

# ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE (EEİ) İŞPARÇASI YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK PROFİLİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

**Can ÇOĞUN, Birol KOCABAŞ ve Ali ÖZGEDİK**

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570, Ankara

## ÖZET

Bu çalışmada elektro erozyon ile işlemede (EEİ) değişik parametrelerde işlenmiş işparçalarının yüzey profilleri deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan işparçaları kalıpcılıkta yaygın kullanılan Ç2080 takım çeliğinden hazırlanmıştır. Çalışmada, boşalım akımı, vuruş süresi ve dielektrik sıvı basıncı gibi işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımı, vuruş süresi ve dielektrik sıvı basıncı ile arttığı görülmüştür. Ölçüm cihazından elde edilen yüzey pürüzlülük bilgileri bir yazılım yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Yüzey pürüzlülük grafikleri diğer bir yazılım yardımıyla sayısallaştırılmış ve elde edilen pürüzlülük verileri Fourier serileri ile modellenmiştir. 20 terimli Fourier serisinin yüzey profilini iyi bir uyumla temsil edebileceği saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** EEİ, yüzey pürüzlülüğü, Fourier serisi, matematiksel modelleme.

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF WORKPIECE SURFACE PROFILES IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM)

### ABSTRACT

In this study, surface profiles of workpieces machined under varying machining parameters are investigated experimentally and theoretically in electric discharge machining (EDM). Workpiece specimens are prepared from 2080 tool steel, which is widely used in die making. Effects of machining parameters, namely, discharge current, pulse duration and dielectric flushing pressure on surface roughness are also investigated. It is found that surface roughness increases with increasing discharge current, pulse duration and flushing pressure. Surface profile information obtained from the measurement instrument is transferred to computer using a software. Surface profile information is digitized using another software and they are modeled in form of Fourier series. It is found that the profiles can be well presented by Fourier series with 20 terms.

**Keywords:** EDM, surface roughness, Fourier series, mathematical modeling.

### GİRİŞ

Elektro erozyon ile işleme (EEİ) elektriksel olarak iletken bir işparçasına yüksek frekanslı elektrik boşalmalarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece işparçasından küçük parçacıkların eritilerek ve buharlaştırılarak koparılması prensibine dayanan bir alışılmamış işleme yöntemidir. EEİ yöntemi günümüz teknolojisinde kalıp imalatında hızla kullanımı artan bir metal işleme yöntemidir. Yüksek mukavemetli, karmaşık geometri ve sert malzemelerin işlenebilmesi EEİ yöntemini modern imalat yöntemleri arasında seçkin bir noktaya getirmiştir.

Elektrik boşalmaları gerilim vuruşlarının uygulanması sonucu takım elektrodu (kısaca "elektrot") ile işparçası arasında oluşur. Dielektrik sıvı içerisine batırılmış durumda olan işparçası ve elektrot 0.01-0.5 mm'lik bir aralıkla birbirinden ayrılmıştır (işleme aralığı). Boşalım gerilimi işleme aralığının büyüklüğüne ve dielektrik sıvının yalıtkanlık direncine bağlıdır. Gerilim vuruşunun uygulanmasını takiben elektrot ve işparçası arasındaki en yakın iki nokta arasında bir kanal iyonlaşır. Oluşan elektrik boşalımı temas ettiği elektrot ve işparçası yüzeylerinin erimesine ve buharlaşmasına neden olur. Sonuçta, işparçasında küçük kraterler oluşacak

şekilde malzemeler yüzeyden kopar ve dielektrik sıvı sirkülasyonu tarafından ortamdan uzaklaştırılır.

EEİ yönteminde oluşan yüzeyler kratersi yapıdadır. Bu nedenle krater boyutları ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü vurumların boşalım enerjileri ile ilgilidir. Bu işleme yöntemi ile düşük işleme hızlarında 0.05-0.10 µm ortalama yüzey pürüzlülüğünde ( $R_a$ ) bitirme yüzeyi elde edilmektedir. Hızlı (kaba) işlemede (yaklaşık 250 cm<sup>3</sup>/saat işleme hızında) ise 20 µm  $R_a$  değerinde yüzey pürüzlülüğü elde edilir. Hızlı işlemede, yüksek boşalım akımı, düşük boşalım frekansı, yüksek kapasitans ve minimum boşalım gerilimi gereklidir. İyi bitirme yüzeyi için (hassas işleme) bu şartların tersi uygulanır.

## LİTERATÜR ÖZETİ

EEİ yönteminde işparçası yüzey pürüzlülüğü ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Burada, bu çalışmalar arasında güncel olanlarına yer verilecektir.

Wang ve arkadaşları [1] bakır elektrot ve gazyağı dielektrikle yaptıkları deneylerde 5, 10, 15 A boşalım akımı ve 100-600 µs vurum süresi değerlerini kullanmışlar ve östemperlenmiş sünek demiri işleme hızı, elektrot aşınma hızı (kısaca "aşınma hızı") ve yüzey pürüzlülüğü açısından incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün uygulanan akım ve vurum süresi ile arttığını deneysel olarak bulmuşlar ve aralarındaki ilişkiyi Eşitlik 1'deki formda sunmuşlardır.

$$R_a = A(i_e)^B(t_i)^C [\mu\text{m}], \quad (1)$$

$$(A = 1.078166, B = 0.299662, C = 0.227414, R^2 = 0.93908)$$

Burada  $i_e$  boşalım akımı,  $t_i$  vurum süresi, A, B, C sabitler ve R regresyon katsayısıdır. Erden ve arkadaşları [2] bakır elektrot ve çelik işparçası ile yaptıkları deneysel çalışmada dielektrik sıvı olarak saf su, çeşme suyu, tuzlu ve gliserinli suyun işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü açısından gazyağına göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Jilani ve arkadaşları [3] dielektrik sıvı olarak saf su, çeşme suyu ve bu ikisinin karışımını bakır ve pirinç elektrotlar kullanarak 4.5, 6, 7.5 A boşalım akımı ve 100-500 µs vurum süresi aralıklarında incelemişlerdir. Saf su ve çeşme suyu kullanıldığında bakır elektrot pirinç elektrottan daha düşük  $R_{maks}$  (maksimum tepçukür yükseklik pürüzlülüğü) değerleri vermiştir.  $R_{maks} = 40-60$  µm aralığı için çeşme suyunun gazyağına ve saf suya göre daha yüksek işleme hızları verdiği bulunmuştur. Her iki tip elektrot ve akım koşullarında vurum süresi arttığında  $R_{maks}$  değerleri artmıştır. Masuzawa [4], dielektrik sıvı olarak su kullanıldığında negatif elektrot polaritesi için vurum süresi ve boşalım akımının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmiştir. Pozitif elektrot polaritesi için yüzey pürüzlülüğü akımın

artması ile artmış ancak vurum süresinden fazla etkilenmemiştir. Köniğ ve arkadaşları [5] dielektrik sıvı olarak deiyonize su ile şeker, glikol, gliserin, polietilen glikol bileşiklerinin sudaki çözeltilerini ve Shell K-60 yağını kullanmışlardır. Gliserinli su, yüzey pürüzlülüğü ve işleme hızı açılarından en iyi sonuçları vermiştir.

