



## Nikel esaslı waspaloy alaşımının tel erozyon yöntemiyle işlenmesinde Taguchi metodu ile yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametrelerinin tahmini

Abdil Kuş<sup>1</sup>, Ali Rıza Motorcu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Uludağ Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, 16059, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 17100, Çanakkale, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Waspaloy'un tel erozyon yöntemi ile işlenmesi.
- En düşük yüzey pürüzlülük değeri için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi.
- Yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için tahminsel denklemin geliştirilmesi.

#### Makale Bilgileri

Geliş: 02.01.2016

Kabul: 24.05.2016

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.300611

#### Anahtar Kelimeler:

Waspaloy,  
tel erozyon tezgahında  
işleme,  
yüzey pürüzlülüğü,  
taguchi metodu

#### ÖZET

Bu çalışmada, Waspaloy süper alaşımının tel erozyon yöntemi ile işlenmesinde (WEDM) kesme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmış ve en düşük yüzey pürüzlülük değerlerini veren en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir. Kontrol faktörleri olarak; tel gerginliği, tel ilerleme hızı, ilerleme miktarı ve dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı seçilmiş ve Taguchi Metodu (TM) kullanılarak L18 ( $2^1 \times 3^3$ ) ortogonal dizin oluşturulmuştur. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki istatistiksel etkileri, varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek amacıyla Lineer Regresyon yöntemi ile ikinci dereceden tahminsel denklem geliştirilmiştir. Geliştirilen ikinci dereceden tahminsel yüzey pürüzlülük denkleminin kullanılması ile % 95 güven seviyesinde ( $R^2=0,936$ ) teorik ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri elde edilmiştir. Varyans analizi sonuçları ve ana etki grafiklerinin değerlendirilmesinden, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla; ilerleme miktarı, dielektrik sıvı basıncı ve tel ilerleme hızı olarak belirlenmiş, tel gerginliğinin anlamlı bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Waspaloy'un WEDM'de kesilmesinde; yüzey pürüzlülüğü aritmetik ortalamasının 2,683-4,052  $\mu\text{m}$  aralığında değiştiği belirlenmiştir.

## Estimation of the optimum cutting parameters for surface roughness in wire electrical discharge machining of nickel based waspaloy using Taguchi method

### H I G H L I G H T S

- Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of Waspaloy.
- Determination of optimal cutting parameters for lowest surface roughness value.
- Development of the predictive equation to estimate surface roughness.

#### Article Info

Received: 02.01.2016

Accepted: 24.05.2016

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.300611

#### Keywords:

Waspaloy,  
wire electrical discharge  
machining,  
surface roughness,  
taguchi method

#### ABSTRACT

In this study, the effects of cutting parameters on the surface roughness in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of Waspaloy have been investigated and optimal cutting parameters for lowest surface roughness values were determined. As control factors; wire tension, wire feed speed, feed rate and dielectric flushing pressure have been selected and a Taguchi L18 ( $2^1 \times 3^3$ ) orthogonal array was used for experimentation. The statistical effects of cutting parameters on the surface roughness have been determined by using analysis of variance (ANOVA). The second order predictive equation has been developed via Linear Regression Analysis. Using the second-order predictive surface roughness equation developed in the result of this study, the theoretical average surface roughness ( $R_a$ ) values at a confidence level of 95 percent ( $R^2=0.936$ ) have been obtained. When evaluating the main effects plots and ANOVA results, the feed rate was found the most efficient factor on the  $R_a$ , while dielectric flushing pressure and wire speed were the following ranking factors. The wire tension was seemed to have not of a statistically influence on the  $R_a$ . The arithmetic average surface roughness  $R_a$  of the WEDM-cut workpiece has been obtained between 2.683 to 4.052  $\mu\text{m}$  intervals for Waspaloy.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding author: armotorcu@comu.edu.tr / Tel: +90 0286 218 0540 - 2358

