

Tayfun Çağlar Deniz  
Araş. Gör.

Can Çoğun  
Prof. Dr.

Ali Özgedik  
Araş. Gör.

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık  
Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
06570 Maltepe, Ankara, Türkiye

## Elektro Erozyon İle İşlemede İşleme Parametrelerinin Matematiksel Modellenmesi

*Bu çalışmada Tepki Yüzeyi Metodu (TYM) (surface response methodology) kullanılarak, 1040 çeliğinin elektro erozyon ile işlenmesinde işparçası işleme hızı (İİH), yüzey pürüzlülüğü (R<sub>a</sub>) ve elektrot aşınma hızı (EAH) gibi performans değerlerinin analizi ve matematiksel modellenmesi sunulmuştur. Deneysel verilere regresyon analizi uygulanarak birçok bağımsız girdi değişkenine bağlı matematiksel modeller oluşturulmuştur.*

*Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile İşleme (EEİ), Tepki Yüzeyi Metodolojisi (TYM), ANOVA*

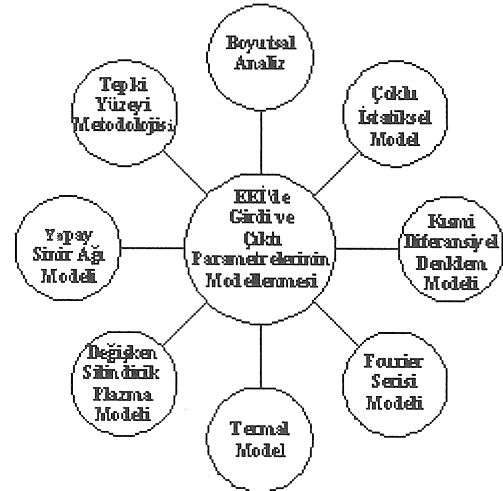
### 1. GİRİŞ

Elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemi, genel olarak kalıp üretiminde kullanılan, alışılmamış imalat usullerinden birisidir. Geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan çok sert malzemelerin ve karmaşık geometrik şekle sahip parçaların işlenebilmesinden dolayı endüstriyel uygulamalarda EEİ yönteminin kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Yöntemde elektriksel iletken elektrot, kalıp boşluğunun işlenmesi için hazırlanır. Döküm, enjeksiyon, ekstrüzyon, dövme ve sıkıştırılmış toz kalıpları EEİ yöntemi kullanılarak işlenir. EEİ yönteminde boşalım akımı, vurum süresi, dielektrik sıvı cinsi ve püskürtme koşulları gibi birçok işleme performansını etkileyen işleme parametresi vardır.

Yüzey pürüzlülüğü (R<sub>a</sub>), elektrot aşınma hızı (EAH) ve işparçası işleme hızı (İİH) gibi işleme performansı çıktı parametrelerini önceden belirlemek için literatürde çeşitli teknikler kullanılmıştır (Şekil 1.). Bu çalışmada, bağımlı değişkenler olan R<sub>a</sub>, İİH ve EAH ile bağımsız değişkenler olan boşalım akımı (i<sub>e</sub>), vurum süresi (t<sub>i</sub>) ve işleme derinliği (h) arasındaki ilişkileri belirlemek üzere TYM modeli üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla, istatistiksel yazılım paketi olan MINITAB kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır [1].

Endüstriyel uygulamalarda ikinci dereceden modeller oldukça yaygındır. Eğer deneylerde etken limitler uygun bir şekilde belirlenmişse ve/veya çoklu regresyon analizinde girdi ve çıktılar arasında bir dönüşüm mevcutsa bu durumda daha yüksek dereceden bir modele gerek yoktur. Bu çalışmada matematiksel modeli geliştirmenin amacı işleme

parametreleri ile performans çıktı değişkenleri arasında bağıntı kurulması ve yapılan deney koşullarında işleme parametrelerinin optimize edilmesini sağlamaktır.



