



Ferritik Paslanmaz Çeliğin Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu

Oya Arat^{1,*} , Hacı Bekir Özerkan² 

¹Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Turkey

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 03.08.2021

Kabul: 29.08.2021

Anahtar Kelimeler:

Ferritik paslanmaz çelik

EEİ

İş parçası işleme hızı

Elektrot aşınma hızı

Yüzey pürüzlülüğü

Gri ilişkisel analiz

ÖZET

Bu çalışmada, ferritik paslanmaz çelik malzemenin elektro erozyon ile işleme yöntemiyle işlenebilirliği araştırılmıştır. Deneyler boşalım akımı (A), vurum süresi (T_{on}) ve vurum bekleme süresi (T_{off}) olmak üzere üç farklı işleme parametresi kullanılarak Taguchi'nin L_9 ortogonal dizisi uygulanarak deneyler yapılmıştır. Belirlenen parametrelerin iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) olan etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğü boşalım akımının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Ark süresinin artması ile İİH ve EAH değerleri artarken, elektrot aşınmasının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçları Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çoklu optimizasyonu yapılmıştır. Optimum işleme parametreleri, boşalım akım, vurum süresi ve vurum bekleme süresi için sırasıyla 6 A, 400 μ s ve 100 μ s olarak belirlenmiştir.

Optimization of Machining Parameters for Electro Discharge Machining of Ferritic Stainless Steel

ARTICLE INFO

Received: 03.08.2021

Accepted: 29.08.2021

Keywords:

Ferritic stainless steel,
EDM

Material removal rate

Tool wear rate

Surface roughness

Grey relational analysis

ABSTRACT

In this study, the machinability of ferritic stainless steel material by electrical discharge machining was investigated. Experiments were carried out by applying Taguchi's L_9 orthogonal sequence using three different processing parameters: discharge current (A), pulse on (T_{on}) and pulse off time (T_{off}). The effects of the determined parameters on material removal rate (MRR), tool wear rate (TWR) and average surface roughness (Ra) were investigated. According to the experimental results, material removal rate, electrode wear rate and surface roughness increased with the increase of discharge current. It was determined that while the values of MRR and TWR increased with the increase of arc time, tool wear decreased. In addition, the experimental results obtained were optimized with Taguchi-based grey relational analysis method. The optimum processing parameters were determined as 6 A, 400 μ s, and 100 μ s for discharge current, pulse on time and pulse off time, respectively.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), karmaşık şekilli parçaların üretiminde, geleneksel işleme yöntemleriyle işlenmesi zor olan malzemelerin (sertleştirilmiş çelikler, karbürler, seramikler) işlenmesinde modern imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. EEİ özellikle; kalıp, kalıp zımbaları, küçük pompalar, motorlar, robotlar, nükleer güç reaktörlerinin parçaları, biyomedikal cihazlar gibi elektro-mekanik sistemlerin imalatında kullanılmaktadır [3,4]. Geleneksel

*Sorumlu yazar, e-posta: oyaarat57@gmail.com

<https://doi.org/10.52795/mateca.978074>

talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak bu yöntemlerde temel işleme prensip, bir dielektrik sıvı ortamında takım ve iş parçası arasında temas olmadan meydana gelen elektriksel kıvılcıklar tarafından üretilen ısı ile şekillendirilmez [5]. İş parçasının yüzeyine boşalan kıvılcım, noktasal olarak erime ve buharlaşmaya neden olur ve küçük metal parçacıklarının iş parçasından kopmasını sağlar [6]. Elektro erozyon yöntemi ile elektriksel iletken, çok yüksek sertlik ve mukavemetli ve karmaşık geometri malzemelerin kolaylıkla işlenebilmesi bu yöntemi modern imalat yöntemleri arasında seçkin bir noktaya getirmiştir [7].