Mohri ve arkadaşları [6] bakır elektrot ve Si karışımli gazyağı dielektrik ve doğrudan Si elektrot (saf gazyağı) kullandıkları deneylerinde aynaya yakın işparçası yüzeyleri elde etmişlerdir. Bu koşullarda, yüzey pürüzlülüğünün işleme alanı ile artması da büyük ölçüde azalmıştır. Ming ve arkadaşları [7] yaptıkları çalışmada, hassas işlemede bazı iletken tozların gazyağına eklenmesi ile yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde azaldığını bulmuşlardır. Wong ve arkadaşları ise grafit, Si ve MoS<sub>2</sub> tozlarının dielektriğe katılmasıyla uygun işleme parametrelerinde aynaya yakın yüzeyler elde etmişlerdir [8]. Chow ve arkadaşları ise Ti alaşımı işparçalarında gazyağı dielektriğe Al ve SiC tozu ekleyerek yüzey pürüzlülüğünü azaltmışlardır [9].

Lee ve arkadaşları WC işparçalarında işleme parametrelerinin işleme performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır [10]. Yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımının, gerilimin ve vurum süresinin artması ile arttığı, ancak, belli bir dielektrik sıvı basıncı ve vurum ara süresi için optimum değerlerin olduğu belirtilmiştir. Chen ve arkadaşları [11], değişik boşalım akımı, vurum süresi ve vurum ara süresi değerlerinde deneyler yaparak yüzey pürüzlülüğü için aşağıdaki empirik ifadeyi bulmuşlardır:

$$R_{maks} = 1.5\pi(F_c i_e V_e t_i)^{1/3} \quad (2)$$

Burada,  $F_c$  malzeme, elektrot ve dielektrik sıvıya bağlı çarpım katsayısı ve  $V_e$  ortalama boşalım gerilimidir. Lonardo ve arkadaşları [12] Cu elektrot kullanıldığında grafitte göre aşınmanın arttığını ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığını bulmuşlardır. Dielektrik sıvı püskürtüldüğünde yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Lin ve arkadaşları [13] ise bilyalı dövme (ball burnishing) tekniği ile EEİ yöntemini birleştirerek ZrO<sub>2</sub> bilyalar kullanmak suretiyle yüzey pürüzlülüğünde önemli derecede iyileştirmeler sağlamış, mikroçatlak ve gözenek oluşumunu önlemişlerdir.

Yan ve arkadaşları [14] ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061 Al metal matris kompozit malzemenin bilyalı dövme kullanılarak EEİ yöntemi ile işlenmesinde, işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde %55-92 arasında bir iyileşme elde etmişlerdir. Yan ve arkadaşları [15-17] diğer çalışmalarında aynı kompozit malzemenin disk ve tüp şeklindeki elektrotlar ile işlenmesini ve bu malzemeye kör delik delinmesini incelemişlerdir. Çalışmalarında gerilim, polarite, vurum süresi, boşalım akımı ve elektrot

çevresel dönüş hızının yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. Ramulu ve arkadaşları [18] ise EEİ yönteminin yüzey etkilerinin SiC/Al metal matris kompozit malzemesinin yorulma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Diğer bir çalışmada, aynı büyüklükteki bir hacmin levha ve 3-boyutlu elektrotlar ile işlenmesi sonucu oluşan yüzey pürüzlülükleri karşılaştırılmıştır. Levha elektrot kullanımında 3-boyutlu elektrotlara nazaran daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir [19].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, vurum süresinin, boşalım akımının, dielektrik sıvı cinsinin, basıncının ve içine karıştırılan tozların, elektrot malzemesinin, işleme alanının ve polaritenin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelendiği ve sonuçların grafiksel veya basit deneysel empirik formüller şeklinde ifade edildiği görülmektedir.

Bu çalışmanın yazarlarının bilgisi dahilinde EEİ yöntemi sonucu elde edilen yüzey profillerini ifade edebilecek bir matematiksel modelin veya formulasyonun arayışına gidilmemiştir. Bu tür bir modelin bulunması halinde yüzey pürüzlülük değerlerinin önceden hesaplanabilmesi yanında işlenmiş yüzey profillerinin de görünümü tahmin edilebilecektir. Bu çalışmada, öncelikle EEİ yönteminde vurum süresinin, boşalım akımının ve dielektrik sıvı basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenecek, takiben elde edilen yüzey profillerinin matematiksel olarak modellenmesi için ileri sürülen yaklaşımın mantığı, adımları ve elde edilen sonuçlar sunulacaktır.

## DENEYLER

### Deney Numuneleri

Deneyel çalışmalar için 48 adet işparçası-elektrot çifti hazırlanmıştır. Elektrot olarak, 20 mm çapında elektrolitik bakır torna ile 18 mm çapına indirilmiştir. Elektrotların ortasına dielektrik sıvı püskürtmesi için 5 mm çapında boydan delik delinmiştir. İşparçası malzemesi olarak, kalıpcılıkta yaygın kullanılan Ç2080 takım çeliği kullanılmıştır. İşparçası 39x44 mm kesitindeki malzemeden 17 mm kalınlıkta kesilmiş ve geniş yüzeyleri taşlanmıştır. Deneylerde

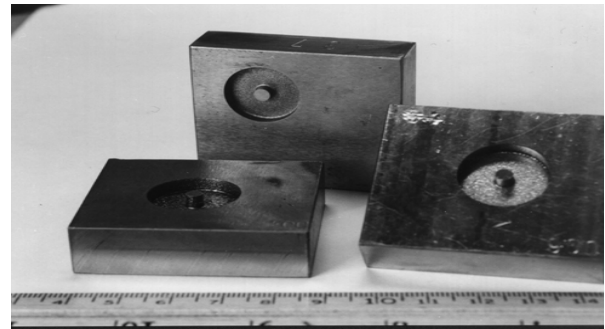
kullanılan elektrot ve işparçaları Şekil 1'de görülmektedir.

