



The Effects of Cutting Parameters on the Kerf and Surface Roughness on the Electrode in Electro Erosion Process

Ferhat CERİTBİNMEZ^{1*} Erdoğın KANCA²

¹Haier Europe, Candy - Hoover Group, Research and Development Center, 26010, Odunpazarı/ESKİŞEHİR

²İskenderun Technical University, Department of Mechanical Engineering, 31200, İskenderun/HATAY

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 11/04/2021
Revision: 27/05/2021
Accepted: 27/05/2021

Highlights

- Copper erosion.
- EDM process.
- Kerf measurement.

Keywords

EDM
Cupromax CuCrZr
Kerf
Surface Roughness

During the electro erosion process, which is a thermal chip removal method, heating, melting and evaporation occur between the electrode material and the workpiece due to sparking and thermal effects, in this case both the workpiece and the electrode material are worn. In this study, the kerf angle and the electrode wear rate were analyzed by taking into account the size changes in the erosion areas of the copper electrode, which were eroded as a result of different processing parameters.

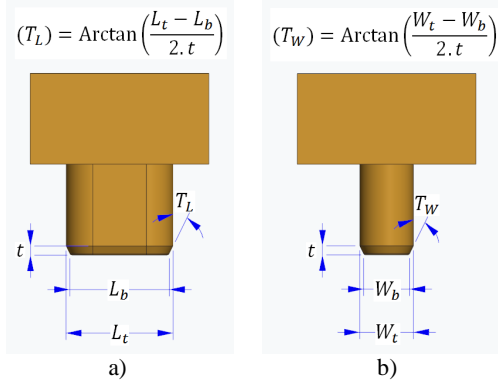


Figure A. Kerf Angle Calculation (a) Longitudinal kerf measurement, b) Transverse kerf measurement)

Purpose: In this study, electrode wear caused by machining from cold work tool steel with heat treated 60-62 HRC hardness was investigated by using electro erosion method and Cupro MAX CuCrZr electrode. In addition, it is aimed to determine the effects of processing parameters on the surface roughness of each electrode and electrode wear rates by going beyond the usual measurements.

Theory and Methods: In this study, erosion process was performed using three different current values (6.25, 12.5, 25 A), three different pulse on times (3, 6, 9 μ s) and pulse off times (4, 6, 8 μ s), respectively, and the electrode wear rate of these processing parameters, the effects on kerf angle and surface roughness were analyzed by macro and analytical measurements. Surface roughness, kerf measurements and macro images of the electrodes were analyzed using Mitutoyo SJ200 surface roughness tester, 0.001 mm precision mitutoyo micrometer and Nikon SMZ 745T microscope, respectively.

Results The results have shown that with increasing current, machining time decreased due to increased sparking between workpiece and electrode, but the average surface roughness, kerf angle and wear rate of the electrode increased. The analytical measurements and experimental results are presented and compared in Section 3.

Conclusion: According to the analytical calculations and macro analysis results obtained as a result of experimental studies, it has been determined that as the pulse on time increases, the electrode wear rate decreases. The reduction in electrode wear resulted from the increase in the strength of the electrode due to the protective layer formed by the adhesion of the dielectric fluid and carbon particles released from the workpiece to the electrode surface.



The Effects of Cutting Parameters on the Kerf and Surface Roughness on the Electrode in Electro Erosion Process

Ferhat CERİTBİNMEZ^{1,*} Erdoğan KANCA²

¹Haier Europe, Candy - Hoover Group, Araştırma ve Geliştirme Merkezi, 26010, Odunpazarı/ESKİŞEHİR

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 31200, İskenderun/HATAY

Abstract

In this study, electrode wear caused by machining from cold work tool steel with heat treated 60-62 HRC hardness was investigated by using electro erosion method and Cupro MAX CuCrZr electrode. The workpiece and electrode material are eroded by melting and evaporation as a result of the electrical arc (sparking) that occurs between the electrode and the workpiece in the dielectric environment. These erosions can be interpreted by changes in electrode form measurements and surface roughness. In this context, erosion process was performed using three different current values (6.25, 12.5, 25 A), three different pulse on times (3, 6, 9 μ s) and pulse off times (4, 6, 8 μ s), respectively, and the electrode wear rate of these processing parameters, the effects on kerf angle and surface roughness were analyzed by macro and analytical measurements. As a result of the analysis, with increasing current, machining time decreased due to increased sparking between workpiece and electrode, but the average surface roughness, kerf angle and wear rate of the electrode increased. It has been determined that as the pulse on time increases, the electrode wear rate decreases. The reduction in electrode wear resulted from the increase in the strength of the electrode due to the protective layer formed by the adhesion of the dielectric fluid and carbon particles released from the workpiece to the electrode surface.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/04/2021
Düzeltilme: 27/05/2021
Kabul: 27/05/2021

Keywords

EDM
Cupromax CuCrZr
Kerf
Surface Roughness

Anahtar Kelimeler

EEİ
Cupromax CuCrZr
Kerf
Yüzey pürüzlülüğü

Elektro Erozyon İşleminde Kesme Parametrelerinin Elektrot Üzerindeki Kerf ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri

