin (kontrol faktörleri) S/N oranları verilmektedir. Şekil 1’de verilen S/N oranları, pirinç elektrot ile Al 6082-

T651 alaşımının EEİ elde edilen yüzey pürüzlülüğü, İİH ve EAH üzerindeki en etkili faktörlerin sırasıyla boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresi olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. İşlenebilirlik parametreleri için değişkenlerin S/N oranları a) Ortalama yüzey pürüzlülüğü b) İİH c) EAH

İşlenebilirlik faktörlerinin ve seviyelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 1'de gösterilen S/N oranları Tablo 6'da çizelge olarak verilmiştir. Tablo 6'da verilen bu değerler, faktörlerin her bir seviyesinin, ortalama yüzey pürüzlülüğü, İİH ve EAH değişimi üzerindeki etkisini göstermektedir. En etkili faktör ve seviyeler koyu olarak belirtilmiştir. Taguchi metodu sonucunda, ortalama yüzey pürüzlülüğü için bulunan en etkili faktörler ve seviyeler, boşalım akımı (1), vurum süresi (1), bekleme süresi (1) olduğu anlaşılmaktadır. İİH için en etkili faktör ve seviyeler boşalım akımı (3), vurum süresi (3), bekleme süresi (1) ve EAH için en etkili faktör ve seviyeler boşalım akımı (1), vurum süresi (1), bekleme süresi (1) şeklindedir.

Tablo 6. Ortalama yüzey pürüzlülüğü faktörleri için S/N oranları.

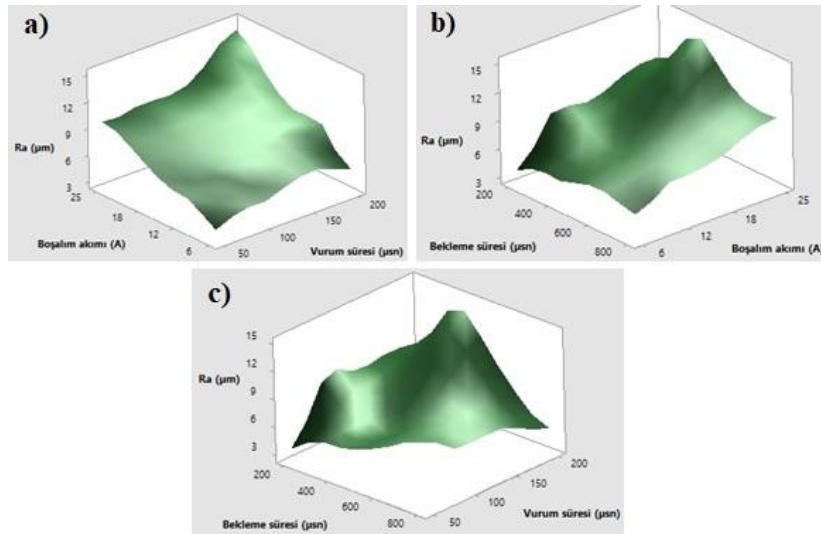
Ortalama yüzey pürüzlülüğü faktörleri için S/N oranları			
Seviye	Boşalım akımı (A)	Vurum süresi (µsn)	Bekleme süresi (µsn)
1	-13,09	-15,51	-16,86
2	-17,15	-17,03	-17,40
3	-21,12	-18,82	-17,10
Delta	8,02	3,30	0,54
İş parçası işleme hızı faktörleri için S/N oranları			
Seviye	Boşalım akımı (A)	Vurum süresi (µsn)	Bekleme süresi (µsn)
1	3,355	7,132	10,352
2	7,004	9,375	10,204
3	18,177	12,029	7,980
Delta	14,821	4,896	2,373
Elektrot aşınma hızı faktörleri için S/N oranları			
Seviye	Boşalım akımı (A)	Vurum süresi (µsn)	Bekleme süresi (µsn)
1	4.489	-1.251	-2.300
2	-5.290	-3.418	-3.483
3	-8.401	-4.533	-3.419
Delta	12.890	3.282	1.183

Şekil 2.a'da boşalım akımı ve vurum süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde vurum süresinin artması ortalama yüzey pürüzlülüğünde artışlara neden olduğu görülmektedir. Fakat bu etkinin düşük miktarda olduğu görülmektedir. Boşalım akımının artmasının ortalama yüzey pürüzlülüğ değerini arttırdığı görülmektedir. Bunun

sebebi, boşalım akımının artmasıyla vurumun boşalım enerjisi de artmaktadır, bu durum iş parçasından daha fazla malzeme kopmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda iş parçası yüzeyinde daha büyük kraterler oluşmasına neden olmaktadır [26].