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son zamanlarda gelişen imalat yöntemlerinden biri de geleneksel talaş kaldırma yöntemleri içerisinde yer almayan tel erozyon tezgâhında işleme (WEDM) yöntemidir [1]. Bu yöntemde, tel elektrot ile iş parçası arasında elektrik kıvılcımı oluşumu sağlanarak talaş kaldırılmaktadır. İşlenmesi zor malzemeler için uygun olan bu yöntem, genellikle karmaşık şekilli parçaların üretiminde kullanılmaktadır [2]. Kesme plastik enjeksiyon, ekstrüzyon ve özel formlardaki kalıpların üretiminde karmaşık geometrilerin kesilmesi için tel erozyon ile işleme ideal bir yöntemdir [3]. Bu tür parçalar işlenirken yüzey pürüzlülük değerlerinin parçanın teknik resminde verilen değerlerinde ya da en düşük değerlerde olması istenir. Böylelikle ikinci bir talaş kaldırma yöntemi olan bitirme işlemi ortadan kaldırılır. Diğer taraftan, tel erozyon tezgâhı ile kesme işlemi maliyetli bir süreç olduğundan uygun işleme parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir [4]. WEDM ile kesilen yüzeylerin pürüzlülükleri kesme parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Kesme parametrelerinin kesme sırasında aynı anda etkili olması bu parametrelerin seçimini zorlaştırmaktadır. Tel erozyon ile kesmede kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini araştırmak amacıyla son on yılda araştırmacılar farklı amaçları ve malzemeleri içeren çalışmalar yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda, boşalım akımı, kapasitans, vuruş süresi, vuruş frekansı, tel hızı, tel gerginliği, ortalama çalışma gerilimi ve dielektrik sıvısı püskürtme şartlarının performansı etkileyen en önemli işleme parametreleri olduğu tespit edilmiştir. Erdem vd. [1] tarafından yapılan çalışmada kesme parametrelerinin yanısıra iş parçası malzemesi, elektrot malzemesi, dielektrik sıvısı, kutuplama, işleme derinliği, elektrot boyutu ve tipinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. WEDM ile kesmede, düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesinde en etkili parametre açık devre gerilimidir. Yüksek dielektrik sıvı basıncı yüzey kalitesinin artmasında etkili iken vuruş süresi, tel hızı ve açık devre geriliminin artırılmasıyla yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır [5]. Han vd. [6] vuruş süresi ve boşalım akımının azalmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün iyileştiğini tespit etmişlerdir. GGG40 sfero döküm malzemesinin WEDM'de kesilmesinde açık devre gerilimi, boşalım akımı ve tel hızındaki artışlar malzemenin kesilme oranında ve yüzey pürüzlülük değerlerinde artışlara sebep olmuştur [7]. AISI 4140 çeliğinin kesilmesinde, malzeme kesilme hızı (kesme süresi) ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre voltaj, en etkisiz parametre ise dielektrik sıvı basıncı olarak belirlenmiştir. Kaliteli bir yüzey elde edebilmek için voltajın, tel ilerleme hızının ve vuruş süresinin azaltılması, dielektrik sıvı basıncının ise artırılması gerektiği bildirilmiştir [8]. SAE 4140 çeliğinin WEDM'de kesilmesinde, vuruş süresi ve açık devre geriliminin artması ile yüzey pürüzlülük değerleri artmış iken dielektrik sıvı basıncının artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinde azalmıştır [9]. BIS-24345 alüminyum alaşımının WEDM'de kesilmesinde iyi bir yüzey kalitesi

için tel gerginliği ve kıvılcım aralık geriliminin oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir. Tel gerginliğinin artırılması kesme sırasında oluşan titreşimi azaltmış ve yüzey kalitesinin iyileşmesine sebep olmuştur [10]. Huang vd. [11] açık devre akımı ve malzeme ile tel arasındaki mesafenin yüzey kalitesini etkilediğini belirtmişlerdir. Mahapatra ve Patnaik [12] boşalım akımı, vuruş süresi, vuruş frekansı, tel hızı, tel gerginliği ve dielektrik sıvısının WEDM performansını etkileyen önemli parametreler olduğunu tespit etmişlerdir. Rozenek vd. [13] tarafından metal matrisli kompozit malzemenin kesilmesinde vuruş süresi, vuruş ara süresi, boşaltım akımı ve boşaltım geriliminin kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılırken Rebelo vd. [14] bakır-berilyum alaşımlarının WEDM'de işlenebilirliğini incelemişlerdir. Tosun ve Çoğun [15] kesme süresince tel elektrotta oluşan aşınmaları incelerken Prohaszka ve Mamalis [16] işleme parametreleri ve farklı tel elektrot malzeme seçimine bağlı olarak kesme performansını araştırmışlardır. Aspinwal vd. [17] Ti-6Al-4V ve Inconel 718'i tel erozyon tezgâhında işleyerek yüzey pürüzlülüklerini incelemişler ve yüzeyde oluşan artık tabaka kalınlıklarını karşılaştırmışlardır. Hasçalık ve Çaydaş [18] AISI D5 takım çeliğinin tel erozyon tezgâhında işleme özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneylerde açık devre gerilimi, vuruş süresi, tel hızı ve dielektrik sıvı basıncının yüzey pürüzlülüğü ve kesme bölgesinin metalürjik yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre; vuruş süresi ve açık devre gerilimi arttığında yüzey pürüzlülüğü de artmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün öncelikle bu iki parametreye bağlı olduğu görülmüş iken dielektrik sıvı basıncı ve tel hızının çok fazla etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde süper alaşımların WEDM'de işlenmesine yönelik çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir.

Nikel esaslı bir süperalaşım olan Waspaloy yüksek sıcaklıklarda yaşlanabilen ve korozyon direnci iyi olan bir malzemedir. Nikel esaslı süperalaşımlar, en fazla uzay aracı motorları ile gaz türbini kompartımanlarının üretiminde kullanılmaktadırlar. Ayrıca, nükleer reaktörler, petrokimya fabrikaları ve gıda üretim ortamlarında da kullanılmaktadırlar [19]. Bu süperalaşımların zor ve güç ortamlarda kullanılmasının sebebi; yüksek sıcaklıklarda korozyona, termal-mekaniksel yorgunluğa ve şoklara, erozyon ve sürünmeye karşı yüksek dayanımlara sahip olmalarıdır [20]. Geleneksel talaş kaldırma yöntemleri ile işlenmesi güç bir malzeme olup bu malzemenin işlenebilirliğinin değerlendirilmesi alanında yapılan bilimsel çalışmaların sayısı yok denecek kadar azdır. Bu amaçla bu çalışmada, Waspaloy süperalaşımının geleneksel talaş kaldırma yöntemi olmayan WEDM'de işlenebilirliği araştırılmıştır. Kontrol faktörleri olarak; tel gerginliği ( $WT$ ), tel ilerleme hızı ( $S$ ), ilerleme miktarı ( $F$ ) ve dielektrik sıvı basıncı ( $DF$ ) seçilerek bu faktörlerin  $R_a$  pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmış ve en düşük  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerlerini veren optimal kontrol faktörleri belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen verilerin Waspaloy