Öz

Bu çalışmada elektro erozyon yöntemi ve Cupro MAX CuCrZr elektrot kullanılarak, ısıtılmış 60-62 HRC sertliğe sahip soğuk iş takım çeliğinden talaş kaldırma neticesinde meydana gelen elektrot aşınması incelenmiştir. Dielektrik ortamda elektrot ve iş parçası arasında meydana gelen elektriksel ark (kıvılcımlanma) neticesinde ergime ve buharlaşma yoluyla iş parçası ve elektrot malzeme aşınır. Bu aşınmalar elektrot form ölçüleri ve yüzey pürüzlülüğündeki değişimlerle yorumlanabilir. Bu kapsamda sırasıyla üç farklı akım değeri (6.25, 12.5, 25 A), üç farklı ark süresi (3, 6, 9 μ s) ve bekleme süreleri (4, 6, 8 μ s) kullanılarak erozyon işlemi gerçekleştirilmiş ve bu işleme parametrelerinin elektrot aşınma hızı, kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri makro ve analitik ölçümlerle analiz edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, akımının artmasıyla, iş parçası ve elektrot arasında artan kıvılcımlanmaya bağlı olarak işleme süresi azalmıştır fakat elektrodun ortalama yüzey pürüzlülüğü, kerf açısı ve aşınma hızı artmıştır. Ark süresi arttıkça elektrot aşınma hızının azaldığı tespit edilmiştir. Elektrot aşınmasındaki azalma, dielektrik sıvı ve iş parçasından salınan karbon partiküllerinin elektrot yüzeyine yapışarak oluşan koruyucu tabaka nedeniyle elektrotun mukavemetinin artmasından kaynaklanmıştır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektro erozyonla işleme (EEİ), dielektrik sıvı altında elektrot (katot) ve iş parçası (anot) arasında hızla tekrar eden elektriksel deşarjlar neticesinde iş parçasının ergimesi ve buharlaşmasıyla talaş kaldırma prensibine dayanan geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir [1-3]. Bu yöntemin en büyük avantajı sertliği yüksek iletken malzemelerden termal yöntemle talaş kaldırılmasıdır, bu özelliğinden dolayı başta kalıpcılık olmak üzere havacılık ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4,5]. EEİ’de elektrot aşınması, kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğü başlıca kalite gösterge parametreleridir [6,7]. Doğru seçilen EEİ parametreleri ve dayanıklı elektrot kullanımı işlem kalitesini büyük ölçüde etkiler. Elektrot aşınmasının malzeme kaybına sebep olmasının yanı sıra işlenecek olan parçaya aktarılacak olan şeklin ve formun da istenilenin dışına çıkması anlamına gelir [8]. Muralova ve diğerleri, EEİ yönteminde bakır ve grafit elektrotlar kullanarak 1.2363 ve 1.2343 ESR çeliklerinden farklı işleme parametreleri ile talaş kaldırılarak elektrotların köşe ve kenar aşınmalarını elektron mikroskobu altında incelemiştir. Ayrıca, kullanılan elektrotların aşınma hızını, işlenmiş numunelerin topografyasını ve yüzey morfolojisini araştırmışlardır. Grafit elektrot kullanımında daha az aşınma olduğunu, elektrot formunun korunmasına bağlı olarak daha hassas şekil ve ölçü elde edildiğini bildirmişlerdir [8]. Pavan ve diğerleri, inconel 600 alaşımının EEİ’de pirinç, bakır ve tungsten bakır elektrotlar kullanılarak işlenebilirliğini araştırarak; ark süresi, bekleme süresi, akım, elektrot ve iş parçası arasındaki boşluk gibi işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranı (TKO) ve elektrot aşınma oranı (EAO) üzerindeki etkilerini Taguchi Analizi ile incelemiştir. Sonuç olarak, tungsten bakır elektrotlar kullanılarak en yüksek talaş kaldırma oranı ($0.01579 \text{ cm}^3/\text{dak}$) ve en düşük elektrot aşınması ($0.00045 \text{ cm}^3/\text{dak}$) elde edilmiştir [9]. Dhanabalan ve diğerleri, Ti Gr 2/3.7035 titanyum alaşımını EEİ yöntemiyle bakır, pirinç ve alüminyum elektrot kullanarak değişken akım, ark ve bekleme süresi değerlerini kullanarak işlemiş; değişen işleme parametrelerinin elektrot aşınma oranı, talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü (YP) üzerine etkilerini rapor etmişlerdir. Yapılan taguchi analizleri neticesinde işleme akımının artmasıyla EAO, TKO ve YP’nin arttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca en yüksek EAO ve TKO pirinç elektrot kullanımında tespit edilmiştir. Elektrot malzemesinin termal iletkenliği ve ergime noktasının EAO ve TKO’na etki ettiği bildirilmiştir [10]. Nas ve diğerleri, EEİ yönteminde 100, 200 ve 300 μs vurum süreleri; 10, 20 ve 30 μs bekleme süreleri ve 10, 20 ve 30 A boşalım akımları gibi işleme parametreleriyle bakır ve grafit elektrot kullanarak AISI 1.2738 malzemesinden talaş kaldırmış, elde edilen verileri Taguchi Orthogonal Array Design L54 istatistiksel metodunu kullanarak en düşük yüzey pürüzlülüğü için ideal parametreleri belirlemede kullanmışlardır. Yapılan analizler neticesinde yüzey pürüzlülüğüne en etkili parametreler sırasıyla akım, vurum süresi, bekleme süresi ve elektrot malzeme türü olarak belirlenmiştir. En düşük ortalama yüzey pürüzlülük değerleri bakır elektrot kullanımında Ton 300 μs , Toff 30 μs ve 10 A parametrelerinin seçilmesi neticesinde $4,73 \mu\text{m}$ olarak, grafik elektrot kullanımında ise Ton 100 μs Toff 10 μs ve 20 A parametreleri seçilmesi neticesinde $4,35 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır [11]. Sahu ve Mahapatra, titanyum alaşımı ve AISI 1040 çeliğini EEİ yöntemiyle işleyerek; dielektrik sıvı olarak EDM-30, elektrot malzeme olarak bakır, pirinç ve AlSi10Mg RP kullanmıştır. Akım ve ark süresi gibi işleme parametrelerinin işlenmiş yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülüğüne, yüzey çatlak yoğunluğuna, beyaz tabaka kalınlığına ve beyaz tabakanın mikro sertliğine etkilerini incelemiştir. Yüzey çatlaklarını gözlemlmek için taramalı elektron mikroskobunu, optimum parametrelerin analizi için Grey-TOPSIS metodunu kullanarak; en iyi yüzey özelliklerinin AlSi10Mg RP elektrot kullanımında düşük akım ve ark süresi işleme parametrelerinde elde edildiğini rapor etmişlerdir [12]. Rizvi ve diğerleri, AISI 4340 çeliğinin EEİ yönteminde bakır-tungsten elektrot kullanılarak işlenmesinde AISI 4340’ın yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Akım, voltaj, ark süresi ve darbe boşluk oranı gibi işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerini Anova ile analiz etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü için en önemli faktörün ark süresi olduğunu, diğer parametrelerin ihmal edilebilir olduğunu, daha düşük bir ark süresi değerinin daha düşük yüzey pürüzlülüğü için uygun olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca iyi bir yüzey için düşük ark süresi ve akım, orta düzeyde darbe boşluk oranı ve daha düşük voltaj parametrelerinin kullanılmasını önermişlerdir [13]. Joshi ve diğerleri, EN8 kalıp çeliğinin EEİ yönteminde bakır elektrot kullanılarak işlenmesini ve işleme parametrelerinin işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğüne etkilerini incelemiştir. İşleme parametrelerinin yüksek değerlerinde elektrot aşınma oranının talaş kaldırma oranı ile orantılı olduğunu vurgulamışlardır [14]. Valentinčić ve diğerleri, mikro EEİ’de elektrodun doğrusal ve hacimsel aşınma ölçümlerini ve belirsizliklerini, makine üzerinde temaslı (touch) ve temassız (lazer) ölçüm yöntemleriyle belirlemeye çalışmışlardır. Yeterli büyüklükte elektrot