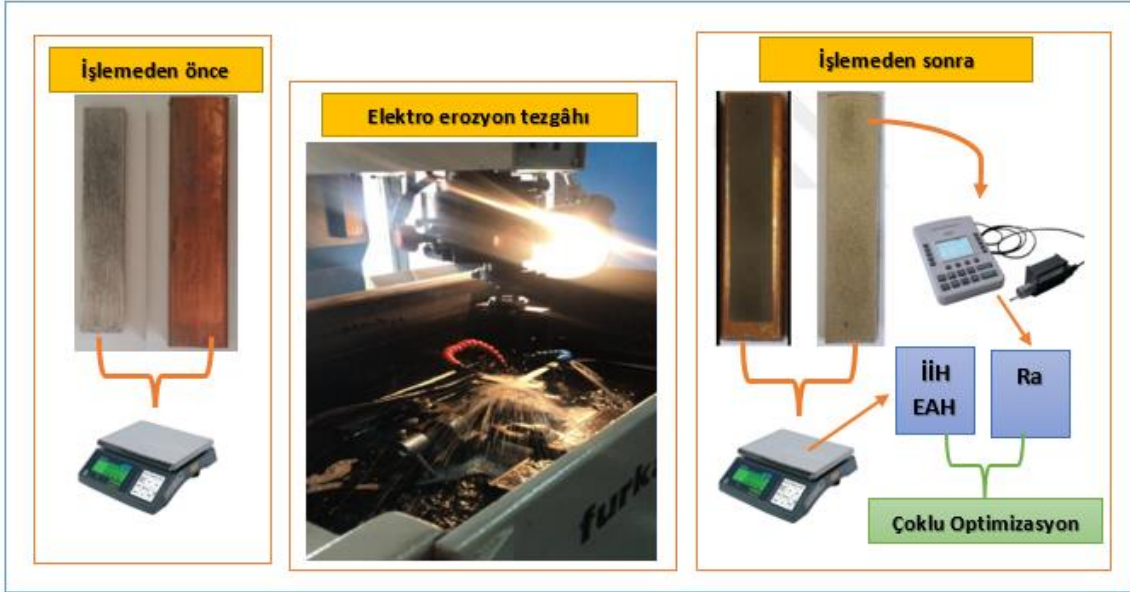
Elektro erozyon ile işlemede İİH (iş parçası işleme hızı), EAH (elektrot aşınma hızı) ve Ra (yüzey pürüzlülüğü) gibi performans parametreleri ölçülen faktörlerdir. İİH, iş parçası yüzeyinin aşınma oranını bir ölçüsü olurken EAH, takımın aşınma oranının bir ölçüsüdür ve her ikisi de genellikle birim zamandaki çıkarılan malzemenin hacmi olarak ifade edilir. Ra ise işlenmiş yüzeyin kalitesinin bir ölçüsüdür. Ra ısıdan etkilenen bölgenin kapsamı, katman kalınlığı ve mikro çatlak yoğunluğu gibi birçok bileşenleri içermektedir [8]. İşlemlerde İİH'in hızlı olması EAH ve Ra değerlerinin düşük olmasına yönelik çalışmalar günümüzde devam etmektedir. Nas ve Akıncıoğlu, kriyojenik işlem uygulanmış nikel esaslı süper alaşımın EEİ ile işleme performansını araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı için en ideal parametrenin belirlenmesinde Grey-Taguchi yaklaşımını kullanmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda Ra için en etkili parametrenin işlem uygulanmamış malzemede 300 µs vurum süresinde (A1B1), malzeme aşınma kaybı için sıg kriyojenik işlem uygulanmış malzemede 300 µs vurum süresi (A2B1) olarak belirlemişlerdir. Maksimum aşınma miktarı ve en düşük yüzey pürüzlülük değeri için gri ilişkisel derecesi hesaplandığında her ikisi için ideal parametre olarak işlem uygulanmamış malzemede 300 µs vurum süresinde (A1B1) olduğu tespit edilmiştir [9, 10]. Annamalai, AISI 4340 çeliğinin elektro erozyon ile işlenmesinde, seçilen işleme parametrelerinin İİH ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştir. İİH ve yüzey pürüzlülüğünün; ark süresi, ark aralığı ve akım parametrelerinden etkilendiğini kanıtlamıştır. Akım değerindeki artışın İİH oranını önemli ölçüde artırdığı ve ark süresindeki artışın yine, İİH oranını artırdığını belirtmişlerdir. Ancak ark aralığındaki artışın İİH oranını etkilemediği belirtilmiştir [11]. Dastagiri ve Kumar, EEİ işlemi ile ilgili olarak; akım (I), voltaj (V), ark süresi (Ton) ve iş faktörü (η) gibi etkenlerin İİH, EAH, Ra ve sertlik (HRC) üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneyler tam faktöriyel tasarım ile gerçekleştirilmiş ve akım, voltaj, vurum süresi ve çevrim faktörü giriş parametreleri kullanılarak İİH, Ra ve sertliği tahmin etmek için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Tahmini değerler ile deney sonuçları birbirine çok yakın çıktığından, matematiksel modeli, malzemedeki kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü gibi parametreleri belirlemede kullanmışlardır [12]. Özerkan ve Çoğun, dielektrik sıvıya metal tozu katılmış EEİ'de, Ra, İİH, EAH, bağıl aşınma, iş parçası mikro yapısı ve iş parçası yüzey sertliği gibi temel performans çıktılarının işleme parametreleri ile gösterdiği değişimi incelemiştir. Bu amaçla, prizmatik çelik iş parçası, prizmatik bakır elektrot, borik asit ve grafit tozları katılmış gazyağı dielektrik kullanılarak farklı vurum sürelerinde işleme deneyleri yapılmıştır. Deneyler neticesinde, vurum süresinin ve dielektrik sıvı içine karıştırılan farklı tozların ve toz yoğunluklarının EEİ'de temel performans çıktıları üzerinde etkili olduğu görülmüştür [13]. Çakıroğlu ve Günay, L2 takım çeliğinin elektro erozyon ile tornalamasında malzeme kaldırma oranı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünü giri ilişkisel analiz ile optimizasyonu yapmışlardır [14,15].