Şekil 1. EEİ'de girdi ve çıktı parametrelerini modelleme metodları

İkinci dereceden matematiksel model genel olarak;

$$y = b_0 + b_1i_e + b_2t_i + b_3h + b_{12}i_e t_i + b_{13}i_e h + b_{23}t_i h + b_{11}i_e^2 + b_{22}t_i^2 + b_{33}h^2 \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada  $y$  performans çıktısı,  $b_0, b_1, \dots, b_{33}$  katsayılar,  $i_e$  boşalım akımı,  $t_i$  vurum süresi,  $h$  işleme derinliği ( $i_e, t_i$  ve  $h$  ana etkenler olarak adlandırılır),  $i_e^2, t_i^2, h^2$  ikincil etkenler ve  $i_e t_i, t_i h$  ve  $i_e h$  etkileşim etkenleridir.

## 2. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ

Tepki yüzeyi metodolojisi, deneysel veriler sonucunda işlem girdileri ile çıktılar (sonuçlar) arasında ilişki kurarak matematiksel bir model oluşturma yöntemidir. Bu yöntem çıktıları optimize etmeye yarayan matematiksel ve istatistiksel işlemlerin birleşimidir. Bu çalışmada deney sırasında kullanılan işleme parametreleri ve deney sonucunda elde edilen performans çıktı değerleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2 de verilmiştir. Deneysel yöntem ve bulunan sonuçlar üzerinde yapılan detaylı analizler daha önce yayımlanmıştır [3].

### 2.1. $R_a$ 'nın $i_e, t_i, h$ ile değişimi

Katsayı analizinde  $i_e t_i$  teriminin katsayısı çok küçük olduğundan belirlenememiştir. Bu nedenle bu terim matematiksel modelden çıkarılmıştır. Analiz gerçek (uncoded) değerlerle yapılmıştır.  $R_a$  için oluşturulan ikinci derece denklem;

$$R_a = -0.600 + 0.323 i_e + 0.040 t_i + 0.269 h + 0.009 i_e^2 - 0.00008 t_i^2 + 0.082 h^2 - 0.083 i_e h - 0.004 t_i h \quad (2)$$

şeklindedir.

Tablo 1 EEI'de işlem parametreleri

Elektrot malzemesi	elektrolitik bakır
Numune malzemesi	1040 çeliği
Yalıtkan sıvı cinsi	gaz yağı
Alışkan Basıncı	0,50 Bar

### 2.2. EAH'nın $i_e, t_i, h$ ile değişimi

Katsayı analizinde  $i_e t_i$  teriminin katsayısı çok küçük olduğundan belirlenememiştir. EAH için oluşturulan ikinci derece denklem;

$$EAH = -57.2325 + 0.8123 i_e + 1.2471 t_i + 6.1841 h + 0.0247 i_e^2 - 0.0033 t_i^2 - 0.2545 h^2 + 0.1753 i_e h - 0.1077 t_i h \quad (3)$$

şeklindedir.

Tablo 2. Tasarım planı ve deneysel sonuçlar

Deney No.	$i_e$ (A)	$t_i$ ( $\mu$ s)	$h$ (mm)	$R_a$ ( $\mu$ m)	EAH ( $\text{mm}^3/\text{dk}$ )	$\ddot{I}H$ ( $\text{mm}^3/\text{dk}$ )
1	3	50	0,85	2,20	0,10	0.56
2	3	50	1,13	2,20	0,04	0.60
3	6	50	6,38	4,27	1,55	4.05
4	6	50	6,40	4,27	1,55	4.06
5	12	12	6,22	3,51	3,54	4.25
6	12	12	6,26	3,51	3,37	3.94
7	12	25	6,70	3,85	9,46	14.06
8	12	25	6,83	3,85	5,88	9.42
9	12	50	6,48	4,04	8,42	18.03
10	12	50	6,35	4,04	9,15	18.20
11	12	100	6,29	4,34	8,07	22.01
12	12	100	6,50	4,34	8,10	20.94
13	25	50	6,65	5,59	34,13	55.80