### Tezgah ve İşleme Koşulları

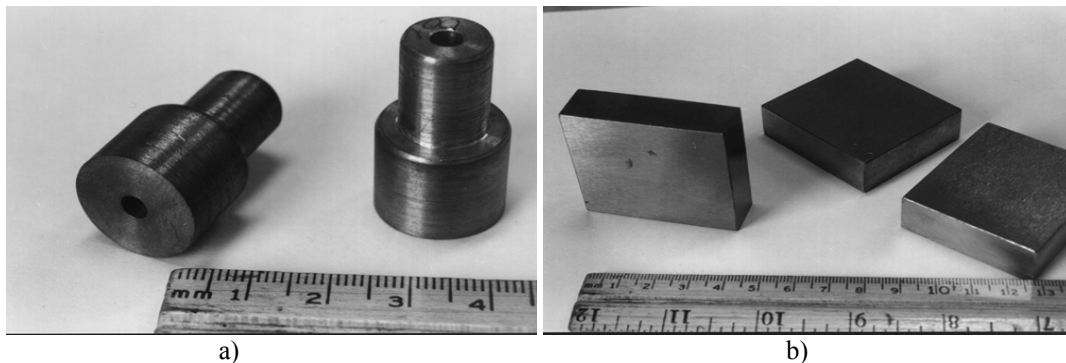
İşleme deneyleri için, Furkan marka EDM M25A tipi bir elektro erozyon tezgahı kullanılmıştır. İş başlığının aşağı ilerleme hareketi, otomatik derinlik kontrol sistemi yardımıyla önceden belirlenen değere göre (8 mm) yapılmıştır. Dielektrik sıvı olarak "Tellus" kullanılmıştır. Boşalım akımı ( $i_c$ ) olarak 12, 18, 25 A, vurum süresi ( $t_i$ ) olarak 25, 50, 100, 200  $\mu$ s, dielektrik sıvı püskürtme basıncı ( $P_i$ ) olarak 0.75, 1, 1.25, 1.5 bar kullanılmıştır. Vurum ara süresi ( $t_o$ ) 25  $\mu$ s, açık devre gerilimi ( $V_o$ ) 80V ve + polarite tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Deneyel tasarım Tablo1'de görülmektedir.

### Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi, Yüzey Profillerinin Eldesi ve Sayısalştırılması

Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümünde Rank Taylor Hobson Surtronic 3+ adlı izleyici uçlu yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihazın hassasiyeti  $R_a$  için 0.2  $\mu$ m,  $S_m$  (ölçüm uzunluğu boyunca ölçülen profil ortalama çizgisinde tepeler arası uzunluklarının ortalaması) için 0.5  $\mu$ m'dir. İşlenmiş numunelerin  $R_a$  değerleri 5-10  $\mu$ m civarında tahmin edildiğinden standart tablolar kullanılarak örnekleme uzunluğu ( $L_c$ ) 0.8 mm, ölçme uzunluğu ( $L_n$ ) 4 mm ( $5.L_c$ ) ve travers uzunluğu ( $L_t$ ) 4.2 mm olarak seçilmiştir. İşlenmiş yüzeyler numunelerin üst yüzeyden 8 mm aşağıda kaldığından (Şekil 2) numunelerin üst yüzeylerinden freze ile 7.8 mm



Şekil 2. Numunelerin işleme sonrası görünüşleri



Şekil 1. Deneylerde kullanılan a) elektrotlar, b) işparçaları

işlenmiştir. Her numuneden farklı doğrultularda beşer pürüzlülük ölçümü alınmış ve ölçümlerin ortalaması kullanılmıştır.

Surtronic 3+ cihazından elde edilen yüzey profilleri geliştirilen bir yazılım (SURT adlı Delphi programı) yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. (Şekil 3).

Yüzey pürüzlülüğü grafiklerinin sayısallaştırılarak x ve y değerlerinin elde edilmesi için Sigma Scan 5 adlı görüntü işleme paket programından yararlanılmıştır. Grafikler yatayda 80 ve dikeyde 25 kareden (grid) oluşmaktadır. Grafik üzerinden eşit aralıklarla alınacak 160 noktanın grafiği oldukça iyi temsil edeceği sonucuna varılmıştır. Yatay eksen boyunca profilin her bir kare kenarı ile ve karelerin ortası ile kesiştiği noktalar işaretlenmiştir (Şekil 4). Sigma Scan 5 programı tarafından her birinin arası 7 piksel olarak işaretlenen noktaların koordinatları kaydedilmiştir. Bu koordinatlar yatay ve dikey yönlerde ayrı ayrı kaydırılarak ölçeklendirilmiştir. Böylece grafiklerin tüm cinsinden sayısallaştırılması mümkün olmuştur.

### Pürüzlülük Profillerinin Modellenmesi için Geliştirilen Yazılım

Sayısallaştırma ile elde edilen pürüzlülük profili koordinatlarını kullanarak istenen terim sayısındaki Fourier serisinin katsayılarını hesaplayan FORTRAN dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. Bu katsayılarla

bulunan fonksiyonun değerleri okuma yapılan noktalarda hesaplanmakta ve ölçümlerden elde edilen gerçek değerlerle beraber çıktı dosyasına yazılmaktadır.

Herhangi bir sürekli f(x) fonksiyonu Fourier serisi ile

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos kx + B_k \sin kx) \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $A_0$  serideki sabit terim,  $A_k$  kosinüslü terimlerin katsayıları,  $B_k$  sinüslü terimlerin katsayıları olup k Fourier serisinin terim sayısıdır. Yüzey profili f(x) fonksiyonu olarak kabul edilirse;

$$\theta = \frac{2(x-a)}{b-a} = \frac{(x-a)\pi}{hN} \quad (4)$$

gibi bir  $\theta$  değişkeni tanımlanıp f(x) fonksiyonu yaklaşık olarak

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\theta + B_k \sin k\theta) \quad (5)$$

$$A_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{(2N-1)} f(x_i) \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada incelenen yüzey profilinin

$R_a = 5.30 \mu m$   
 $R_q = 6.48 \mu m$   
 $R_{zDIN} = 25.3 \mu m$   
 $R_t = 36.9 \mu m$   
 $R_y = 30.4 \mu m$   
 $S_m = 207 \mu m$

