

# ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE Cu-Cr T/M ELEKTROT KULLANIMININ İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİ

Orhan GÜLCAN<sup>1</sup>, İbrahim USLAN<sup>2</sup>, Yusuf USTA<sup>2</sup>, Can ÇOĞUN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ankara

<sup>3</sup> Çankaya Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fak., Ankara

[ogulcan@tai.com.tr](mailto:ogulcan@tai.com.tr), [iuslan@gazi.edu.tr](mailto:iuslan@gazi.edu.tr), [yusta@gazi.edu.tr](mailto:yusta@gazi.edu.tr), [cogun@cankaya.edu.tr](mailto:cogun@cankaya.edu.tr)

(Geliş/Received: 30.09.2014; Kabul/Accepted: 23.06.2015)

## ÖZET

Bu çalışmada, Cu-Cr toz metal (T/M) elektrot kullanımının elektro erozyon ile işleme (EEİ) performans çıktılarından işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), işlenmiş yüzeyin ortalama ve azami yüzey pürüzlülükleri ( $R_a$  ve  $R_z$ ) ve işparçası yüzey katman kalınlıklarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı toz karıştırma oranları, sıkıştırma basınçları ve sinterleme sıcaklıklarında elde edilen Cu-Cr T/M elektrotlar SAE 1040 çeliğinin işlenmesinde kullanılmıştır. Analizler, elektrot malzemesinin işparçası yüzeyinde katman halinde alaşımlandığını ve karıştırma oranı, sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığının EEİ performans çıktılarını etkilediğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** EEİ, T/M elektrot, Cu tozu, Cr tozu, karıştırma oranı, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı

## EFFECT OF USE OF Cu-Cr P/M ELECTRODES ON MACHINING PERFORMANCE OF ELECTRIC DISCHARGE MACHINING

### ABSTRACT

In this study, the effect of use of Cu-Cr powder metal (P/M) electrodes on EDM performance outputs, namely material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR), mean and maximum roughness of machined surface ( $R_a$  and  $R_z$ ) and workpiece surface recast layer thickness, was investigated experimentally. The Cu-Cr P/M electrodes produced at different mixing ratios, compacting pressures and sintering temperatures were used to machine SAE 1040 steel. The analyses performed have shown that the electrode material is deposited on to the work surface as a layer and the powder mixing ratio, the compaction pressure and sintering temperature affect the EDM performance outputs.

**Keywords:** EDM, P/M electrode, Cu powder, Cr powder, mixing ratio, compacting pressure, sintering temperature

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

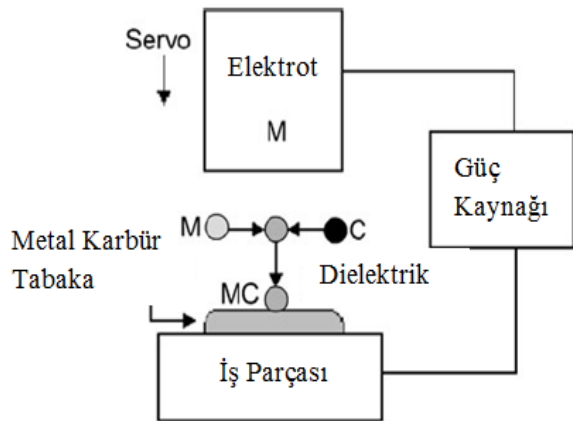
EEİ, bir dielektrik sıvısı içerisine yerleştirilen elektrot ile işparçası arasında oluşan elektriksel boşalimler sayesinde elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanır. İşparçası yüzeyinin ergimesi, işparçası ile elektrot arasında oluşan ve sıcaklığı 10,000 C°'ye kadar çıkan plazma kanalı sayesinde gerçekleştirilir. Elektrot ile işparçası arasındaki akım kesilince, plazma kanalı çöker ve dielektrik sıvısı, ergiyen malzemeleri yüzeyden uzaklaştırır [1-3]. EEİ yöntemi günümüzde uçak sanayi, otomotiv sanayi, kalıp üretimi, medikal

ürünler vs. gibi farklı alanlarda kullanım imkânı bulmuştur. EEİ yönteminde yüksek işparçası işleme hızı (İİH), düşük elektrot aşınma hızı (EAH) ve düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edilmesi doğrultusunda işleme parametreleri, işleme ortamı ve elektrot malzemesi değiştirilerek deneysel çalışmalar yapılmıştır. EEİ performansını artırmak için yapılan çalışmaların çoğunda saf veya alaşım metal elektrotlar kullanılmıştır. Son zamanlarda EEİ'de toz metal (T/M) elektrot kullanılarak yapılan çalışmaların sayısında artış görülmektedir. Bunun temel nedenleri sadece bir kalıp ve zımba seti kullanarak çok sayıda T/M elektrot üretilmesi ve elektrot üretim

maliyetinin ciddi olarak azalmasıdır. Ayrıca, T/M yöntemi sayesinde, toz karıştırma oranı ( $K_t$ ), sıkıştırma basıncı ( $P_s$ ) ve sinterleme sıcaklığı ( $T_s$ ) gibi parametreleri değiştirerek, elektrotların elektriksel, mekanik ve mikro yapı özellikleri kontrol edilebilmektedir [4, 5].

Kalıp ve zımbaların yüzeylerinin alaşımlanması sayesinde kalıp-zimba setinin ömrü, sertlikleri, aşınma dirençleri ve korozyon dirençleri artırılabilir. Ancak, yüksek ekipman maliyetleri ve karmaşık alaşımlama işlemleri yeni yüzey alaşımlama/değiştirme yöntemlerini araştırmayı zorunlu kılmaktadır [6]. T/M yöntemi ile üretilen elektrotlar, EEİ'de yüzey alaşımlama için de kullanılmaktadır. Elektro erozyon ile alaşımlama/kaplama (EEK) adı verilen bu yöntemde, elektrottan kopan malzeme dielektrik sıvısında bulunan karbon ile kimyasal reaksiyona girer ve işparçası yüzeyinde birikerek sert metal karbür tabakası oluşturur (Şekil 1) [7]. Bu tabaka elektrot malzemesine bağlı olarak ana malzemeden sert veya yumuşak olabilir [8].

Bu bölümde, EEK amaçlı olarak, T/M elektrot kullanımı ile ilgili çalışmalar kronolojik olarak sunulmuştur. Samuel ve Philip [5],  $P_s=62-625$  MPa ve  $T_s=950$  C°'de üretilen Cu-Zn (ağırlıkça ~%1 Zn) T/M elektrotlarla yapılan işlemlerde elektrottan kopan ve işleme aralığında biriken büyük Cu toz tanelerinin, sıklıkla kısa devre ve ark tipi vurum (zararlı vurumlar) oluşumuna yol açtığını rapor etmişlerdir. Yüksek işparçası yüzey pürüzlülüğüne yol açan işleme aralığının kirlenmesine  $P_s$  ve  $T_s$ 'nin etki ettiğini göstermişlerdir. Cu ortalama toz boyutunun artması, EEİ dengesini olumsuz etkilemektedir. Yüksek boşalım akımlarında ( $i_d$ ) ve uzun vurum sürelerinde ( $t_s$ ) yüksek İİH elde edildiği belirtilmiştir. Düşük  $P_s$  ve  $T_s$  değerlerinde daha yüksek EAH değerleri gözlemlenmiştir. İİH ve EAH, birim zamanda sırasıyla işparçasındaki ve elektrottaki hacimsel malzeme kaybını tanımlamaktadır.



**Şekil 1.** Elektro erozyon ile kaplama (EEK) prensibinin şematik gösterimi (Schematic view of the principle of electric discharge coating (EDC)) [7]