süperalaşımının geleneksel olmayan yöntemlerle işlenebilirliğinin değerlendirilmesine yönelik bilimsel çalışmalara ve bu süperalaşımın da kullanıldığı üretimlerde uygulayıcılara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Malzeme ve Deneysel Kurulumu (Material and Experimental Setup)

WEDM'de kesilen Waspaloy (AMS 5708) iş parçasının boyutları  $\varnothing 36,6$  mm x 200 mm'dir. İş parçasının sertliği 39 HRC olarak ölçülmüştür. Bu alaşımına ait kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir [21].

**Tablo 1.** Waspaloyun kimyasal bileşimi-Hacimsel % [21]  
(Chemical composition of Waspaloy - % Volume)

C	S	Mn	Si	Cr	Mo	Co	Ti	Al	B
0,036	0,0004	0,03	0,05	19,57	4,27	13,26	3,08	1,35	0,007
Zr	Fe	Cu	Ni	P	Cb	Ta	W	V	
0,06	0,9	0,01	57,32	0,004	0,04	0,01	0,03	0,02	

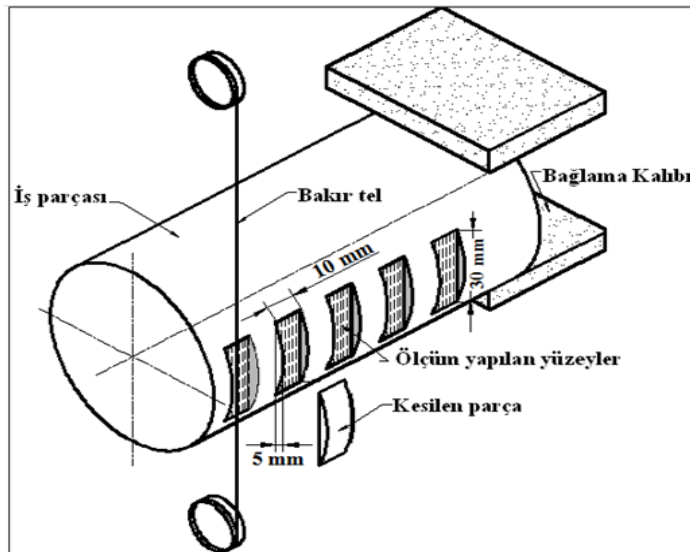
Şekil 1'de deneysel kurulumun şematik gösterimi, WEDM'de kesilen iş parçası ve kesim yüzeyleri görülmektedir. Kesme deneyleri 10 kW gücünde Charmilles Robofill 290P püskürtmeli tel erozyon tezgahında yapılmıştır. WEDM'de 0,25 mm çapında bakır tel ile kesilmiş parçaların yüzey pürüzlülükleri Time TR200 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçme boyu (cut off) 0,8 mm (ISO 4287'e göre) alınmıştır. Ölçümler öncesi cihaz referans (master) blok parça kullanılarak kalibre edilmiştir. Kontrol faktörlerinin Tablo 2'de belirtilen seviyelerinde kesilmiş her bir yüzeyin farklı üç bölgesinden  $R_a$  ölçümleri alınmış ve bu ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması ( $R_{a_{ort}}$ ) hesaplanmıştır.

### 2.2. Metot (Method)

Waspaloy'un WEDM'de kesilmesinde kesme parametrelerinin etkilerini ve en düşük  $R_a$  değerlerini verecek optimum kontrol faktörlerini belirlemek amacıyla Taguchi Metodu (TM) kullanılmıştır. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu istatistiksel metodun amacı ürünün kalitesini geliştirmektir [22]. Bu metot birçok endüstriyel uygulamada başarı ile uygulanmakta ve deney sayısını anlamlı bir şekilde azaltmaktadır [23]. TM şu adımlar takip edilerek uygulanmaktadır [24]:

1. Kontrol faktörleri tanımlanır.
2. Her bir kontrol faktörünün uygun seviyeleri ve yine uygun bir ortogonal bir dizi belirlenir.
3. Belirlenen ortogonal diziyeye göre deneyler yapılır.
4. Deneysel veriler analiz edilerek kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ve etkileri belirlenir.
5. Anlamlı etkileri tespit edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ile tahminsel optimal kalite karakteristiği belirlenir.
6. Doğrulama testleri yapılır ve güven aralığı hesaplanır.