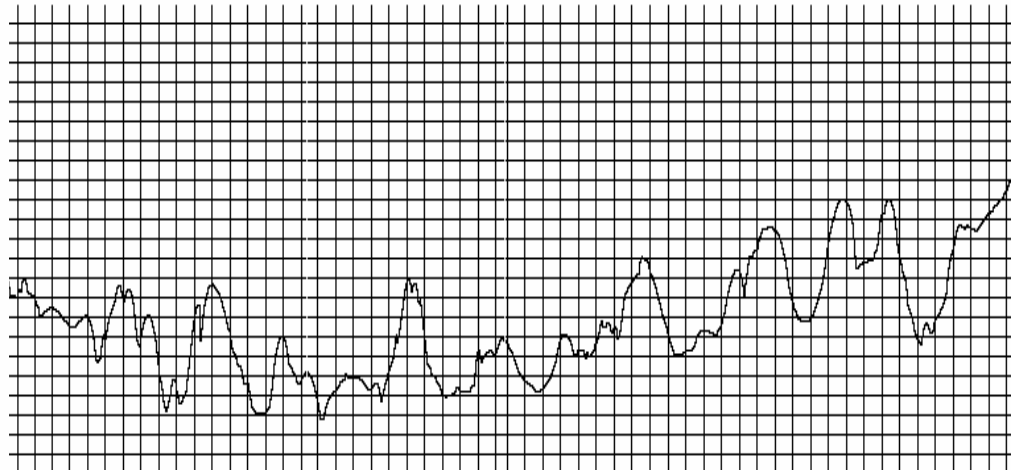
Vv = x 500

Vh = x 100

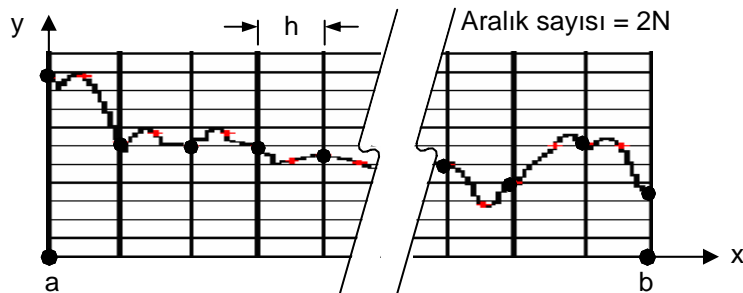
20  $\mu m/cm$

100  $\mu m/cm$

Taylor Hobson Limited



Şekil 3. Bilgisayara aktarılan yüzey profillerinden bir örnek



Şekil 4. Sayısallaştırılmış bir yüzey profili

başlangıcının  $x$  değeri  $a$ , bitişinin  $x$  değeri  $b$ , iki ardışık  $x$  değeri arasındaki uzaklık  $h$  ve çift sayıdaki aralık sayısı  $2N$ 'dir (Şekil 4). Yüzey profili sayısallaştırılırken yatay ekseninde 160 eşit aralıklı noktadaki ( $2N=160$ ) koordinat değerleri bulunmuştur.  $A_k$  ve  $B_k$  değerleri ise

$$A_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{(2N-1)} f(\theta_i) \cos k\theta_i \quad k=0,1,2,\dots, m \quad (7)$$

$$B_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{(2N-1)} f(\theta_i) \sin k\theta_i \quad k=1,2,\dots, m \quad (8)$$

$$\theta_i = i\left(\frac{\pi}{N}\right) \quad i=1,2,3,\dots, 2N-1 \quad (9)$$

eşitliklerinden hesaplanır.

Sayısallaştırma ile elde edilen gerçek değerlerle Fourier serileriyle hesaplanan yaklaşık değerlerin birbirine uyumunu belirlemek amacıyla  $\chi^2$  uyum testi kullanılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü grafiklerini en iyi şekilde ifade eden en az terimli Fourier serisinin terim sayısının tespiti için yazılım, 1'den itibaren 79'a kadar dereceleri (terim sayısı) arttırarak  $A_0$ ,  $A_k$  ve  $B_k$  katsayılarını hesaplamıştır. Her derecenin sapması bir önceki ile karşılaştırılarak % sapma hesaplanmıştır.

## DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### Ortalama Yüzey Pürüzlülüğünün ( $R_a$ ) İşleme Parametreleri ile Değişimi

Değişik işleme koşullarında elde edilen yüzeylerin  $R_a$  değerleri toplu olarak Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 5 ve 6'dan görüldüğü üzere  $R_a$  değerleri boşalım akımının ve vuruş süresinin artmasıyla artmaktadır. Akımın artmasıyla vuruşun boşalım enerjisi artmakta, bu da işparçasından daha fazla malzeme ergimesine ve buharlaşmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda işparçası yüzeyinde daha büyük kraterler oluşmaktadır. Daha büyük kraterler ise  $R_a$  değerinin artmasına sebebiyet vermektedir. Yüksek boşalım akımı ve yüksek dielektrik sıvı basınçlarında vuruş süresinin artmasıyla  $R_a$ 'nın artması daha belirgindir.

$R_a$ 'nın dielektrik sıvı basıncı ile değişimi (farklı akım ve vuruş süreleri için) Şekil 7'de görülmektedir.  $R_a$ , dielektrik sıvı basıncının artmasıyla genelde artma eğilimindedir. Bu artış özellikle yüksek vuruş süreleri ve yüksek akımda 1 bar dielektrik sıvı basıncının üstünde belirginleşmektedir. Deney yapılan işleme parametre aralıklarında dielektrik sıvı basıncının  $R_a$  üzerindeki etkisi akım ve vuruş

