



Makale / Research Paper

Bor Alaşımli Çeliklerin Elektro Erozyonla İşleme Parametrelerinin Deneysel Araştırılması

Asım GENÇ^{1a}, İbrahim Baki ŞAHİN^{2b}, H. Bekir ÖZERKAN^{1c}, Levent URTEKİN^{2d}

¹Machinery and Metal Technology, Department, Gazi University, Ankara, TURKIYE

²Department of Mechanical Engineering, Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir, TURKIYE

levent.urtekin@ahievran.edu.tr

Received/Geliş: 25.07.2021

Accepted/Kabul: 26.11.2021

Öz: Bu çalışmada, bor alaşımli çeliğin elektro erozyon ile işleme yöntemiyle işlenebilirliği araştırılmıştır. Deneyler sırasında üç farklı parametre değişken olarak seçilmiş olup (boşalım akımı, vuruş süresi ve vuruş bekleme süresi) işleme parametrelerinin iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) olan etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre İİH, EAH ve Ra boşalım akımının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Vuruş süresinin artması ile İİH ve EAH değerleri artarken, elektrot aşınmasının azaldığı tespit edilmiştir. Her bir işleme seviyesi için ideal işleme parametrelerinin farklı seviyelerde olduğu belirlenmiştir. İş parçası işleme hızı için ideal işleme parametreleri, akım, vuruş süresi ve vuruş bekleme süresi için sırasıyla 12 A, 100 µs ve 50 µs olarak bulunmuştur. EAH için ideal işleme parametreleri, akım için 24 A, vuruş süresi için 100 µs, vuruş bekleme süresi için ise 6 µs olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için ideal işleme parametreleri, akım, vuruş süresi ve vuruş bekleme süresi için sırasıyla 12 A, 50 µs ve 24 µs olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), iş parçası yüzey pürüzlülüğünün ve boşalım akımının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Yine İİH, iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerlerinin vuruş süresinin artmasıyla birlikte artış gösterdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektro erozyon ile işleme, bor alaşımli çelik, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü

Experimental Investigation of Electro Erosion Machining Parameters of Boron Alloy Steels

Abstract: In this study, the machinability of boron alloy steel by electro erosion method was investigated. Three different parameters were chosen as variables during the experiments (discharge current, pulse on-time, and pulse of time) and the effects of machining parameters on material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR), and average surface roughness (Ra) were investigated. According to the experimental results, MRR, EWR, and Ra increased with the increase of discharge current. It was determined that while the MRR and EWR values increased, electrode wear decreased with the increase of the stroke time. The ideal processing parameters for each processing level are at different levels has been specified. Ideal machining parameters for workpiece machining speed were found 12 A, 100 µs, and 50 µs for current, pulse duration, and pulse waiting time, respectively. Ideal processing parameters for EWR were found 24 A for current, 100 µs for pulse duration, and 6 µs for pulse waiting time. Ideal processing parameters for surface roughness were determined as 12 A, 50 µs, and 24 µs for current, pulse duration, and pulse waiting time, respectively. As a result of the experimental studies; material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR) increased with the increase of workpiece surface roughness and discharge current. It was also observed that MRR, workpiece surface roughness values increased with increasing stroke time.

Keywords: Electrical discharge machining, boron alloy steel, material removal rate, electrode wear rate.

Bu makaleye atf yapmak için

Genç A., Şahin İB., Özerkan B., Urtekin L., "Bor Alaşımli Çeliklerin Elektro Erozyonla İşleme Parametrelerinin Deneysel Araştırılması" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 9 (1); 325-334.

How to cite this article

Genç A., Şahin İB., Özerkan B., Urtekin L., "Experimental Investigation of Electro Erosion Machining Parameters of Boron Alloy Steels" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2022, 9 (1); 325-334.

ORCID ID: ^a0000-0002-5267-5312; ^b0000-0003-2200-2691

1. Giriş

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), kesilmesi zor malzemeler için (karbürler, seramikler, sertleştirilmiş çelikler) en yaygın kullanılan geleneksel olmayan imalat işlemlerinden biridir. EEİ, bir dielektrik sıvıya batırılmış takım ve iş parçası arasında kıvılcım olarak bilinen bir dizi elektrik boşalmasının erozyon etkisiyle malzemenin iş parçasından uzaklaştırıldığı bir termo-elektrik işlemdir [1]. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak bu yöntemlerde temel işleme prensibi, bir dielektrik sıvı ortamında takım ve iş parçası arasında temas olmadan meydana gelen elektriksel kıvılcımlar tarafından üretilen ısı enerjisi ile şekillendirilmedir. EEİ yöntemi ile elektriksel iletken, çok yüksek sertlik ve mukavemetli, karmaşık geometrili malzemelerin kolaylıkla işlenebilmesi bu yöntemi modern imalat yöntemleri arasında seçkin bir noktaya getirmiştir [2].

EEİ işlemede, işleme parametreleri ve elektrot seçimi, iş parçasının işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Uygun işleme parametrelerinin seçilmesi ve elektrotların doğru kullanımı, iş parçasının yüzey pürüzlülüğünü (R_a) ve iş parçasının işleme hızını (İHH) doğrudan etkilemektedir. Payal ve arkadaşları, deneysel çalışmalarında, elektro-erozyon yöntemleriyle takım çeliklerini işlerken en yüksek İHH değerinin bakır elektrotlar kullanılarak elde edilebileceğine dikkat çekmişlerdir. Araştırma sonuçları, pirinç elektrotların kullanımında en düşük R_a değerini elde edildiğini göstermektedir [3]. Lee ve arkadaşları; WC iş parçalarında işleme parametrelerinin işleme performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımının, gerilimin ve vurum süresinin artması ile arttığı ancak belli bir dielektrik sıvı basıncı ve vurum ara süresi için ideal değerlerin olduğu belirtilmiştir. [4].