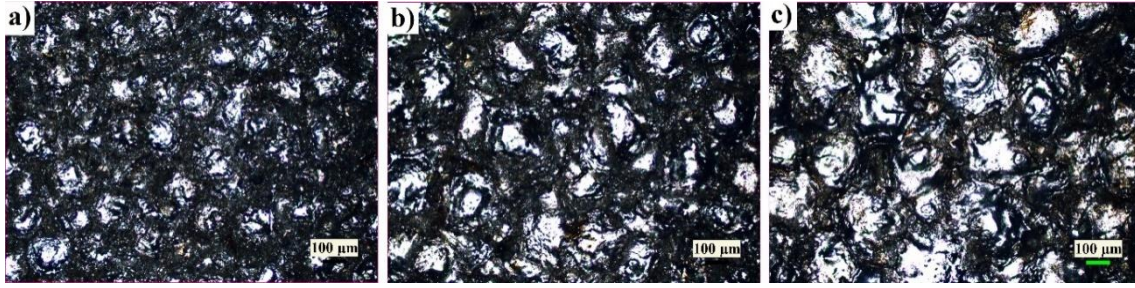
Şekil 2.b'de boşalım akımı ve bekleme süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde bekleme süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü boşalım akımının artmasıyla beraber arttığı görülmektedir. Bekleme süresi iki vurum süresi arasında geçen zamandır. Bekleme süresinin dielektrik ortam sıvısının akışı ile kopan parçacıkların ortamdan uzaklaştırılması ve işleme bölgesinde oluşan ısının ortamdan uzaklaştırılmasında olumlu etkisi vardır. Mevcut çalışmada işlenen yüzey alanı 180 mm^3 'tür. Bekleme süresinin en düşük seviyesi olan $200 \mu\text{sn}$ olduğu durumda dielektrik ortam sıvısının kopan parçacıkları başarılı bir şekilde ortamdan uzaklaştırmış ve de soğutma görevini başarılı bir şekilde yapmıştır. Bu çalışmada asgari bekleme süresinin yeterli olduğu anlaşılmıştır. Bekleme süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin düşük olduğu için, işlenebilirlik çalışmalarında düşük bekleme seviyeleri seçilerek işleme süreleri kısaltılabilir.

Şekil 2.c'de vurum süresi ve bekleme süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri gösterilmektedir. Şekil 2.a ve Şekil 2.b göz önünde bulundurularak Şekil 2.c incelendiğinde bekleme süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi olmadığı söylenebilir. Vurum süresinin bekleme süresi ile kıyaslandığında, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Şekil 2.c'de bekleme süresine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünde görülen artışlar, boşalım akımının yüksek olduğu deney şartlarıdır.



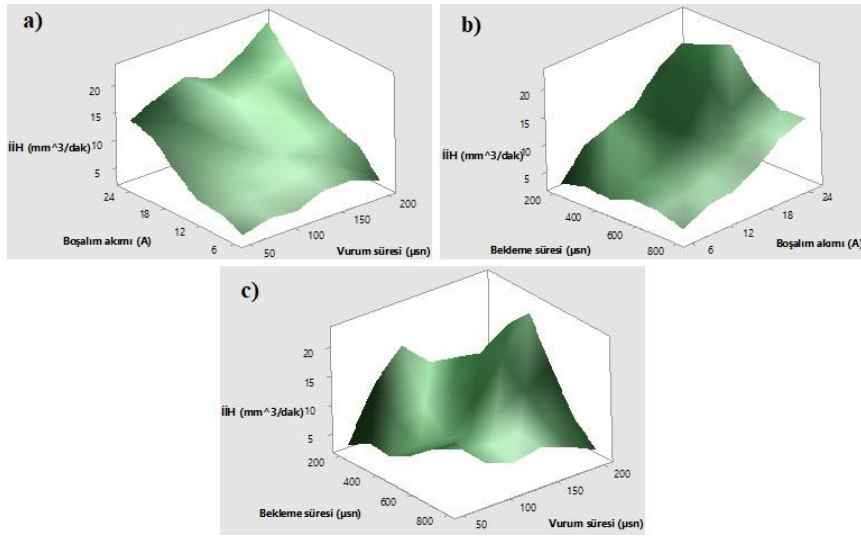
Şekil 2. İşleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri

Şekil 3'te sırasıyla $A_1B_1C_1$, $A_2B_1C_2$ ve $A_3B_1C_3$ kodlu deneylere ait işlenmiş yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Deneylerde sırasıyla 6 A, 12 A ve 25 A boşalım akımı kullanılmıştır. Şekil 3.a'da boşalım akımının 6 A olduğu durumda küçük kraterlerin oluştuğu görülmektedir. Şekil 3.b ve 3.c'de boşalım akımının artmasıyla (12 A, 25 A) beraber işlenen yüzeyde daha büyük kraterlerin oluştuğu görülmektedir. Bu durum ortalama yüzey pürüzlülüğünü olumsuz olarak etkilemektedir. Daha önce yapılan birçok çalışmada iyi bir yüzey kalitesi için düşük akım değerlerinin kullanılmasını önerilmiştir [11, 27, 28].



Şekil 3. İşlenmiş yüzeylere ait optik mikroskop görüntüleri a) 6A b)12A c) 25A

Şekil 4’te işlenebilirlik parametrelerinin İİH etkileri gösterilmektedir. Şekil 4.a’da güç seviyesinin artması iş parçası işlenebilirlik hızını arttırdığını göstermektedir. İş parçası yüzeyinde elektriksel boşalmalar ile meydana gelen krater boyutlarının boşalım enerjisi ile beraber orantılı olarak artması elektro-erozyon ile işleme tekniğinin çalışma şeklidir. Böylece boşalım akımının artması ile artan boşalım enerjisi ile beraber işparçası malzemesi yüzeyinden çok fazla malzeme eritilip buharlaşmaktadır. Boşalım akımının artması kıvılcım şiddetini arttırmaktadır ve şiddeti artan bu kıvılcımlar her vurum süresinde işparçası üzerinden daha büyük parçacıkların kopmasına sebep olmaktadır [29]. Daha önce birçok çalışmada boşalım akımının artışının İİH arttırdığı belirtilmiştir [30–32]. Grafik incelendiğinde ark süresi ve bekleme süresinin İİH üzerinde etkisinin düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.b ve 4.c vurum süresi ve bekleme süresinin iş parçası işleme hızı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir.



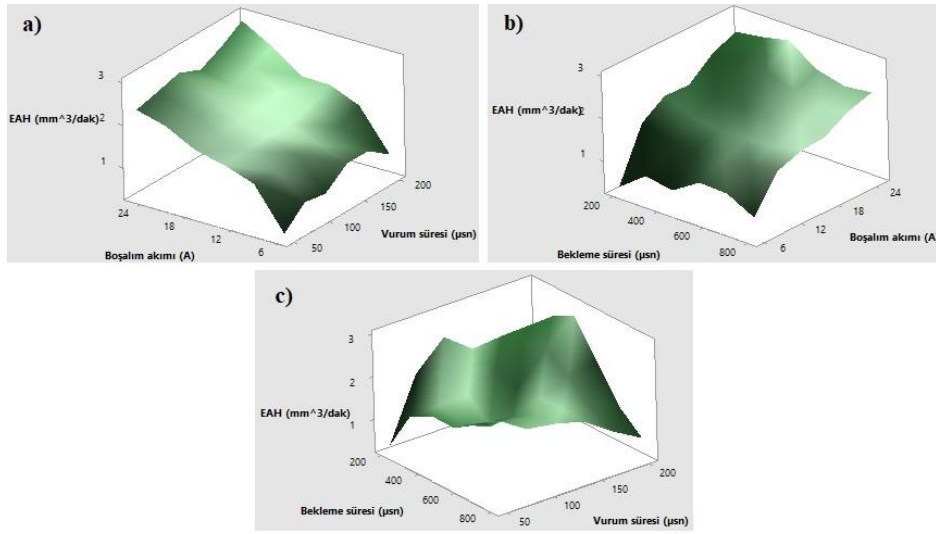
Şekil 4. İşleme parametrelerinin iş parçası işleme hızına

Şekil 5’te işlenebilirlik parametrelerinin EAH etkileri gösterilmektedir. Güç seviyesinin artması elektrot aşınma hızını arttırdığını göstermektedir. EEİ uygulamalarında iş parçası ve elektrot çifti arasında oluşan kıvılcımlar yalnız iş parçasından değil elektrotta da hacim azalmasına neden olmaktadır [29]. Şekil 5.a incelendiğinde güç seviyesininim artışıyla beraber elektrotta gerçekleşen aşınmanın hızlandığı görülmektedir. Şekil 5.b. ve 5.c’de ark süresi ve bekleme süresinin elektrot aşınma hızına etkisinin düşük olduğu görülmektedir.