**Tablo 1.** İşleme parametreleri ve deneysel sonuçlar

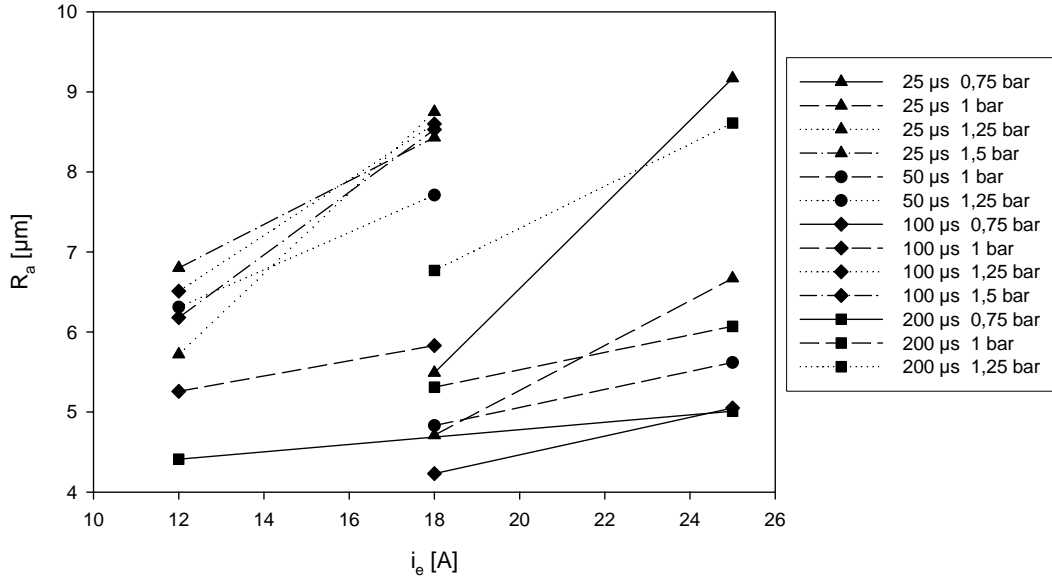
Numune No	Vuruş Süresi [ $\mu$ s]	Boşalım Akımı [A]	Dielektrik Basıncı [bar]	$R_a$ [ $\mu$ m]	$S_m$ [ $\mu$ m]
103	25	12	1,25	5,72	174
104	25	12	1,50	6,80	243
106	50	12	1,00	5,36	210
107	50	12	1,25	6,31	180
110	100	12	1,00	5,26	212
111	100	12	1,25	6,51	214
112	100	12	1,50	6,18	200
113	200	12	0,75	4,41	152
114	200	12	1,00	5,46	195
115	200	12	1,25	7,77	332
116	200	12	1,50	9,43	289
117	25	18	0,75	5,49	195
118	25	18	1,00	4,71	180
119	25	18	1,25	8,75	271
120	25	18	1,50	8,43	317
121	50	18	0,75	5,04	190
122	50	18	1,00	4,83	184
123	50	18	1,25	7,71	264
124	50	18	1,50	9,09	318
125	100	18	0,75	4,23	169
126	100	18	1,00	5,83	270
127	100	18	1,25	8,60	242
128	100	18	1,50	8,53	264
129	200	18	0,75	4,35	175
130	200	18	1,00	5,31	193
131	200	18	1,25	6,77	228
132	200	18	1,50	8,73	341
133	25	25	0,75	9,17	279
134	25	25	1,00	6,67	196
135	25	25	1,25	8,02	253
136	25	25	1,50	4,94	186
138	50	25	1,00	5,62	202
139	50	25	1,25	5,63	243
140	50	25	1,50	7,00	240
141	100	25	0,75	5,05	183
142	100	25	1,00	5,02	198
143	100	25	1,25	7,27	254
144	100	25	1,50	8,24	242
145	200	25	0,75	5,01	175
146	200	25	1,00	6,07	225
147	200	25	1,25	8,61	268
148	200	25	1,50	8,19	301

süresinin etkisinden daha büyüktür.  $R_a$  değerleri 0.75 bar'da 4-5  $\mu$ m civarında iken 1 bar'da 5-6  $\mu$ m seviyesine, 1.25 bar'da 5.5-8  $\mu$ m seviyesine çıkmaktadır.  $R_a$  değerleri 1.5 bar'da 0.75 bar'daki değerlerin 1.5-2 katına çıkmıştır (6-9  $\mu$ m).

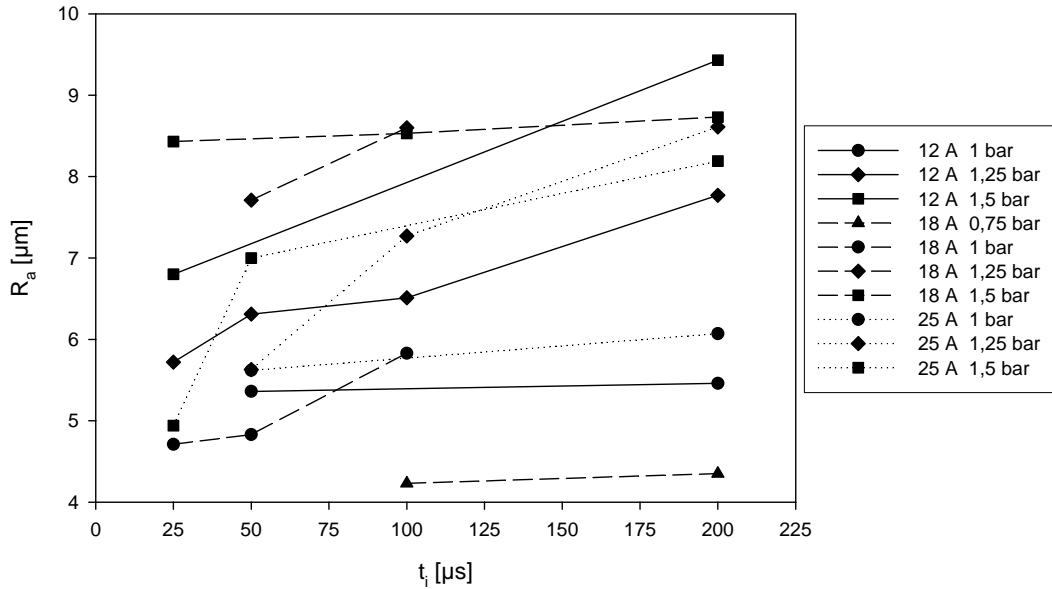
### Yüzey Profiline Matematiksel Modellenmesi

#### a) Fourier Serisinde Terim Sayısının Tespiti

“Deneysel” bölümünde anlatıldığı üzere her bir profil için 160 noktada  $y$  değerleri hesaplandığı için  $\chi^2$  testinde kullanılacak serbestlik derecesi  $j=k-1$  formülünden  $j=160-1=159$  olarak bulunur. 100 serbestlik derecesinden daha yüksek değerler için  $\chi^2$  değeri



Şekil 5. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün ( $R_a$ ) boşalım akımıyla ( $i_e$ ) gösterdiği değişim



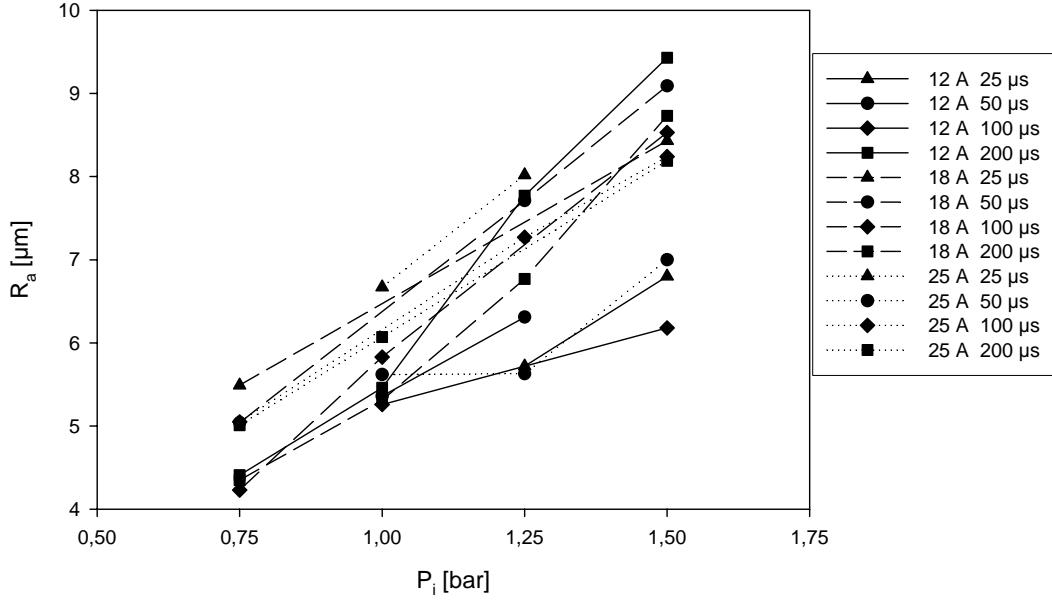
Şekil 6. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün ( $R_a$ ) vurum süresi ( $t_i$ ) ile gösterdiği değişim

