

## Sertleştirilmiş AISI H13 Takım Çeliğinin Delme Performansını İyileştirmek İçin Elektro Erozyon İşleme Parametrelerinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak Modellenmesi ve Optimizasyonu

Engin NAS<sup>\*a</sup>, Erman ZURNACI<sup>b</sup>, Sıdıka YILDIRIM<sup>a</sup>

<sup>a</sup>\* Düzce Üniversitesi Cumayeri Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

<sup>b</sup> Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 05.04.2021  
Kabul: 05.08.2021

#### **Anahtar Kelimeler:**

Elektro erozyon işleme, AISI H13 çeliği, Ölçü tamlığı, Taguchi, Anova,

### ÖZ

AISI H13 sıcak iş takım çeliği, sahip olduğu mekanik ve termal özellikleri nedeniyle endüstriyel kalıpcılık uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Elektro Erozyonla İşleme yöntemi (EEİ) ise özellikle karmaşık geometriye sahip ve ölçüsel hassasiyeti yüksek parçaların işlenmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu çalışmada; sertleştirilmiş AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin farklı işleme parametreleri (akım şiddeti, vurum süresi, elektrot tipi) kullanılarak elektro erozyon işleme yöntemi ile delinmesinde, işleme parametrelerinin delik çapı ve kalitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel tasarım Taguchi yöntemi ile oluşturulmuş, deneysel parametreleri  $L_{27}$  ortogonal dizin kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel tasarımda, işleme parametreleri olarak üç farklı elektrot tipi (Bakır, Grafit, Tuncop), üç farklı vurum süresi (200, 300, 400  $\mu$ s), üç farklı akım şiddeti (4, 8, 12 A), 0,5 mm talaş derinliği ve 50  $\mu$ s bekleme süresi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, varyans analizi (ANOVA) ve sinyal / gürültü (S/N) oranı kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, işleme parametrelerinin delik çapının ölçüsel doğruluğu üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Sinyal/Gürültü oranları incelendiğinde, elektrot çapına en yakın delik çapını elde etmek için gerekli işleme parametrelerinin  $A_3B_1C_1$  (Bakır–200  $\mu$ s–4 A) olduğu belirlenmiştir. Anova analizi sonuçları değerlendirildiğinde, delik çapının ölçüsel doğruluğu üzerinde en etkili işleme parametresinin elektrot malzemesi olduğu, en az etki eden işleme parametresinin ise vurum süresi olarak olduğu tespit edilmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.03>

## Modelling and Optimization of Electrical Discharge Machining Parameters Using the Taguchi Method to Improve the Drilling Performance of Hardened AISI H13 Tool Steel

### ARTICLE INFO

Received: 05.04.2021  
Accepted: 05.08.2021

#### **Keywords:**

Electro Discharge Machining, AISI H13 Steel, Taguchi, Anova, Dimensional accuracy

### ABSTRACT

AISI H13 hot work tool steel is a material that is frequently used in industrial molding applications due to its mechanical and thermal properties. Electric Discharge Machining (EDM) is a preferred method especially for the machining of parts with complex geometry and high dimensional precision. In this study; the effects of machining parameters on hole diameter and surface quality were investigated experimentally when drilling hardened AISI H13 hot work tool steel using different machining parameters (current, pulse on- time, electrode material) by electric discharge machining method. The experimental design was developed with the Taguchi method, experimental parameters were determined using the  $L_{27}$  orthogonal array. In the experimental design; three different electrode material (Copper, Graphite, Tuncop), three different pulse-on times (200, 300, 400  $\mu$ s), three different currents (4, 8, 12 A), 0.5 mm depth of cut and 50  $\mu$ s pulse-

\*Corresponding author: enginnas@duzce.edu.tr

**To cite this article:** Nas, E., Zurnacı, E. and Yildirim, S. "Modelling and Optimization of Electrical Discharge Machining Parameters Using the Taguchi Method to Improve the Drilling Performance of Hardened AISI H13 Tool Steel", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 99-110, 2021. doi: <https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.03>

of time was used as machining parameters. Experimental results were evaluated by using analysis of variance (ANOVA) and signal/noise (S/N) ratio. As a result of the study, it was determined that the machining parameters have an effect on the dimensional accuracy of the hole diameter. Processing parameters that the required to obtain the hole diameter closest to the electrode diameter was determined as  $A_3B_1C_1$  (Copper - 200  $\mu$ s - 4 A) using Signal/Noise ratios. When the ANOVA results were evaluated, it was determined that the most effective machining parameter on the dimensional accuracy of the hole diameter as the electrode material, and the least effective machining parameter was the pulse-on time.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.03>

## 1. INTRODUCTION (Giriş)

Sıcak iş takım çelikleri, özellikle yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan malzemelerden birisidir. Sıcak iş takım çelikleri, dövme kalıpcılığı, hafif metal ekstrüzyonu ve yüksek basınçlı döküm gibi kalıpcılık sektöründe tercih edilmektedir. İçyapısındaki içerdikleri elementlere göre krom, molibden ve tungsten esaslı olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [1]. Kimyasal alaşımlarından dolayı sağladıkları dayanım avantajı sayesinde, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen metal ve metal olmayan malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadırlar [2]. En uygun sıcak iş takım çeliğinin belirlenmesinde, maliyetinin yanında işleme şartları ve üretim parametreleri gibi kriterler dikkate alınmaktadır. AISI H13 sıcak iş takım çelikleri, yüksek sıcaklıklarda mekanik ve termal özelliklerini koruduklarından, yeterli plastik deformasyon ve distorsiyon direnci gösterdiklerinden dolayı sıcak dövme kalıplarında yaygın olarak kullanılırlar [3].