Guu, Honceng ve Processes yaptıkları çalışmada işleme parametrelerini 1, 5 ve 10A, vurum süresini 20, 100, 180 ve 260 μ s, vurum bekleme süresini 20 μ s ve iş parçası devir sayısını 1200, 2200 ve 5000 dev/dak. belirleyerek seçilen parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisini deneysel olarak araştırmışlardır [5].

Gohil ve Puri yaptıkları çalışmada ise; Ti-6Al-4V alaşımının EEİ ile işlenmesi sonucunda yüzey pürüzlülüklerini belirlemişlerdir. Deneysel uygulama sonucunda akımın ve vurum süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkili olduğunu belirlemişlerdir. Akım ve vurum süresi ile doğru orantılı olarak arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin arttığını görmüşlerdir [6]. Choudhary ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; elektro erozyonla işlemede takım polaritesi, boşalım akımı ve vurum süresinin yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir etki oluşturduğu belirtmişlerdir [7]. Matorian ve arkadaşları, deneysel çalışmalarında; yüksek hız çeliğini EEİ yöntemi ile işlemişlerdir. Boşalım akımı, devir sayısı ve vurum süresinin işleme hızını etkileyen en önemli faktörler olduğunu belirlemişlerdir [8]. Kushwaha ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ise; boşalım akımının artmasıyla İİH, EAH (elektrot aşınma hızı) ve R_a değerleri arttığını ifade etmişlerdir [9]. Wang ve arkadaşları bakır elektrot ve gaz yağı dielektrikle yaptıkları deneylerde yüzey pürüzlülüğünün uygulanan akım ve vurum süresi ile arttığını deneysel olarak belirlemişlerdir [10].

Torres vd. yaptıkları çalışmalarda EEİ'de kullanılan parametrelerin özellikle vurum süresi ve boşalım akımının yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu belirtmişlerdir [11]. Vurum süresinin elektrottan iş parçasına doğru gerçekleşen boşalım akım aralığı olup bu sürenin artması iş parçası yüzeyine daha fazla ısı enerjisinin transfer edilmesine neden olmaktadır. Kumar vd. bu olay yükselen vurum sürelerinin yüzey pürüzlülüğünü olumlu yönde etkilemediğini belirtmişlerdir [12]. Hourmand vd. ve Pei vd. yaptıkları araştırmalar sonucunda EEİ tekniğinde önemli sonuçlarının İİH ve EAH olduğunu vurgulamışlardır. İmalat işleminin kısa bir zamanda bitmesi için İİH'nin yüksek olması istenirken, EAH'nin düşük olması istenmektedir. İşleme süreci boyunca daha az aşınan elektrotların daha iyi ölçüsel ve boyutsal doğruluk sağladığı ve yüksek boşalım akımı kullanılmasının EEİ operasyonlarında İİH ve EAH değerlerini artırdığı yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlardır [13,14]. Rahul ve ark. tungsten ve bakır (normal ve kriyojenik işlem görmüş)

elektrotlar kullanılarak EEİ ile titanyum alaşımını (Ti-6Al-4V) işlemişlerdir. Üç farklı elektrot (tungsten, normal bakır ve kriyojenik işlem görmüş bakır) arasından kriyojenik işlem görmüş bakır elektrotun EDM performansı açısından en üstün olduğu ifade etmişlerdir [15]. Perumal ve ark. EEİ parametrelerin titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. EAH için en önemli faktörlerin sırasıyla vurum süresi boşalım akımı ve bundan sonra takım çapı olduğunu belirlemişlerdir [16]. Jiang ve Kunieda yaptıkları araştırmada boşalım akımının artmasıyla malzeme erozyon hacminin arttığı ve yüksek dirençli malzemelerin işlenmesinin kolaylaştığını tespit etmişlerdir [17].

Bu araştırmada, EEİ yöntemi ile aşınma dayanımı ve sertliği oldukça yüksek bor alaşımlı çelik işlenmiştir. Bu çeliklere alaşımlanan bor atomlarının malzemeyi oldukça sertleştirmesinden dolayı talaşlı imalat teknikleri ile şekillendirilmesi güç malzemelerdir. Deneyler sırasında üç farklı parametre değişken olarak seçilmiş olup bu parametreler; boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresidir. İşleme parametrelerinin iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne (R_a) olan etkileri incelenmiştir.

2. Deneysel Metot

2.1. Malzeme Seçimi (İş Parçası/Elektrot)

Deneysel çalışmada iş parçası malzemesi olarak 30x20x10 mm boyutlarında bor alaşımlı çelik kullanılmıştır. Aşağıdaki tablolarda bor katkılı çelik içinde bulunan elementler ağırlıkça verilmiş ve fiziksel özellikleri belirtilmiştir. Tablo 1’de iş parçası malzemesi ağırlık oranına göre element dağılımı verilmiştir. Tablo 2’de ise elektrot ve iş parçasının fiziksel özellikleri verilmiştir. Elektrot olarak ise prizmatik formda (20x10 mm ve %99,99 saflıkta) bakır elektrotlar kullanılmıştır. Tablo 3’te sunulan deneysel parametrelere uygun olarak toplamda 27 adet işlenebilirlik deneyi yapılmıştır.