$$\chi_{j,\alpha}^2 = \frac{1}{2}(z_\alpha + \sqrt{2j-1})^2 \quad (10)$$

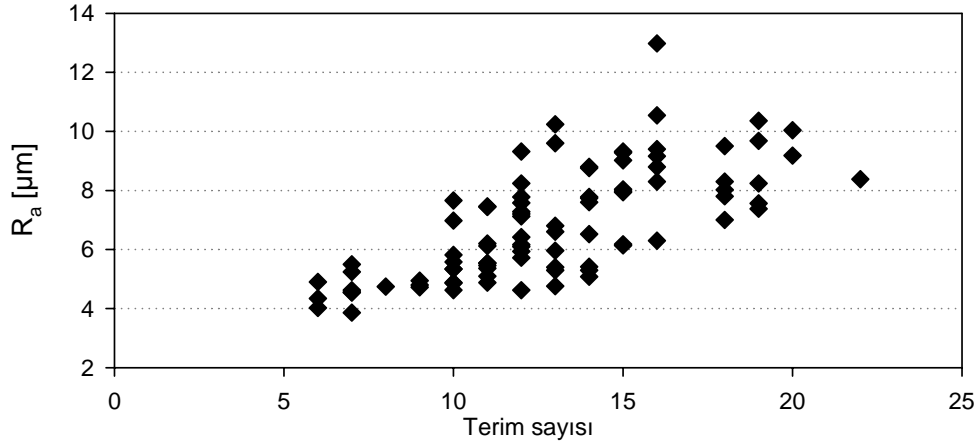
formülünden bulunur [20]. Burada  $j$  serbestlik derecesi,  $\alpha$  önem seviyesi,  $z_\alpha$  standart normal dağılımda  $\alpha$  önem seviyesine karşı gelen  $z$  değeridir.  $\alpha = 0.99$  için standart normal dağılım tablosundan  $z_\alpha = -2.3263$  olarak bulunur. Değerler eşitlik 10'da yerine konursa  $\chi^2$  değeri 120 bulunur. Çeşitli ölçümlerde  $R_a$  değerine bağlı olarak  $\chi^2 < 120$  olması için Fourier serisinde en az kaç terim alınması gerektiği tespit edilmiş ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 1 ölçüm hariç diğer tüm 20'şer terimli Fourier serileri (20'şer adet  $A_k$  ve  $B_k$ , ve bir adet  $A_0$

katsayısı bulunan) elde edilmiş olan profilleri başarılı biçimde temsil edebilmektedir.

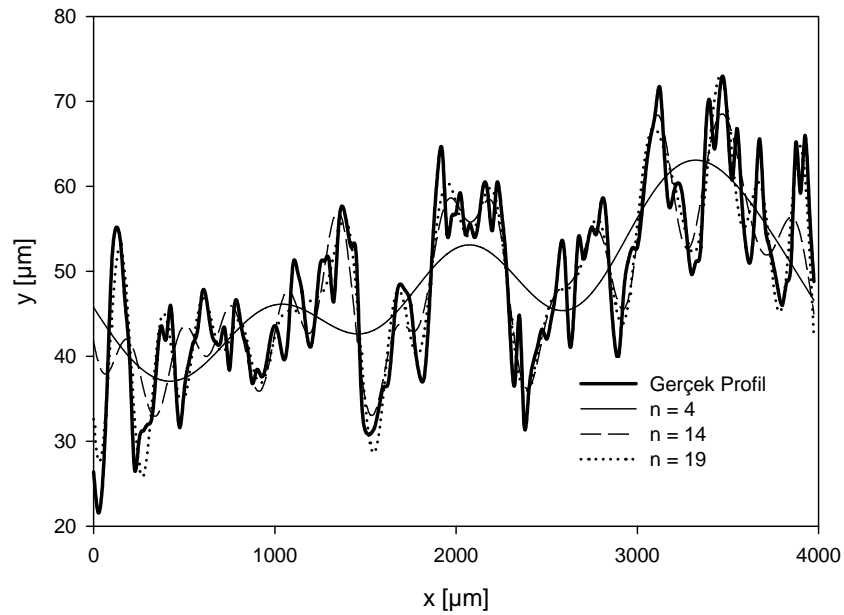
79 terimde  $\chi^2$  değeri sıfıra düşmektedir. Yani elektroerozyonla işlenmiş yüzeyler 79 terimle tam olarak ifade edilebilir. Ancak bu kadar büyük terim sayılı bir Fourier serisinin kullanımı pratik değildir. Yapılan analizler  $\chi^2$  değerinin 17-19 terim sayısına kadar hızla düştüğünü, 20 terim sayısından sonra çok az değiştiğini göstermiştir. Bu incelemeler sonucunda 20 terimli Fourier serisinin yüzey pürüzlülük profillerinin çok küçük bir hata ile temsil edebileceğine karar verilmiştir. Şekil 9'da farklı terim sayılı Fourier serilerinden elde edilen profiller gerçek profille karşılaştırılmış ve bulunan sonuç görsel olarak da doğrulanmıştır.