kullanıldığında ve yeterli şekilde işleme yapıldığında doğrusal aşınma ölçümlerinin touch yöntemi (temaslı) ile etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceğini buna karşılık hacimsel aşınmanın lazer yöntemi ile ölçülmesi gerektiğini bildirmişlerdir. Daha küçük çaplı elektrot kullanımında elektrot aşınmasını etkili bir biçimde telafi etmek için lazer yönteminin kullanılmasını önermişlerdir. Doğrusal aşınma ölçümleri için Lazer yönteminin yalnızca yaklaşık 40 µm altındaki elektrot aşınmasını ölçerken kullanıldığını, lazer tezgah üstü ölçüm yöntemi ile gerçekleştirilen ölçümlerin standart belirsizliklerinin Touch on (temaslı) ölçüm yönteminden önemli ölçüde daha düşük olduğunu vurgulamışlardır [15]. Literatür çalışmaları incelendiğinde, EEİ yöntemi kullanılarak talaş kaldırmak için bakır, grafit, pirinç, tungsten bakır, alüminyum, AlSi10Mg RP gibi elektrot malzemelerinin kullanıldığı ve bu elektrotlarla farklı işleme parametreleri kullanımında iş parçasında elde edilen yüzeylerin kalitelerinin analiz edildiği görülmektedir. Dalma erozyon olarak ta bilinen EEİ'de kullanılan elektrot ve özellikleri iş parçasının yüzeyinde elde edilen formda ve yüzey pürüzlülüğünde etkilidir. Bu çalışmada farklı işleme parametreleri neticesinde aşınan bakır elektrodun erozyona mağruz kalan bölgelerindeki ölçü değişimleri dikkate alınarak kerf açısı ve elektrot aşınma hızı analiz edilmiştir. Ayrıca alışlagelmiş ölçümlerin dışına çıkılarak, işleme parametrelerinin her bir elektrodun yüzey pürüzlülüklerine etkileri incelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Cupro MAX CuCrZr Elektrot (Cupro MAX CuCrZr Electrode Materials)

Bu çalışmada EEİ parametrelerinin elektrot aşınmasına etkilerinin tespiti için saf bakıra göre daha yüksek sertliğe ve elektriksel iletkenliğe sahip olan Cupro MAX CuCrZr Bakır Krom Zirkonyum Alaşımı tercih edilmiştir. Endüstride başta kaynak elektrot ucu olarak, alüminyum ve plastik enjeksiyon makinalarında püskürtme memesi olarak, elektro erozyon işleminde elektrot olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da EEİ elektrodu olarak seçilerek Sağlam Metal firmasından kare lama şeklinde tedarik edilmiştir. Söz konusu bakırın kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri tedarikçi firmadan temin edilerek sırası ile Tablo 1, 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 1. Cupro MAX CuCrZr Kimyasal bileşeni