Pantelis ve arkadaşları [9] 1040 çeliğini işlemek için Fe-WC T/M elektrot kullanmışlardır. İşlenmiş yüzeyde WC tabakası gözlemlenmiştir. Zaw ve arkadaşları [10] Cu-ZrB<sub>2</sub> ve Cu-TiO T/M elektrotlardaki ( $P_s=350$  bar,  $T_s=1070-1300$  C°) ZrB<sub>2</sub> ve TiO toz miktarlarının artırılması ile EAH ve ortalama işparçası yüzey pürüzlülüğünde ( $R_a$ ) artma, İİH'de ise azalma tespit etmişlerdir. Li ve arkadaşları [11] lazerle sinterlenmiş Cu (%25)-TiC (%5-40)-W T/M elektrotlarla, Cu (%25)-W (%75) alaşım elektrotların EEİ performansını karşılaştırmışlardır. T/M elektrotlar alaşım elektrotlara göre ~15 % daha yüksek yoğunluk, daha düşük EAH (yüksek  $i_d$  ayarlarında bile) ve daha yüksek İİH değerleri vermiştir. Wang ve arkadaşları [12] Ti T/M elektrotlar kullanarak işparçası yüzeyinde seramik bir katman oluşturmuşlardır. Yazarlar, işparçası yüzeyine alaşımlanan bu katmanın oluşumunu, yüksek boşalım kanalı sıcaklığında, elektrottan kopan malzeme ile dielektrik sıvıdan ayrılan karbon atomlarının reaksiyona girmesine bağlamışlardır. İşparçası yüzeyinde ana malzemeden üç kat daha sert olan TiC katmanı oluşmuştur. Taramalı elektron mikroskobu (TEM) analizleri, yüzey aşınma direncinin 3 ila 7 kat arasında artışına sebep olan Ti ve Fe elementlerinin yüzeye alaşımlandığını göstermiştir. Simao ve arkadaşları [13] AISI D2 çeliğinin yüzeyini, TiC-WC-Co veya WC-Co karışımı Cu-C T/M elektrotlar kullanarak kaplamışlardır. Yüzeyin C, Ti ve W ile alaşımlandığı gözlemlenmiştir. TiC-WC-Co ve WC-Co T/M elektrotlarla işlenen yüzeyin sertliğinin (300 HK) elektrolitik Cu elektrotlarla işlenen yüzeyin sertliğinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Yüzey katmanının 25 µm derinlikteki sertliği 800 HK olarak ölçülmüştür.  $P_s$  ve  $T_s$ 'nin artmasıyla elektrotların fiziksel, elektriksel, mikro yapı, mekanik ve ısıl özelliklerinin iyileştiği (arttığı) ancak işparçası yüzeyine alaşımlanan malzeme miktarının azaldığı belirtilmiştir. Tsai ve arkadaşları [14] 1045 çeliğini işlemek için düşük  $T_s$  (200 C°) ve düşük sinterleme basıncında (10, 20 ve 30 MPa) ürettikleri Cu ve Cr-Cu T/M elektrotlar kullanmışlardır. Cu T/M elektrotlar Cr-Cu T/M elektrotlara göre daha yüksek İİH ve EAH ve daha düşük  $R_a$  vermişlerdir. Ayrıca, 20-30 MPa sinterleme basıncında üretilen elektrotlar, 10 MPa'da elde edilenlere göre daha yüksek İİH vermişlerdir. Simao ve arkadaşları [15] AISI H13 çelik işparçasını WC-Co T/M elektrot ve Al, Ni ve Ti tozu katkılı dielektrik sıvı kullanarak işlemişlerdir. Yazarlar, işparçası yüzeyinde 30 µm kalınlığında ve 1350 HK sertliğinde (ana malzeme sertliği 650 HK) bir seramik katman oluştuğunu belirtmişlerdir. Moro ve arkadaşlarının çalışmasında [16], TiC T/M elektrotlar elektro erozyon ile delme operasyonunda kullanılmıştır. EAH arttıkça alaşımlanan yüzey kalınlığının ve  $R_a$ 'nın arttığını belirtmişlerdir. Luis ve arkadaşları [17], SiC T/M elektrot kullandıkları çalışmalarında  $i_d$ ,  $t_s$ , işleme süresi, açık devre gerilimi ( $V_s$ ) ve dielektrik püskürtme basıncının ( $P_d$ ) İİH ve EAH üzerindeki etkilerini incelemiştir. İİH'nin %

95 ağırlıkla  $i_d$  ve  $V_s$  parametrelerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Patowari ve arkadaşları [18] C-40 çeliğini Cu-WC T/M elektrot kullanarak işlemler ve işparçası yüzeyinde WC ve Cu içeren sert bir tabaka (beyaz tabaka) elde etmişlerdir. Çoğun ve arkadaşları [19], gaz yağı dielektriğe borik asit ( $B_2O_3$ ) tozu ilavesinin EEİ performansına etkisini araştırmışlardır. Saf gaz yağı ile yapılan işlemlerle kıyaslandığında, toz katkılı gaz yağı ile yapılan işlemlerde işparçası yüzey sertliğinde artış görülmesine rağmen,  $R_a$ , İİH ve EAH'da belirgin değişimler gözlemlenmemiştir. Bai ve Koo [20] ve Bai'nin [21] çalışmalarında, Ni esaslı süper alaşım Haynes 230 işparçasının oksitlenme direncini arttırmak için Al-Mo T/M elektrot ( $P_s=80$  MPa,  $T_s=250$  C°) kullanılmıştır. İlk 40-50  $\mu m$  yüzey derinliğinde Al, Mo, Cr, Ni ve C içeren metalik ve ara metalik fazlar görülmüştür.  $R_a$  değeri + ve - elektrot kutuplaması için 2,62 ve 5,68  $\mu m$  bulunmuştur. Alaşımlanmış yüzeyin sertliği; a) saf su için 1138 HK, b) gaz yağı dielektrik ve + kutuplama için 1086 HK, ve c) gaz yağı dielektrik ve - kutuplama için 720 HK ölçülmüştür (ana metal sertliği ~300 HK). Ho ve arkadaşları [22], Ti-6Al-4V alaşımının (~365 HK) işlenmesinde Cu T/M ve elektrolitik Cu elektrotlar kullanmıştır. Farklı işleme koşulları için yüzey katman kalınlığı 4-11  $\mu m$  arasında değişmiştir. T/M elektrotlar kullanıldığında katman sertliği ana malzemeden düşük çıkmıştır (200-350 HK). Elektrolitik Cu elektrot ve - kutuplama kullanıldığında, yüzeyde oluşan  $TiO_2$ 'den dolayı, yüzey sertliği 1100 HK'ya çıkmıştır. Kutuplamadan bağımsız olarak elektrolitik Cu elektrotlar en düşük  $R_a$  değerini vermiştir. Elektrolitik Cu elektrot kullanıldığında yüzeyde ~ %10 Cu tespit edilmiştir. Bu değer,  $P_s=32$  MPa'da sıkıştırılan Cu T/M elektrotların kullanımında ~ %78'e çıkmış ve  $P_s$ 'nin artması ile azalmıştır. Chen ve arkadaşları [6] düşük karbonlu çeliği işlemek için Cu-W T/M elektrotlar ( $P_s=770$  MPa,  $T_s=600$  C°) kullanmışlardır.  $V_s$  veya  $i_d$ 'nin artması ile İİH ve EAH artmıştır. İşparçası yüzeyinde biriken malzeme düşük  $V_s$  (60 V) veya  $i_d$  (3-5 A) ayarlarında daha yüksek çıkmıştır. Yüzeyde oluşan katmanda W (% 50,5), C (% 49) ve Fe tespit edilmiştir. Ana malzemenin sertliği 310 HV iken, işlenmiş yüzeyin sertliği 1200 HV olarak bulunmuştur. Jahan ve arkadaşları [23], WC işparçasının mikro-EEİ'sinde düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek için W, Cu-W ve Ag-W T/M elektrotlar kullanmıştır. Ag-W T/M elektrotun elektriksel ve ısıl özellikleri W ve Cu-W T/M elektrotlara göre daha iyi olduğu için daha düşük  $R_a$  değerleri elde edilmiştir. Yazarlar, özellikle düşük  $V_s$  ayarlarında, kötü yüzey pürüzlülüğüne yol açan, işleme aralığında kısa devre ve ark vurumlarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Kıvılcım boşalım enerjisinin artmasıyla İİH ve EAH değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Cu-W T/M elektrot diğer elektrotlara göre daha yüksek İİH vermiştir. Patowari ve arkadaşları [7, 24] C-40 karbon çeliğini işlemek için W (%75)-Cu T/M elektrot kullanmışlardır.

İşparçası yüzeyinde  $W_2C$ , W, Cu ve Fe içeren ve geniş kalınlık aralığına sahip (3-785  $\mu m$ ) bir katmanın oluştuğunu belirtmişlerdir.  $R_a$  değeri 3-15  $\mu m$  ve sertlik değeri 9,81-12,75 GPa (ana metalin sertliği 2,00-2,95 GPa'dır) aralığında ölçülmüştür. İİH değeri  $t_s$ 'nin artması ile artmıştır.  $t_s$  ve  $i_d$ 'nin artması ve  $P_s$ 'nin azalması ile yüzey katman kalınlığı artmıştır. Das ve Misra [25], Al işparçasını işlemek için TiC-Cu T/M elektrot kullanmışlardır. İşparçası yüzeyinde Ti (%51), C (%37), Cu ve Al tespit edilmiştir. Yüzeyde oluşan tabakanın en üstünde bulunan beyaz katmanın yüksek oranda Ti ihtiva ettiği, ana metale doğru ilerledikçe bu oranı azaldığı belirtilmiştir. Katmanın yüzey sertliği 1780-1800 HV olarak ölçülmüştür (ana metalin sertliği 140-155 HV'dir).  $i_d$ ,  $t_s$  veya TiC miktarını arttırmanın veya  $P_s$ 'yi azaltmanın  $R_a$ , mikro sertlik ve katman kalınlığını arttırdığı belirtilmiştir. Kumar ve arkadaşları [26], WC-Co işparçasını işlemek için Cu-SiC T/M elektrot kullanmışlardır. İşlemeden sonra işparçası yüzey sertliğinin (1028-1829 HV), ana metalin sertliğinden (140-155 HV) çok daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Yüksek boşalım enerjisi ayarlarında daha pürüzlü yüzeyler ve daha kalın (~20-70  $\mu m$ ) yüzey katmanı elde edilmiştir.