### 2.3. İİH'nın $i_e$ , $t_i$ , $h$ ile değişimi

Katsayı analizinde  $i_e t_i$  teriminin katsayısı çok küçük olduğundan belirlenememiştir. İİH için oluşturulan ikinci derece denklem;

$$\begin{aligned} \text{İİH} = & -22.2195 - 0.9432 i_e + 0.5693 t_i + 2.4458 h + \\ & 0.0325 i_e^2 - 0.0016 t_i^2 - 0.1011 h^2 + 0.2482 i_e h - \\ & 0.0538 t_i h \end{aligned} \quad (4)$$

şeklinde dir.

### 3. SONUÇLARIN İSTATİKSEL ANALİZİ

Bu çalışmada, elde edilen sonuçların doğruluğunu belirlemek için regresyon modelinin ve modeldeki katsayıların doğruluğunu belirleyen testler uygulanmıştır. Ayrıca işlem parametrelerini incelemek ve bu parametrelerin çıktı parametrelerine katkısı istatistiksel olarak belirlemek için değişim analizi (analysis of variance-ANOVA) ve F testi uygulanmıştır [4].

Türetilen deklemlerin (denklem 2-4) yeterliliği ve uygunluğu, F testi uygulanarak belirlenmiştir. Determinasyon katsayısı olarak isimlendirilen  $R^2$  terimi, bağımsız değişkenlerden türetilen bağımlı değişkendeki değişim oranıdır. Tüm model için

hesaplanan  $R^2$  (0.90) değeri, Denklem 2-4'deki  $i_e$ ,  $t_i$  ve  $h$  değişkenlerinden belirlenebilen  $R_a$ , EAH ve İİH'ndaki değişimin %90 olduğunu ifade etmektedir. Hesaplanan determinasyon katsayısının (R) 0.95 olması bağımlı değişkenlerle bağımsız değişkenler arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ifade etmektedir.

Ortalama karesel hata olarak da isimlendirilen tahminin standart hatası hata teriminin standart sapması ve ortalama kare farkının kareköküdür. Bu çalışmada, olasılık değeri olan p değeri anlamlılık seviye testi ile incelenmiştir. Türetilen regresyon modelinin ANOVA analizi sonucunda p değerinin 0.0000 olması bu değer p<0.0001 olduğunu ifade eder. Bu p değeri 0.01 den küçük oldukça istatistiksel olarak ölçülen ve hesaplanan çıktı değerleri arasında 99% güvenilirlikte bir ilişki olduğu ve modelin istatistiksel olarak geçerli olduğu anlaşılmaktadır [5].

F değerinin büyük olması (Ek A) işlem değişkeninin, performans çıktıları üzerinde etkisinin büyük olduğu anlamına gelmektedir [6].  $R_a$ , EAH ve İİH değerleri için ANOVA sonuçları sırasıyla Tablo 3, 4 ve 5'te sunulmuştur. Bu tablolardan da görüldüğü üzere  $R_a$ , EAH ve İİH modellerindeki terimlerden en büyük etkiyi ikincil terimler yapmaktadır.

Tablo 3  $R_a$  için ANOVA Testi

Kaynak	Serbestlik Derecesi (f)	Karelerinin Toplamı (SS)	Ortalama Kareler (MS)	F Oranı	P Değeri
Regresyon	8	9.60770	1.200962	4067.04	0.000
Doğrusal	3	8.44960	0.005181	17.54	0.009
İkincil	3	1.14247	0.289534	980.50	0.000
Etkileşim	2	0.01563	0.007814	26.46	0.005
Residual Hata	4	0.00118	0.000295		
Toplam	12	9.60888			