Krom (% Cr)	Zirkonyum (% Zr)	Diğer (Maksimum)	Bakır (% Cu)
1	0.1	0.2	Kalan

Tablo2. Cupro MAX CuCrZr Fiziksel Özellikleri

Elektrik iletkenliği (%)	Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	Isı İletkenliği (W/mK)	Yoğunluk (g/cm ³)
86	17	320	8.9

Tablo 3. Cupro MAX CuCrZr Mekanik Özellikleri

Sertlik (HB)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Akma Dayanımı (kN/mm ²)	Elastisite Modülü (kN/mm ²)	Uzama (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
120-140	400-500	320-410	122	18	8.9

Lama şeklinde 20 x 20 mm ölçülerinde temin edilen Cupro MAX CuCrZr bakır öncelikle Proth satıh taşlama tezgahında taşlanarak Şekil 1 (a)'da gösterildiği gibi parlatılmıştır. Daha sonra Şekil 1 (b)'de görüldüğü gibi Charmilles Robofil 290P tel erozyon tezgahında 20 x 20 x 20 mm ölçülerinde kesilmiştir. İstenilen slot formlarının elde edilmesinde Makino S33 model bilgisayarlı sayısal kontrollü takım tezgahı kullanılmıştır. İş parçasında 3 mm derinlikte 14 x 8 mm slot formu oluşturmak için bakırlar Şekil 1 (c)'de gösterildiği gibi 10 mm yüksekliğinde slot şeklinde işlenmiştir.



Şekil 1. Elektrotların hazırlanması (a) Ham kütük, b) Kare bakırlar, c) Formlu bakırlar

2.2. Sleipner İş Parçası (Sleipner Workpiece Material)

EEİ yöntemi ve bakır elektrot kullanılarak talaş kaldırma işleminde iş parçası olarak 60-62 HRC sertliğe sahip Uddeholm Sleipner krom - molibden - vanadyum alaşımlı takım çeliği kullanılmıştır. Sleipner malzemesinin iş parçası olarak seçilmesinde EEİ yöntemine uygunluk, yüksek sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra endüstride başta kalıpcılık sektörü olmak üzere yaygın kullanıma sahip olması belirleyici olmuştur. Uddeholm Sleipner malzemesi Alseko metal firmasından tedarik edilerek teknik özellikleri Tablo 4 ve 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Sleipner Kimyasal bileşeni

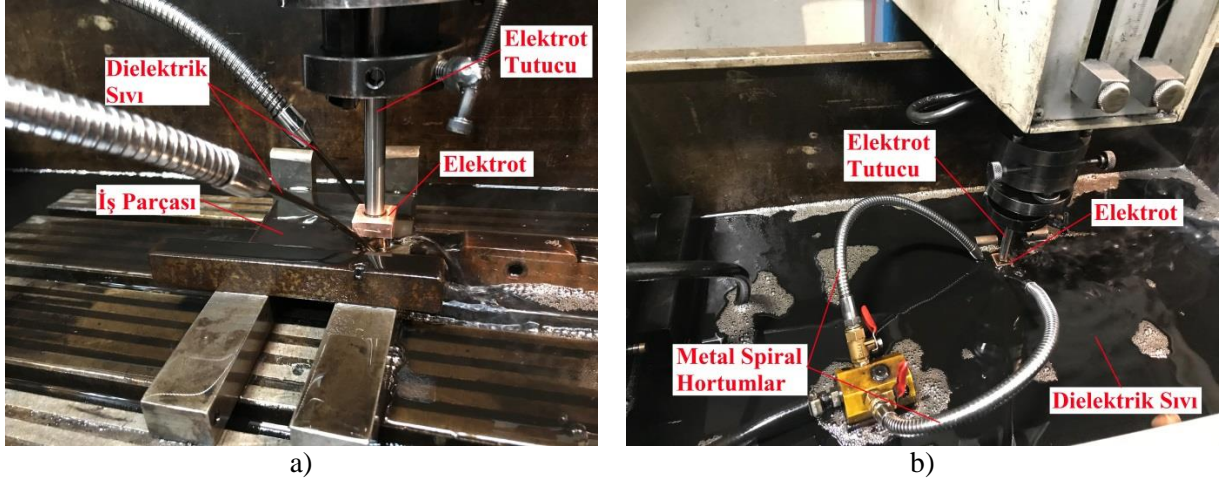
Karbon (% C)	Silisyum (% Si)	Manganez (% Mn)	Krom (% Cr)	Molibden (% Mo)	Vanadyum (% V)	Demir (% Fe)
0.9	0.9	0.5	7.8	2.5	0.5	Kalan

Tablo 5. Sleipner Mekanik Özellikleri

Sertlik (HRC)	Termal İletkenlik (W/m•°C)	Özgül Isı Sığası (J/kg•°C)	Elastisite Modülü (kN/mm ²)	Termal Genleşme katsayısı	Yoğunluk (g/cm ³)
60-62	400-500	460	205	12.7x10 ⁻⁶	7.73

2.3. İşleme Metodu (Machining Method)