Literatür incelendiğinde EEK'da daha çok Cu-W T/M elektrotların kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmanın yazarları, işparçası yüzeyinde oluşacak Cr içeren yüzey tabakasının işparçasının sertlik, kırılma, darbe, aşınma ve oksitlenme direncini arttırabileceğini öngörmektedirler. Literatür incelemesinde 14 nolu referans dışında Cu tozu ile birlikte Cr tozunu T/M elektrotta kullanan çalışmaya rastlanmamıştır. 14 nolu referansta ise Cr tozu farklı  $K_t$  değerlerinde Cu tozu ile karıştırılarak ve farklı basınçlarında sinterlenerek üretilmiş, ancak  $P_s$  ve  $T_s$ 'nin elektrot performansına etkileri incelenmemiştir.  $K_t$  kadar bu iki parametrenin de elektrotların elektriksel, mekanik ve mikro yapı özelliklerinin iyileştirilmelerinde ve dolayısıyla daha yüksek İİH ve daha düşük EAH ve  $R_a$  değerlerinin elde edilmesinde etkili olacağı bu çalışmanın yazarları tarafından öngörülmektedir. Yine literatürdeki birçok çalışmada  $R_a$  değeri incelenmişken,  $R_z$  değeri birkaç çalışma dışında incelenmemiştir. EEİ'de parlak bir yüzey elde etmek için yüzeyde oluşan işleme kraterlerinin (çukurların) genişliği ve derinliği az olmalıdır (küçük  $R_z$  değeri). Derin çukurların oluşumu, yüzeyin mat bir görünümde olmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla  $R_z$  değeri de  $R_a$  kadar işleme performansını anlamada ve üstün yüzey kalitesi elde etmede önemli bir performans çıktısıdır [23, 27].

Bu çalışmada Cr-Cu tozları SAE 1040 çeliğinin EE ile işlenmesinde kullanılmıştır.  $K_t$ ,  $P_s$  ve  $T_s$  değiştirilen (ayarlanan) girdi parametreleri, İİH, EAH,  $R_a$ ,  $R_z$ , yüzeyde oluşan katman kalınlığı, katmanı oluşturan malzemelerin cinsi ve miktarı işleme performans çıktıları olarak kullanılmıştır.

**Tablo 1.** SAE 1040'ın kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of SAE 1040)

| Element     | Fe     | Mn    | C      | Si    | Cu     | Ni    | W      |
|-------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Ağırlıkça % | 98,175 | 0,744 | 0,3754 | 0,208 | 0,1495 | 0,097 | 0,0915 |

**Tablo 2.** Deneyleerde kullanılan elektrotlar (Electrodes used in experiments)

| Deneý No | Malzeme         | $K_t$ (% Ağırlık) | $P_s$ (MPa) | $T_s$ (C°) |
|----------|-----------------|-------------------|-------------|------------|
| 1        | Cu-Cr           | 85-15             | 700         | 900        |
| 2        | Cu-Cr           | 75-25             | 700         | 900        |
| 3        | Cu-Cr           | 65-35             | 700         | 900        |
| 4        | Cu-Cr           | 75-25             | 700         | 800        |
| 5        | Cu-Cr           | 75-25             | 700         | 850        |
| 6        | Cu-Cr           | 75-25             | 800         | 900        |
| 7        | Cu-Cr           | 75-25             | 600         | 900        |
| 8        | Elektrolitik Cu | -                 | -           | -          |

## 2. DENEYSSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

İşparçası olarak 60x60x10 mm boyutlarında SAE 1040 çeliği kullanılmıştır. SAE 1040'ın kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de gösterilmiştir. Numuneler işlemeden önce ikiye kesilmiş (60x30x10 mm) ve yüzeyler taşlanmıştır.

Elektrot malzemesi olarak Cu tozu (toz boyutu<84,7  $\mu$ m) ve Cr tozu (toz boyutu<127  $\mu$ m) kullanılmıştır. Cu ve Cr tozları üç boyutlu Turbula marka karıştırıcıda üç farklı  $K_t$ 'de (%65-%35, %75-%25 ve %85-%15) karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışımlar 60 ton kapasiteli Dartec marka preste basılmış ve MTI OTF-1200X marka fırında argon gazı atmosferde (3 lt/dak debi) sinterlenmiştir. Sinterleme sonrasında elektrotlar torna tezgâhında işlenerek Ø8x16 mm boyutlarına getirilmiştir.  $K_t$ ,  $P_s$  ve  $T_s$ 'nin işleme performans çıktılarına etkilerini inceleyebilmek için yedi farklı elektrot üretilmiştir (Tablo 2). T/M elektrotların işleme performansı elektrolitik Cu elektrotla karşılaştırılmıştır. İşlemeler Furkan EDM M100A marka elektro erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir. İşleme sırasında dielektrik olarak kullanılan gaz yağı, işleme ortamına basınçlı olarak püskürtülmüştür.

Tablo 3'te işleme parametre değerleri verilmiştir. Her deney iki kere tekrar edilmiş ve ölçümlerin ortalamaları grafiklerde kullanılmıştır.

İİH ve EAH hesaplamaları için, işparçası ve elektrotların ağırlıkları deneylerden önce ve sonra Sartorius marka, GC 1603 S-OCE model dijital tartı ile tartılmıştır. İşparçalarının yüzey pürüzlülükleri Mahr MarSurf M300 model pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskobu, işparçası yüzeylerinin incelenmesinde kullanılmıştır.

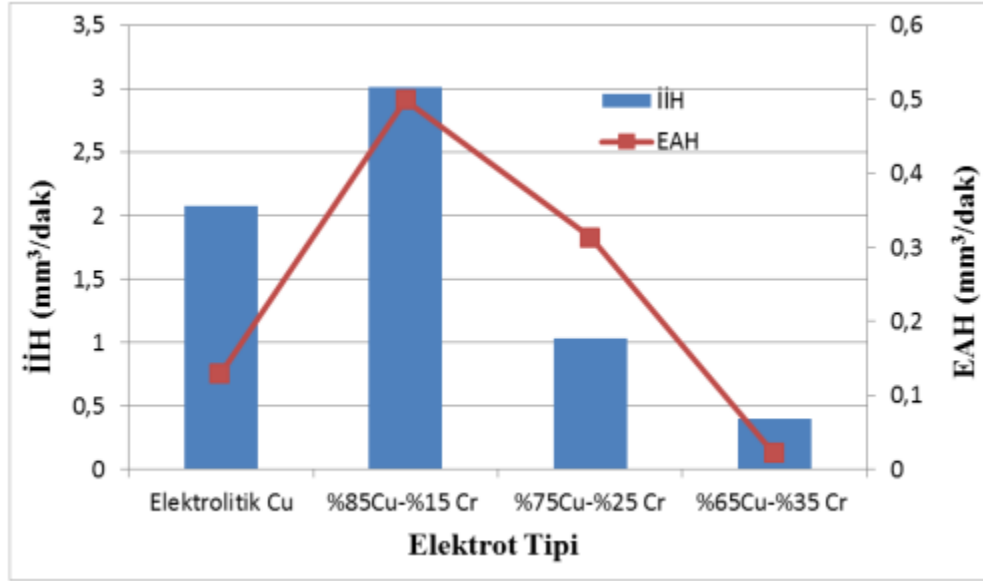
**Tablo 3.** İşleme parametreleri (Machining parameters)

| İşleme parametreleri                | Değer        |
|-------------------------------------|--------------|
| Boşalım akımı ( $i_d$ ) [A]         | 2            |
| Vurum süresi ( $t_s$ ) [ $\mu$ s]   | 25           |
| Kutuplama                           | Elektrot (+) |
| Bekleme süresi ( $t_d$ ) [ $\mu$ s] | 25           |
| Açık devre gerilimi [ $V_s$ ]       | 50           |
| İşleme süresi [dak]                 | 60           |

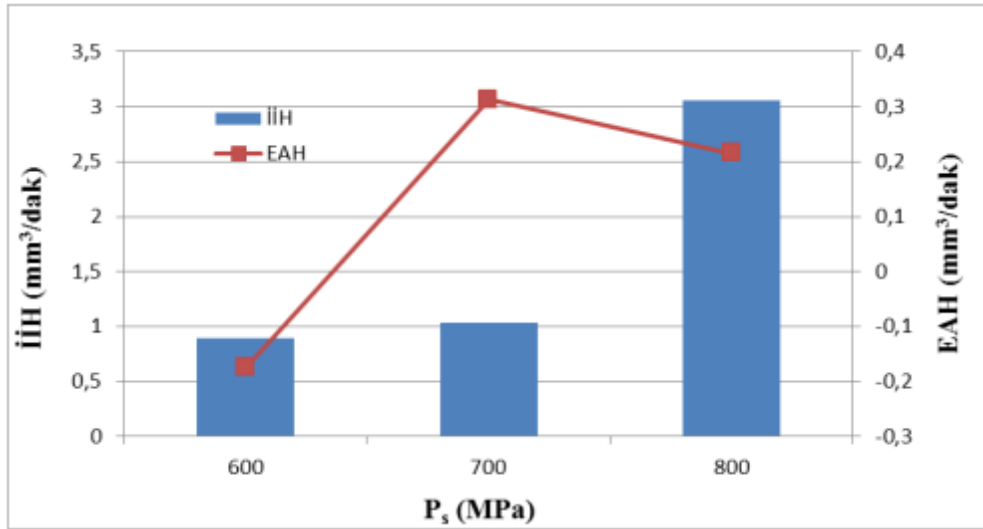
## 3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