S = 0.01718 R-Sq = 100.0% R-Sq (düzeltilmiş) = 100.0%. Modelin çoklu regresyon katsayısı olan  $R^2$ ,  $R_a$ 'daki varyasyonu %100 sağlayabilmektedir. Böylece modelin işlemi simgelemek için yeterli olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4 EAH için ANOVA Testi

Kaynak	Serbestlik Derecesi (f)	Karelerinin Toplamı (SS)	Ortalama Kareler (MS)	F Oranı	P Değeri
Regresyon	8	923.924	115.4905	53.78	0.001
Doğrusal	3	850.486	2.5202	1.17	0.424
İkincil	3	72.736	13.4300	6.25	0.044
Etkileşim	2	0.702	0.3510	0.16	0.855
Residual Hata	4	8.590	2.1474		
Toplam	12	932.513			

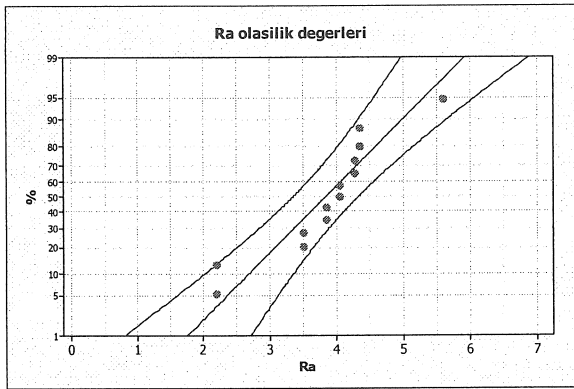
S = 1.465 R-Sq = 99.1% R-Sq (düzeltilmiş) = 97.2%. Modelin çoklu regresyon katsayısı olan  $R^2$ ,  $R_a$ 'daki varyasyonu %99.1 sağlayabilmektedir. Böylece modelin işlemi simgelemek için yeterli olduğu anlaşılmıştır.

Table 5 İİH için ANOVA Testi

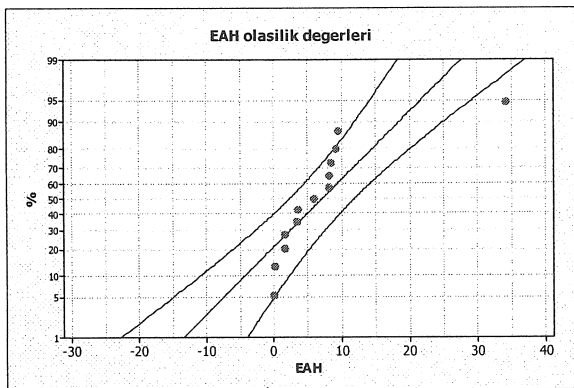
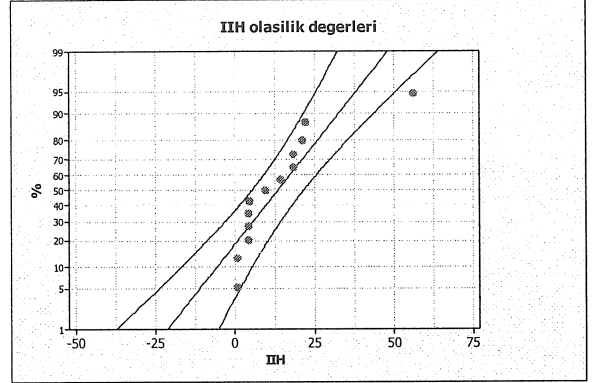
Kaynak	Serbestlik Derecesi (f)	Karelerinin Toplamı (SS)	Ortalama Kareler (MS)	F Oranı	P Değeri
Regresyon	8	2653.19	331.6487	104.81	0.000
Doğrusal	3	2502.42	5.8371	1.84	0.279
İkincil	3	148.86	32.2940	10.21	0.024
Etkileşim	2	1.90	0.9502	0.30	0.756
Residual Hata	4	12.66	3.1643		
Toplam	12	2665.85			

$S = 1.779$   $R-Sq = 99.5\%$   $R-Sq$  (düzeltmiş) = 98.6%. Modelin çoklu regresyon katsayısı olan  $R^2$ ,  $R_a$ 'daki varyasyonu %99.5 sağlayabilmektedir. Böylece modelin işlemi simgelemek için yeterli olduğu anlaşılmıştır.