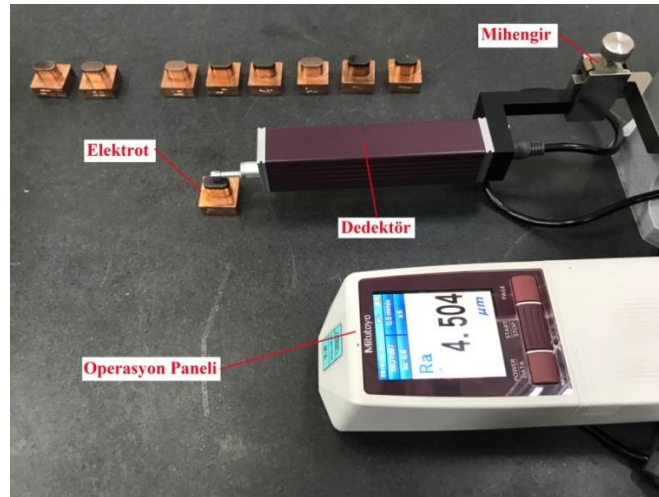
Elektro erozyon işlemi için 50 Amper gücünde Furkan Marka EDM (electric discharge machining) makinası kullanılmıştır. Erozyonla talaş kaldırma işlemi dielektrik sıvı altında gerçekleştirilerek Eralube marka dielektrik sıvı tercih edilmiştir (Şekil 2). Her bir operasyon öncesi iş parçası ve elektrot malzemesinin düzlemsellik ve diklik ayarı yapılarak deneylere başlanmıştır.



Şekil 2. Elektro Erozyon İşlemi (a) işlem başlangıcı, b) dielektrik sıvı altında erozyon

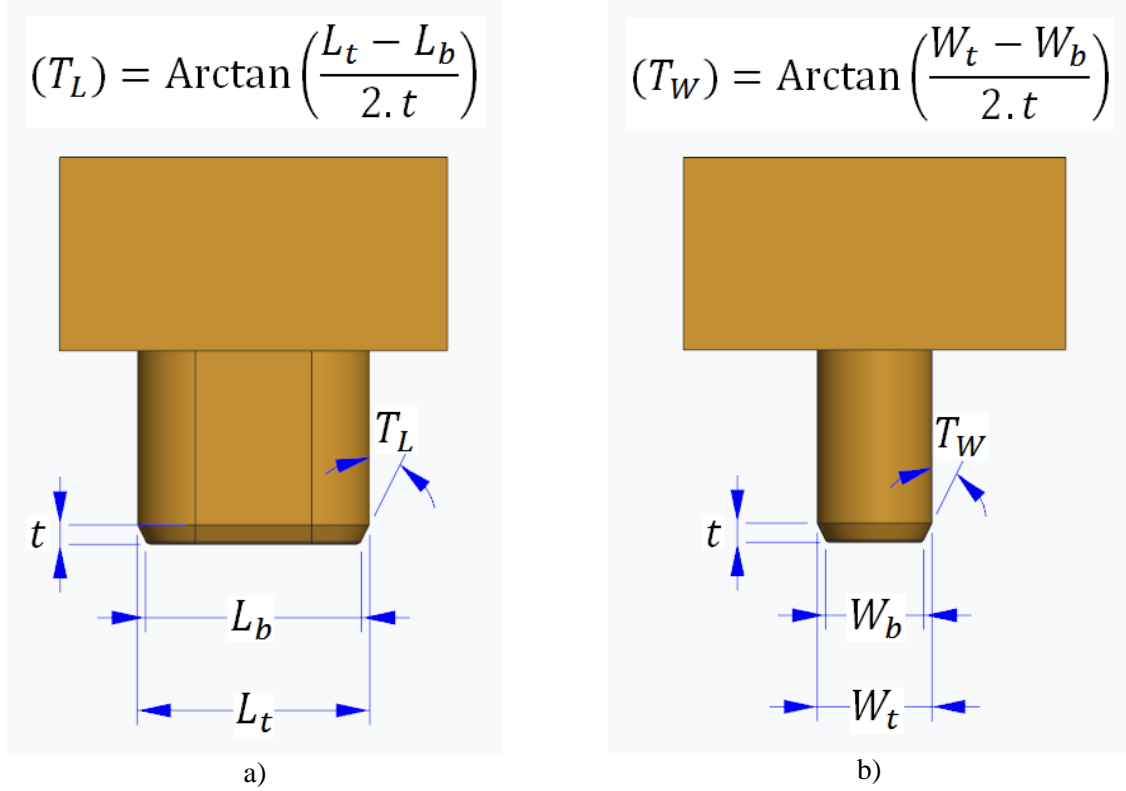
2.4. İşlenen Parçaların Analiz Yöntemleri (Analysis Methods of Processed Parts)

Elektro erozyon sonrası her bir elektrot yüksek basınçlı hava kullanılarak dielektrik sıvı ve curuf kalıntılarından temizlenmiştir. İşleme yüzeyleri kir ve yağdan arındırılan elektrotların yüzey pürüzlülüğü, Mitutoyo SJ200 marka taşınabilir yüzey pürüzlülük test cihazı kullanılarak Şekil 3'te görüldüğü gibi ölçülerek Ra pürüzlülük değerleri kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Elektro erozyon işlemi elektrot malzemesinden iş parçasına atlayan kıvılcımlar neticesinde ergime ve buharlaşma prensibine dayanan bir talaş kaldırma işlemidir. Bu sebepten dolayı iş parçası aşınırken elektrotta da aşınmalar meydana gelir. Bu aşınmalar elektrot uc kısımlarında daha fazladır. Bu sebeplerden dolayı elektrodun iş parçasına yaklaştığı ilk ölçüleri ile işlem sonundaki ölçüleri aynı değildir. Slot şeklinde hazırlanan elektrotların aşınmalarını tespit edebilmek için Şekil 4'te gösterilen denklemler ve ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Elektrodun uc kısımlarındaki iş parçasına en yakın yüzeydeki ölçüleri $L_b - W_b$ ile iş parçasıyla en son buluşan düzlemdeki $L_t - W_t$ ölçüleri elektrot üzerinden 0.001 mm hassasiyete sahip mitutoyo mikrometre kullanılarak ölçülmüştür. Elektrotun iş parçasında oluşturduğu derinlik değeri (t) iş parçası üzerinden Şekil 5'te gösterilen mitutoyo derinlik kumpası kullanılarak ölçülmüştür. Yapılan tüm ölçümlerde ortalama değerler hesaplanarak ortalama kerf açısı T_L ve T_W değerlerinin aritmetik ortalaması olarak rapor edilmiştir.