### 3.1 İİH ve EAH sonuçları (MRR and EWR results)

Şekil 2'de üç farklı  $K_t$ 'deki Cu-Cr T/M elektrot ve elektrolitik Cu elektrotla yapılan işlemlerde elde edilen İİH ve EAH değerleri görülmektedir. %85 Cu-%15 Cr elektrot en yüksek İİH ve EAH, %65 Cu-%35Cr elektrot ise en düşük İİH ve EAH değerlerini vermiştir. Sonuçta, T/M elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça İİH ve EAH değerleri azalmıştır. Bu çalışmanın yazarları artan Cr miktarı ile İİH azalmasının elektrotun elektrik iletkenliği ile ilgili olduğunu düşünmektedirler. Cu, Cr'den daha yüksek elektrik iletkenliğine sahip olduğu için, T/M elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça, elektrotun elektrik iletkenliği azalmakta, işleme sırasında elektrot ile işparçası arasında daha az sayıda boşalım vurumu oluşmakta ve bu da sonuç olarak daha düşük İİH'na sebep olmaktadır. Ayrıca, Cr miktarının artışı ile elektrotun ısı iletkenliği azalmakta, bunun sonucunda da elektrot üzerinde oluşan kraterler daha küçük boyutlu olmaktadır (daha küçük EAH). Bir diğer etkili sebep ise, Tsai ve arkadaşlarının da [14] belirttiği gibi, Cr miktarı arttıkça elektrotun bağlama kuvvetinin azalmasıdır. Bunun sonucunda, elektrottan daha fazla toz malzeme koparak işleme ortamında (dielektrik içinde) birikmekte, bu da işleme sürekliliğini ve verimini bozmaktadır (düşük İİH).



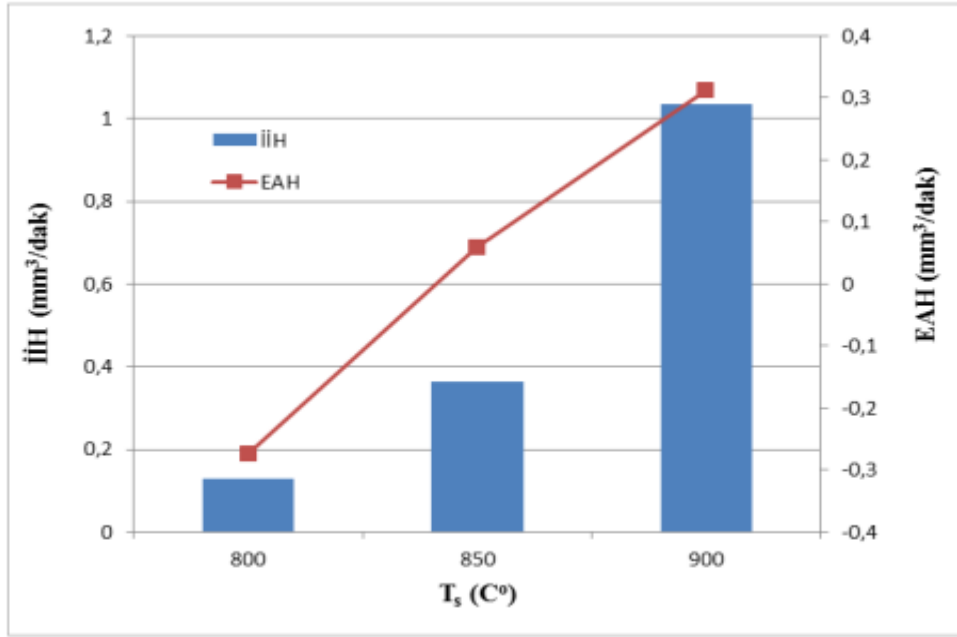
**Şekil 2.** Elektrolitik Cu elektrot ve farklı  $K_t$ 'lerdeki T/M elektrotlar için İİH ve EAH sonuçları (MRR and EWR results for electrolytic Cu electrode and P/M electrodes with different  $K_t$  values)



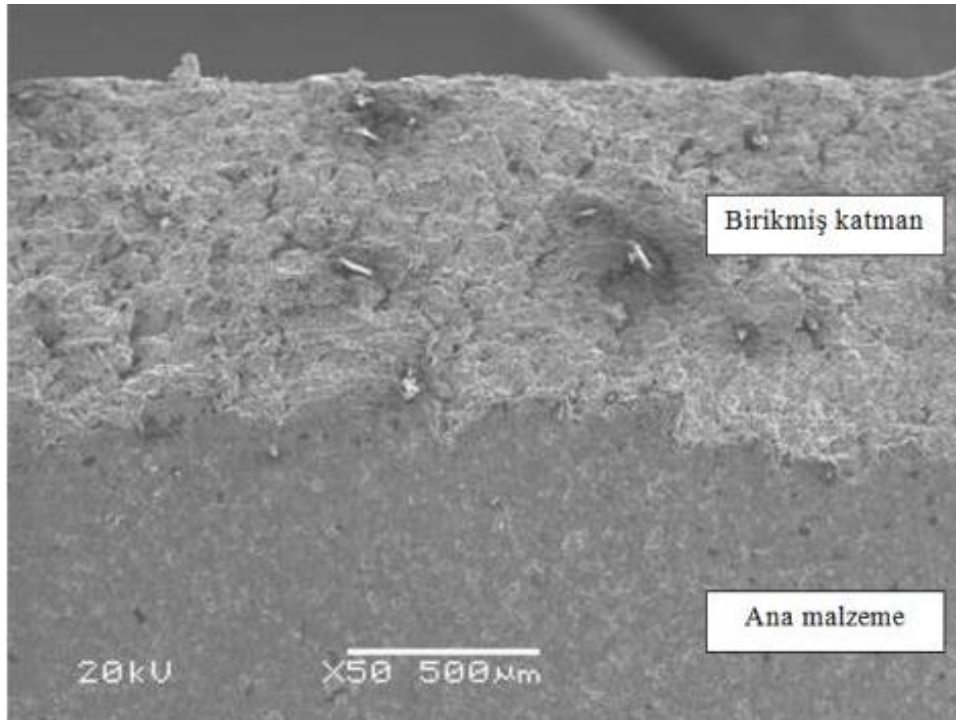
**Şekil 3.** Farklı  $P_s$ 'lerde üretilen T/M elektrotların İİH ve EAH değerleri (MRR and EWR results of P/M electrodes produced at different  $P_s$  values)

Şekil 3 ve 4'te farklı  $P_s$  ve  $T_s$  değerlerinde üretilen T/M elektrotların İİH ve EAH değerleri gösterilmiştir.  $P_s$  ve/veya  $T_s$  düşük olduğunda, toz tanecekleri birbirlerine gevşek bir şekilde bağlanmaktadır. Bu, çalışma aralığında (dielektrik sıvı içinde) elektrottan kopan fazla miktarda Cu ve Cr toz birikmesine ve sonuçta düşük İİH'ye sebep olmaktadır.  $P_s$  ve/veya  $T_s$  artırıldığında ise, toz taneceklerinin birbirlerine daha kuvvetli bağlanmakta, yoğunluk ve elektrik iletkenlik artmaktadır [28]. Bu çalışmada,  $P_s=600$  MPa ve  $T_s=800$  C'de üretilen T/M elektrotların EAH değeri negatif çıkmıştır. Yani elektrot üzerine biriken (kaplanan) malzeme miktarı, elektrottan kopan malzeme miktarından fazladır. İşleme sırasında işparçası yüzeyinden kopan ergimiş malzemenin

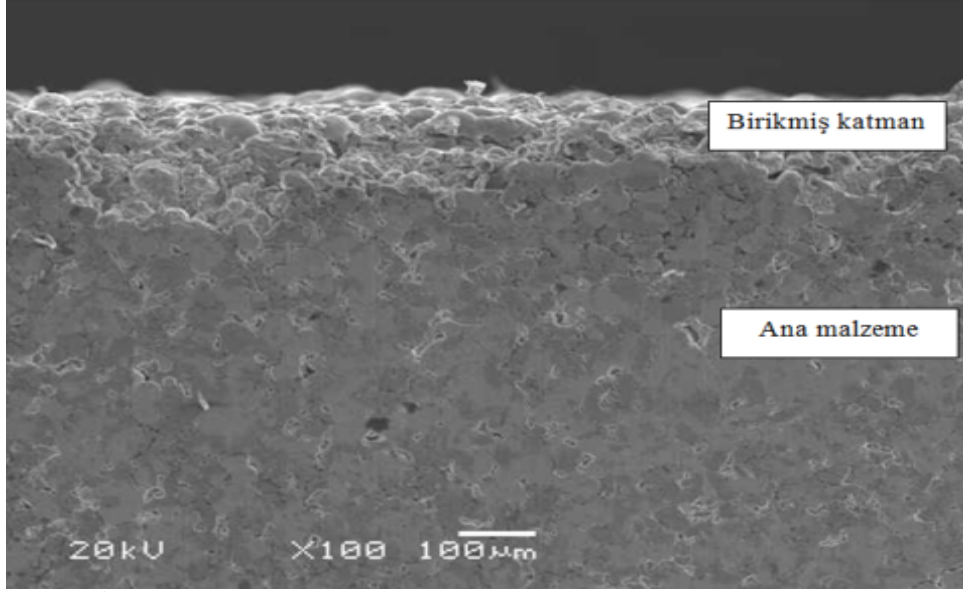
elektrot yüzeyine yapıştığı daha önceki bir çalışmada da rapor edilmişti [29]. Hidro-karbon esaslı dielektrik sıvısında bulunan C işleme sırasında bozunarak ayrılmakta ve elektrot yüzeyine alaşım olarak siyah bir katman oluşturmaktadır. Marafona [30] bu katmanda sadece C değil, işparçasında bulunan Fe, Cr, Va ve Mo gibi elementlerin de var olduğunu göstermiştir. TEM (Şekil 5 ve 6) ve EDS (Şekil 7 ve 8) analizleri,  $P_s=600$  MPa'da üretilen elektrotun yüzeyindeki katmanın yaklaşık %46 C, %17 Fe, %28 Cu ve %7 Cr içerdiğini göstermiştir.  $T_s=800$  C'de üretilen T/M elektrotun yüzeyindeki katman ise yaklaşık %17 C, %18 Fe, %49 Cu ve %14 Cr içermektedir.