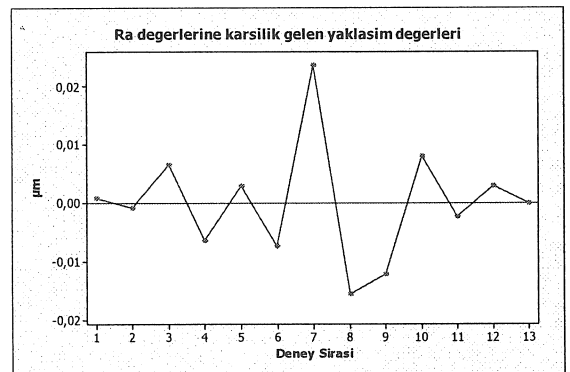
Şekil 3-5'den elde edilen modeller için neredeyse bütün deneysel noktaların yaklaşık %95 güvenlik aralığında olduğu ve p değerinin 0.05'den küçük olduğu anlaşılmaktadır..

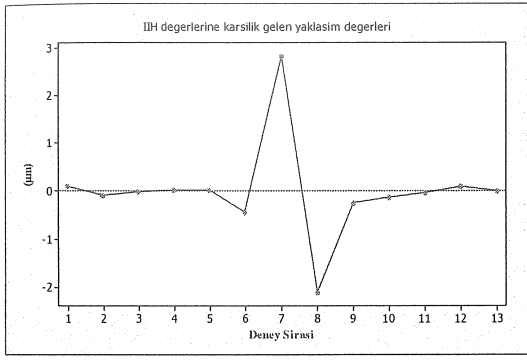
Şekil 3.  $R_a$  performans çıktıları için olasılık değerleri

Bu çalışmada, regresyon analizindeki verilerin uygun olup olmadığını belirlemek amacıyla  $S$ ,  $R^2$  ve  $R^2$  (düzeltmiş) değerleri her bir çıktı değeri için belirlenmiştir.

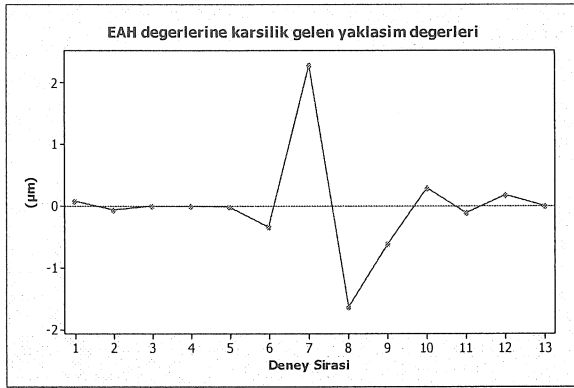
Şekil 4.  $EAH$  performans çıktıları için olasılık değerleriŞekil 5.  $İİH$  performans çıktıları için olasılık değerleri

Şekil 6-8'de merkez çizgileri sırasıyla  $R_a$ ,  $EAH$  ve  $İİH$  için deneysel değerleri göstermektedir. Modellerin deneysel sonuçlardan sapmaları 13 deney için şekil 6-8 de görülmektedir. Ayrıca, şekillerden deneysel ve model çıktıları arasındaki farkların (sapmaların) önemsiz olduğu anlaşılmaktadır.  $R_a$ ,  $EAH$  ve  $İİH$  değerleri için sapmalar sırasıyla 0.02-(-0.02)  $\mu\text{m}$ , 2-(-2)  $\text{mm}^3/\text{dk}$  and 3-(-2)  $\text{mm}^3/\text{dk}$ 'dır.