Tablo 1. İş Parçası malzemesinin % ağırlık oranına göre element

| C | Si | Mn | Ni | P | S | Cr | Mo | V | Nb | Ti | B |
|-----|-----|-----|-----------|-----------|--------|------|------|-------|------|-----|--------|
| 0,1 | 0,3 | 1,2 | 0,01-0,03 | 0,05-0,01 | <0,001 | 0,18 | 0,01 | 0,002 | 0,04 | 0,1 | 0,0001 |

Tablo 2. Elektrot ve iş parçasının fiziksel özellikleri.

| Elektrot Malzemesi | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| Özellikler | Değer | | |
| Çekme mukavemeti (MPa) | 290,28 | | |
| Kopma uzaması (%) | 14,31 | | |
| Sertlik (HB) | 99,64 | | |
| Elektrik iletkenliği (MS/m) | 57,61 | | |
| İş parçası Malzemesi | | | |
| Sertlik (HRC) | Akma Mukavemeti (MPa) | Çekme Mukavemeti (Mpa) | Isıl İletkenlik (W/m-k) |
| 42,7 | 1350 | 172 - 1450 MPa | 11.3 - 53.3 |

2.2. EEİ Parametreleri ve İşleme Deneyleri

Deneysel çalışmalarda Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Takım Tezgâhları Laboratuvarında bulunan FURKAN marka “K1 Z-NC” tip endüstriyel elektro erozyon tezgâhi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan işlem parametreleri Tablo 2’te verilmiştir.

Tablo 3. Deneyselde kullanılan işleme parametreleri.

| Deney Parametresi | Boşalım Tepe Akımı (Amper) (a) | Vurum Süresi (μ s) | Vurum Bekleme Süresi (μ s) | Malzeme İşleme Süresi (s) | Elektrot Polaritesi |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Değer | 6 | 50 | 6 | 5 | - |
| | 12 | 100 | 24 | | |
| | 24 | 200 | 48 | | |

2.3. Karakterizasyon

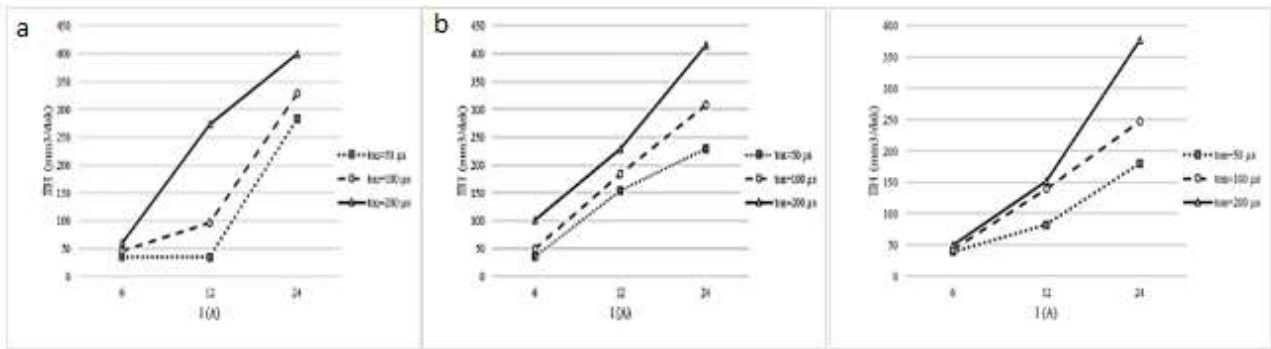
Deneysel çalışmalarda 0,5 mm'ye kadar olan kanalların yüzey pürüzlülüğü ölçümlerini yapabilen Mitutoyo SJ 210 yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan optik profilometre Zygo Zegage tercih edilmiştir. İşlenmiş numunelerin yüzeylerini Hitachi Regulus 8230 taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3. Deneysel Sonuçlar

EEİ yönteminde kullanılan çeşitli işlem parametrelerinin (I , t_{on} , t_{off}), işleme performansı çıktıları ($\dot{I}H$, EAH, R_a) üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyselde işleme parametreleri olarak; boşalım tepe akımı (I) (6, 12 ve 24 A), vurum süresi (t_{on}) (50, 100, 200 μ s), vurum bekleme süresi (t_{off}) (6, 24, 48 μ s) kullanılmıştır.

3.1. İşleme Parametrelerinin İş Parçası İşleme Hızına ($\dot{I}H$) Etkisi

EEİ'nin en etkili parametrelerinden boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin $\dot{I}H$ 'ye etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir ve elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 1).



Şekil 1. İH- I değişimi (a= t_{off} =6 μ s, b= t_{off} =24 μ s, c= t_{off} =48 μ s)

Yapılan deneysel çalışmalarda İH'nin I ve t_{on} değerlerinin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. Yine t_{off} değerinin artmasıyla birlikte İH'nin arttığı belirlenmiştir. İH, iş parçasına boşalan enerjiye bağlıdır; bu da boşalım akımı ve vurum süresiyle doğru orantılıdır.