3.2 Varyans Analizi (ANOVA)

Grafiklerin daha iyi anlaşılabilmesi ve istatistiksel olarak ifade edilebilmesi için ANOVA çalışması yapılmıştır. Tablo 7’de ortalama yüzey pürüzlülüğü ANOVA analizi gösterilmektedir. Tablo 7’de ortalama yüzey pürüzlülüğü, İİH ve EAH değerleri kullanılarak hesaplanan S/N oranları için %95 güven düzeyinde yapılan varyans analizi (ANOVA) gösterilmektedir. Her bir faktör için hesaplanan

P değerinin $P < 0.05$ olması durumunda, ilgili faktörün ortalama yüzey pürüzlülüğü için önemli olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 5. İşleme parametrelerinin elektrot aşınma hızına etkisi

Vurum süresi ve bekleme süresi parametrelerinin P değerleri göz önünde bulundurulduğunda, bu faktörlerin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisiz oldukları görülmektedir.

Tablo 7. İşlenebilirlik Parametrelerinin ANOVA Analizi.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü ANOVA analizi						
Faktörler	SD	KT	KO	F Değeri	P Değeri	PCR (%)
Boşalım akımı (A)	2	74.865	37.4327	21.3	0.045	78.73
Vurum süresi (µsn)	2	15.004	7.5022	4.27	0.190	15.78
Bekleme süresi (µsn)	2	1.710	0.8549	0.49	0.673	1.8
Hata	2	3.515	1.7574			3.7
Toplam	8	95.094				100
İşparçası işleme hızı ANOVA analizi						
Faktörler	SD	KT	KO	F Değeri	P Değeri	PCR (%)
Boşalım akımı (A)	2	10,4027	5,20134	179,29	0,006	96,24
Vurum süresi (µsn)	2	0,2680	0,13401	4,62	0,178	2,48
Bekleme süresi (µsn)	2	0,0806	0,04031	1,39	0,418	0,75
Hata	2	0,0580	0,02901			0,54
Toplam	8	10,8094				100,00
Elektrot aşınma hızı ANOVA analizi						
Faktörler	SD	KT	KO	F Değeri	P Değeri	PCR (%)
Boşalım akımı (A)	2	6.23327	3.11663	7192.23	0.000	94.43
Vurum süresi (µsn)	2	0.34127	0.17063	393.77	0.003	5.17
Bekleme süresi (µsn)	2	0.02580	0.01290	29.77	0.033	0.39
Hata	2	0.00087	0.00043			0.01
Toplam	8	6.60120				100

Tabloda ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan faktörlerin sırasıyla %78.73 ile boşalım akımı, %15.78 ile vurum süresi ve %1.8 ile bekleme süresi olduğu görülmektedir. S/N oranları için yapılan ANOVA analizinde belirleme katsayısı (R^2) %96.3 olarak hesaplanmıştır.

İİH için vurum süresi ve bekleme süresi parametrelerinin P değerleri göz önünde bulundurulduğunda, bu faktörlerin İİH üzerinde etkisiz oldukları görülmektedir. Tabloda İİH üzerinde etkili olan faktörlerin sırasıyla %96.24 ile boşalım akımı, %2.48 ile vurum süresi ve %0.75 ile bekleme süresi olduğu görülmektedir. S/N oranları için yapılan ANOVA analizinde belirleme katsayısı (R^2) %98.68 olarak hesaplanmıştır.

EAH sonuçları için yapılan ANOVA analizinde EAH üzerinde etkili olan faktörlerin sırasıyla %94.43 ile boşalım akımı, %5.17 ile vurum süresi ve %0.39 ile bekleme süresi olduğu görülmektedir. S/N oranları için yapılan ANOVA analizinde belirleme katsayısı (R^2) %99.96 olarak hesaplanmıştır.