Literatür incelendiğinde, EEİ yöntemiyle çeşitli malzemelerin işlenebilirliğinin araştırıldığı görülmektedir. Çalışmaların çoğu İİH, EAH ve Ra için işleme parametrelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalardır. Ancak ferritik paslanmaz çeliğin elektro erozyon ile işlenmesinde işleme parametrelerinin araştırılmasına yönelik çalışmaların oldukça az olduğu görülmüştür. Bu yüzden imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bu malzemenin farklı imalat teknikleri ile işlenebilirliği araştırılarak yönetime uygun ideal işleme şartlarının tespit edilmesi çok önemlidir. Bu amaçla, ferritik paslanmaz çeliğin işlenmesinde elektro erozyon tekniği kullanılmış olup I, Ton ve Toff girdi değerlerine göre İİH, EAH ve Ra performans çıktıları eş zamanlı olarak Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz ile optimize edilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deneysel Ekipmanlar (Experimental Equipment)

Bu çalışmanın temel amacı farklı işleme parametreleri kullanılarak EEİ sonucunda İİH, EAH ve Ra üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Deneylerde iş parçası olarak ferritik paslanmaz çelik (5x15x80 mm), elektrot (takım) olarak da bakır malzeme (10x20x86 mm) kullanılmıştır. Deneyler, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgâhları Laboratuvarında bulunan FURKAN M25 A tipi elektro erozyon tezgâhı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tezgâhın teknik özellikleri Tablo1’de verilmiştir. Dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Deneysel düzeneği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel düzeneği (Experimental setup)

Tablo1. M25 A dalma elektro erozyon tezgâhının genel özellikleri (General features of the M25 A electrical discharge machining)

JENERATÖR	
Güç 220 V, 50 Hz, 3f	3 KVA
Maksimum sürekli çalışma akımı	25 A
Güç seviyesi kontrolleri	5 Kademe; 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1
Maksimum aşınmasız talaş kaldırma	Cu+/Çelik- 150 mm ³ /dak Gr+/Çelik- 170 mm ³ /dak
En ince yüzey	1.5 µm (Ra)
MAKİNA GÖVDESİ	
İş tablası ölçüleri (XY)	550x250 mm
Tabla hareket ölçüleri (XY)	300x200 mm
Tambur skala bölüntüsü	0,02 mm
İş haznesi	860x470x280 mm
Maksimum iş parçası ölçüleri (XYZ)	660x410x200 mm
Z EKSENİ	
Otomatik kafa mekanizması	Yüksek hassasiyetli, özel tasarım servo
Hareket kursu	160 mm
Okuma hassasiyeti	0.01 mm
Kaba hareket	200 mm

İş parçaları, işleme öncesi ve sonrası temizlenip kurutulduktan sonra 0.005 gr hassasiyete sahip HANA marka hassas terazi ile tartılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri Marsurf M300 tipi yüzey pürüzlülük cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde hareket uzunluğu (L) 1.75

mm ve dalga boyu (λ) 0.8 mm olarak ayarlanmıştır. Her deney sonucunda iş parçasının işlenmiş yüzeyinin baş, orta ve son kısımlarından ortalama yüzey pürüzlülük değeri olan Ra için üç ölçüm değeri alınarak ortalaması hesaplanmıştır.

Tablo 2. SJ-210 marka yüzey pürüzlülük cihazı teknik özellikleri (Technical characteristics of SJ-210 brand surface roughness device)

Tarama ucu	2 μ m
Sürücü ünite hızı	0.25-0.5-0.75 mm/s
Ölçüm kuvveti	0.75 mN
Ölçüm mesafesi (Z)	360 μ m (-200 μ m ile +160 μ m)
Ölçüm uzunluğu (L)	0.08-0.25-0.8- 2.5-8 mm

2.2. Deney Tasarımı ve Optimizasyon (Experiment Design and Optimization)

Literatür taraması ve yapılan ön deneyler neticesinde; işleme parametreleri olarak sanayide pratikte en sık kullanılan parametreler tercih edilerek, işleme akımı 6 A, 12 A ve 25 A, vurum süresi 12 μ s, 100 μ s ve 400 μ s ve vurum bekleme süresi 50 μ s, 100 μ s ve 200 μ s olarak belirlenmiştir. Belirlenen parametre ve seviyelerine göre Tablo 3’de verilen Taguchi L₉ ortogonal deney tasarımı oluşturulmuştur. Her deney şartı için deneyler iki defa tekrar edilmiştir ve deneyler sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. İş parçası işleme derinliği 0,5 mm olarak bütün deneylerde sabit tutulmuştur.

Tablo 3. Taguchi L₉ ortogonal deney tasarımı (Taguchi L₉ orthogonal experiment design)

Deney No	Boşalım akımı A	Vurum süresi μ s	Vurum bekleme süresi μ s
1	6	12	50
2	6	100	100
3	6	400	200
4	12	12	100
5	12	100	200
6	12	400	50
7	25	12	200
8	25	100	50
9	25	400	100