TM'nin bu adımları sistematik bir şekilde takip edilerek çalışma gerçekleştirilmiştir. Nikel esaslı bir süperalaşım olan ve ticari kullanımı da giderek yaygınlaşan Waspaloy'un tel erozyonda kesilmesi üzerine literatürde yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Geleneksel talaş kaldırma yöntemleriyle işlemede de bu malzemenin işlenebilirlik oranı oldukça düşük tespit edilmiştir [19]. Farklı malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde WEDM işleminde açık devre gerilimi, vuruş süresi, akım vd. parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler olduğu görülmüştür. Literatürde önerilen değerler de göz önünde bulundurularak az sayıda gerçekleştirilen ön deneylerde özellikle açık devre geriliminin en etkili parametreler arasında yer aldığı



**Şekil 1.** Deneysel kurulumun şematik gösterimi, WEDM'de kesilen iş parçası ve kesim yüzeyleri  
(Schematic presentation of the experimental setup, workpiece cut on the WEDM and its cutting surfaces)

**Tablo 2.** Kontrol faktörlerinin seviyeleri (The levels of control factors)

Kontrol Faktörleri	Sembol	Birim	Seviyeler			Serbestlik Derecesi
			Seviye1	Seviye2	Seviye3	
Tel Gerginliği	<i>WT</i>	kg.f	1,0	1,4	-	1
Tel İlerleme Hızı	<i>S</i>	m/min	5,0	7,5	10,0	2
İlerleme Miktarı	<i>F</i>	mm/min	50,0	75,0	100,0	2
Dielektrik Sıvı Basıncı	<i>DF</i>	kg/cm <sup>2</sup>	2,0	3,0	4,0	2
<b>Sabit Faktörler</b>						
Akım miktarı	<i>I</i>	A	16,0			
Vurum süresi	<i>Pon</i>	µs	1,0			
İki vurum arası geçen süre	<i>Poff</i>	µs	5,0			
Açık Devre Gerilimi	<i>V</i>	V	40,0			

görülmüştür. Bu nedenle, etkisi belirlenmiş ve test edilmiş parametreler yerine Waspaloy süperalaşımının işlenebilirlik özellikleri de göz önünde tel gerginliği (*WT*), tel ilerleme hızı (*S*), ilerleme miktarı (*F*) ve dielektrik sıvı basıncı (*DF*) etkileri araştırılacak işleme parametreleri (kontrol faktörleri) olarak seçilmiştir. İş parçası malzemesi ve makine parametreleri de göz önünde bulundurularak kontrol faktörlerinin Tablo 2’de verilen uygun seviyeleri seçilmiştir. Bu tabloda görüldüğü üzere kontrol faktörlerinden tel gerginliği 2, diğerleri ise 3 seviyeye sahiptir ve kontrol faktörlerinin toplam serbestlik derecesi 7’dir. Deneyler sırasında akım miktarı  $I=16,0$  A, vurum süresi  $Pon=1,0\mu s$ , iki vurum arası geçen süre  $Poff=5,0\mu s$  ve açık devre gerilimi  $V=40,0$  V sabit faktörler olarak kabul edilmiştir (Tablo 2).

Optimal kesme parametrelerini ve bu kesme parametrelerinin etkilerini belirlemek amacıyla kontrol faktör grubunun toplam serbestlik derecesi de göz önünde bulundurularak en uygun ortogonal dizi seçilir [24]. Kontrol faktörleri ve seviyeleri  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$  ortogonal diziyi Tablo 3’te gösterildiği gibi atanmıştır. TM’de ortogonal diziler en az sayıda deneylerin yapılmasıyla deneysel çalışmaların verimli bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır [23]. Deneysel çalışmalar Tablo 3’te görülen kontrol faktörlerinin her bir kombinasyonu için yapılmış ve kesilen her yüzeyden üç adet yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmıştır. Waspaloy’un WEDM işlemi sonrası  $R_a$  değerlerinin en düşük olması istendiğinden bağımlı değişkenin kalite karakteristiği sinyal/gürültü oranları ( $S/N$ ) dB cinsinden “Daha küçük daha iyi” seçeneğine göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [24].

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

Eş. 1’de,  $n$  deney sayısı,  $y_i$  ise elde edilen  $i$ . veriyi ifade etmektedir. “Daha küçük daha iyi” kalite karakteristiğine göre hesaplanmış  $S/N$  oranları değerleri Tablo 4’te sunulmuştur. Her bir kontrol faktörünün seviyelerinin etkileri  $S/N$  oranları kullanılarak analiz edilmiştir. Bu etkiler deneysel ölçüm sonuçlarının ya da  $S/N$  oranları değerlerinin ortalamalarının toplamına göre hesaplanmıştır. Kontrol faktörünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki istatistiksel etkileri ANOVA ile belirlenmiştir. Bu analizde

her bir kontrol faktörünün yüzde katkısı kalite karakteristiği üzerinde kontrol faktörünün etkisini temsil etmektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma %95 güven seviyesinde değerlendirilmiştir. ANOVA tablosundan anlamlı etkileri tespit edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ile tahminsel optimal kalite karakteristiği (Tahminsel optimal  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü,  $R_{a,opt}$ ) belirlenmiştir. Doğrulama deneyleri kalite karakteristiğini belirlemek için güven aralığı ( $CI$ ) hesaplanmaktadır. Tahminsel optimal kalite karakteristiği  $R_{a,opt}$  için  $CI$  aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [22].