Elektro erozyon yöntemi ile işleme (EDM), karmaşık ve ölçü hassasiyeti yüksek parçaların işlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, sert malzemeler ve hassas işleme için özellikle tavsiye edilmektedir [4]. Bahsedilen avantajları dikkate alındığında EDM işleminin kalıpcılık için en uygun imalat yöntemlerinden birisi olduğu açıktır. Endüstriyel kalıpların işlenmesinde, yüzey kalitesi ve ölçü tamlığı en önemli çıktı parametrelerinin başında gelmektedir. Yüzey kalitesi, büyük oranda işleme parametrelerine bağlı olarak değişen ve kalıpcılık bileşenlerinin kullanım ömrü üzerinde etkili olan bir faktördür [2- 5]. Ölçü tamlığı ise, seri üretim için kullanılan kalıpcılık ürünlerinin üretiminde, üretim kaynaklı hataların önüne geçilmesi açısından çok önemli bir konudur. Delik delme işleminde, işleme parametrelerinin etkisiyle istenmeyen şekil hataları ve ölçüsel hatalar meydana gelmektedir. Özellikle talaşlı imalat yöntemlerinde, işleme sürecinde ortaya çıkan titreşimler hem yüzey kalitesini hem de ölçü doğruluğu etkilemektedir. Bu sebeple EDM yöntemi ile delik delme işleminde, işleme parametrelerinin delme performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi

üzerinde çalışılması gereken bir konudur. Optimum işleme parametrelerinin önceden tespiti, işleme süresinin kısaltılması, ölçü tamlığı ve yüzey kalitesinin sağlanması açısından önem arz etmektedir.

Elektro erozyon işleme yönteminin işleme performansı üzerine etkisi ile ilgili gerçekleştirilen akademik çalışmalardan bazıları özetlenmiştir. Jaharah ve arkadaşları, sertleştirilmiş AISI H13 takım çeliğinin elektro erozyon işleme performansını, bakır elektrot ve farklı işleme parametreleri kullanarak incelemiştir. Gerçekleştirdikleri deneylerde, işleme parametrelerini akım şiddeti (1, 2 ve 4 A), vuruş süresi (3, 6 ve 12  $\mu$ s) ve bekleme süresi (1, 2 ve 4  $\mu$ s) olarak, çıktı parametrelerini ise yüzey pürüzlülüğü, elektrot ve malzeme aşınması olarak belirlemiştir. Elde ettikleri sonuçları değerlendirdiklerinde; yüzey pürüzlülüğü için optimum işleme parametrelerinin üç parametre için de en düşük seviye olduğunu, en düşük malzeme aşınmasının gerçekleştiği optimum işleme parametrelerinin ise yüksek seviye akım şiddeti, orta seviye vuruş süresi ve düşük seviye bekleme süresi olarak gerçekleştiğini belirlemiştir. Elektrot aşınması ise; yüksek akım şiddeti, yüksek vuruş süresi ve düşük bekleme süresinde gerçekleşmiştir [6].

Kuppan ve Narayanan, derin delik delme işlemi sırasında elektro erozyon işleme parametrelerinin delik kalitesi özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Delik kalitesini incelemek için, Inconel 718 süperalaşımı numunelere 3,055 ile 3,316 mm arasında değişen çaplarda 62 mm derinliğinde boydan boya delikler açmışlar ve yüzey pürüzlülüğü, radyal kesme ve delik profili parametrelerini incelemiştir. Deneysel sonuçlar, akım şiddeti ve vuruş süresi gibi işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli parametreler olduğunu ve radyal kesme parametresinin sadece vuruş süresinden etkilendiğini tespit etmiştir [7].

Hasçalık ve Çaydaş, tel erozyon yöntemi ile yaptıkları çalışmalarında farklı kesme modlarını kullanarak sıcak iş kalıplarının imalatında kullanılan

AISI 4340 çeliğinin mikro yapı ve yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmaların sonucunda, işleme sürecinde oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı numunelerin yüzey bölgelerinde sert yapının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, malzemenin yorulma dayanımını azaltacak çatlakların oluştuğunu gözlemlemişlerdir [8].

Özek ve Özel yaptıkları çalışmalarında, tel erozyon yöntemi ile işlemede kesme alanına bağlı olarak meydana gelen sertlik değişimi ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar için dişli çark imalatında yaygın olarak tercih edilen Ç8620 çeliği kullanmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda kesme metodu ve kesme alanına bağlı olarak kesme alanı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin ve malzeme sertliğinin azaldığını, ark süresince elektrot telin yüzeyinde meydana gelen küçük kraterlerden dolayı yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir [9].

Pramanik ve arkadaşları 6061 alüminyum alaşımının tel elektro erozyon yöntemi ile işlenmesinde malzeme aşınması, yüzey kalitesi ve elektrot aşınması gibi bir dizi parametre üzerindeki işleme parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Vurum süresinin artmasıyla malzeme aşınmasının arttığını, vurum süresinin değişmesinin yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde değiştirmediğini tespit etmişlerdir. Vurum süresinin artması, elektrot aşınmasını arttırmış bu ise deliğin üst tarafında alt tarafına kıyasla daha yüksek çentik genişliğine sahip konik yuva oluşturduğunu tespit etmişlerdir [10].

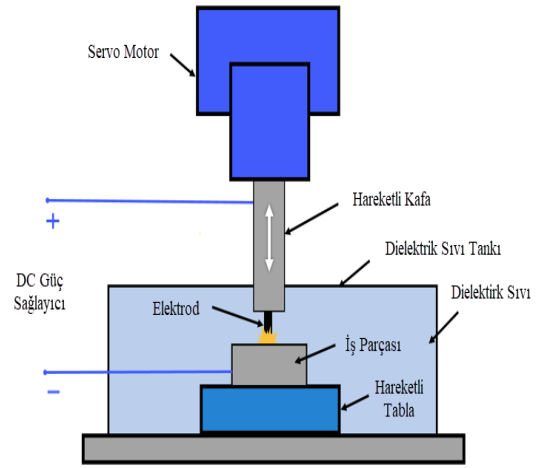
Dave ve arkadaşları ayrıca, elektro erozyon yöntemi ile 1100 alüminyum alaşımı malzeme üzerinde açtıkları mikro delikleri incelemek için Taguchi metodolojisini kullanmışlardır. Deney tasarımlarında girdi parametrelerini aralık voltajı, vurum süresi, elektrot boyutu ve elektrot rotasyonu olarak, çıktı parametrelerini ise üst yarıçap, alt yarıçap, konik açı ve elektrot aşınması olarak belirlemişlerdir [11].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, işleme parametrelerinde gerçekleştirilen optimizasyonun, EDM yöntemini daha kararlı hale getirdiği görülmektedir. Ayrıca çalışmalar, sıcak iş takım çeliklerinin EDM ile işlenmesine ilişkin çeşitli girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiye dair bilgiler sunsa da, temeldeki mekanizmalar hakkında çok fazla bilgi vermemektedir. AISI H13 Sıcak iş takım çeliğinin daha çok yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması

ve malzeme aşınma miktarı ile ilgili çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu çalışmada AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin elektro erozyon işleme yöntemi ile işlenmesinde, farklı işleme parametrelerinin malzeme yüzey kalitesi, elektrot ve deliğin ölçü doğruluğu üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

## 2. EXPERIMENTAL METHODS (DENEYSEL YÖNTEMLER)

Deneyler ISO 11090-1:2014 standardına uygun olarak tek sütunlu KING marka elektro erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Dielektrik akışkan olarak Petrofer Dielectricum 358 mineral bazlı yağ kullanılmıştır. EDM yöntemi şematığı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. EDM Tezgâhı çalışma şematığı  
(EDM Machine working schematic)

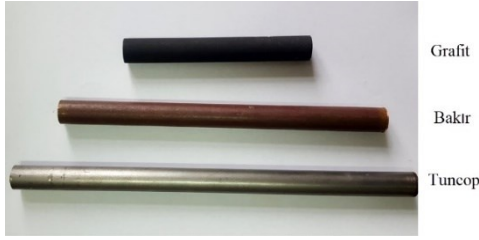
Deneysel çalışmada Ø20 mm X 20 mm boyutlarında sertleştirilmiş (54 HRC) AISI H13 sıcak iş takım çeliği kullanılmış olup, malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi (% Ağırlık) (Chemical composition of AISI H13 hot work tool steel (% by weight))

C	Mn	Cr	Mo	V	W	Diğer
0,39	0,4	5,3	1,3	0,9	-	Si 1,0

AISI H13 sıcak iş takım çeliği malzemesinin EDM yöntemi ile işlenmesinde, delik işleme kalitesi üzerinde elektrot türünün etkisini belirleyebilmek amacıyla üç farklı elektrot malzemesi kullanılmıştır (Şekil 2). Elektrot malzemelerinin seçiminde, imalat sanayisinde en çok kullanılan bakır ve grafit elektrot malzemesine ek olarak Tuncop elektrot malzemesi

tercih edilmiştir. Belirlenen elektrot malzemeleri Ø12 mm X 200 mm ölçülerinde kesilerek kullanılmıştır.



Şekil 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan elektrot malzemeleri (*Electrode materials used in experimental studies*)

## 2.1. Experimental Design (Deneysel Tasarım)

AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin EDM yöntemi ile işlenmesinde farklı işleme parametrelerinin belirlenen çıktı parametreleri üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla deneysel tasarım gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarımda girdi parametreleri olarak üç farklı elektrot tipi, üç farklı vurma süresi, üç farklı akım şiddeti, 0,5 mm talaş derinliği ve 50 µs bekleme süresi, çıktı parametreleri olarak ise delik çapı ve yüzey kalitesi olarak belirlenmiştir. Girdi parametreleri ve alt seviyeleri literatür araştırması sonucu belirlenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Deneysel çalışmada kullanılan işleme parametreleri (*Processing parameters used in the experimental study*)

Parametre	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Elektrot	A	Bakır	Grafit	TunCop
Vurma süresi (µs)	B	200	300	400
Akım (A)	C	4	8	12
Bekleme süresi (µs)	-	50		
Talaş Derinliği (mm)	-	0,5		

Alt seviyeleri bulunan girdi parametreleri çalışmanın devamında Tablo 2’de verilen harflerle sembolize edilmiştir. Belirlenen işleme parametreleri ile Taguchi L27 ortogonal dizi kullanılarak deney tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan deney tasarımı Tablo 3’de verilmiştir.

Belirlenen deneysel tasarıma uygun olarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen numunelerin delik kalitesinin ve delik çaplarının belirlenmesinde DINO-LITE AM7915MZT – EDGE optik mikroskop kullanılarak üç noktadan geçen bir daire çizilerek üç ölçüm gerçekleştirilmiş ve ortalamaları delik çapı olarak alınmıştır.

Tablo 3. Taguchi L<sub>27</sub> ile belirlenen deneysel tasarım parametreleri (*Taguchi L<sub>27</sub> experimental design parameters*)

Sıra No	Elektrot			Akım (A)	Vurma Süresi (µs)
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>		
1	Bakır	Grafit	Tuncop	4	200
2	Bakır	Grafit	Tuncop	4	300
3	Bakır	Grafit	Tuncop	4	400
4	Bakır	Grafit	Tuncop	8	200
5	Bakır	Grafit	Tuncop	8	300
6	Bakır	Grafit	Tuncop	8	400
7	Bakır	Grafit	Tuncop	12	200
8	Bakır	Grafit	Tuncop	12	300
9	Bakır	Grafit	Tuncop	12	400

Delik yüzey durumunun ve kalitesinin daha ayrıntılı olarak belirlenmesi için ise numuneler Quanta FEG 251 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)’nda incelenmiştir. İşleme parametreleri ile çıktı parametreleri arasındaki ilişkinin ve optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, deneysel sonuçlar Taguchi yöntemi ile analiz edilmiştir.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