3.3 Doğrulama Deneyleri

Taguchi optimizasyon metodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda ortalama yüzey pürüzlülüğü, İİH ve EAH değerlerinin ideal sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar bazen mevcut deney setinin içerisinde bulunabilirken, bazen de deney setinin dışında bir deneysel şartını belirtebilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğü ve EAH için ideal deney şartı $A_1B_1C_1$ kodlu deneydir. Bu deney şartı deney seti içerisinde mevcuttur. İİH için deney seti dışından ideal işlenebilirlik parametreleri $A_3B_3C_1$ deney şartını göstermektedir.

Taguchi tekniğinde, değişken seviyelere ait ideal değerlerin bulunması ve devamında yapılan doğrulama deneylerinde bulunan sonuçlar, ideal değerler aralığında olması gerekmektedir. Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'te hesaplanan güven aralığı (CI) değerleri dikkate alınmaktadır [33].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1;fe} \times V_e \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (3)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + [T_{dof}]} \quad (4)$$

Eşitlik 3'te bulunan alan $F_{\alpha;1;fe}$, α önem seviyesini, fe serbestlik derecesinin hatasını, V_e varyans hatasını, n_{eff} gerçek tekrar sayısını ve r doğrulama deneyi tekrar sayısını ifade etmektedir. Eşitlik 4'te N toplam deney sayısını ve T_{dof} ise serbestlik derecesinin ana faktörlerinin toplamını ifade etmektedir.

Tablo 8. Doğrulama Deneyi Sonuçları

Optimize deney şartı	Doğrulama deneyi sonucu	Tahmin sonucu	Fark	
İİH	$A_3B_3C_1$	22.24	21.538	0.702

Tablo 8'de doğrulama deneyinin sonuçları gösterilmektedir. Ra için ve EAH optimize deney şartı deney setinde olduğu için, Ra ve EAH için doğrulama deneyi yapılmamıştır. İİH için yapılan doğrulama deney şartında 22.24 mm³/dak bulunmuştur. İİH Taguchi tahmin modelinin sonucu 21.538 mm³/dak olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneyi sonucu ile tahmin modeli sonuçlarının birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi optimizasyon çalışmasının başarılı bir şekilde EEİ uygulamasında kullanılabilceğini göstermektedir.

Doğrulama deneyi sonrasında bulunan sonuçlar, yapılan optimizasyon modelinin başarısını göstermektedir. Bu amaçla ideal şartların tahmin edildiği ve hesaplamalar sonucu edilen değerler ile doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen İİH değeri Tablo 8’de gösterilmektedir. Doğrulama deneyi sonuçları incelendiğinde İİH için elde edilen tahmin değerlerinin deneysel sonuçlara yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi EEİ’de Taguchi optimizasyonun başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Al 6082 alaşımı, pirinç elektrot kullanılarak dalma erozyon tezgahında işlenebilirlik özelliklerinin araştırıldığı bu çalışma sonucunda;

- Boşalım akımının ve vurum süresinin artması yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediği belirlenmiştir
- Yüksek boşalım akım değerleri iş parçası işleme hızını arttırmaktadır.
- Boşalım akım değerinin artması elektrotta gerçekleşen aşınmayı da arttırmaktadır.
- Ra, İİH ve EAH sonuçlarını en çok etkileyen parametrenin boşalım akımı olduğu belirlenmiştir.
- ANOVA analizi sonuçlarına göre bekleme süresi, işlenebilirlik üzerindeki etkisi en düşük parametredir.
- Doğru deneyleri sonuçları Taguchi optimizasyon çalışmasının EEİ başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Walsh C., Low J., Wood K., Stevens T., Archer J., Poeton R., Ryder A., "Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys", Transactions of The IMF, 2009, 87: 122–135.
- [2] Xin G., Song X., Zhao G., Hu F., "Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina", Materials Chemistry and Physics, 2006, 97: 132–136.
- [3] Vargel C., "Corrosion of aluminium", **Elsevier**, (2004).
- [4] Tsai C., Yan H., Huang Y., "EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, 2003: 245–252.
- [5] Lee T., Deng J., "Mechanical surface treatments of electro-discharge machined (EDMed) ceramic composite for improved strength and reliability", Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22: 545–550.
- [6] Mohd N., Solomon G., Fuad M., "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47: 1214–1228.
- [7] Kiyak M., Çakır O., "Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel", Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191: 141–144.
- [8] Çaydaş U., Hasçalık A., "Tel erozyon yönteminde işleme parametrelerinin alüminyum alaşımının yüzey yapısına etkisi", Politeknik Dergisi, 2004, 7: 31–36.
- [9] Kiyak M., Çakır O., "Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel", Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191: 141–144.
- [10] Guu Y. H., Hocheng H., Chou C. Y., Deng C. S., "Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel", Materials Science and Engineering A, 2003, 358: 37–43.
- [11] Lee H., Li P., "Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide", Journal of Materials Processing