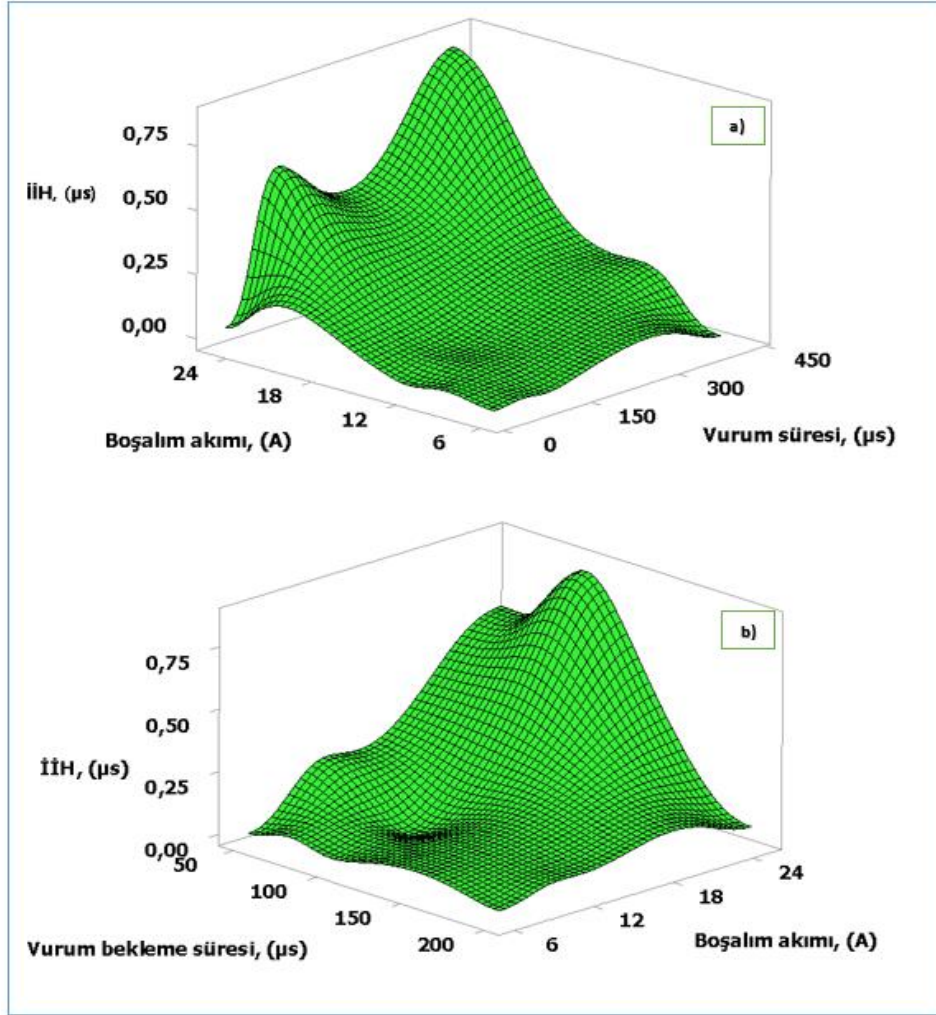
Deneyler Taguchi L₉ ortogonal dizinine göre yapılmıştır. Girdi parametrelerine bağlı kalarak üç çıktı sonucu değerlendirilmiştir. Bu yüzden literatürde yaygın olarak tercih edilen Taguchi tabanlı Grey Relational Analysis yöntemi tercih edilerek çoklu optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde İİH için "en büyük en iyi" yaklaşımı kullanılırken EAH ve Ra'yı en aza indirmek için "en küçük en iyi" yaklaşımı kullanılmıştır.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

2.1. İşleme Parametrelerinin İş Parçası İşleme Hızına Etkisi (The Effect of Machining Parameters on Material Removal Rate)

Ferritik paslanmaz çeliğin işlenmesinde, işleme parametrelerinin İİH üzerindeki etkisi Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2-a incelendiğinde boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla İİH’nin arttığı görülmektedir [4,16]. Bu durum daha yüksek enerji yoğunluğuna bağlanabilir, bu da elektrottan iş

parçasına daha fazla termal enerji aktarılması anlamına gelmektedir. Boşalım akımının artışı ile artan termal enerji, birim zamanda iş parçasının yüzeyinde yüksek miktarda erime ve buharlaşmaya neden olduğundan daha derin ve daha geniş krater oluşumlarına neden olmaktadır [14]. Şekil 2-b’de ise boşalım akımı ile vurum bekleme süresinin İİH üzerindeki etkilerini göstermektedir. Burada vurum bekleme süresinin ise İİH üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. İş parçasından malzeme boşaltma işlemi dışında kalma süresi, vurum bekleme süresinin artışı ile arttığından dolayı İİH’in azalmasıyla sonuçlanmıştır. Ancak bu sürenin artışı ile malzemeden kopartılan mikro boyutlu işleme artıkları çok küçük olan takım-işparçası arasındaki işleme boşluğundan etkili bir şekilde uzaklaştırılması için imalatın vazgeçilmez değişkenlerinden biridir. Çok küçük değerler olduğundan İİH’ ya olan azaltıcı etkisi değerlendirmede ihmal edilebilir.