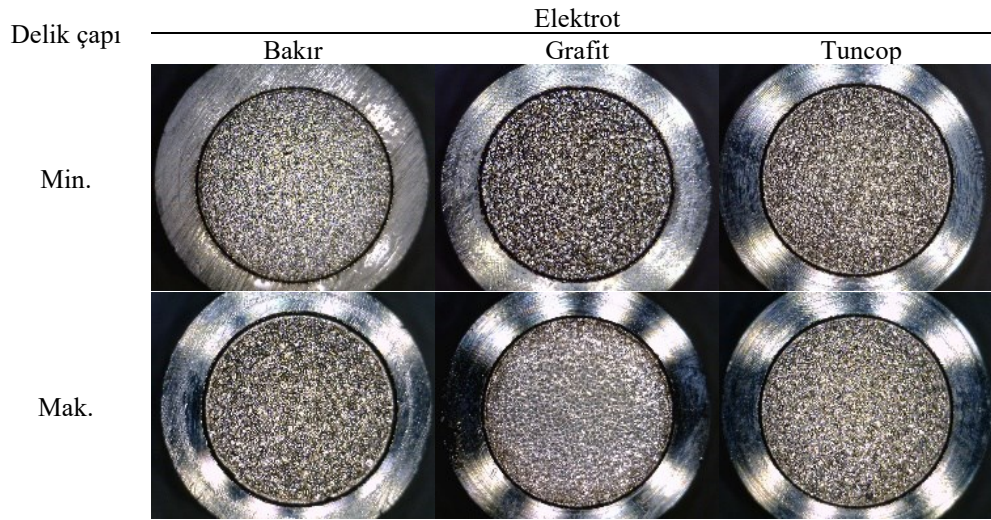
### 3.1. The Effect of Machining Parameters on Hole Diameter (İşleme Parametrelerinin Delik Çapı Üzerindeki Etkisi)

AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin EDM yöntemi ile farklı işleme parametreleri kullanılarak işlenmesi sonucu oluşan deliklerin ölçümleri yapılmış ve ölçü doğruluk değerleri belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen numunelerin delik çapı ölçüm sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Maksimum ve minimum delik çapı elde edilen numunelere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 3’de gösterilmektedir.

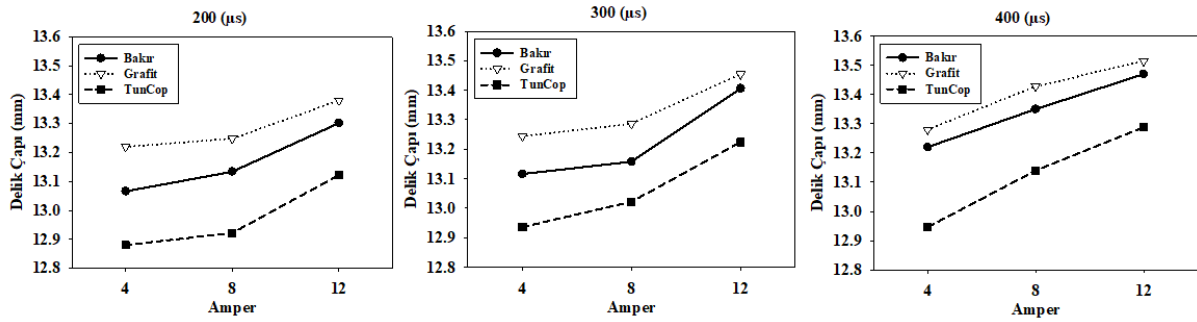
Tablo 4’de gösterilen verilerin işleme parametrelerine göre karşılaştırılması için veriler Sigmaplot yazılımı kullanılarak grafik haline getirilmiştir. Farklı vurma süreleri için, farklı elektrot malzemelerinin oluşturdukları delik çaplarını gösteren grafikler Şekil 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Deneysel tasarıma göre elde edilen delik çapları (Hole diameters obtained according to the experimental design)

Sıra No	Akım (A)	Vurum süresi ( $\mu$ s)	Elektrot			Delik Çapı (mm)		
			E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
1	4	200	Bakır	Grafit	Tuncop	13,066	13,220	12,880
2	4	300	Bakır	Grafit	Tuncop	13,116	13,244	12,936
3	4	400	Bakır	Grafit	Tuncop	13,220	13,280	12,946
4	8	200	Bakır	Grafit	Tuncop	13,134	13,248	12,922
5	8	300	Bakır	Grafit	Tuncop	13,158	13,286	13,022
6	8	400	Bakır	Grafit	Tuncop	13,350	13,428	13,140
7	12	200	Bakır	Grafit	Tuncop	13,302	13,380	13,122
8	12	300	Bakır	Grafit	Tuncop	13,406	13,454	13,224
9	12	400	Bakır	Grafit	Tuncop	13,470	13,514	13,288



Şekil 3. AISI H13 numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri (Optical microscope images of AISI H13 samples)

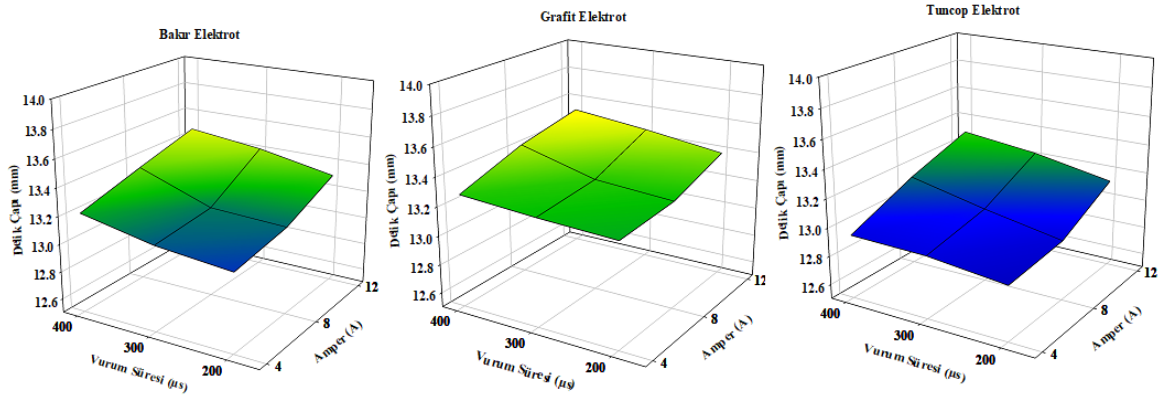


Şekil 4. Bakır, Grafit ve Tuncop elektrot malzemeleri ile işlenen numunelerin ölçülen delik çaplarının vurum süresi ve akım şiddetine bağlı olarak grafik gösterimi (Graphical representation of the measured hole diameters of the samples processed with copper, graphite and Tuncop electrode materials, depending on the pulse duration and current intensity.)