Şekil 4. Kerf Açısı Hesabı (a) Uzunlamasına kerf ölçümü, b) Enine kerf ölçümü



Şekil 5. Mitutoyo mikrometre ile elektrot ölçümü

Bu çalışmada her bir deneyde kullanılan elektrot malzemesi deney öncesinde ve deney sonrasında HZK-110FA Serisi 0.0001 gr hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Ayrıca her bir deneyde seçilen işleme parametreleri neticesinde elde edilen işleme süreleri tespit edilmiştir. Yapılan işleme ve ölçümler neticesinde aşınan elektrotların aşınma hızının hesabında Denklem 1’de gösterilen eşitlik kullanılmıştır. Elektrot aşınma hızı (EAH) hesabında operasyon süresi, elektrodun yoğunluğu, işleme öncesi ve sonrası ağırlığı kullanılmıştır [16,17].

$$EAH = \frac{(\text{elektrotun ilk ağırlığı}) - (\text{elektrotun son ağırlığı})}{(\text{elektrot yoğunluğu}) \times (\text{işleme süresi})} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{dak}} \right) \quad (1)$$

3. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Elektro erozyonla işlemede seçilen işleme parametrelerinin, kullanılan elektrot malzemesinin yüzey pürüzlülüğüne ve kerf ölçülerine etkileri Tablo 6'de gösterilmiştir. Farklı işleme akımı, ark süresi ve bekleme süresinin kullanımında operasyon süreleri başta olmak üzere değişen yüzey pürüzlülüğü, kerf ölçüleri ve elektrot aşınma hızları tespit edilmiştir.

Tablo 6. EEİ değerleri ve test sonuçları

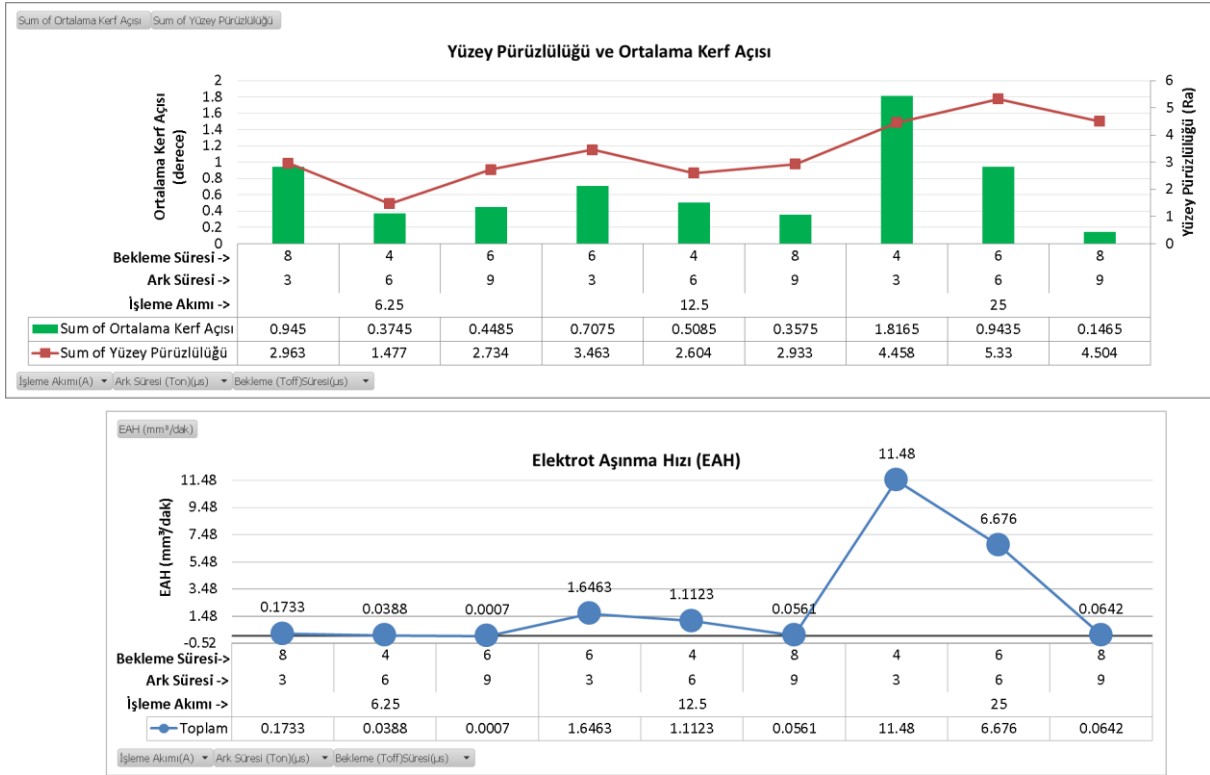
Deney No	İşleme Akımı (A)	Ark Süresi (µs)	Bekleme Süresi (µs)	İşleme Süresi (dak)	Elektrot Aşınma Hızı (mm ³ /dak)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Kerf Açısı	
							TL (derece)	TW (derece)
1	6.25	9	6	157	0.0007	2.734	0.315	0.582
2	6.25	6	4	26	0.0388	1.477	0.161	0.588
3	6.25	3	8	540	0.1733	2.963	0.556	1.334
4	12.5	9	8	18	0.0561	2.933	0.188	0.527
5	12.5	6	4	10	1.1123	2.604	0.306	0.711
6	12.5	3	6	72	1.6463	3.463	0.779	0.636
7	25	9	8	7	0.0642	4.504	0.064	0.229
8	25	6	6	12	6.6761	5.330	0.690	1.197
9	25	3	4	9	11.4801	4.458	2.514	1.119