**Tablo 3.** L18 ortogonal dizi (L18 orthogonal array)

Deney No	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1,V_2} \cdot V_e \cdot \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r}\right)} \quad (2)$$

Eş. 2’de,  $F_{\alpha;1,V_2}$  anlamlı seviye  $\alpha$ ’nın F-oranı,  $\alpha$ : anlamlı seviye,  $V_2$ : birleştirilmiş hata varyansının serbestlik derecesi,  $V_e$ : birleştirilmiş hata varyansı,  $r$ : tekrar deneylerinin sayısı,  $n_{eff}$  geçerli ölçüm sonuçlarının sayısıdır. Geçerli ölçüm sonuçlarının sayısı ( $n_{eff}$ ) aşağıdaki gibi belirlenir.

$$n_{eff} = \frac{T_{den}}{1 + dof} \quad (3)$$

**Tablo 4.**  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü için deneysel çalışma, Taguchi Metodu ve ikinci dereceden tahminsel denklemin değerleri  
(Value of experimental study, Taguchi method and second order predictive equation for  $R_a$  surface roughness)

D.N.	Faktörlerin Deneysel Değerleri				Deneysel Değerler				Taguchi Metodu Tahminsel Değerleri				İkinci Dereceden Tahminsel Denklem Değerleri				
	$WT$ [kg.f]	$S$ [m/min]	$F$ [mm/min]	$DF$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$R_{a1}$ [µm]	$R_{a2}$ [µm]	$R_{a3}$ [µm]	$R_{a\text{ort}}$ [µm]	$R_{a\text{tah}}$ [µm]	$R_{a\text{ort}} - R_{a\text{tah}}$ [µm]	% E	S/N [dB]	S/N <sub>tah</sub> [dB]	$R_{a\text{tah}}$ [µm]	$R_{a\text{ort}} - R_{a\text{tah}}$ [µm]	% E	
1	1,0	5,0	50,0	2,0	4,080	4,187	3,890	4,052	3,906	0,146	3,615	-12,158	-11,869	3,913	0,139	3,418	
2	1,0	5,0	75,0	3,0	3,255	3,261	3,284	3,267	3,369	0,102	3,128	-10,282	-10,538	3,311	0,047	1,426	
3	1,0	5,0	100,0	4,0	3,171	3,411	3,249	3,277	3,171	0,106	3,244	-10,314	-10,014	3,368	0,096	2,945	
4	1,0	7,5	50,0	2,0	3,897	3,994	3,649	3,847	3,787	0,060	1,555	-11,708	-11,562	4,029	0,180	4,669	
5	1,0	7,5	75,0	3,0	3,194	3,232	3,163	3,196	3,251	0,055	1,716	-10,093	-10,230	3,154	0,042	1,327	
6	1,0	7,5	100,0	4,0	3,086	3,113	3,017	3,072	3,052	0,020	0,640	-9,749	-9,707	2,939	0,132	4,287	
7	1,0	10,0	50,0	3,0	3,605	3,843	3,255	3,568	3,254	0,314	8,814	-11,068	-10,178	3,481	0,090	2,508	
8	1,0	10,0	75,0	4,0	2,867	2,884	3,218	2,990	3,120	0,130	4,354	-9,525	-9,880	3,075	0,084	2,819	
9	1,0	10,0	100,0	2,0	2,587	2,816	3,127	2,843	3,202	0,359	12,634	-9,103	-10,022	2,842	0,011	0,387	
10	1,4	5,0	50,0	4,0	3,197	3,324	3,447	3,323	3,526	0,203	6,110	-10,434	-10,956	3,325	0,011	0,322	
11	1,4	5,0	75,0	2,0	3,380	3,685	3,348	3,471	3,673	0,202	5,825	-10,817	-11,324	3,523	0,051	1,461	
12	1,4	5,0	100,0	3,0	3,652	3,118	3,210	3,327	3,072	0,255	7,674	-10,462	-9,766	3,277	0,049	1,461	
13	1,4	7,5	50,0	3,0	2,930	3,224	3,007	3,054	3,367	0,313	10,245	-9,704	-10,525	3,094	0,041	1,333	
14	1,4	7,5	75,0	4,0	3,447	3,436	3,453	3,445	3,234	0,211	6,138	-10,745	-10,228	3,399	0,043	1,234	
15	1,4	7,5	100,0	2,0	3,478	3,563	3,136	3,392	3,316	0,076	2,254	-10,623	-10,370	3,391	0,008	0,224	
16	1,4	10,0	50,0	4,0	3,267	3,102	3,328	3,232	3,236	0,004	0,130	-10,194	-10,175	3,234	0,004	0,114	
17	1,4	10,0	75,0	2,0	3,834	3,688	3,462	3,661	3,383	0,278	7,583	-11,28	-10,543	3,568	0,101	2,762	
18	1,4	10,0	100,0	3,0	2,791	2,321	2,937	2,683	2,782	0,099	3,685	-8,614	-8,985	2,777	0,087	3,258	
								Ortalama:	3,317	3,317		4,964	-10,382	-10,382	3,316		1,997
								En Büyük:	4,052	3,906		12,634	-8,614	-8,985	4,027		4,669
								En Küçük:	2,683	2,782		0,130	-12,158	-11,869	2,770		0,114
$T_{R_{a\text{ort}}}$ : Ölçülmüş Tüm Yüzey Pürüzlülüklerinin Ortalaması: 3,317 µm																	
$T_{S/N}$ : Ölçülmüş Tüm Yüzey Pürüzlülüklerinin Ortalamasına ait S/N Oranı: -10,382 dB																	

Eş. 3'te,  $T_{den}$ : toplam deney sayısı,  $dof$ : tahmin için kullanılan faktörlerin toplam serbestlik derecesidir [22].