Şekil 2. İşleme parametrelerinin İİH üzerindeki etkisi; a) boşalım akımı-vurum süresi, b) boşalım akımı-vurum bekleme süresi (Effect of processing parameters on MRR; a) discharge current-pulse on time, b) discharge current-pulse off time)

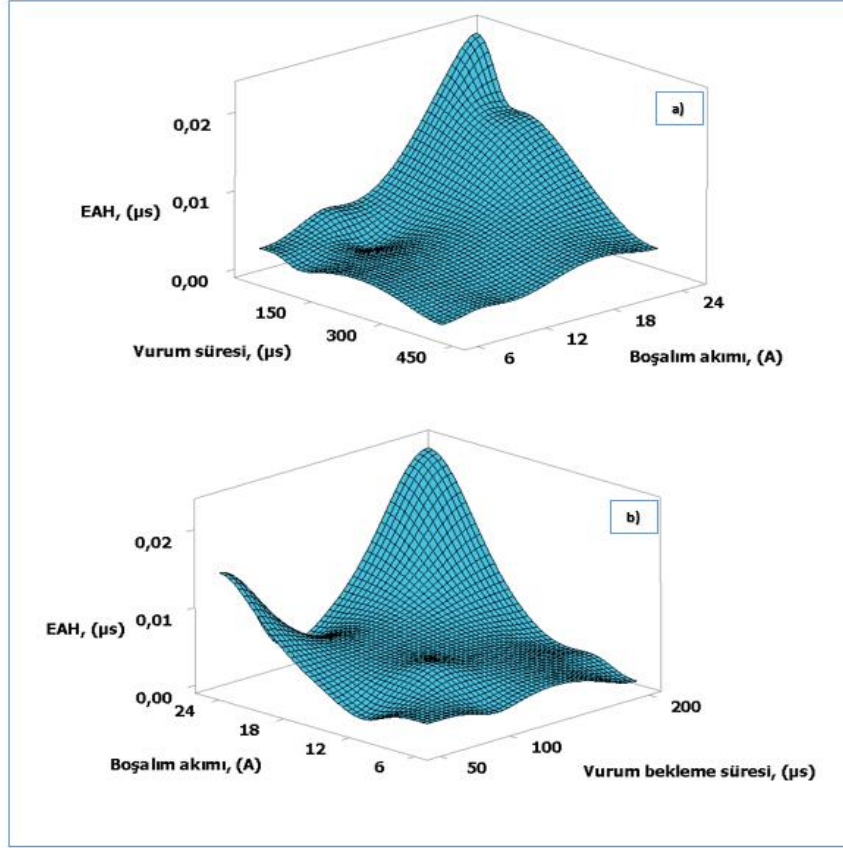
2.2. İşleme Parametrelerinin Elektrot Aşınma Hızına Etkisi (The Effect of Processing Parameters on Tool Wear Rate)

Şekil 3-a incelendiğinde, boşalım akımının artırılmasıyla EAH'ın arttığı görülmektedir. Enerji boşalımı sırasında akım iletkenini ve ısı üretimini etkileyen takım ve iş parçası arasında bir plazma kanalı oluşmaktadır. Bu durumun da yüksek miktarda ergime ve termal erozyonun elektrot yüzeyinde oluşan sıcaklığı artırdığı ve termal deformasyonun artmasına ve takımın aşınmasına neden olduğu görülmektedir [17,18].

Vurum süresi 12 μs 'den 400 μs 'ye çıkartıldığında takım aşınmasında azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu durum dielektrik sıvı olarak kullanılan gaz yağının hidrokarbon bazlı bir sıvı

olmasından dolayı, karbonun EEİ sırasında gaz yağından iş parçasına ve/veya takım yüzeyine aktarılmasından kaynaklanmaktadır [15,19].

Vurum süresinin artmasıyla birlikte daha fazla karbon atomu yayılmıştır ve bu oluşum elektrot üzerinde takım aşınmasını azaltan koruyucu bir film oluşturmuştur [19]. Şekil 3-b'ye göre vurum bekleme süresinin artmasıyla takım aşınmasının düzensiz bir eğilime sahip olduğu görülmektedir. Vurum bekleme süresi en yüksek değere ulaştığında, takım aşınmasının arttığı gözlenmiştir. Bu durum oluşturulan deney tasarımındaki kombinasyondan kaynaklanmıştır [15].



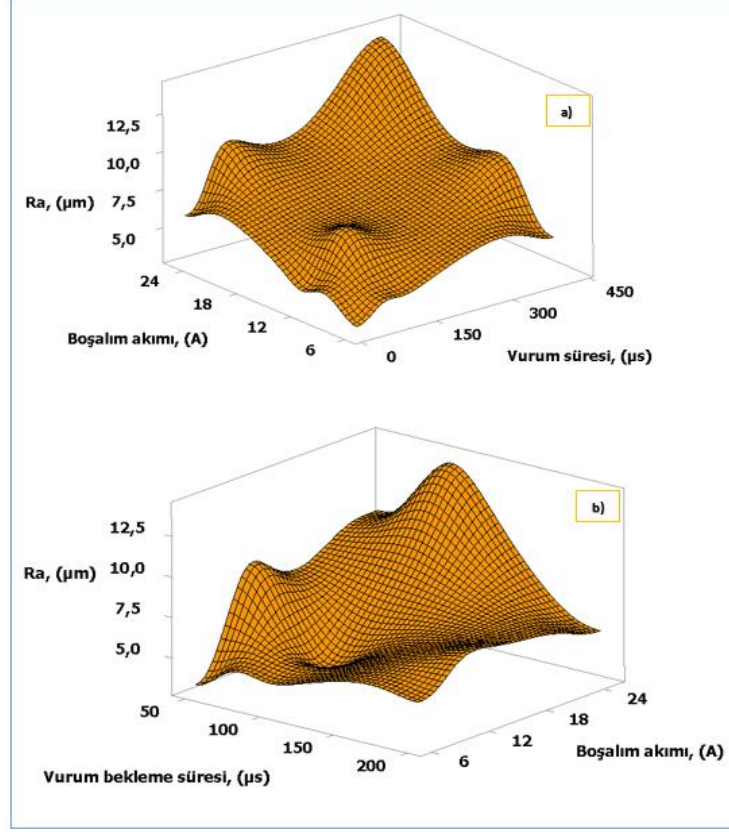
Şekil 3. İşleme parametrelerinin EAH üzerindeki etkisi; a) boşalım akımı-vurum süresi, b) boşalım akımı-vurum bekleme süresi (Effect of processing parameters on TWR; a) discharge current-pulse on time, b) discharge current-pulse off time)