EDM tezgâhı ile 12 mm çapında elektrot malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde 4 A akımda, elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün tuncop elektrot ile 200  $\mu$ s vuruş süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise grafit elektrot ile 400  $\mu$ s vuruş süresinde işlenen numunede elde edildiği belirlenmiştir. 8 A akım ile gerçekleştirilen deneylerde, elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün grafit elektrot ile 200  $\mu$ s vuruş süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise tuncop elektrot ile 400  $\mu$ s vuruş süresinde işlenen numunede elde edildiği belirlenmiştir. 12 A akım ile gerçekleştirilen deneylerde ise, malzeme yüzeyinde oluşan en küçük delik çapının grafit elektrot ile 200  $\mu$ s vuruş süresinde, en büyük delik çapının ise bakır elektrot ile 400  $\mu$ s vuruş süresinde oluştuğu tespit edilmiştir.

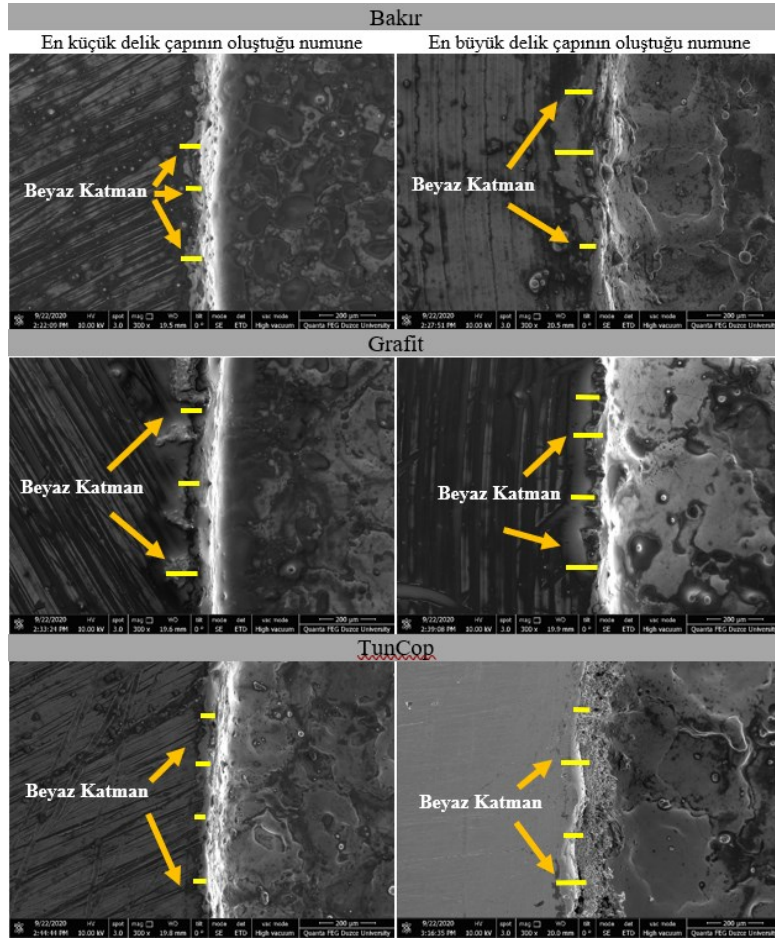
Bakır elektrot ile 200, 300 ve 400  $\mu$ s vuruş süresinde gerçekleştirilen deneylerde (Şekil 5) en düşük delik çapı 4 A akım 200  $\mu$ s vuruş süresinde, en büyük delik çapı ise 12 A akım 400  $\mu$ s vuruş süresinde oluşmuştur. Grafit elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde, en düşük delik çapının 4 A akım 200  $\mu$ s vuruş süresinde, en büyük delik çapının ise 12 A akım 400  $\mu$ s vuruş süresinde oluştuğu görülmüştür. Tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde ise elektrot çapına en yakın delik çapının 4 A akım 200  $\mu$ s vuruş süresinde ve en büyük delik çapının ise 12 A akım 400  $\mu$ s vuruş süresinde oluştuğu optik mikroskop ölçümleri ile belirlenmiştir. Farklı işleme parametreleri ile işlenen malzemelerde oluşan deliklerin çaplarının elektrot malzemesine göre kıyaslaması Şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 5. Elektrot malzemelerinin vuruş sürelerine bağlı olarak farklı akım şiddetine göre oluşturdukları delik çaplarının grafik gösterimi (Graphical display of the hole diameters formed by the electrode materials according to the different current intensity depending on the pulse duration.)

Şekil 5' de verilen grafikler incelendiğinde bakır ve grafit elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde 4 A akım sonucu oluşan deliklerin çaplarının 8 A akım sonucu oluşan deliklere göre daha büyük oluştuğu, en büyük delik çaplarının ise 12 A akımda oluştuğu belirlenmiştir. Tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde ise akım şiddetinin artması ile tüm vuruş

sürelerinde delik çaplarının diğer elektrotlara göre arttığı tespit edilmiştir. Artan akım ve vuruş sürelerinde, bakır, grafit ve tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde en küçük ve en büyük delik çapının oluştuğu numunelerin SEM görüntüleri Şekil 6' da gösterilmektedir.