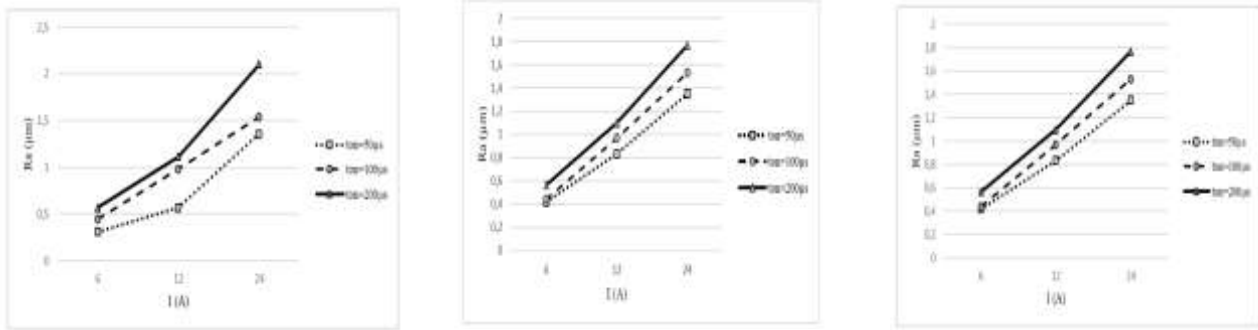
$$Ws = e(t) \times ie(t) \times dt \approx u(e) \times ie \times ie(t) \quad (1)$$

I ve t_{on} artması boşalım enerjisinin artmasını sağlar. Akımın artması, daha fazla elektronun iş parçasına düşmesi, artan t_{on} değeri ise bu düşme süresinin artışı anlamına gelmektedir. Yani vurum süresinin artışı ile boşalım enerjisi uzun süreli boşalmaktadır. Böylelikle boşalım enerjisinin artması iş parçasında daha geniş bir alanının ısınmasına neden olarak, iş parçasından daha fazla miktarda malzemenin ergitilmesine neden olarak İH'nin artmasını sağlamaktadır. Bu nedenle boşalım

akımındaki artış iş parçası işleme hızının artmasına neden olmuştur [4]. Vurum bekleme süresi değerinin artışı ile işleme esnasında arka arkaya boşalan kıvılcımlar arasındaki bekleme süresinin artışı anlamına gelmektedir. Yapılan deneyde t_{off} artış durumu, işleme boşluğundaki işleme artıklarının daha etkili uzaklaştırılmasını sağladığı gibi İİH değeri de azalma eğilimi göstermektedir. En düşük İİH 12 A, $6\mu s$ t_{off} ve $50\mu s$ t_{on} süresinde $34,77 \text{ mm}^3/\text{dak}$ en yüksek İİH ise 24 A, $48\mu s$ t_{off} ve $200 \mu s$ t_{on} süresinde $400 \text{ mm}^3/\text{dak}$ olarak tespit edilmiştir.

3.2. İşleme Parametrelerinin İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

İşleme parametrelerinin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacıyla işlemler sonrası yüzeylerden alınan 3'er adet pürüzlülük ölçümünün ortalaması kullanılmıştır. Elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 2). Bu teknikte imalat sonrası yüzey pürüzlülük deseni kraterli yapıda oluşmaktadır. Kıvılcım boşalımı iş parçası yüzeyine birbiri peşi sıra düşmesinden dolayı en son kıvılcımlar erozyon işlemini gerçekleştirdikten sonra üst üste binmiş kraterler yüzeyde pürüzlülük desenlerini meydana getirmiştir.



Şekil 2. I ve t_{on} değişiminin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi ($a=t_{off}=6 \mu s$, $b=t_{off}=24 \mu s$, $c=t_{off}=48 \mu s$)

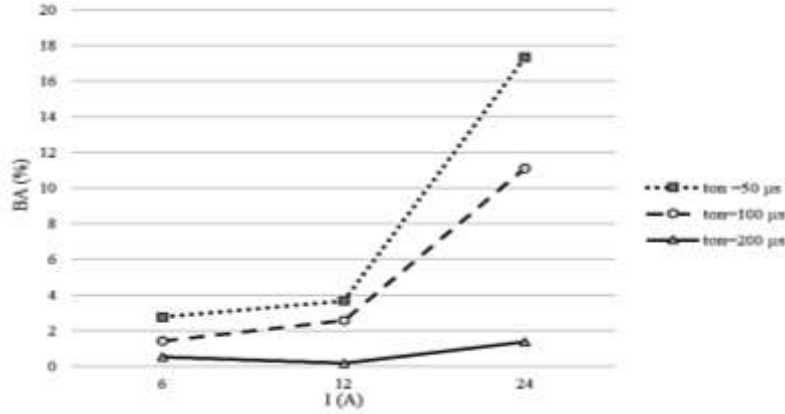
Elektro erozyonla işleme sırasında işlenmiş yüzeylerde ergime, buharlaşma ve dielektrik sıvının patlaması sonucu oluşan tepkisel kuvvetten dolayı çeşitli boyutlarda yüzey kraterleri oluşmaktadır. Bu nedenle işlenmiş yüzeyin topografyası düzensiz haldedir [18]. Boşalım akımının artması ile daha geniş ve derin kraterlerin meydana geldiği bu işleme tekniğinin fiziksel mantığında vardır. Yüksek enerji yoğunluğu, daha geniş ve derin kraterlerin ergitilmesi ve sonuçta daha kısa zamanda fazla malzeme erozyon edilmesi anlamına gelmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi R_a değeri akım ile artış göstermiş ve bu durum İİH değişimi ile de uyumlu olmuştur.