- Technology, 2001, 115: 344–358.
- [12] Amorim L., Weingaertner L., "The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2007, 29: 366–371.
- [13] Özgedik A., Çoğun C., "An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 27: 488–500 .
- [14] Singh D., Kalia A., Magon B., Sondhi A., "Experimental study of wear ratio on superni-600 (Super Alloy) using powder mixed EDM", *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2017, 5: 7-18 .
- [15] Srivastava V., Pandey M., "Statistical modeling and material removal mechanism of electrical discharge machining process with cryogenically cooled electrode", *Procedia Materials Science*, 2014, 5: 2004–2013.
- [16] Singh P., Lal H., Singh P., "Wear ratio of EN8 Steel and copper electrode in sinking EDM with titanium abrasives suspended dielectric fluid", *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, 2015, 47: 2278–9359.
- [17] Özerkan B., Çoğun C., "Effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining (EDM)", *Gazi University Journal of Science*, 2008, 18: 211–228.
- [18] Assarzadeh S., Ghoreishi M., "Statistical modeling and optimization of process parameters in Electro-Discharge Machining of cobalt-bonded tungsten carbide composite (WC/6%Co)", *Procedia CIRP*, 2013, 6:463–468.
- [19] Khan A., "Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 39: 482–487.
- [20] Keskin Y., Halkacı S., Kızıl M., "An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surface roughness in electrical discharge machining (EDM)", *International Journal For Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 28:1118–1121.
- [21] Raghuraman S., Thirupathi K., Panneerselvam T., Santosh S., "Optimization of EDM parameters using Taguchi method and grey relational analysis for mild steel IS 2026", *International Journal of Innovative Research In Science*, 2013, 2: 3095–3104.
- [22] Gopalakannan S., Senthilvelan T., "Statistical optimization of EDM parameters on machining of aluminum Hybrid Metal Matrix composite by applying Taguchi based Grey analysis", *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2013, 72: 358–365.
- [23] Thillaivanan A., Asokan P., Srinivasan K. N., Saravanan R., "Optimization of operating parameters for EDM process based on the Taguchi method and artificial neural network", *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, 2: 6880–6888.
- [24] Tzeng J., Chen Y., "Optimization of electric discharge machining process using the response surface methodology and genetic algorithm approach", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14: 709–717.
- [25] Özçelik B., Özbay A., "Determination of effect on the mechanical properties of polypropylene product of molding materials using Taguchi method", *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2011, 262: 289–300.
- [26] Çoğun C., Kocabaş B., Özgedik A., "Elektro erozyon ile işlemede (EEİ) işparçası yüzey pürüzlülük profilinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2004, 19: 97–106.
- [27] Shabgard M., Faraji H., Khosrozadeh B., Amini K., Seyedazavvar M., "Experimental investigation into the EDM Process of γ -TiAl", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2014, 38: 38231–239.
- [28] Syed H., Palaniyandi K., "Performance of electrical discharge machining using aluminium powder suspended distilled water", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2012, 36: 195–207.
- [29] Yılmaz V., Özdemir M., Dilipak H., "AISI 1040 çeliğinin elektro erozyon ile işleme

- yöntemiyle delinmesinde işleme parametrelerinin temel performans çıktıları üzerindeki etkilerinin incelenmesi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji, 2015, 3: 417–426.
- [30] Luis J., Puertas I., Villa G., "Material removal rate and electrode wear study on the EDM of silicon carbide, Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164: 889–896.
- [31] Marafona J., Wykes C., "New method of optimising material removal rate using EDM with copper-tungsten electrodes", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 200, 40: 153–164.
- [32] Kung Y., Horng T., Chiang T., "Material removal rate and electrode wear ratio study on the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bonded tungsten carbide", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40: 95–104.
- [33] Şirin E., Şirin Ş., Turgut Y., Korkut İ., "Optimization of surface roughness using the Taguchi method in milling of AISI D2 cold work tool steel", Düzce University Journal of Science & Technology, 2015, 3: 132–144.