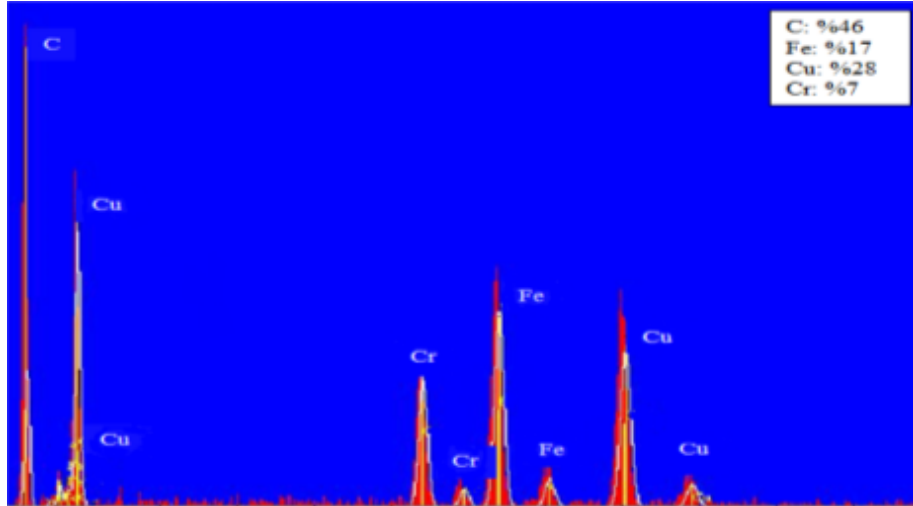
Şekil 4. Farklı T<sub>s</sub>'lerde üretilen T/M elektrotların İİH ve EAH değerleri (MRR and EWR results of P/M electrodes produced at different T<sub>s</sub> values)



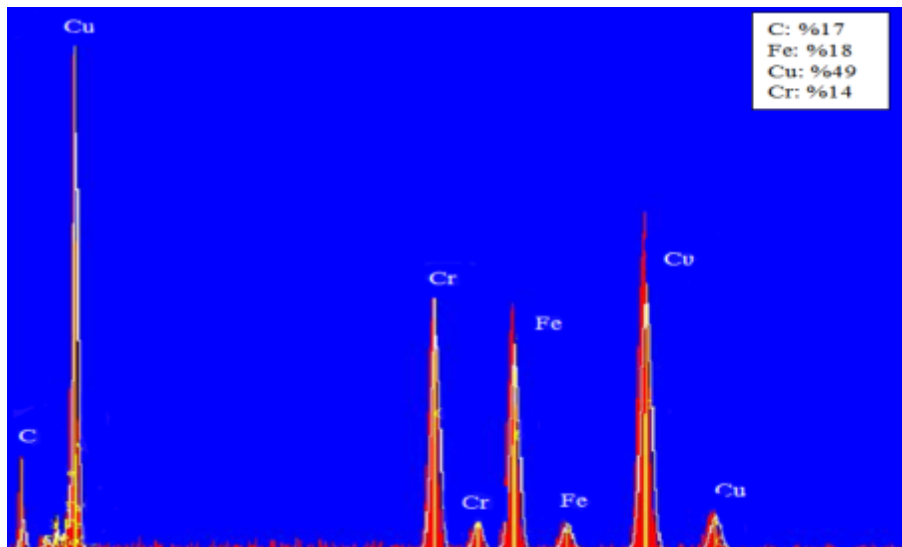
Şekil 5. P<sub>s</sub>=600 MPa'da üretilen T/M elektrotun kesitinin TEM fotoğrafı (SEM photograph of the cross-section of the P/M electrode produced at P<sub>s</sub>=600)



**Şekil 6.**  $T_s=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de üretilen T/M elektrotun kesitinin TEM fotoğrafı (SEM photograph of the cross-section of the P/M electrode produced at  $T_s=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



**Şekil 7.**  $P_s=600\text{ MPa}$ 'da üretilen T/M elektrotun yüzeyinin EDS analizi (EDS analysis of the surface of the P/M electrode produced at  $P_s=600\text{ MPa}$ )

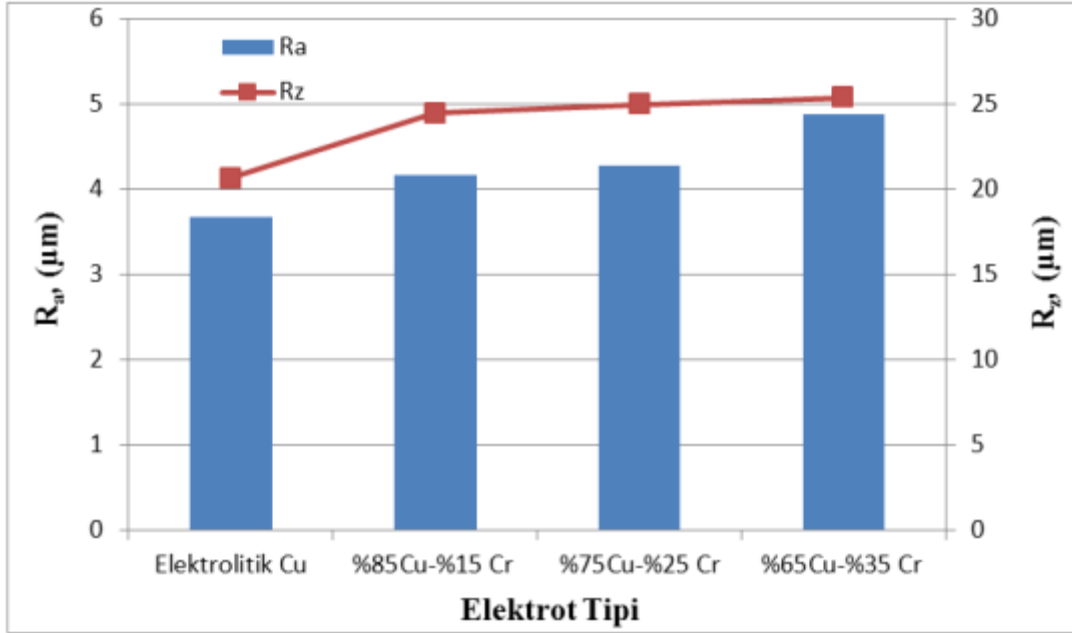


**Şekil 8.**  $T_s=800\text{ }^{\circ}\text{C}$  üretilen T/M elektrotun yüzeyinin EDS analizi (EDS analysis of the surface of the P/M electrode produced at  $T_s=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

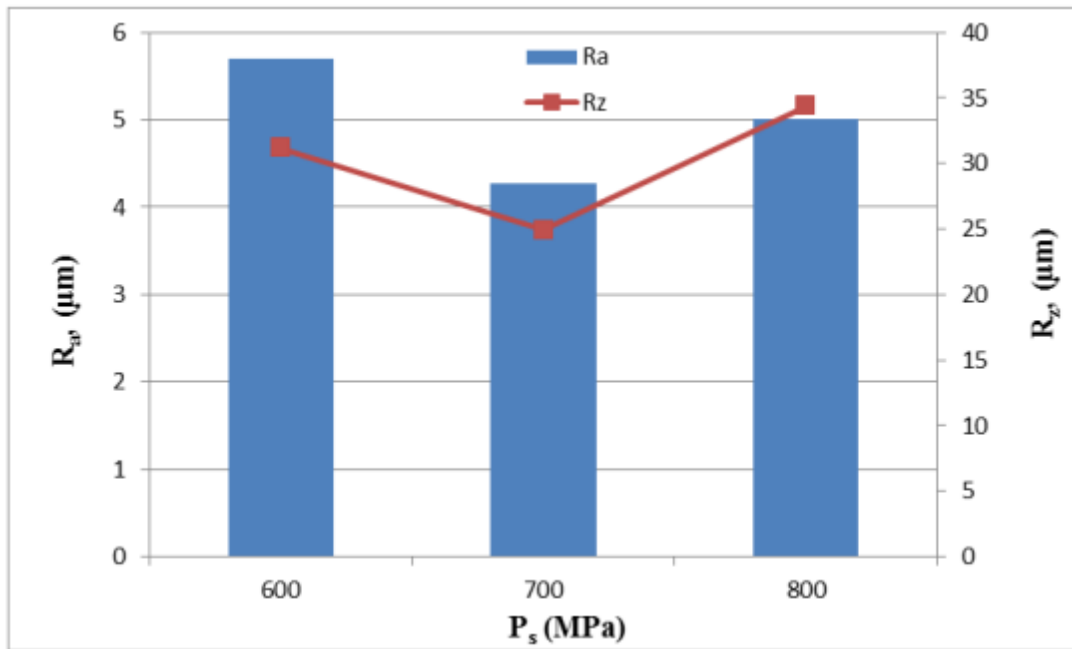
### 3.2 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları (Surface Roughness Results)