Vurum süresi R_a değerini etkileyen önemli girdilerden biri olmuştur. Bu değer, kıvılcımın yüzeye düşme süresi olduğundan, artışı ile daha geniş ve derin ergitmeler meydana gelerek büyük kraterler oluşturmaktadır. En yüksek R_a değeri $t_{off}=6\mu s$, $t_{on}=200 \mu s$ 6A değerindeki işlemlerde $0,7 \mu m$, en düşük R_a ise $t_{off}=6\mu s$, $t_{on}=50 \mu s$ 6A değerindeki işlemlerde $0,31 \mu m$ olarak ölçülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı ve vurum süresi arttığında iş parçası yüzey pürüzlülük değerinin arttığı gözlenmiştir. I ve t_{on} yüksek olduğu zaman kıvılcım yoğunluğu (enerji yoğunluğu) ve boşalım gücü daha fazla olmaktadır. Bu da iş parçası yüzeyinde daha derin ve geniş krater oluşumuna neden olacak miktarda malzeme kaldırılmasını sağlayarak iş parçasının yüzeyinin daha pürüzlü bir hal almasına neden olmuştur. Ayrıca yapılan deneysel çalışma sonucunda vurum bekleme süresinin iş parçası yüzey pürüzlülük değerine etkisinin akım değerlerine göre az olduğu görülmüştür.

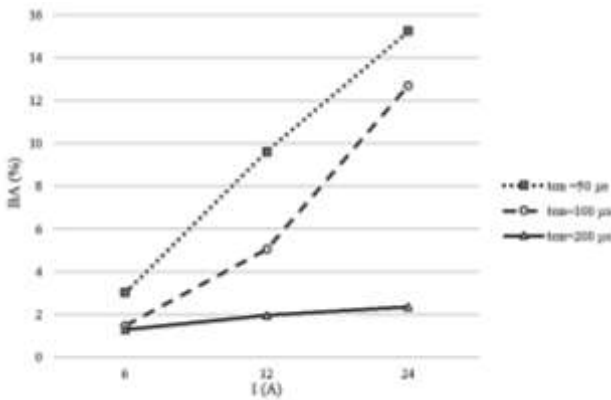
3.3. İşleme Parametrelerinin Bağlı Aşınmaya (BA) Etkisi

Bağlı aşınma, elektrot aşınma özellikleri için kriter olarak kullanılır. EEİ’de genellikle İİH’nin yüksek olması arzu edilir, ancak daha yüksek İİH daha yüksek EAH’a yol açar. Böylelikle yüksek EAH ile takım şekli de bozulmuş olur ve iş parçasında oluşturulmak istenen geometride bozulmuş olur. Çünkü bu teknikte işlenmiş yüzey, takım yüzeyinin zıt bir kopyası olmaktadır. Elektro erozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin bağlı aşınma etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir. Elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 3-5).

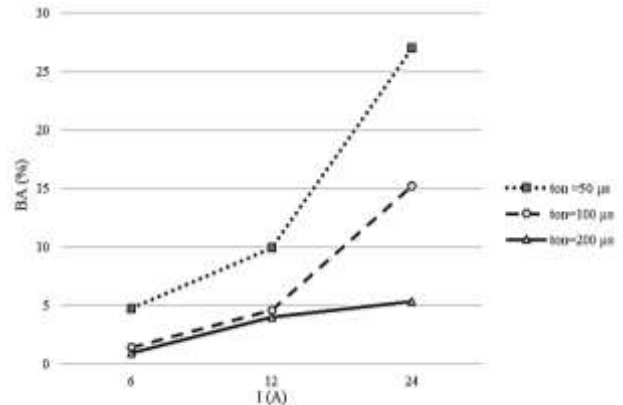


Şekil 3. BA (%) - I (A) değişimi t_{off}=6 s

Şekil 7-9’ da bağlı takım aşınmasının vurum süresine bağlı değişimini göstermektedir. Tüm işlemlerde t_{on} süresinin artışı ile takım aşınması azalmaktadır. Takım aşınmasında azalma zamana bağlı olarak kıvılcım enerjisine atfedilebilir ve doğrudan t_{on} ile orantılıdır. Vurum süresi değerindeki artış kıvılcım enerjisini yükseltmekte olup ancak daha yüksek t_{on} değerlerinde kıvılcımın yayılmasına neden olur (plazma kanalı) ve takım-iş parçası çiftine doğru ısı transferi azalır. Böylece daha az takım aşınması ve yüksek malzeme kaldırma oranı sağlanır. Akım değerinin artışı ile takımın alt yüzeyinden daha yüksek enerji boşalımı olacağından küçük akım değerlerine nazaran daha büyük miktarlarda aşınma meydana gelecektir. Tüm işlemlerde akım artışı ile takım aşınması artmıştır. 6A işleme değerinden 12A işleme değerine geçişte BA çok az bir artış oranı ile değişim göstermiş olup 24A’lık işlemlerde bu değer daha belirgin artış göstermiştir. Bu sürenin yüksek seçilmesi; aynı zamanda malzeme işlenmesi olmayan zamanın artması demek olduğundan işleme hızı, bir başka deyişle malzeme işleme hızı (mm³/dakika) azalır. Ark aralığının ark süresine göre az olması elektrot aşınmasını azaltır, ancak işleme hızını arttırır. Ancak kıvılcımlar sönmeyecek kadar küçük ark aralıkları seçilirse yüzeyde bozulmalar ve kömürleşme oluşur.