Şekil 7. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün ( $R_a$ ) dielektrik sıvı basıncı ( $P_i$ ) ile gösterdiği değişim



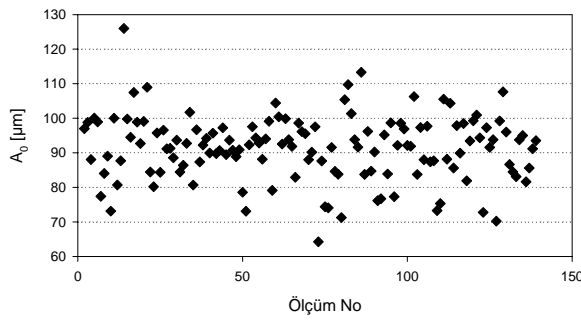
Şekil 8. Çeşitli  $R_a$  değerlerinde  $\chi^2 < 120$  şartı için minimum terim sayısı



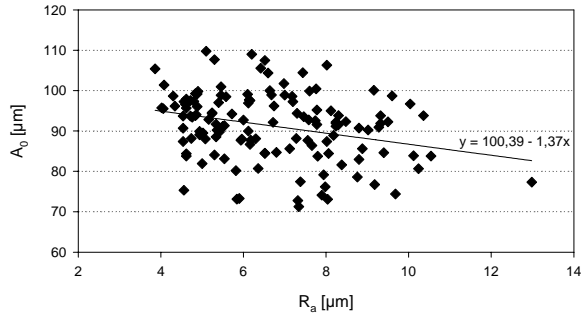
Şekil 9. Değişik Fourier terim sayılarıyla elde edilen profillerin gerçek profile karşılaştırılması

### b) Fourier Serilerinin $A_k$ ve $B_k$ Katsayıları ile İlgili Bulgular

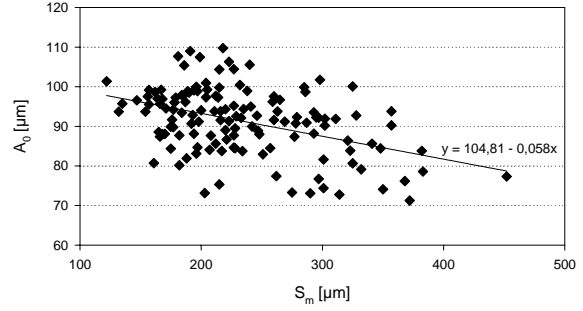
Şekil 10'da bütün profillere ait  $A_0$  değerleri incelendiğinde büyük bir çoğunluğunun 80-100 aralığında olduğu gözlenmiştir. Bilindiği üzere  $A_0/2$  değeri bir profilin ortalama çizgi değerini vermektedir. Şekil 11'de her ölçüm için  $R_a$  değeri ve ölçümün  $A_0$  değeri noktalar halinde gösterilmiştir. Şekilden  $R_a$  değerinin artmasıyla  $A_0$  değerinde azalma eğilimi görülmektedir. Şekil 12'de ise  $A_0$  değerlerinin ortalama tepe mesafesi  $S_m$  ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi  $S_m$  değerinin artmasıyla  $A_0$  değeri azalma eğilimindedir.  $R_a$  ve  $S_m$ 'nin  $A_0$  ile değişimlerinin birbirleriyle çok benzer eğilimde olduğu görülmüştür.



Şekil 10.  $A_0$  katsayılarının değerleri



Şekil 11.  $A_0$  katsayısının  $R_a$  ile değişimi



Şekil 12.  $A_0$  katsayısının  $S_m$  ile değişimi

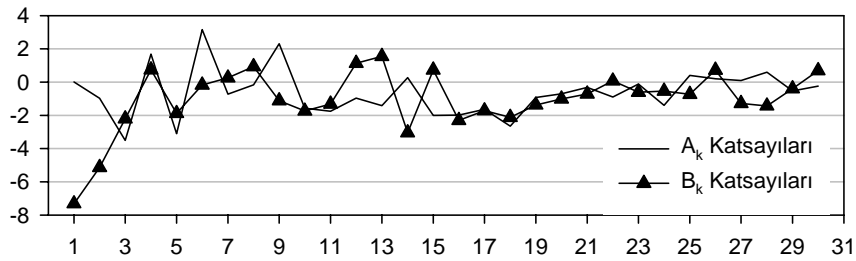
Bu çalışmada  $A_k$  ve  $B_k$  katsayıları ve  $R_a$  değerleri arasında çok belirgin bir bağıntı bulunamamıştır. Ancak şu bulgular dikkat çekmektedir:

1.  $A_k$  ve  $B_k$  katsayıları  $k$  terim sayısı arttıkça küçülmektedir.
2. Büyük katsayılar ilk 10 terimde, orta büyüklükteki katsayılar ise 10-20 terimler arasında görülmektedir. 20 terimden sonra katsayılar iyice küçülerek mutlak değer olarak 1'in altına inmektedir (Şekil 13-16).
3.  $R_a$  değeri büyük olan numuneler için ilk 10 terimdeki mutlak değerce büyük katsayıların sayısının daha fazla olduğu görülmüştür.

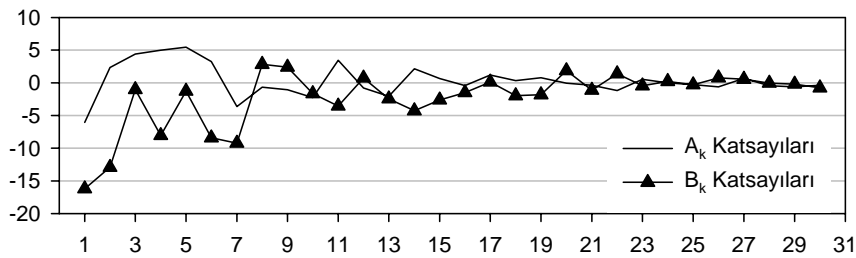
### SONUÇ

Bu çalışmada EEİ yönteminde işleme parametrelerinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülük profillerinin matematiksel olarak modellenmesi için Fourier serileri kullanılmıştır.

Deneylerde boşalım akımının artırılmasıyla yüzey pürüzlülüğünün büyüdüğü tespit edilmiştir. Düşük dielektrik sıvı basınçlarında boşalım akımı belli bir değer altına indiğinde yüzey pürüzlülüğünün değişmediği veya az arttığı görülmüştür. Yüksek

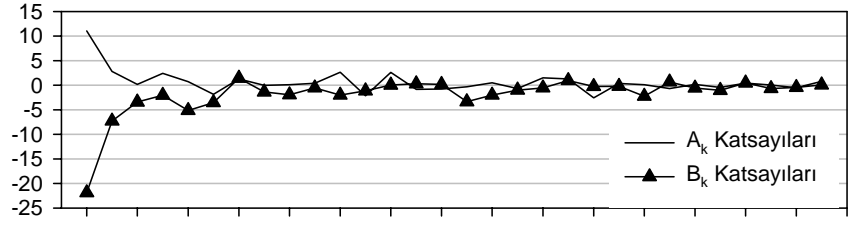
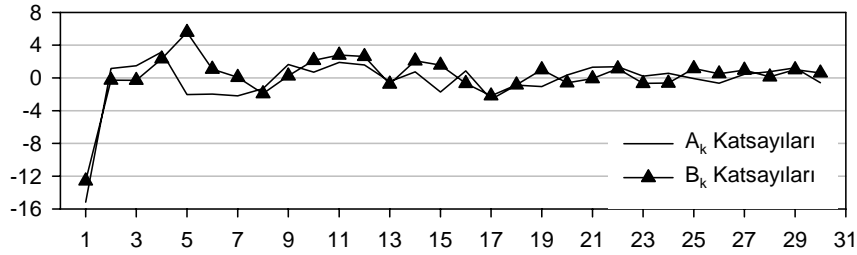