Elektrolitik Cu elektrot, T/M elektrotlara göre daha iyi  $R_a$  ve  $R_z$  değerleri vermiştir (Şekil 9). T/M elektrotlardaki Cr miktarı arttıkça  $R_a$  ve  $R_z$  artmıştır. Bunun sebebi, elektrottaki Cr miktarının azalması ile elektrik iletkenlik arttığında, Jahan ve arkadaşlarının da belirttiği gibi [23], her bir boşalımda daha etkili vurumların oluşması ve kısa devre oluşumlarının azalmasıdır. Bu sayede etkili vurum sayısı (frekansı)

artmakta ve daha iyi yüzey pürüzlülüğüne (daha düşük  $R_a$  ve  $R_z$ ) sahip yüzeyler elde edilmektedir. Şekil 10 ve 11'de farklı  $P_s$  ve  $T_s$  değerlerinde üretilen T/M elektrotlarla yapılan işlemler sonucunda elde edilen  $R_a$  ve  $R_z$  sonuçları gösterilmiştir.  $P_s$  600 MPa'dan 800 MPa'a ve  $T_s$  800 C°'den 900 C°'ye çıkarıldığında,  $R_a$  ve  $R_z$  önce azalmış, sonra artmıştır. Şekil 12'de işlenmiş yüzeylerin TEM görüntüleri,  $R_z$  değerleri en düşükten en yükseğe doğru sıralanarak gösterilmiştir. Görüntülerden de görülebileceği gibi  $R_z$  arttıkça, yüzey daha mat bir görünüm almaktadır.

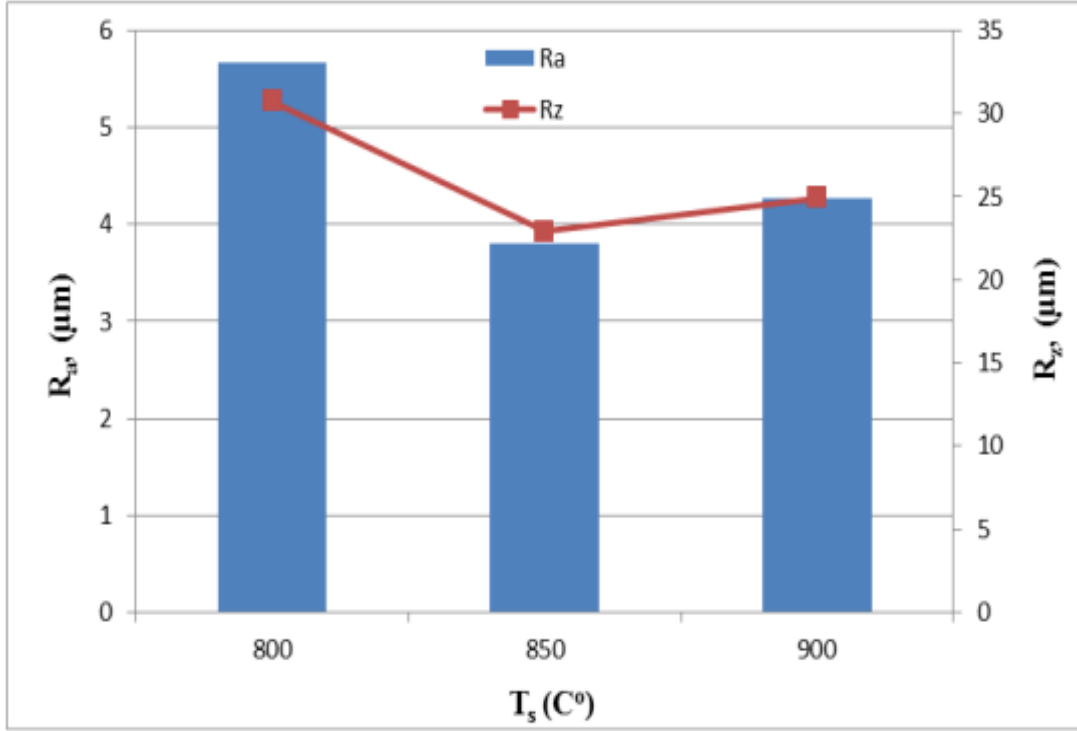


Şekil 9. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı  $K_t$ 'lerdeki T/M elektrotların  $R_a$  ve  $R_z$  sonuçları ( $R_a$  and  $R_z$  results of electrolytic Cu electrode and P/M electrodes at different  $K_t$  values)



Şekil 10. Farklı  $P_s$  değerlerinde üretilen elektrotların işparçası  $R_a$  ve  $R_z$  sonuçlarına etkisi (Effect of P/M electrodes produced at different  $P_s$  values on workpiece  $R_a$  and  $R_z$  results)





**Şekil 11.** Farklı  $T_s$  değerlerinde üretilen elektrotların işparçası  $R_a$  ve  $R_z$  sonuçlarına etkisi (Effect of P/M electrodes produced at different  $T_s$  values on workpiece  $R_a$  and  $R_z$  results)

### 3.3 Birikmiş Katman Kalınlığı Ölçümleri (Deposited Layer Thickness Measurements)

Choudhary ve arkadaşlarının da belirttiği gibi [8], işparçası yüzeyinden ergiyen malzeme dielektrik sıvısı tarafından hızlı bir şekilde ortamdan uzaklaştırılmazsa, tekrar işparçası yüzeyine yapışmakta ve bir katman oluşturmaktadır.

Ana metalin üzerinde üç farklı tabaka halinde (yüzeyde ergimiş-katılmış katman, altında ısıl olarak etkilenmiş katman ve en altta geçiş katmanı) biriken bu katmanın toplam kalınlığı  $400 \mu\text{m}$ 'ye kadar çıkmaktadır [31].

Şekil 13'te örnek olarak, işlenmiş yüzey kesitinin TEM görüntüsü gösterilmiştir. Tablo 4'te ise her bir numune kesitinden ölçülen en yüksek katman kalınlıkları sunulmuştur.

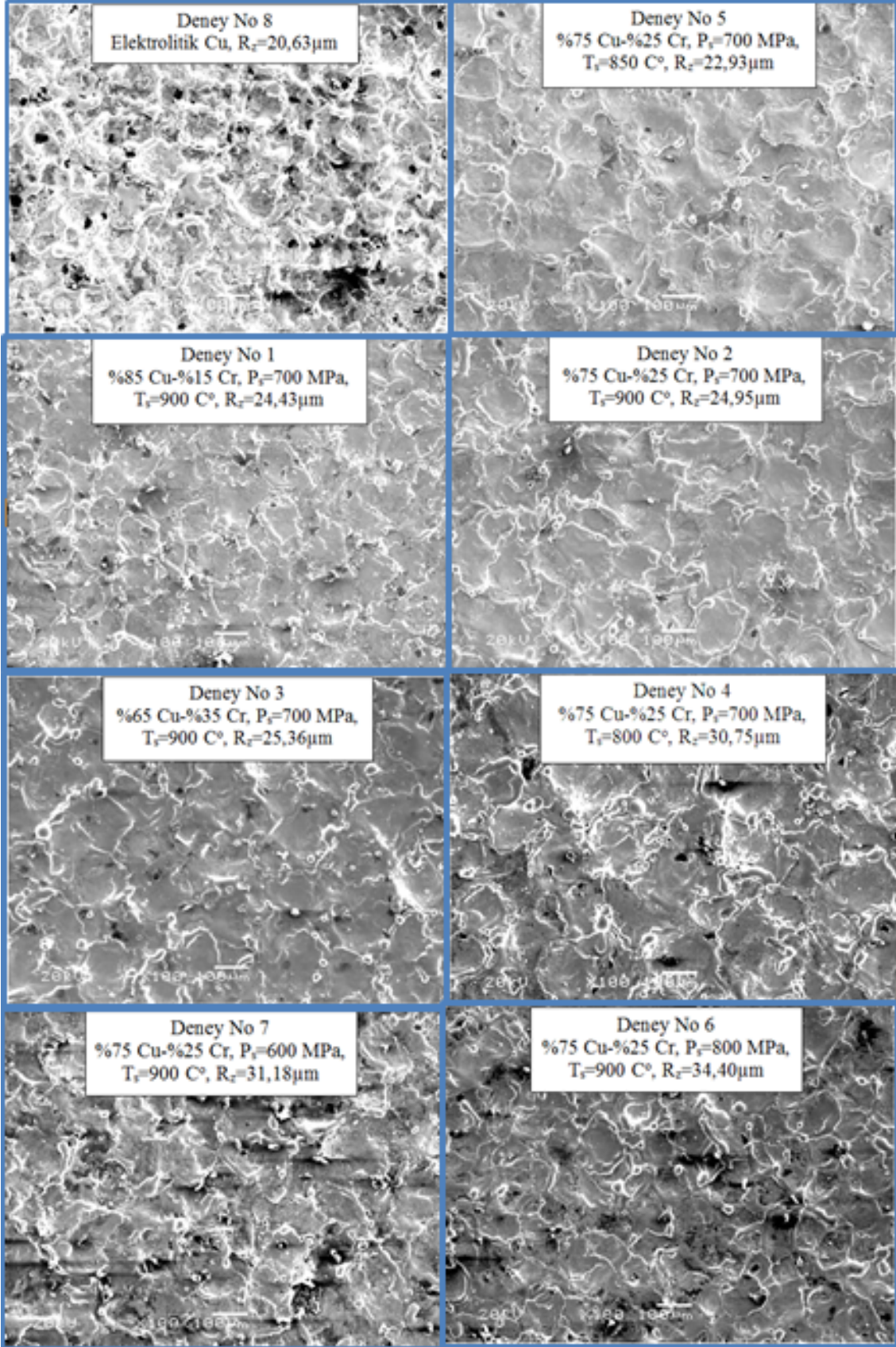
Tablo 4 incelendiğinde,  $P_s$  ve  $T_s$  değişiminin yüzeyde oluşan katman kalınlığı değişimi ile doğru orantılı olmadığı ancak elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça yüzeyde oluşan katman kalınlığının arttığı görülmüştür.