Şekil 4. BA (%) - I (A) değişimi t_{off}=24 µs

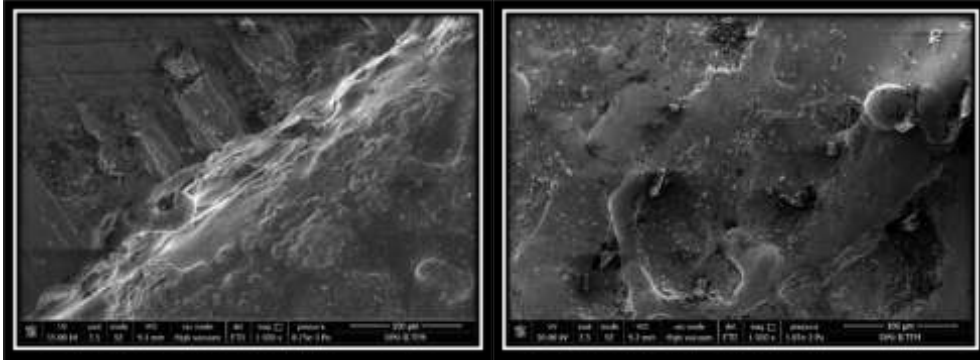


Şekil 5. BA (%) - I (A) değişimi t_{off}=48 µs

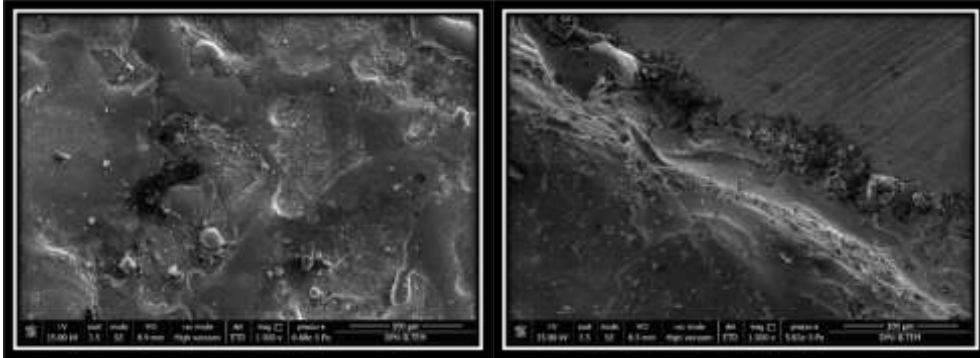
En düşük BA değerlerinin yüksek t_{on} ve t_{off} sürelerinde ortaya çıktığını göstermektedir. En düşük BA değeri, 12 A değerinde $6 \mu s$ t_{off} ve $200 \mu s$ t_{on} değerinde $2,1 \text{ mm}^3/\text{dak}$ olarak, en yüksek değeri $48 \mu s$ t_{off} , $24 \mu s$ t_{on} ve 24 A değerinde $26,97 \text{ mm}^3/\text{dak}$ olarak belirlenmiştir.

3.4. SEM Görüntüleri

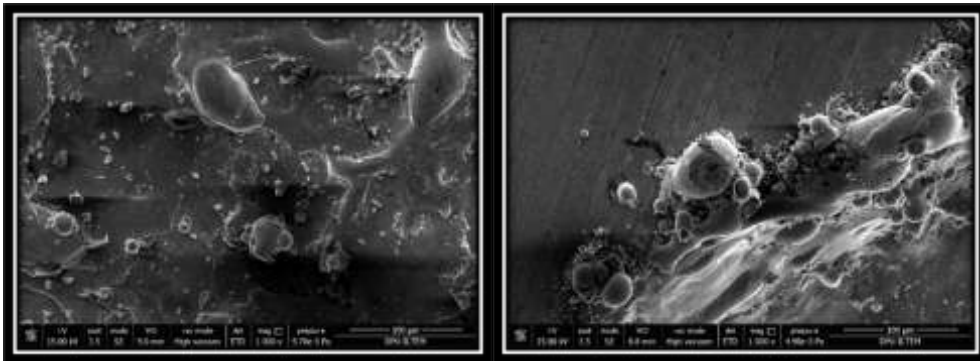
Şekil 6-12’de EDM ile işlenmiş yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Malzeme yüzeylerinden erozyon edilen ve sıvı basıncıyla orta bölgede kalan partiküller, ergiyerek yüzeyde damla benzeri döküntü, çatlaklar ve değişik boyutlarda oluşmuş kraterler görülebilmektedir. Meydana gelen bu kraterler, her bir kıvılcımın etkisiyle işleme sırasında yüzeyden kalkan küresel taşların oluşturduğu oyuklardır. Elektro erozyon ile işlemede, meydana gelen her bir elektriksel boşalım sonucunda oldukça yüksek değerlerde ısı oluşur ve ortaya çıkan yüksek ısının etkisi ile iş parçasının yüzeyi yerel olarak erir ve buharlaşır. Bundan dolayı EEİ’de işenmiş olan yüzeylerde yönü olmayan bir profil elde edilmektedir. Şekiller incelendiğinde boşalım akımının artmasıyla yüzey hasarları arttığı görülmektedir. İş parçası yüzeyine daha yoğun bir enerji boşalımının olması sonucu olarak yüzeyden daha fazla malzeme erozyon edilmiştir.



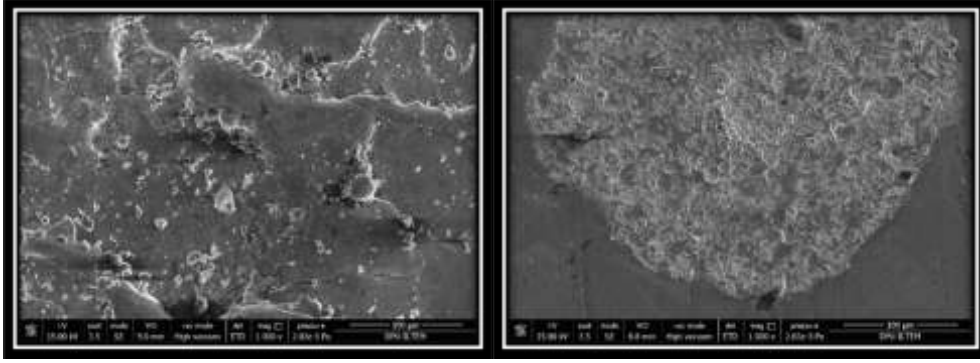
Şekil 6. Akım:6A - t_{on} :50 μs - t_{off} :6 μs işleme sonrası SEM görüntüsü