EEİ'de kullanılan her bir elektrotun işlem görmüş yüzeyleri ayrı ayrı Nikon SMZ 745T mikroskop kullanılarak incelenerek Şekil 6'da görselleştirilmiştir. Yüzeylerin farklı renklerde ve dokularda olması, işleme parametrelerinin değişimi ile iş parçasının aşındırılması esnasında ortaya çıkan curuf ve termal etkilerin elektrot yüzeylerine etkilerinin sonucu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 6. Bakır elektrotların optik mikroskop görüntüleri ($\times 5$ büyütme oranı)

Yapılan ölçüm ve analiz sonuçlarına göre düşük ark sürelerinde ve artan akım değerlerinde elektriksel boşalma (kıvılcım atlaması) arttığı için elektrot aşınması ve buna bağlı olarak kerf açısı artmıştır. Bekleme süresi, ark süresi ve işleme akımının bakır elektrodun yüzey pürüzlülüğüne etki ettiği; işleme akımının artması ile elektrodun uç kısımlarında elektrik yoğunluğunun artmasına bağlı olarak elektrottan iş parçasına doğru yoğun elektriksel boşalmanın neticesinde noktasal erime ve tahribat arttığı için elektrot yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Ortalama kerf açısı, elektrodun parçaya yanaşan yüzeyindeki aşınmalardan dolayı ortaya çıkar; yani elektrot aşınma hızı arttıkça kerf açısı artar. Yapılan analiz ve ölçümler neticesinde Şekil 7’de görüldüğü gibi kerf açısı ve elektrot aşınma hızı uyum içindedir, işleme akımının artması elektrot aşınma hızını arttırmıştır.



Şekil 7. Test sonuçlarının grafiksel gösterimi

İşleme akımının artmasıyla, iş parçası ve elektrot arasında artan kıvılcım atlamasına bağlı olarak işleme süresi azalmıştır fakat elektrot aşınma hızı, ortalama kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Hadad ve arkadaşları; kaba, yarı kaba ve son kesim işlemlerinde elektrot yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla elektrot aşınmasının arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca EEİ sonrası iş parçası yüzey pürüzlülüğünün elektrot yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değiştiğini bu değişime EEİ parametrelerinin de etki ettiğini raporlamışlardır [18]. Ark süresinin düşmesi işleme süresini artırarak, elektrot malzemesinin birim zamanda daha fazla çalışmasına sebep olmuş bunun neticesinde elektrot aşınma hızı ve kerf açısı artmıştır. Ancak ark süresi arttıkça elektrot aşınma hızının azaldığı tespit edilmiştir. Elektrot aşınmasındaki azalma, dielektrik sıvı ve iş parçasından salınan karbon partiküllerinin elektrot yüzeyine yapışarak oluşan koruyucu tabaka nedeniyle elektrodun mukavemetinin artmasına bağlanmıştır [19]. Literatür çalışmaları göz önüne alındığında EEİ parametrelerinin yanı sıra işlem sırasında kullanılan dielektrik sıvı ve basıncının, elektrot malzemesinin mekanik ve kimyasal özelliklerinin de elektrot aşınmasına etki ettiği görülmektedir [9, 16, 20]. Elektro erozyon yöntemi termal bir talaş kaldırma yöntemidir [21]. Bu sebeple erozyon işlemi esnasında elektrot malzeme ve iş parçası arasında kıvılcımlanma ve termal etkiler nedeni ile ısınma, ergime ve buharlaşma olur bu durumda hem iş parçası hemde elektrot malzeme aşınır. Bu süreçte elektrodun erime sıcaklığı ne kadar yüksek ise aşınması da okadar düşük olur [22]. Sonuç olarak EEİ’de performans çıktıları olarak en düşük elektrot aşınması, en yüksek talaş kaldırma oranı ve kabul edilebilir yüzey pürüzlülüğü istenilen parametreler olmaktadır [23].

4. GENEL SONUÇLAR (GENERAL RESULTS)

DeneySEL çalışmalar neticesinde elde edilen analitik hesaplamalar ve makro analiz sonuçlarına göre;

- İşleme akımının artmasıyla, iş parçası ve elektrot arasında artan kıvılcım atlamasına bağlı olarak işleme süresi azalmıştır fakat elektrodun ortalama yüzey pürüzlülüğü, kerf açısı ve aşınma hızı artmıştır.
- Bekleme ve ark süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etki ettiği fakat bu etkinin işleme akımının etkisi kadar olmadığı, değişen yüzey pürüzlülüğünün elektrot aşınmasına veya aşındırılan malzemeden kopan partiküllerin elektrot yüzeyine yapışmasına göre değişkenlik gösterebileceği tespit edilmiştir.