**Tablo 4.** Yüzeydeki azami birikmiş katman kalınlığı (Maximum thickness of deposited layer on surface)

| Deney No | Azami Katman Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------|--|
| 1        | 46                                       |
| 2        | 230                                      |
| 3        | 270                                      |
| 4        | 145                                      |
| 5        | 25                                       |
| 6        | 15                                       |
| 7        | 27                                       |
| 8        | 22                                       |

### 3.4 EDS analizleri (EDS analysis)

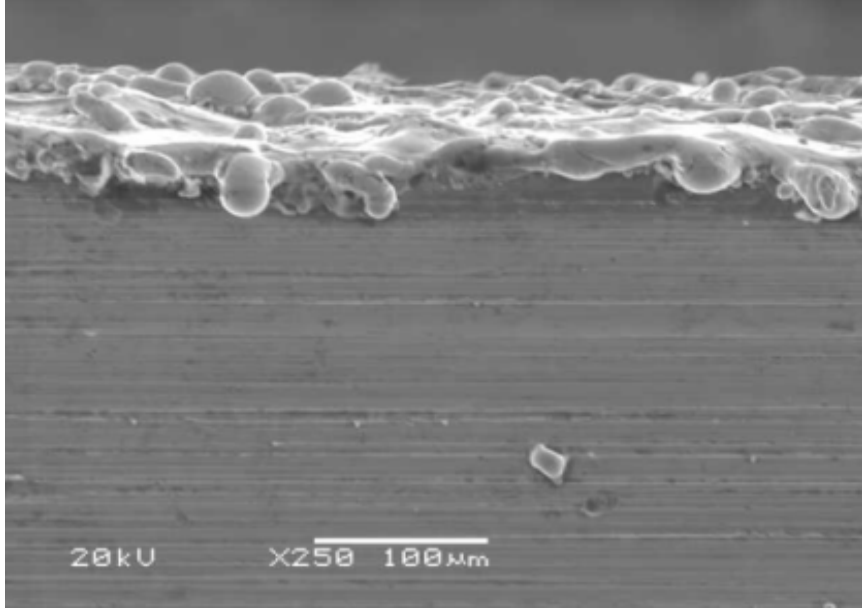
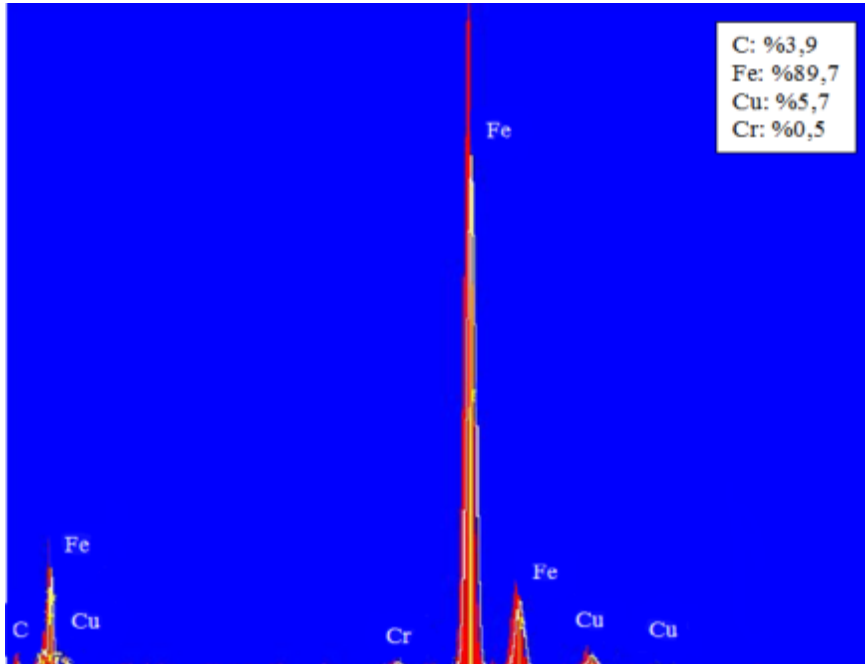
İşlenmiş örnek bir yüzey için EDS analizi Şekil 14'te gösterilmiştir. Tablo 5'ten de görülebileceği gibi Cu ve Cr tozları, işleme sırasında elektrottan kopup işparçası yüzeyinde birikmiştir. İşlenmiş yüzeydeki Cu ve Cr miktarının, elektrottaki Cr oranından bağımsız olduğu görülmüştür.  $P_s$  ve  $T_s$ 'in artmasıyla, yüzeydeki Cu ve Cr miktarı azalmıştır (elektrottaki tozların birbirine daha kuvvetli bir şekilde bağlanmaları ve işleme sırasında elektrottan kopmalarının zorlaşması [13] nedeniyle).



Şekil 12. İşlenmiş yüzeylerin TEM görüntüleri (SEM photographs of machined surfaces)

**Tablo 5.** İşlenmiş yüzeydeki malzemeler ve miktarları (Types and amounts of the material on machined surface)

| Deney No | Malzeme |        |        |        |
|----------|---------|--------|--------|--------|
|          | C (%)   | Cr (%) | Fe (%) | Cu (%) |
| 1        | 3,9     | 0,5    | 89,7   | 5,7    |
| 2        | 6,9     | 0,5    | 88,8   | 3,6    |
| 3        | 9,7     | 2,1    | 83,2   | 4,8    |
| 4        | 7,5     | 1,4    | 82,8   | 8,2    |
| 5        | 7,0     | 1,4    | 86,4   | 5,1    |
| 6        | 4,4     | 0,4    | 92,1   | 2,9    |
| 7        | 15,1    | 0,6    | 79,9   | 4,3    |
| 8        | 17,4    | -      | 81,3   | 1,1    |

**Şekil 13.** İşlenmiş yüzey kesitinin örnek TEM görüntüsü (1 nolu deney) (Sample SEM photograph of the cross-section of the machined surface (experiment no 1))**Şekil 14.** İşlenmiş örnek bir yüzeyin EDS analizi (1 nolu deney) (Sample EDS analysis of a machined surface (experiment no 1))

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Cu-Cr T/M elektrotların üretim parametrelerinden karıştırma oranı  $K_t$ , sıkıştırma basıncı  $P_s$  ve sinterleme sıcaklığı  $T_s$  gibi parametreler değiştirilerek, EEİ'de işleme yanında yüzey kaplaması da yapılabileceği gösterilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur:

Uygun  $K_t$  değerlerinde (örneğin %85 Cu-%15 Cr), Cu-Cr T/M elektrotlar, elektrolitik Cu elektrottan daha yüksek İİH değerleri verebilmektedir.

T/M elektrot içerisindeki Cr miktarı arttıkça İHH düşmekte buna karşın EAH iyileşmektedir (azalmaktadır).  $P_s$  ve/veya  $T_s$ 'nin artmasıyla T/M elektrotun yoğunluğu ve elektrik iletkenliği artmakta (toz taneciklerinin birbirlerine daha kuvvetli bağlanmaları sebebiyle) ve bunun sonucu olarak daha yüksek İİH değerleri elde edilebilmektedir.

4 ( $K_t$ =%75Cu-%25Cr,  $P_s$ =700 MPa,  $T_s$ =800 C°) ve 7 ( $K_t$ =%75Cu-%25Cr,  $P_s$ =600 MPa,  $T_s$ =900 C°) numaralı deneylerde, elektrot yüzeyinde içeriğinde C, Cr, Fe ve Cu bulunan bir katman oluşmuştur. Bu katman sayesinde EAH negatif çıkmış yani elektrotta malzeme kaybı yerine malzeme artışı tespit edilmiştir.

Elektrolitik Cu elektrot, işparçası yüzeyinde 3,67  $\mu$ m  $R_a$  ve 20,63  $\mu$ m  $R_z$  değeri vermişken, T/M elektrotlar, 3,80-5,69  $\mu$ m arasında değişen  $R_a$  ve 22,93-34,40  $\mu$ m arasında değişen  $R_z$  değerleri vermiştir. Daha yüksek  $R_z$  değerlerinden dolayı, T/M elektrotlarla işlenen yüzeyler, elektrolitik Cu ile işlenen yüzeye göre daha mat bir görünüme sahip olmuştur.