Şekil 6.  $R_a$  için sapma değerleri



Şekil 7. EAH için sapma değerleri



Şekil 8. İİH için sapma değerleri

#### 4. GİRDİ PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

EEİ'de maksimum İİH ve minimum  $R_a$  ve EAH optimum işleme koşullarının göstergesidir. Denklem 2-4'ü kullanarak tepki optimizasyonu tekniğiyle deneylerdeki işleme aralığındaki optimum EEİ girdi işleme parametreleri  $i_e=3$  A,  $t_i=56.73$   $\mu$ s ve  $h=0.86$  mm olarak elde edilmiştir. Bu değerler denklem 2-4'de yerine koyulduğunda  $R_a=2.39$   $\mu$ m, EAH=2.41 mm<sup>3</sup>/dk ve İİH=5.89 mm<sup>3</sup>/dk olarak bulunur.

#### 5. SONUÇ

Bu çalışmada, deneysel veriler kullanılarak  $R_a$ , EAH ve İİH için geliştirilen matematiksel modellerin doğruluğu TYM'ne bağlı olarak belirlenmiştir. Türetilen modellerin yeterliliği ve geçerliliği ANOVA ve F testi uygulanarak kontrol edilmiştir. Geliştirilen matematiksel modeller, verilen girdi parametreleri aralığında deney yapmadan  $R_a$ , EAH ve İİH'nı tahmini olarak belirlemede kullanılabilir. Bu çalışmada, TYM yöntemiyle elde edilen modeller kullanılarak minimum  $R_a$  ve EAH ile maksimum İİH'nı verecek işleme parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır.

#### Ek A

$$SS_m = \frac{(\sum \eta_i)^2}{n}, \quad SS_A = \frac{\sum \eta_A^2}{N} - SS_m,$$

$$SS_T = \sum \eta_i^2 - SS_m, \quad SS_e = SS_T - \sum SS_A,$$

$$V_A = \frac{SS_A}{f_A}, \quad F_{A_0} = \frac{V_A}{V_e}$$

Burada  $SS_T$ , toplam değişimdeki karelerin toplamı,  $SS_m$ , karelerin ortalaması,  $SS_A$  ( $A=i_e, t_i, h$ ) faktörünün karelerinin toplamı,  $SS_e$  hata miktarlarının karelerinin toplamı,  $\eta_A$  faktörün  $i$ 'nci seviyede toplamı,  $N$  faktör  $A$ 'nın her seviye için tekrarlanma sayısı,  $f_A$   $A$  faktörünün serbestlik derecesi,  $V_A$  faktör  $A$  ve  $F_{A_0}$ 'ın F testi sonucundaki varyansdır.

#### MODELLING OF THE MACHINING PARAMETERS IN ELECTRIC DISCHARGE MACHINING

This paper presents a systematic methodology for modeling and analysis of the surface roughness ( $R_a$ ), material removal rate (MMR) and tool wear rate (TWR) of 1040 steel in the electric discharge machining process using the response surface methodology (RSM). Using design of experiments methodology and applying regression analysis, the desiring response to several independent input variables are modelled.

**Key Words :** Electro discharge machining (EDM), surface response methodology (RSM), ANOVA

#### KAYNAKÇA

1. D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 5th ed., Wiley, NewYork, 2001.
2. N. M. Abbas, A review of current research trends in electric discharge machining (EDM), International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, (2007), 1214-1228.
3. A. Ozgedik and C. Çoğun, An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 27, 5-6, (2006), 488-500.
4. S. Gangopadhyay, B.R. Sarkar and B. Bhattacharyya, Modellig and Analysis of EDMed job surface integrity, Journal of Materials Processing Technology 189, (2007), 169-177.
5. H. T. Lee and T. Y. Tai, Relationship between EDM parameters and surface crack formation, J. Mater. Process. Technol., 142, (2003), 676-68