Şekil 6. Bakır, Grafit ve Tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde en küçük ve en büyük delik çapının oluştuğu numunelerin SEM görüntüleri (*SEM images of the samples with the smallest and largest hole diameters in the experiments performed with copper, graphite and Tuncop electrodes.*)

Farklı işleme parametreleri ile işlenen numunelerin delik yüzeyleri incelendiğinde, delik çapların küçük olduğu numunelerin elektrotun ilk temas ettiği kısımda küçük hasarlar oluşturduğu, büyük delik çapının olduğu yüzeylerde ise elektrotun ilk temas ettiği kısımda daha büyük hasarlar olduğu görülmektedir. Bu duruma AISI H13 malzemenin EDM yöntemi ile işlenmesinde, elektrot ile malzeme arasında işleme sırasında oluşan arkların malzeme yüzeyine etki etmeye başlaması sonucu oluşan kıvılcımlar ve sıcaklıktan dolayı eriyen malzeme parçacıklarının parça yüzeyine akarak beyaz katman oluşturması sebep olmaktadır [12].

### 3.2. Evaluation of the Relationship Between Processing Parameters and Output Parameters by Using the Taguchi Method (*İşleme Parametreleri ve Çıktı Parametreleri Arasındaki İlişkinin Taguchi Yöntemi ile Değerlendirilmesi*)

Taguchi metodu, ortogonal deney tasarımı kullanarak belirlenen deney parametreleri ve alt

seviyeleri ile gerçekleştirilecek deney sayısını en aza indirerek çıktı parametrelerinde avantaj sağlayan bir optimizasyon tekniğidir. Bu teknikle elde edilen veriler sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilir. S parametresi sinyal faktörünü (ortalama), N parametresi ise gürültüyü faktörünü (standart sapma) ifade etmektedir. Sinyal faktörü elde edilen deney sonuçlarını, gürültü faktörü ise deney deneylerde dikkate alınamayan fakat sonuçlar üzerinde etkisi olan parametreleri ifade etmektedir. Gürültü faktörünü oluşturan parametreler, istenen optimum deney sonucunun elde edilmesini engelleyen faktörleri temsil eder [13-14]. S/N oranının yorumlanmasında deney yönteminin karakteristiğine bağlı olarak üç farklı amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Bunlar “en büyük en iyi”, “en küçük en iyi”, “nominal en iyi” amaç fonksiyonlarıdır. Bu çalışmada delik çapının elektrot çapına en yakın ölçüde olması istendiğinden, S/N oranının değerlendirilmesinde “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu seçilmiştir [15]. En küçük en iyi yaklaşımına göre S/N oranının belirlenmesinde

kullanılan formülasyon Denklem 1’de verilmiştir. En küçük en iyi:

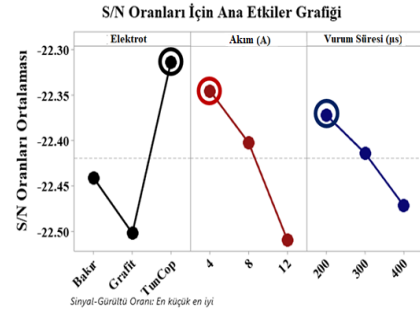
$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Denklem 2’de  $y$ , deneyde ölçülen işleme parametresini,  $n$  değeri ise yapılan deney sayısını ifade etmektedir.

En küçük en iyi amaç fonksiyonuna göre hesaplanan S/N analizi sonuçları Şekil 7’de gösterilmektedir. S/N grafiğinde dikeyde en üst noktada olan değer, en küçük en iyi amaç fonksiyonuna göre ideal olan işleme parametresini göstermektedir [16].

Şekil 7 incelendiğinde, elektrot çapına en yakın delik çapını elde etmek için gerekli işleme parametrelerinin A3B1C1 olarak gerçekleştiği belirlenmiş ve bu parametrelerle gerçekleştirilen deney sonucunda delik çapı 12,880 mm olarak elde

edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçların istatistiksel analizi ile işleme parametreleri ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiden yola çıkarak tahmini deney sonuçları hesaplamak mümkün olmaktadır. Belirlenen işleme parametrelerine göre istatistiksel analiz sonucu hesaplanan tahmini delik çapları (Predicted hole diameter- PreH) Tablo 5’de verilmiştir.

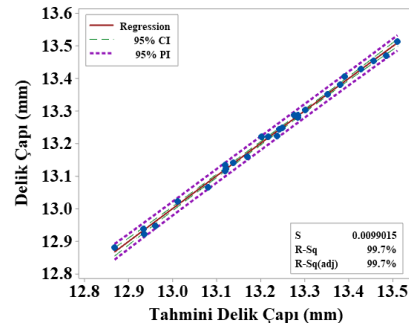


Şekil 7. S/N oranları için ana etkiler grafiği  
(Main effects plot for S/N ratios)

Tablo 5. Tahmini delik çapları (Estimated hole diameters)

Sıra No	Elektrot			Akım (A)	Vurum süresi (µs)	Tahmini Delik Çapı (mm)		
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>			Pre H <sub>1</sub>	Pre H <sub>2</sub>	Pre H <sub>3</sub>
1	Bakır	Grafit	Tuncop	4	200	13,080	13,217	12,868
2	Bakır	Grafit	Tuncop	4	300	13,119	13,242	12,933
3	Bakır	Grafit	Tuncop	4	400	13,201	13,284	12,960
4	Bakır	Grafit	Tuncop	8	200	13,119	13,249	12,934
5	Bakır	Grafit	Tuncop	8	300	13,169	13,285	13,011
6	Bakır	Grafit	Tuncop	8	400	13,352	13,427	13,138
7	Bakır	Grafit	Tuncop	12	200	13,301	13,381	13,121
8	Bakır	Grafit	Tuncop	12	300	13,390	13,456	13,237
9	Bakır	Grafit	Tuncop	12	400	13,485	13,510	13,275

Deneyel test sonuçları ve tahmini deney sonuçları için oluşturulan ikinci dereceden regresyon denklemleri karşılaştırılarak, tahmini deney sonuçlarının deneysel test sonuçlarını karşılama durumu belirlenmiştir. Şekil 8’de deneysel ve tahmini test sonucu elde edilen ve %95 güven düzeyinde oluşturulan regresyon eğrilerinin kıyaslanması gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tahmini olarak belirlenen delik çaplarının deneysel test sonuçlarına oldukça yakın olarak hesaplandığını göstermektedir.