2.3. İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi (The Effect of Processing Parameters on Surface Roughness)

İmalat sonrası yüzey kalitesi değerlendirilirken en önemli baskın kriter olan Ra değeri üretilen parçaların yorulma ömrüne oldukça büyük etkisi vardır. Bu yüzden işlenmiş yüzeylerde ki pürüzlülük deseni ve büyüklük değerlerinin incelenmesi önem arz etmektedir. EEİ ile işlemede hızlı işlemenin yanı sıra düşük pürüzlülük değeri ise genelde istenilen bir işlenebilirlik bütünüdür. Boşalım akımını artırarak iş parçasına daha fazla termal enerji aktarılması iş parçasından daha fazla malzeme boşaltılmasını sağladığı bilinen bir gerçektir. Böylece, iş parçası yüzeyinde daha derin ve daha geniş kraterler oluşur ve bu oluşum yüzey pürüzlülük değerinde bir artışa neden olur [20-22]. Şekil 4-a incelendiğinde boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla Ra değeri artış göstermiştir. Vurum süresinin artışından kaynaklanan yüksek termal deformasyon, yüzeyde oluşan kraterin derinliğinde ve genişliğinde belirgin bir artışa ve dolayısıyla Ra değerinin artmasına neden olmuştur [10].

Bununla birlikte Şekil 4-b'de gösterilen Ra değerleri, vurum bekleme süresindeki artışa paralel bir eğilim göstermemiştir. Tablo 3 incelenecek olursa, vurum bekleme süresi seviyelerinin rastgele dağılması nedeniyle yüzey pürüzlülüğü önce çok az azalma gösterirken vurum bekleme süresi 200

μs değerine yükseltildiğinde doğrusal bir azalma eğilimi sergilemiştir. Ayrıca, T_{off} arttıkça kıvılcımın düşme süresi her akım değerinde değişmiştir. T_{on} artmasıyla birlikte, iş parçası yüzeyi daha uzun süre ısı etkisinde kalmış ve ergime miktarı kademeli olarak artmıştır. Sonuç olarak, bu durum Ramasawmy ve Blunt tarafından belirtildiği gibi işlenmiş yüzey üzerinde çok yönlü düzensiz ve rastgele dağılmış daha derin kraterlerin oluşmasını sağlamış ve Ra değerinin artmasına sebep olmuştur [23].



Şekil 4. İşleme parametrelerinin Ra üzerindeki etkisi; a) boşalım akımı-vurum süresi, b) boşalım akımı-vurum bekleme süresi (Effect of processing parameters on Ra; a) discharge current-pulse on time, b) discharge current-pulse off time)

2.4. Optimizasyon Sonuçları (Optimization Results)

İkinci olarak, ferritik paslanmaz çelik malzemenin elektro erozyon ile işleme yöntemiyle işlenmesi sonucu elde edilen İİH, EAH ve Ra sonuçlarını Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemiyle işleme parametreleri optimize edilmiştir. Deney tasarımına ve analize dayalı çalışmalarda, özellikle farklı işleme koşulları ve işleme parametrelerinde, her sonuç belirli oranda çok etkili ve önemli olduğundan tüm sonuçların aynı anda optimize edilmiştir. Gerekli eşitliklerin kullanılması sonucunda elde edilen deney sonuçları ve hesaplanan değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deney sonuçları ve gri ilişkisel analiz sonuçları (Experiment results and gray relational analysis results)

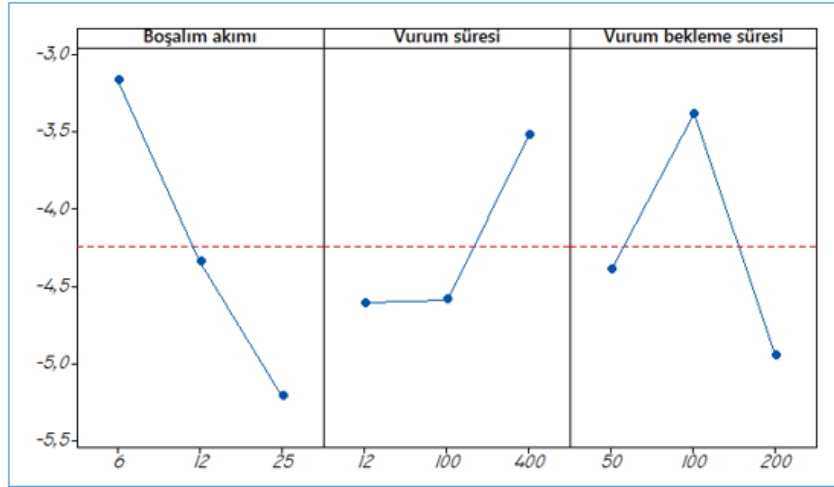
Deney no	DeneySEL sonuçlar			Normalize değerler			Katsayılar			GİD	S/N	Sıra
	İİH	EAH	Ra	İİH	EAH	Ra	İİH	EAH	Ra			
1	0.0053	0.0027	3.319	0.000	0.892	1.000	0.333	0.823	1.000	0.719	-2.86860	2
2	0.0106	0.0015	4.498	0.006	0.946	0.889	0.335	0.903	0.819	0.685	-3.28010	3
3	0.0144	0.0003	5.556	0.011	1.000	0.790	0.336	1.000	0.704	0.680	-3.34927	4
4	0.0137	0.0055	4.154	0.010	0.767	0.922	0.336	0.682	0.865	0.627	-4.04968	5
5	0.0621	0.0021	7.493	0.067	0.919	0.608	0.349	0.861	0.561	0.590	-4.57924	7
6	0.2184	0.0009	9.602	0.251	0.973	0.411	0.400	0.949	0.459	0.603	-4.39681	6