Şekil 13. 103-1 nolu numune ( $R_a=5.40$ ) için ilk 30  $A_k$  ve  $B_k$  katsayıları



Şekil 14. 104-1 nolu numune ( $R_a=9.16$ ) için ilk 30  $A_k$  ve  $B_k$  katsayıları



Şekil 15. 106-1 nolu numune ( $R_a=5.30$ ) için ilk 30  $A_k$  ve  $B_k$  katsayılarıŞekil 16. 112-1 nolu numune ( $R_a=6.20$ ) için ilk 30  $A_k$  ve  $B_k$  katsayıları

dielektrik sıvı basınçlarında yüzey pürüzlülüğü vuru süresiyle belirgin şekilde artmıştır. Düşük dielektrik sıvı basınçlarında yüzey pürüzlülüğünün vuru süresinden daha az etkilendiği tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü artan dielektrik sıvı basıncıyla artmıştır. Bu artış özellikle 1.25 ve 1.5 bar basınçlarda oldukça belirgindir. Yapılan deneyler için 0.75 ve 1 bar değerleri düşük yüzey pürüzlülüğü için uygun dielektrik sıvı basınç değerleridir.

Numunelerden elde edilen yüzey profilleri Fourier serileri kullanılarak modellenmiştir. 20 terimden oluşan Fourier serisi EEİ yöntemi ile işlenmiş yüzey profillerinin temsilinde başarılı sonuçlar vermiştir. Fourier serisinin terimlerinin katsayıları olan  $A_k$  ve  $B_k$  katsayıları ve  $R_a$  değerleri arasında belirgin bir bağıntı bulunamamıştır. Yine de,  $R_a$  değeri büyük olan numunelerde mutlak değerce büyük  $A_k$  ve  $B_k$  katsayılarının sayısının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.  $A_0$  değerleri ise tüm yüzeyler için 80-100  $\mu m$  değerleri arasındadır. EEİ ile işlenmiş yüzeylerin modellenmesinde, işleme parametreleri ve Fourier serisi katsayıları arasında ilişkilerin bulunmasında daha dar işleme parametre aralıklarıyla yapılacak deneysel çalışmaların faydası olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Wang, C.C., Yan, B.H., Chow, H.M., Suzuki, Y., "Cutting Austempered Ductile Iron Using an EDM Sinkers", **Journal of Materials Processing Technology**, 88, 83-89, 1999.
2. Erden A., Temel D., "Investigation on the Use of Water as a Dielectric Liquid in EDM", **Journal of Pure and Applied Sciences**, METU, 437-440, 1978.
3. Jilani T. S., Pandey P.C., "Experimental Investigation into the Performance of Water as Dielectric in EDM", **International Journal of**

**Machining and Tool Design Research**, 24, 31-43, 1984.

4. Masuzawa T., "Machining Characteristics of E.D.M Using Water as Dielectric Fluid", **Proc. 22nd Machine Tool Design and Research (MTDR) Conf.**, Manchester, 441-447, 1981.
5. König W., Jörres L., "Aqueous Solutions of Organic Compounds as Dielectrics for EDM Sinking", **Annals of the CIRP**, 36/1, 105-109, 1987.
6. Mohri N., Saito N., Higashi M., "A New Process of Finish Machining on Free Surface by EDM Methods", **Annals of the CIRP**, 40/1, 207-210, 1991.
7. Ming Q.Y., He L.Y., "Powder-Suspension Dielectric Fluid for EDM", **Journal of Material Processing Technology**, 52, 44-54, 1995.
8. Wong Y.S., Lim L.C., Rahuman I., Tee W.M., "Near-Mirror-Finish Phenomenon in EDM Using Powder-Mixed Dielectric", **Journal of Material Processing Technology**, 79, 30-40, 1998.
9. Chow H.M., Yan B.H., Huang F.Y., Hung J.C., "Study of Added Powder in Kerosene for the Micro-slit Machining of Titanium Alloy Using Electro-discharge Machining", **Journal of Material Processing Technology**, 101, 95-103, 2000.
10. Lee S.H., Li X.P., "Study of the Effect of Machining Parameters on the Machining Characteristics in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide", **Journal of Material Processing Technology**, 115, 344-358, 2001.
11. Chen Y., Mahdivian S.M., "Analysis of Electro-Discharge Machining Process and its Comparison with Experiments", **Journal of Materials Processing Technology**, 104, 150-157, 2000.
12. Lonardo P.M., Bruzzone A.A., "Effect of Flushing and Electrode Material on Die Sinking EDM", **Annals of the CIRP**, 48/1, 123-126, 1999.

13. Lin Y.C., Yan B.H., Huang F.Y., “Surface Improvement Using a Combination of Electrical Discharge Machining with Ball Burnishing Machining Based on the Taguchi Method”, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 18, 673-682, 2001.
14. Yan B.H., Wang C.C., Chow H.M., Lin Y.C., “Feasibility Study of Rotary Electrical Discharge Machining with Ball Burnishing for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061Al Composite”, **The International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 40, 1403-1421, 2000.
15. Yan B.H., Wang C.C., Liu W.D., Huang F.Y., “Machining Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061Al Composite Using Rotary EDM with A Disk-like Electrode”, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 16, 322-333, 2000.
16. Yan B.H., Wang C.C., “The Machining Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061Al Composite Using Rotary Electro-Discharge Machining With a Tube Electrode”, **Journal of Materials Processing Technology**, 95, 222-231, 1999.
17. Wang C.C., Yan B.H., “Blind-Hole Drilling of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061Al Composite Using Rotary Electro-Discharge Machining”, **Journal of Materials Processing Technology**, 102, 90-102, 2000.
18. Ramulu M., Paul G., Patel J., “EDM Surface Effects on the Fatigue Strength of a 15 Vol% SiC<sub>p</sub>/Al Metal Matrix Composite Material”, **Composite Structures**, 54, 79-86, 2001.
19. Bayramođlu, M., “CNC Elektro Erozyon Tezgahlarında Levha Elektrotların Kullanımı”, **6. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 31-40, 1994.
20. Baykul, Y., **İstatistik Metodlar ve Uygulamalar**, Anı Yayıncılık, Ankara, 1997.