Şekil 8. Deneysel ve tahmini deney sonuçların grafiksel olarak karşılaştırılması  
(Graphical comparison of experimental and predictive results)



### 3.3. Anova Analysis (Anova Analizi)

Anova, kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimlerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [17]. Anova analizi ile, işleme parametrelerinin seçilen çıktı değerleri üzerindeki etkisi ve işleme parametrelerine ait alt seviyelerin çıktı parametrelerini nasıl etkilediği belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ise, farklı işleme parametrelerinin delik çapı oluşumu üzerindeki

etkisini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Deneysel test sonuçları ile %95 güven düzeyinde gerçekleştirilen Anova analizi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Tabloda işleme parametreleri için elde edilen P (anamlılık) değeri, işleme parametreleri ile deneysel test sonuçları arasındaki ilişkinin anlamlılık düzeyini göstermektedir. En düşük P değerine sahip olan işleme parametresi en etkili işleme parametresini göstermektedir.

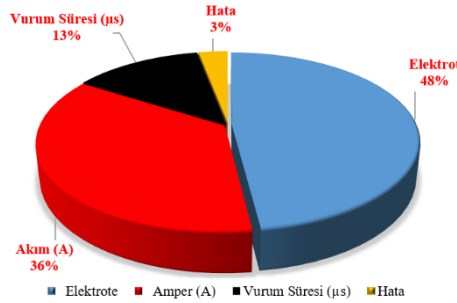
Tablo 6. Anava analizi sonuçları (Anova analysis results)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Elektrot Malzemesi	2	0,38342	0,38342	0,191709	144,03	0,000000000001
Akım (A)	2	0,29062	0,29062	0,145309	109,17	0,000000000017
Vurum Süresi ( $\mu$ s)	2	0,10394	0,10394	0,051969	39,04	0,000000124205
Error	20	0,02662	0,02662	0,001331		
Total	26	0,80459				

R-sq: 96,69%

Tablo 5 incelendiğinde, delik çapına en fazla etki eden işleme parametresinin elektrot malzemesi, en az etki eden işleme parametresinin ise vurum süresi olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise elektrot malzemelerinin farklı kimyasal bileşiminden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. İşleme parametrelerinin etki oranları yüzdesel olarak incelendiğinde ise elde edilen değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 9'da verilmiştir. Etki oranlarının

yüzdesel olarak hesaplanmasında Anova tablosunda bulunan Seq SS (Sequential sums of squares) verileri kullanılmıştır. Şekil 9 incelendiğinde, elektrot malzemesini etki oranının %48, akım şiddetinin %36 ve vurum süresinin %13 olarak oluştuğu tespit edilmiştir. İstatistiksel hesaplamadaki hata payı oranının ise %3 olarak oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 9. İşleme parametrelerinin çıktı değerleri üzerindeki etkisini gösteren grafik (Graph showing the effect of processing parameters on output values)

Regresyon analizleri, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki istatistiksel ilişkinin matematiksel olarak modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır [18-21].

Deneysel test sonuçları kullanılarak elde edilen ve en düşük delik çapı elde edilmesini hedefleyen doğrusal regresyon denklemi katsayıları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Regresyon denklemi (Regression equation)

Elektrot Malzemesi	
Bakır	= 12,7697
Grafit	= 12,8621 + 0,03128 Akım (A) + 0,000757 Vurum süresi ( $\mu$ s)
Tuncop	= 12,5761

Elde edilen regresyon denklemi aynı özellikteki AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin farklı işleme parametreleri ile işlenmesinde işleme sonuçlarının önceden tahmininde kullanılabilir. Bu şekilde araştırmacılar, zaman ve enerji kaybının önüne geçebileceklerdir.

#### 4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Sertleştirilmiş AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin farklı elektrot malzemesi ve işleme parametreleri kullanarak EDM yöntemi ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemi sonrasında oluşan delik çapları deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiş olup elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

- 4 A akımda elektrot çapına en yakın delik çapının tuncop elektrot malzemesi ile 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının grafit elektrot malzemesi ile 400 µs vurum süresinde işlenen numunede oluştuğu,
- 8 A akımda elektrot çapına en yakın delik çapının grafit elektrot malzemesi ile 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının tuncop elektrot malzemesi ile 400 µs vurum süresinde işlenen numunede oluştuğu,
- 12 A akım ile gerçekleştirilen deneylerde en yakın delik çapının grafit elektrot ile 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının bakır elektrot ile 400 µs vurum süresinde işlenen numunede oluştuğu,
- Bakır elektrot ile farklı vurum sürelerinde gerçekleştirilen deneylerde, en yakın delik çapının 8 A akımda 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının ise 12 A akımda 400 µs vurum süresinde oluştuğu,
- Grafit elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde en yakın delik çapının 4 A akımda 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının ise 12 A akımda 400 µs vurum süresinde oluştuğu,
- Tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde elektrot çapına en yakın delik çapının 4 A akımda 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının ise 12 A akımda 400 µs vurum süresinde oluştuğu,
- Numunelerin delik yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, numunelerin elektrot ile ilk temas ettiği bölgelerde arkların küçük hasarlar oluşturduğu, büyük

delik çapının oluştuğu yüzeylerde ise elektrotun ilk temas ettiği alanlarda arkların hasarlarının daha büyük oluştuğu,

- AISI H13 sıcak iş takım çeliği malzemesinin elektro erozyon tezgahında işlenmesi sırasında oluşan arkların oluşturduğu yüksek sıcaklıktan dolayı malzeme yüzeyinde beyaz katman oluştuğu,
- Gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda, elektrot çapına en yakın delik çapının elde edildiği ideal işleme parametrelerinin A3B1C1 (Bakır-200 µs -4 A) parametreleri ile gerçekleştirilen deneyde oluşacağı,
- Anova analizi sonuçları incelendiğinde ise, delik çapına en fazla etki eden işleme parametresinin elektrot malzemesi, en az etki eden işleme parametresinin ise vurum süresi olarak gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

#### ACKNOWLEDGMENT (TEŞEKKÜR)

Bu çalışmayı, 2018.22.02.814 proje numarası ile destekleyen Düzce Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunuyorum.

#### CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Y. Karaca, "Investigation of Vc Coatability Of 1.2344 Hot Work Tool Steel With Box Cementation Method," *Nevşehir Journal of Science and Technology*, pp. 106-110, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.17100/nevbittek.734281>
- [2] S. Koca, "Investigation Of The Relationship Between Tool Wear And Residual Stress That Happens During The High Feed Machining Of The 55 HRC Hardened Tool Steel DIN 1.2344 ESR," Uludağ University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering Uludağ Üniversitesi, Turkey, 2013.
- [3] M. Özer, "The Effect of Deep Cryogenic Processing and Tempering Heat Treatment of AISI H13 Tool Steel on Microstructure, Hardness and Impact Energy," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 688-699, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.29109/gujsc.603355>

- [4] Narcis Pellicer, Joaquim Ciurana & Jordi Delgado "Tool Electrode Geometry And Process Parameters Influence on Different Feature Geometry and Surface Quality in Electrical Discharge Machining of AISI H13 Steel," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 22, pp. 575-584, 2011. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s10845-009-0320-8>
- [5] M. Zeyveli and H. Demir, "Experimental Study Of Surface Roughness For Machining Of AISI H13 Hot Work Tool Steel," *Erciyes University Institute of Science and Technology Journal of Science*, vol. 25, no. 1, pp. 251-261, Feb. 2009.
- [6] A.G. Jaharah, C. G. Liang, S.Z. Wahid, M. N. Ab Rahman and C.H. Che Hassan, "Performance Of Copper Electrode In Electrical Discharge Machining (EDM) Of AISI H13 Harden Steel," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, vol. 3, no. 1, pp. 25-29, 2008.
- [7] P. Kuppan and S. Narayanan, "Effect of EDM Parameters on Hole Quality Characteristics in Deep Hole Drilling of Inconel 718 superalloy," *Int. J. Manufacturing Research*, vol. 10, no. 1, 2015. doi: [10.1504/IJMR.2015.067617](https://doi.org/10.1504/IJMR.2015.067617)
- [8] A. Haşçalık and U.Çaydaş; "The Effects Of Cutting Parameters On The Microstructure And Surface Roughness In The WEDM," *Firat Üniversty Research of Eastern Anatolia Region*, vol. 1, no. 3, pp.118-121, 2003.
- [9] C. Özek and C. Özel, "An Investigation On Cutting Behaviour Of AISI8620 Gear Steel By Wedm Machine," *Dokuz Eylul University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 47-52, 2003.
- [10] A. Pramanik, K. A. Basak, N. M. Islami and G. Littlefair, "Electrical Discharge Machining of 6061 Aluminium Alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* vol. 25, pp. 2866-2874, 2015.
- [11] H. K. Dave, V. J. Mathai, K. P. Desai and H. K. Raval, "Studies on Quality of Microholes Generated on Al 1100 using Micro-Electro-Discharge Machining Process," *Int J Adv Manuf Technol*, no.76, pp.127-140, 2015. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5542-4>
- [12] A. Kumar, V. Kumar, and J. Kumar, "Investigation of Microstructure and Element Migration For Rough Cut Surface of Pure Titanium After WEDM," *International Journal of Microstructure and Materials Properties (IJMMP)*, vol. 8, no. 4-5, pp. 343-356, 2013. doi:<https://dx.doi.org/10.1504/IJMMP.2013.057071>
- [13] H. Serencam and M. Uçurum, "Performance Evaluation Of Adsorption Properties For Ni(II) Removal With Flying Ash Using Taguchi Experimental Design," *Niğde Ömer Halis Demir University Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no.1, pp. 336-344, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.517135>
- [14] B. Özlü, M. Akgün and H. Demir, "Analysis and Optimization of Effects on Surface Roughness of Cutting Parameters on Turning of AA6061 Alloy," *Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)*, vol. 5, no. 2, pp. 151-158, 2019.
- [15] E. Kavcı "Investigations of Adsorption of Direct Red BWS Textile Dye Using Taguchi L9 Orthogonal Experimental Design," *Niğde Ömer Halis Demir University Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, no. 1, pp. 358-363, 2021. doi: <https://dx.doi.org/10.28948/ngumuh.669972>
- [16] F. Kara, M. Karabatak, M. Ayyıldız and E. Nas, "Effect Of Machinability, Microstructure And Hardness Of Deep Cryogenic Treatment in Hard Turning Of AISI D2 Steel With Ceramic Cutting," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 969-983, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.037>
- [17] O. Özbek and N. A. Özbek, "Application Of Taguchi Method in The Optimization Of Cutting Parameters For Surface Roughness in Turning Of Hardened AISI 4140 Steel," *Journal of Advanced Technology Sciences*, vol. 5, no. 3, pp. 41-48, 2016.
- [18] M. H. Cetin et al., "Evaluation of Vegetable Based Cutting Fluids With Extreme Pressure And Cutting Parameters in Turning of AISI 304L by Taguchi Method", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 17, pp. 2049-2056, 2011. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.013>
- [19] E. Nas and H. Gökkaya, "Experimental and Statistical Study On Machinability Of The Composite Materials With Metal Matrix Al/B<sub>4</sub>C/Graphite," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 48, pp.5059-5067, 2017.
- [20] B. Özlü, M. Akgün and H. Demir, "Analysis and Optimization of Effects on Surface Roughness of Cutting Parameters on Turning of AA6061 Alloy." *Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)* vol. 5, no. 2, pp. 151-158, 2019.

[21] M. Yavuz, H. Gokce and U. Şeker, "Investigation of the Effect of Drill Geometry on Tool Wear and Chip Formation," *Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)*, vol. 3, no. 1, pp. 11-19, 2017.