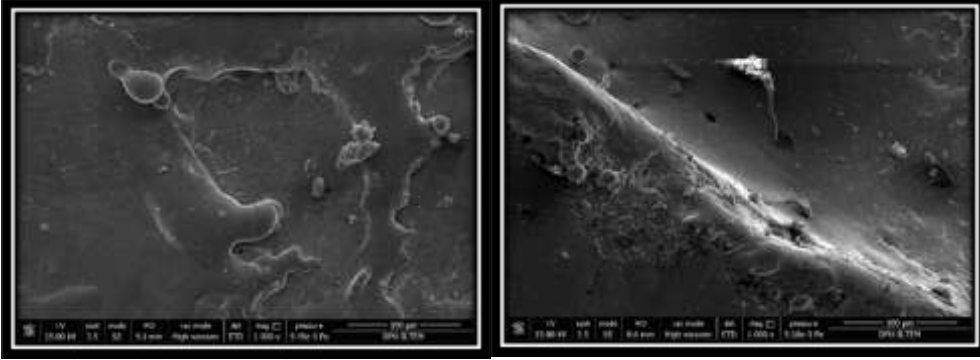
Şekil 7. Akım:6A- t_{on} :100 μs - t_{off} :24 μs , işleme sonrası SEM görüntüsü



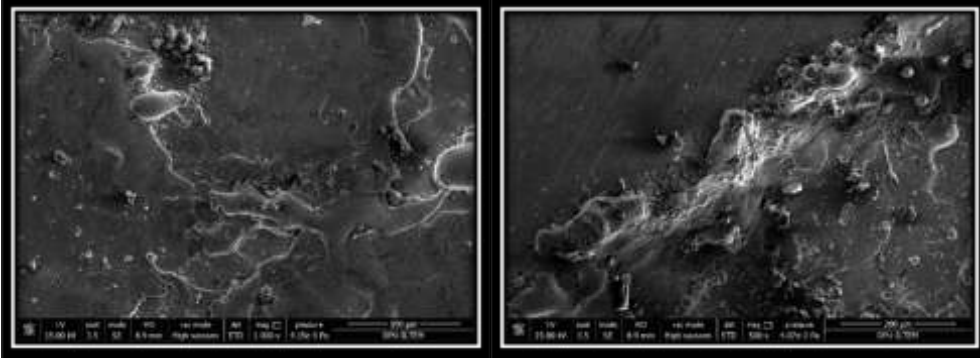
Şekil 8. Akım:12A- t_{on} :50 μs - t_{off} :6 μs , işleme sonrası SEM görüntüsü



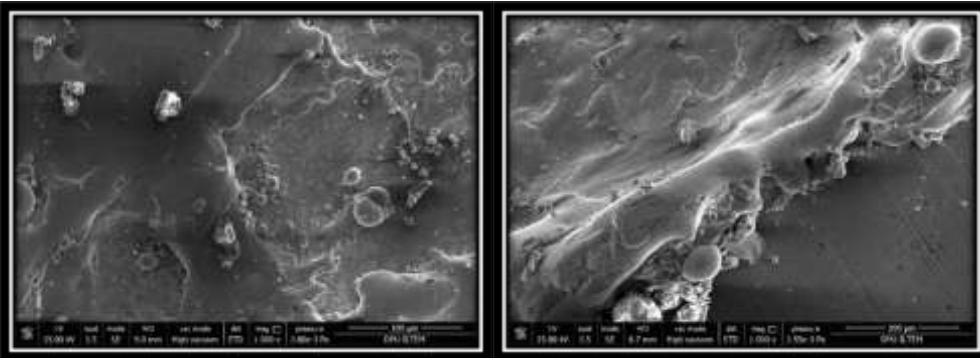
Şekil 9. Akım:12A- t_{on} :100 μ s- t_{off} :24 μ s, işleme sonrası SEM görüntüsü



Şekil 10. Akım:12A- t_{on} : 200 μ s- t_{off} : 48 μ s, işleme sonrası SEM görüntüsü



Şekil 11. Akım:24A- t_{on} :50 μ s- t_{off} : 6 μ s işleme sonrası SEM görüntüsü



Şekil 12. Akım:24A- t_{on} : 100 μ s - t_{off} : 24 μ s, işleme sonrası SEM görüntüsü

Yüzeyden kaldırılan malzeme miktarının artması ile birlikte yüzey pürüzlülük değeri de artmıştır. Akım değerinin artması ile yüzeyde oluşan kraterlerin daha geniş olduğu görülmüştür. Şekil 6-12 incelendiğinde İİH artıkça yüzey pürüzlülük değerinin yükseldiği görülmüştür. Akım değeri arttıkça

yüzeyin daha kraterli bir yapıda olduğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bununla birlikte EAH' nın akım arttıkça arttığı ve düşük akımlarda daha düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Görüntülerde dikkat çeken en önemli nokta çatlak yoğunluğunun çok az seviyede olmasıdır. Bu durum bor katkısının malzemenin ergime noktasını yükseltmiş olabileceğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; iş parçası işleme hızı (İİH) ve elektrot aşınma hızı (EAH), iş parçası yüzey pürüzlülüğünün, boşalım akımının ve vurum süresinin artmasıyla birlikte artış gösterdiği gözlenmiştir.