TM ile elde edilen tahminsel değerlerle kıyaslamak ve TM'nin tahmin yeteneğini belirlemek amacıyla lineer regresyon analizi ile ikinci dereceden tahminsel denklemler geliştirilmiştir. İkinci dereceden tahminsel denklem aşağıdaki gibi formülize edilebilir.

$$Y_2 = y - \varepsilon = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1x_1 + b_{22}x_2x_2 + b_{33}x_3x_3 + b_{44}x_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 \quad (4)$$

Eş. 4'te,  $Y_2$  ikinci dereceden denklemin yanıtı,  $y$  logaritmik ölçekte ölçülen yüzey pürüzlülüğü;  $x_0=1$  sabit değişken,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_3.x_4$  kontrol faktörleri tel gerginliği, tel ilerleme hızı, ilerleme miktarı ve dielektrik sıvı basıncının logaritmik dönüşümleri;  $\varepsilon$  deneysel hata;  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$  ise parametre katsayıları olup en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilecektir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLARIN TAGUCHİ METODU ANALİZİ (ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESULTS VIA TAGUCHI METHOD)

Waspaloyun WEDM'de kesilmesiyle oluşan yüzeylerin  $R_a$  ölçüm sonuçları Minitab 16.0 paket programında Taguchi Metodu kullanılarak çözümlenmiş ve analiz edilmiştir. Grafiklerin çiziminde ve kontrol faktörleri etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılacak olan çözümlene ve analiz çalışmalarıyla elde edilmiş sayısal sonuçlar ( $R_{a\text{ort}}, S/N$ ) Tablo 4'te verilmiştir. Waspaloyun WEDM ile

kesilmesinin incelendiği bu çalışmada  $R_a$  değerleri 2,683-4,052 µm aralığında ölçülmüştür (Tablo 4).

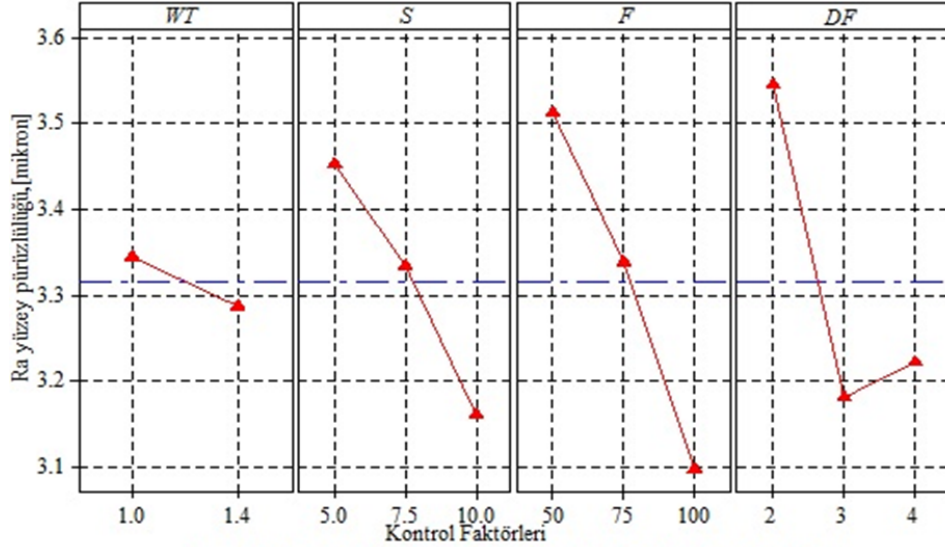
#### 3.1. Sinyal-Gürültü (S/N) Oranının Analizi (Analysis of the Signal-to-Noise (S/N) Ratio)

Yüzey pürüzlülüğü için S/N oranları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te görüldüğü üzere, seçilen ortogonal diziyeye göre WEDM parametrelerinin  $R_a$  yüzey pürüzlülüğüne farklı seviyelerde etkileri ayırt edilebilmektedir. Gerçekleştirilen 18 deney sonucundan ortalama yüzey pürüzlülük değeri 3,317 µm ve ortalama S/N oranı -10,382 dB hesaplanmıştır.  $R_a$  üzerinde her bir kontrol faktörünün etkilerinin analizi  $R_a$  yüzey pürüzlülük ortalamaları ve S/N oranı ortalamaları için yanıt tablosu ile belirlenmiştir (Tablo 5). Kontrol faktörleri ana etkilerinin analizi, seçilen şartlar altında Waspaloy'un WEDM'de kesilmesi hakkında önemli bilgiler vermiştir. Kontrol faktörlerinin her birinin farklı seviyelerinde elde edilen en yüksek ve en düşük  $R_a$  yüzey pürüzlülük ortalamaları ve yine S/N oranı ortalamaları arasındaki farkların daha yüksek ya da az olması yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkili faktörlerin belirlenmesinde kullanılmıştır (Tablo 5). Buna göre;  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü üzerinde kontrol faktörlerinin etki sırası ilerleme miktarı, tel gerginliği, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı basıncı şeklindedir.