İşparçası yüzeyinde, içeriğinde Cu, Cr, Fe ve C olan ve kalınlığı 270  $\mu$ m'ye kadar çıkan bir katman oluşmuştur. Yüzey üzerinde oluşan bu birikmiş katman, aslında ana faz malzemesinin işlem sırasında eriyen ve yeniden katılaşmış katmandır ve elektrot vasıtası ile yüzeye taşınan elementler ile zenginleşmiştir. Yapılan deneylerde, bu katmanın kalınlığının elektrottaki Cr miktarı ile orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

#### SEMBOLLER (SYMBOLS)

|       |   |
|-------|---|
| $i_d$ | : Boşalım akımı [A]                     |
| $K_t$ | : Toz karıştırma oranı                  |
| $P_d$ | : Dielektrik püskürtme basıncı [Pa]     |
| $P_s$ | : Sıkıştırma basıncı [MPa]              |
| $R_a$ | : Ortalama yüzey pürüzlülüğü [ $\mu$ m] |
| $R_z$ | : Azami yüzey pürüzlülüğü [ $\mu$ m]    |
| $T_s$ | : Sinterleme sıcaklığı [C°]             |
| $t_s$ | : Vurum süresi [ $\mu$ s]               |
| $V_s$ | : Açık devre gerilimi [V]               |

#### KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

|     |  |
|-----|--|
| EAH | : Elektrot aşınma hızı [ $\text{mm}^3/\text{dak}$ ]  |
| EEİ | : Elektro erozyon ile işleme                         |
| EEK | : Elektro erozyon ile alaşımlama/kaplama             |
| İİH | : İşparçası işleme hızı [ $\text{mm}^3/\text{dak}$ ] |
| TEM | : Taramalı elektron mikroskobu                       |

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 113M183 kodlu ve "Kompozit Toz Metal Elektrotların Elektro Erozyon İle İşleme Performansının Deneysel Araştırılması" isimli proje ile desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sarıkavak, Y. ve Çoğun, C., "Elektro Erozyon ile İşlemede İşleme Mekanizmasının Isıl Modellenmesi", **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 25, Sayı 3, 517-531, 2010.
2. Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K.P. ve Schumacher, B.M., "Advancing EDM Through Fundamental Insight into the Process", **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, Cilt 54, Sayı 2, 64-87, 2005.
3. Ho, K.H. ve Newman, S.T., "State of the art Electrical Discharge Machining", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 37, Sayı 11, 1287-1300, 2003.
4. Naveen, B., Maheshwari, S. ve Sharma, C., "Performance Evaluation of Powder Metallurgy Electrode in Electrical Discharge Machining of AISI D2 Steel Using Taguchi Method", **International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering**, Cilt 2, Sayı 3, 167-171, 2008.
5. Samuel, M.P. ve Philip, P.K., "Powder Metallurgy Tool Electrodes for Electrical Discharge Machining", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 37, Sayı 11, 1625-1633, 1997.
6. Chen, Y.F., Chow, H.M., Lin, Y.C. ve Lin, C.T., "Surface Modification Using Semi-sintered Electrodes on Electrical Discharge Machining", **International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**, Cilt 36, Sayı 5-6, 490-500, 2008.
7. Patowari, P.K., Saha, P. ve Mishra, P.K., "Artificial Neural Network Model in Surface Modification by EDM Using Tungsten Copper Powder Metallurgy Sintered Electrodes", **International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**, Cilt 51, Sayı 5-8, 627-638, 2010.
8. Choudhary, R., Kumar, H. ve Garg, R.K., "Analysis and Evaluation of Heat Affected Zone in Electric Discharge Machining of EN-31 Die

- Steel”, **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**, Cilt 17, 91-98, 2010.
9. Pantelis, D.I., Vaxevanidis, N.M., Houndri, A.E., Dumas, P. ve Jeandin, M., “Investigation into Application of Electrodischarge Machining as Steel Surface Modification Technique”, **Surface Engineering**, Cilt 14, Sayı 1, 55–61, 1998.
  10. Zaw, H.M., Fuh, J.Y.H., Nee, A.Y.C. ve Lu, L., “Formation of a New EDM Electrode Material Using Sintering Techniques”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 89-90, 182-186, 1999.
  11. Li, L., Wong, Y.S., Fuh, J.Y.H. ve Lu, L., “EDM Performance of TiC/Copper-based Sintered Electrodes”, **Materials & Design**, Cilt 22, Sayı 8, 669-678, 2001.
  12. Wang, Z.L., Fang, Y., Wu, P.N., Zhao, W.S. ve Cheng, K., “Surface Modification Process by Electrical Discharge Machining with a Ti Powder Green Compact Electrode”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 129, Sayı 1-3, 139–142, 2002.
  13. Simão, J., Aspinwall, D., El-Menshawyb, F. ve Meadows, K., “Surface Alloying Using PM Composite Electrode Materials When Electrical Discharge Texturing Hardened AISI D2”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 127, Sayı 2, 211–216, 2002.
  14. Tsai, H.C., Yan, B.H. ve Huang, F.Y., “EDM Performance of Cr/Cu Based Composite Electrodes”, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 43, Sayı 3, 245-252, 2003.
  15. Simão, J., Lee, H.G., Aspinwall, D.K., Dewes, R.C. ve Aspinwall, E.M., “Workpiece Surface Modification Using Electrical Discharge Machining”, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 43, Sayı 2, 121-128, 2003.
  16. Moro, T., Mohri, N., Otsubo, H., Goto, A. ve Sait, N., “Study on the Surface Modification System with Electrical Discharge Machine in the Practical Usage”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 149, Sayı 1-3, 65-70, 2004.
  17. Luis, C.J., Puertas, I. ve Villa, G., “Material Removal Rate and Electrode Wear Study on the EDM of Silicon Carbide”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 164-165, 889-896, 2005.
  18. Patowari, P.K., Mishra, U.K., Saha, P. ve Mishra, P.K., “Surface Modification of C-40 Steel Using WC-Cu P/M Green Compact Electrodes in EDM”, **Proceedings of the 1st International and 22nd AIMTDR Conference**, IIT, Roorkee, India, 875–879, 2006.
  19. Çogun, C., Özerkan, B. ve Karaçay, T., “An Experimental Investigation on Effect of Powder Mixed Dielectric on Machining Performance in Electric Discharge Machining (EDM)”, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Cilt 220, Sayı 7, 1035-1050, 2006.
  20. Bai, C.Y. ve Koo, C.H., “Effects of Kerosene or Distilled Water as Dielectric on Electrical Discharge Alloying of Superalloy Haynes 230 with Al–Mo Composite Electrode”, **Surface & Coatings Technology**, Cilt 200, 4127-4135, 2006.
  21. Bai, C.Y., “Effects of Electrical Discharge Surface Modification of Superalloy Haynes 230 with Aluminum and Molybdenum on Oxidation Behavior”, **Corrosion Science**, Cilt 49, Sayı 10, 3889–3904, 2007.
  22. Ho, S.K., Aspinwall, D.K. ve Voice, M., “Use of Powder Metallurgy (PM) Compacted Electrodes for Electrical Discharge Surface Alloying/Modification of Ti–6Al–4V Alloy”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 191, Sayı 1-3, 123-126, 2007.
  23. Jahan, M.P., Wong, Y.S. ve Rahman, M., “A Study on the Fine-finish Die-sinking Micro-EDM of Tungsten Carbide Using Different Electrode Materials”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 209, Sayı 8, 3956-3967, 2009.
  24. Patowari, P.K., Saha, P. ve Mishra, P.K., “Taguchi Analysis of Surface Modification Technique Using W-Cu Powder Metallurgy Sintered Tools in EDM and Characterization of the Deposited Layer”, **International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**, Cilt 54, Sayı 5-8, 593–604, 2011.
  25. Das, A. ve Misra, J.P., “Experimental Investigation on Surface Modification of Aluminum by Electric Discharge Coating Process Using TiC/Cu Green Compact Tool-electrode”, **Machining Science and Technology**, Cilt 16, Sayı 4, 601-623, 2012.
  26. Kumar, D., Mittal, K., Kataria, S., Kadiyan, S. ve Sharma, S., “Experimental Investigation on Surface Modification of WC-Co by Electric Discharge Coating Process Using SiC/Cu Green Compact Tool-electrode”, **International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology**, Cilt 3, Sayı 2, 274-278, 2013.
  27. Pecas, P. ve Henriques, E., “Influence of Silicon Powder-mixed Dielectric on Conventional Electrical Discharge Machining”, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 43, Sayı 14, 1465–1471, 2003.
  28. Naveen, B., Sachin, M., Chitra, S. ve Anil, K., “Technological Advancement in Electrical Discharge Machining with Powder Metallurgy Processed Electrodes: a Review”, **Materials and Manufacturing Processes**, Cilt 25, Sayı 10, 1186-1197, 2010.
  29. Murray, J., Zdebski, D. ve Clare, A.T., “Workpiece Debris Deposition on Tool Electrodes and Secondary Discharge Phenomena

- in Micro-EDM”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 212, Sayı 7, 1537-1547, 2012.
30. Marafona, J., “Black Layer Characterisation and Electrode Wear Ratio in Electrical Discharge Machining (EDM)”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 184, Sayı 1-3, 27-31, 2007.
31. Ergün, Z.E. ve Çoğun, C., “Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) İş Parçası Yüzey Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 21, Sayı 3, 427-441, 2006.