7	0.0449	0.0226	5.867	0.047	0.000	0.761	0.344	0.333	0.677	0.451	-6.91027	9
8	0.6071	0.0144	9.956	0.710	0.368	0.377	0.633	0.442	0.445	0.507	-5.90758	8
9	0.8533	0.0025	13.98	1.000	0.901	0.000	1.000	0.835	0.333	0.723	-2.81908	1

Bu tabloda yüksek gri ilişki derecesi (GİD) değeri, deney sonuçları ile normalleştirilmiş değerler arasındaki güçlü ilişkiyle beraber optimum seviyeyi göstermektedir. Ayrıca, GİD için yanıt tablosu Tablo 5'te verilmiştir. Bu tablodaki her parametreye karşılık gelen maksimum değer, optimum seviyeyi ifade etmektedir. Ayrıca, optimum parametre seviyesi Şekil 5'te verilen GİD için S/N oranı grafiğinden de belirlenebilmektedir. Buna göre, en iyi işleme parametreleri, 6 A boşalım akımı, 400 μ s vurum süresi ve 100 μ s vurum bekleme süresi olarak belirlenmiştir (A1B3C2). Düşük akım değerlerinde EAH ve Ra düşük miktarlarda olması doğal bir durumdur. Ancak küçük akımda yüksek vurum süresinde İİH artmıştır. Vurum süresinin artması kıvılcımın düştüğü noktaya daha uzun süreli deşarj olması anlamına gelir.

Tablo 5. GİD için yanıt tablosu (Response table for GRG)

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Fark
I, A	0.695*	0.607	0.560	0.135
Ton, (μ s)	0.599	0.594	0.669*	0.074
Toff, (μ s)	0.609	0.679*	0.574	0.105



Şekil 5. GİD için S/N oranı grafiği (S/N ratio graph for GRG)

3.5. Optimizasyonun Doğrulanması (Verification of Optimization)

Taguchi tabanlı gri ilişkisel analizde son adım, belirlenen optimum parametrenin doğrulanması işlemidir. Belirlenen optimum parametreler kullanılarak üç kez doğrulama deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının ortalaması alındıktan sonra sırasıyla 0.0136 μ s 0.0004 μ s ve 5.619 μ m olarak elde edilen İİH, EAH ve Ra değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, tahmini sonuçların daha iyi olduğu görülmektedir. Tahmin edilen GİD ile deney sonucu elde edilen GİD sonuçları arasında iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür. Sonuçlar ışığında, başlangıçtaki parametrelerden optimum parametrelere doğru GİD 'deki gelişme 0.149, yani %20.1 oranında olmuştur. Doğrulama testinden elde edilen değerler, GİD değerlerinin güven aralığı sınırları ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak İİH, EAH ve Ra için Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz metodolojisi başarıyla uygulanmıştır.

Tablo 6. Doğrulama deney sonuçları (Verification test results)

Başlangıç parametresi		Optimum parametre	
		Tahmini	Deneysel
Seviye	A2-B2-C1	A1-B3-C2	A1-B3-C2
İİH, (µs)	0.0578		0.0136
EAH, (µs)	0.0034		0.0004
Ra, (µm)	7.651		5.619
GİD	0.741	0.800	0.890
GİD'deki gelişme =0.149			
GİD'deki yüzde iyileşme = %20.1			