- Ark süresinin düşmesi işleme süresini arttırarak, elektrot malzemesinin birim zamanda daha fazla çalışmasına sebep olmuş bunun neticesinde elektrot aşınma hızı ve kerf açısı artmıştır.
- Ark süresi arttıkça elektrot aşınma hızının azaldığı tespit edilmiştir. Elektrot aşınmasındaki azalma, dielektrik sıvı ve iş parçasından salınan karbon partiküllerinin elektrot yüzeyine yapışarak oluşan koruyucu tabaka nedeniyle elektrotun mukavemetinin artmasından kaynaklanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kuppan, P., Rajadurai, A., & Narayanan, S. (2008). Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(1-2), 74-84.
- [2] Rajesha, S., Sharma, A. K., & Kumar, P. (2010). Some aspects of surface integrity study of electro discharge machined Inconel 718. In *Proceedings of the 36th international MATADOR conference* (pp. 439-444). Springer, London.
- [3] Rajesha, S., Sharma, A. K., & Kumar, P. (2012). On electro discharge machining of Inconel 718 with hollow tool. *Journal of materials engineering and performance*, 21(6), 882-891.
- [4] Lin, Y. C., Chen, Y. F., Wang, D. A., & Lee, H. S. (2009). Optimization of machining parameters in magnetic force assisted EDM based on Taguchi method. *Journal of materials processing technology*, 209(7), 3374-3383.
- [5] Mishra, D. K., Rahul, , Datta, S., Masanta, M., & Mahapatra, S. S. (2019). Through hole making by electro-discharge machining on Inconel 625 super alloy using hollow copper tool electrode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(2), 348-370.
- [6] Sultan, T., Kumar, A., & Gupta, R. D. (2014). Material removal rate, electrode wear rate, and surface roughness evaluation in die sinking EDM with hollow tool through response surface methodology. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014.
- [7] Selvarajan, L., Sasikumar, R., Kumar, N. S., Kolochi, P., & Kumar, P. N. (2020). Effect of EDM parameters on material removal rate, tool wear rate and geometrical errors of aluminium material. *Materials Today: Proceedings*.
- [8] Mouralová, K., Bednar, J., Benes, L., Hrabec, P., Kalivoda, M., & Fries, J. (2020). The analysis of EDM electrodes wear in corners and edges. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(4), 1-14.
- [9] Pavan, C., & Sateesh, N. (2020). Taguchi analysis on machinability of Inconel 600 using Copper, Brass, and Copper tungsten electrodes in EDM. *Materials Today: Proceedings*.
- [10] Dhanabalan, S., Sivakumar, K., & Narayanan, C. S. (2015). Experimental investigation on electrical discharge machining of titanium alloy using copper, brass and aluminum electrodes. *Journal of Engineering Science and Technology*, 10(1), 72-80.
- [11] Nas, E., Argun, K., & Zurnacı, E. (2018). AISI 1.2738 çeliğinin elektro-erozyon tezgahında bakır ve grafit elektrot ile işlenmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 1082-1093.
- [12] Sahu, A. K., & Mahapatra, S. S. (2020). Surface characteristics of EDMed titanium alloy and AISI 1040 steel workpieces using rapid tool electrode. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(2), 699-718.

- [13] Rizvi, S. A. H., Agarwal, S., & Bharti, P. K. (2020). Modeling of Surface Roughness of AISI 4340 Using Copper-Tungsten Tool in Die Sinking EDM. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2334-2340.
- [14] Joshi, A., Saraf, A. K., & Goyal, R. K. (2020). EDM machining of die steel EN8 and testing of surface roughness with varying parameters. *Materials Today: Proceedings*, 28, 2557-2560.
- [15] Valentinčič, J., Bissacco, G., & Tristo, G. (2021). Uncertainty of the electrode wear on-machine measurements in micro EDM milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 153-160.
- [16] Gülcan, O., Uslan, İ., Usta, Y., & Çoğun, C. (2015). Elektro erozyon ile işlemede Cu-Cr T/M elektrot kullanımının işleme performansına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(3).
- [17] Tawfiq, M. A., & Abbas, A. A. (2018). Effect of current and pulse on time on MRR and EWR for different inner electrode shape of EDM process. *Global Journal of Engineering Science and Research Management*.
- [18] Hadad, M., Bui, L. Q., & Nguyen, C. T. (2018). Experimental investigation of the effects of tool initial surface roughness on the electrical discharge machining (EDM) performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(5), 2093-2104.
- [19] Çakıroğlu, R., & Günay, M. (2020). Comprehensive analysis of material removal rate, tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7305-7317.
- [20] Yılmaz, V., Özdemir, M., & Dilipak, H. (2015). 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*, 3(1), 417-426.
- [21] Guu, Y. H. (2005). AFM surface imaging of AISI D2 tool steel machined by the EDM process. *Applied Surface Science*, 242(3-4), 245-250.
- [22] Kalyon, A. (2020). AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin elektro erozyon tekniği ile işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(1), 75-86.
- [23] Ho, K. H., & Newman, S. T. (2003). State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13), 1287-1300.