- Yapılan deneylerde t_{off} değerinin artışı ile işleme esnasında arka arkaya boşalan kıvılcımların arasındaki bekleme süresinin artışı anlamına gelmektedir ve işleme boşluğundaki işleme artıklarının daha etkili uzaklaştırılmasını sağladığı gibi İİH değerini de azaltan bir etki göstermektedir. En düşük İİH 12 A, $6\mu s$ t_{off} ve 50 μs ton süresinde 34,77 mm^3/dak en yüksek İİH ise 24 A, 48 μs t_{off} ve 200 μs ton süresinde 400 mm^3/dak olarak tespit edilmiştir.
- Vurum süresi R_a değerini etkileyen önemli girdilerden biri olmuştur. Bu değer, kıvılcımın yüzeye düşme süresi olduğundan, artışı ile daha geniş ve derin ergitmeler meydana gelerek büyük kraterler oluşturmuştur. En yüksek R_a değeri t_{off} 6 μs , t_{on} 200 μs 6A değerindeki işlemlerde 0,49 μm , en düşük R_a ise t_{off} 6 μs , ton 50 μs 6A değerindeki işlemlerde 0,01 mm^3/dak olarak ölçülmüştür.
- En düşük BA değerlerinin yüksek ton ve t_{off} sürelerinde ortaya çıktığını göstermektedir. En düşük BA değeri, 12 A değerinde 6 μs t_{off} ve 200 μs t_{on} değerinde 2,1 mm^3/dak olarak, en yüksek değeri 48 μs t_{off} , 24 μs t_{on} ve 24 A değerinde 26,97 mm^3/dak olarak belirlenmiştir.
- İİH arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin yükseldiği görülmüştür. Akım değeri arttıkça yüzeyin daha kraterli bir yapıda olduğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Akım değerinin artması ile yüzeyde oluşan kraterlerin daha geniş olduğu görülmüştür.

Yazarların Katkıları

AG ve İBK deneyleri gerçekleştirdi. HBÖ, AG ve LU sonuçların yorumlanması ve makalenin yazımında çalıştı. Tüm yazarlar makalenin son halini okuyup onayladılar.

Çıkar Çatışması

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1]. Ho, K., S.J.I.J.o.M.T. Newman, and Manufacture, State of the art electrical discharge machining (EDM). 2003. 43(13): 1287-1300.
- [2]. Yue, X., Q. Li, and X.J.C.I. Yang, Influence of thermal stress on material removal of Cf_SiC composite in EDM. 2020. 46(6):7998-8009.
- [3]. Payal, H., R. Choudhary, and S. Singh, Analysis of electro discharge machined surfaces of EN-31 tool steel. 2008.
- [4]. Lee, S. and X.J.J.o.m.p.T. Li, Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide. 2001. 115(3): 344-358.

- [5]. Guu, Y., H.J.M. Hocheng, and M. Processes, Effects of workpiece rotation on machinability during electrical-discharge machining. 2001. 16(1): 91-101.
- [6]. Gohil, V. and Y.J.T.o.F. Puri, Experimental investigation on surface roughness in electrical discharge turning of Ti-6Al-4V alloy. 2016. 40(4): 1-10.
- [7]. Choudhary, R., et al., Performance and surface integrity of Nimonic75 alloy machined by electrical discharge machining. 2015. 2(4-5): 3481-3490.
- [8]. Matorian, P., S. Sulaiman, and M.J.J.o.M.P.T. Ahmad, An experimental study for optimization of electrical discharge turning (EDT) process. 2008. 204(1-3): 350-356.
- [9]. Kushwaha, A., et al., Assessment Of Surface Integrity During Electrical Discharge Machining Of Titanium Grade 5 Alloys (Ti-6Al-4V). 2019. 18: 2477-2485.
- [10]. Wang, C.C., et al., Cutting austempered ductile iron using an EDM sinker. 1999. 88(1-3): 83-89.
- [11]. Torres, A., Puertas, I. & Luis, C. J., Modelling of surface finish, electrode wear and material removal rate in electrical discharge machining of hard-to-machine alloys. Precision Engineering, 2015. 40, 33-45
- [12]. Kumar, H., Development of mirror like surface characteristics using nano powder mixed electric discharge machining (NPMEDM). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. 76(1-4), 105-113.
- [13]. Hourmand, M., Farahany, S., Sarhan, A. A. & Noordin, M. Y., Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg 2 Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR-RSM approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. 77(5-8), 831-838
- [14]. Pei, J., Zhang, L., Du, J., Zhuang, X., Zhou, Z., Wu, S. & Zhu, Y., A model of tool wear in electrical discharge machining process based on electromagnetic theory. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017. 117, 31-41.
- [15]. Mishra, D. K., Datta, S., & Masanta, M., Effects of tool electrode on EDM performance of Ti-6Al-4V. Silicon, 2018. 10(5), 2263-2277.
- [16]. Perumal, A., Kailasanathan, C., Stalin, B., Rajkumar, P. R., Gangadharan, T., & Venkatesan, G., Evaluation of EDM process parameters on titanium alloy through Taguchi approach. Materials Today: Proceedings, 2021, 45, 2394-2400.
- [17]. Jiang, L., & Kunieda, M., High rising speed discharge current pulse for EDM generated by inductive boosting voltage circuit. CIRP Annals. 2021.
- [18]. Gopalakannan, S., et al., Effect of electrode materials on electric discharge machining of 316 L and 17-4 PH stainless steels. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 2012. 11(07): 685.