4. SONUÇLAR(CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, elektrolitik bakır ile ferritik paslanmaz çeliği I, Ton ve Toff değiştirilerek işleme performansı çıktıkları olan İİH, EAH ve Ra üzerindeki etkisine ilişkin aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Artan I ve Ton, yüksek enerjili bir deşarj darbesiyle ergitme ve buharlaşma fenomeni ile çıkarılan yüksek miktarda malzeme nedeniyle İİH artmıştır. En yüksek İİH değeri 25 A boşalım akımı, 400 µs vurum süresi ve 100 µs vurum bekleme süresi işleme parametreleri kombinasyonunda 0.8533 µs olarak tespit edilmiştir. İİH'nın değişimine en yüksek etkiyi boşalım akımı yapmıştır.
- Daha yavaş elektrot aşınma oranlarını ve şekil dejenerasyonunu Toff değerinin değişimi yapmıştır. Sonrasında sırasıyla I ve Ton değişkenleri EAH' yı etkilemiştir. En düşük EAH 6 A boşalım akımı, 400 µs vurum süresi ve 200 µs vurum bekleme süresi işleme değerlerinde 0.0003 µs olarak elde edilmiştir.
- Yüksek I ayarlarında işlenen tüm numunelerde, işleme boşluğunda oluşan yüksek enerji boşalmaları ile daha geniş ve daha derin kraterlerin oluşması nedeniyle daha yüksek Ra değerleri ölçülmüştür. En düşük Ra değeri 6 A boşalım akımı, 12 µs vurum süresi ve 50 µs vurum bekleme süresi 3.3190 µm koşullarında ölçülmüştür.
- Taguchi tabanlı GİA ile optimum işleme parametre kombinasyonu; 6 A boşalım akımı, 400 µs vurum süresi ve 100 µs vurum bekleme süresi olarak belirlenmiştir (A1B3C2).

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi (KBÜBAP-18-YL-100) tarafından desteklenmiş olup, yazarlar bu destekten dolayı teşekkürlerini ifade etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. O. Erdem, C. Çoğun, L. Urtekin, H. B. Özerkan, İ. Uslan, Toz katkılı ve ısıtılmış dielektriğin elektroerozyon ile işlemede (EEİ) delik delme performansı üzerindeki etkisi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31(3): 531-544, 2016.
2. V. Gohil, Y.M. Puri, Turning by electrical discharge machining: A review, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(2): 195-208, 2017.
3. R. Kumar, S. Roy, P. Gunjan, A. Sahoo, D.D. Sarkar, R.K. Das, Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process, Procedia Manufacturing, 20: 358-364, 2018.

4. N. Sharma, G. Singh, M. Gupta, H. Hegab, M. Mia, Investigations of surface integrity, bio-activity and performance characteristics during wire-electrical discharge machining of Ti-6Al-7Nb biomedical alloy, *Materials Research Express*, 6(9): 096568, 2019.
5. P.M. Kumar, K. Sivakumar, N. Jayakumar, Multiobjective optimization and analysis of copper-titanium diboride electrode in EDM of monel 400™ alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 33(13): 1429-1437, 2018.
6. P. Pant, P.S. Bharti, Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review, *Materials Today: Proceedings*, 25: 765-772, 2020.
7. X. Yue, Q. Li, X. Yang, Influence of thermal stress on material removal of Cf_SiC composite in EDM, *Ceramics International*, 46(6): 7998-8009, 2020.
8. J. E. Abu Qudeiri, A. Saleh, A. Ziout, A. H. I. Mourad, M. H. Abidi, A. Elkaseer, Advanced electric discharge machining of stainless steels: Assessment of the state of the art, gaps and future prospect, *Materials*, 12(6): 907, 2019.
9. E. Nas, S. Akıncıoğlu, Kriyojenik işlem görmüş nikel esaslı süper alaşımın elektro-erozyon işleme performansı optimizasyonu, *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1): 115-126, 2019.
10. S. Akıncıoğlu, Taguchi optimization of multiple performance characteristics in the electrical discharge machining of the TIGR2, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 1-18, 2021.
11. N. Annamalai, Investigation and modeling of electrical discharge machining process parameters for AISI 430 steel, *International Journal of Engineering and Technology*, 0975-4024, 2013.
12. M. Dastagiri, A. H. Kumar, Experimental Investigation of EDM Parameters on Stainless Steel & En41b, *Procedia Engineering*, 97: 1551-1564, 2014.
13. B. Özerkan, C. Çoğun, Effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining (EDM), *Gazi University Journal of Science*, 18(2): 211-228, 2005.
14. R. Çakıroğlu, ElektroErozyon ile işlemede yüzey bütünlüğünün yorulma üzerine etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük*, 2020.
15. R. Çakıroğlu, M. Günay, 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, 2020.
16. T. Muthuramalingam, B. Mohan, Influence of discharge current pulse on machinability in electrical discharge machining, *Materials and Manufacturing Processes*, 28(4): 375-380, 2013.
17. S.N. Joshi, S.S. Pande, Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process, *Journal of manufacturing processes*, 12(1): 45-56, 2010.
18. V.K. Yadav, P. Kumar, A. Dvivedi, Effect of tool rotation in near-dry EDM process on machining characteristics of HSS, *Mater Manuf Process*, 34: 779-90, 2019.
19. A. Muttamara, C. Kanchanomai, Effect of carbon in the dielectric fluid and workpieces on the characteristics of recast layers machined by electrical discharge machining, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(6), 3248, 2016.
20. M. Zhang, Q. Zhang, L. Dou, Q. Liu, C. Dong, Comparisons of single pulse discharge crater geometries in EDM and EAM, *Journal of Manufacturing Processes*, 22: 74-81, 2016.
21. K. H. Ho, S. T. Newman, State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13): 1287-1300, 2003.
22. O.A. Zeid, On the effect of electro discharge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 68(1): 27-32, 1997.
23. H. Ramasawmy, L. Blunt, Effect of EDM process parameters on 3D surface topography, *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2): 155-164, 2004.