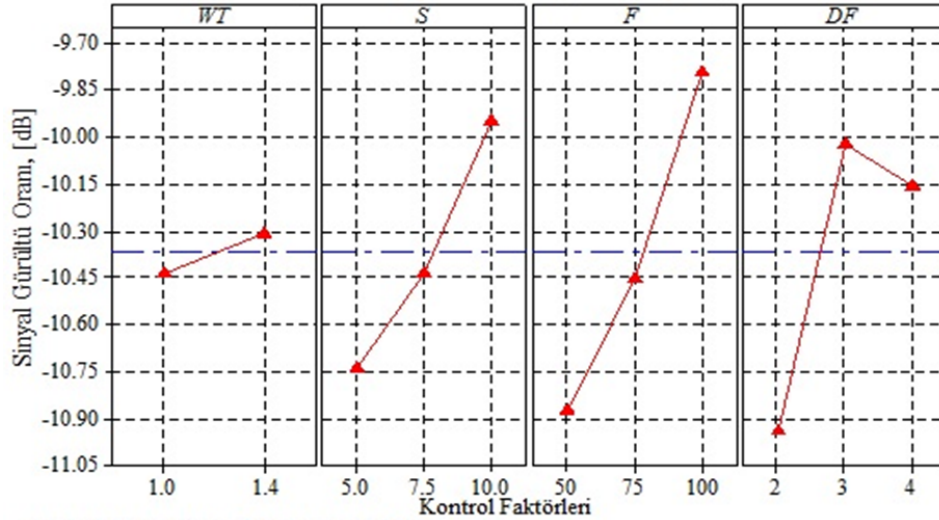
Waspaloy'un WEDM ile kesilmesinde  $R_{a\text{ort}}$  üzerinde kontrol faktörlerinin ana etkileri "Faktör Etkilerinin Grafikselsel Gösterimi" metodu kullanılarak gösterilmiş ve değerlendirilmiştir (Şekil 2) [23]. Şekil 2'de yer alan kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde elde edilen yüzey

pürüzlülüğü değerlerinin değişimi incelendiğinde Tablo 5’te tespit edilen kontrol faktörü etkileri sıralamasını (*F*, *DF*, *S* ve *WT*) destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Şekil 2’de görüleceği üzere, Waspaloy’un WEDM’de kesilmesinde tel gerginliği (*WT*) değerinin artmasıyla yüzey

pürüzlülüğü değerleri azalmıştır. Tel gerginliğinin artırılmasıyla telin titreşimi azaldığından işlenmiş parçaların yüzey kalitesi iyileşmiştir [10]. Açık devre gerilimi, vurum süreleri gibi kesme parametreleri ile kıyaslandığında tel ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü



a) Ortalama  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerleri için ana etki grafiği  
(Main effect graphs for average  $R_a$  surface roughness)



Sinyal Gürültü Oranı: Daha küçük daha iyi  
b) S/N oranı için ana etki grafiği (Main effect graph for S/N ratio)

Şekil 2. Ortalama  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerleri ve S/N oranları için ana etki grafikleri  
(Main effect graphs for average  $R_a$  surface roughness and S/N ratios)

Tablo 5.  $R_a$  yüzey pürüzlülük ortalamaları ve S/N oranı ortalamaları için yanıt tablosu  
(Response table for averages of  $R_a$  surface roughness and averages of S/N ratio).

Faktörler ve Seviyeleri	$R_a$ yüzey pürüzlülük ortalamaları, [ $\mu\text{m}$ ]				S/N Oranı Ortalamaları, [dB]			
	WT	S	F	DF	WT	S	F	DF
Seviye 1	3,346	3,453	3,513	3,544	-10,444	-10,744	-10,878	-10,948
Seviye 2	3,288	3,334	3,338	3,182	-10,319	-10,437	-10,457	-10,037
Seviye 3	-	3,163	3,099	3,223	-	-9,964	-9,811	-10,160
Fark	0,058	0,290	0,413	0,362	0,125	0,780	1,067	0,911
Sıralama	4	3	1	2	4	3	1	2

üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır [5]. Ancak, özellikle yüksek gerilim ve vurum sürelerinde, zaman zaman görülen tel kopmalarının yüksek tel hızlarında daha az görülmektedir. Çünkü, birim zamanda tel yüzeyine tekabül eden kıvılcım, tel boyuna daha geniş aralıkta yayılmaktadır. Dolayısıyla tel yüzeyinde oluşan kraterler birbiri üzerinde oluşmamakta bu da telin mukavemetinin düşmesini önlemektedir [25]. Şekil 2'de görüleceği üzere Waspaloy süperalaşımının tel erozyonda kesilmesinde de daha yüksek tel ilerleme hızlarında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir [12]. WEDM'de genelde yüksek ilerleme miktarı ve iyi bir yüzey pürüzlülüğü kalitesi arzu edilmektedir. Ancak, yüksek ilerleme miktarı ve iyi yüzey kalitesi birbiriyle uyuşmamaktadır. İlerleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü de bozulmaktadır. İşleme parametrelerinin uygun seviyelerinin seçilmesi ile yüksek ilerleme miktarı ve en düşük yüzey pürüzlülük değerlerini aynı anda elde etmek mümkün olabilmektedir [25]. Oldukça yüksek ilerleme miktarlarında kesme yapmak kesme sırasında telin geri çekilmesine ve kopmasına neden olabilmektedir. Bu durumda da işlenmiş yüzeyler bozulmaktadır. Bu nedenle, maksimum ilerleme miktarı talaş kaldırılma oranı ile uyumlu olması gerektiğinden sınırlı olmalıdır [11]. Bu çalışmada da, Şekil 2'de görüldüğü üzere; ilerleme miktarının artmasına bağlı olarak yüzey kalitesi bozulmadığından seçilen ilerleme miktarı değerlerinin Waspaloy süperalaşımının işlenmesi için uygun olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, WEDM'de yapılan deneylerde de, kesme sırasında telin geri çekilerek kopmamıştır. WEDM ile işlemede daha yüksek dielektrik sıvı basıncının tercih edilme sebepleri; tel elektrodun hızlı soğutulmasını, dolayısıyla tel kopmasının azaltılmasını ve ortamda ark tipi arzu edilmeyen vurumların oluşmasına sebep olabilecek işleme artıklarının daha kolay uzaklaştırılabilmesini sağlamaktır. Dielektrik sıvı basıncı artırıldığında ara bölgeden atıkların hızlı bir şekilde uzaklaştırılması ve kesme işleminin kararlılığı sağlanmaktadır. Dolayısıyla, ergiyik metalin yüzeyde katılaşım yapılaşması önlenmekte buna bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır [25]. Diğer taraftan dielektrik sıvı basıncının yüksek soğutma etkisi kesilen yüzeyde daha küçük ergimiş kraterlerin oluşumuna sebep olmaktadır [8]. Daha yüksek dielektrik sıvı basınçlarına çıkıldığında sıvının kesme ortamında akışı sırasında ortaya çıkan türbülans etkisi, iş parçası ile dielektrik arasındaki ısı transferini yavaşlatmakta, daha büyük kraterlerin ve dolayısıyla daha yüksek kesme hızlarının elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu durumda da yüzey pürüzlülük değerleri bir miktar

artmaktadır. Bu çalışmada da dielektrik sıvı basıncının 2 kg/cm<sup>2</sup>'den 3 kg/cm<sup>2</sup>'ye yükseltilmesiyle yüzey kalitesi anlamlı bir şekilde iyileşmiş iken püskürtme basıncının 4 kg/cm<sup>2</sup>'ye yükseltilmesiyle yüzey pürüzlülük değerleri bir miktar artmıştır (Şekil 2). Seçilen kesme şartları altında en düşük ortalama  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerini verecek kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri  $S/N$  hesabından ve yine Şekil 2 kullanılarak  $WT_2S_3F_3DF_2$  olarak tespit edilmiş ve Tablo 6'da sunulmuştur. Şekil 2 ve Tablo 6'da görüleceği üzere bu çalışmada, seçilen kontrol faktörlerinden; tel gerginliğinin ikinci seviyesi ( $WT=1,4$  kg.f), tel ilerleme hızının üçüncü seviyesi ( $S=10$  m/min), ilerleme miktarının üçüncü seviyesi ( $F=100$  mm/min) ve dielektrik sıvı basıncının ikinci seviyesinde ( $DF=3$  kg/cm<sup>2</sup>) en düşük  $R_{a_{ort}}$  değerleri elde edilmiştir. "Daha küçük daha iyi" kalite karakteristiği seçeneğine göre  $S/N$  denkleminde  $WT_2S_3F_3DF_2$  olarak tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri için tahminsel Taguchi Metodu sonuçları ise;  $R_{a_{tah}}=2,781$  µm,  $S/N=-8,98541$  dB olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 6.** Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri (Optimum levels of control factors)

Kontrol faktörleri	Sembol	Optimum Seviye	Optimum Değer
Tel gerginliği, kg.f	$WT$	2	1,4
Tel ilerleme hızı, m/min	$S$	3	100,0
İlerleme miktarı, mm/min	$F$	3	10,0
Dielektrik sıvı basıncı, kg/cm <sup>2</sup>	$DF$	2	3,0

### 3.2. Varyans Analizi (Analysis of Variance)

WEDM'de kesilmiş iş parçalarının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen kontrol faktörlerinin (tasarım parametrelerinin) % etki derecelerini araştırmak amacıyla Varyans Analizi uygulanmıştır. Her bir kontrol faktörünün varyans oranı değerleri ve % etkileri hesaplanmıştır. Tablo 7'de ortalama  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerleri için Varyans Analizi sonuçları sunulmuştur. Varyans tablosunda % 95 güvenilirlik seviyesinde ortalama  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili olan parametreler, Tablo 5 ve Şekil 2'deki sonuçları destekler şekilde sırasıyla;  $F$  (% 26,721),  $DF$  (% 24,339) ve  $S$  (% 13,170) olmuş iken  $WT$ 'nin (% 0,787) anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir.  $WT$ 'nin varyans oranı değeri (0,015) çok düşük hesaplanmıştır. Kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki bu ana etkileri ile farklı malzemelerin kesilmesinde elde edilen etkiler karşılaştırıldığında, 4340 çeliğinin WEDM ile

**Tablo 7.** Waspaloy'un WEDM'de kesilmesinde ortalama  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (Analysis of variance for average  $R_a$  surface roughness in the WEDM cutting of Waspaloy)

Kaynak	Serbestlik	Kareler	Kareler	Varyans	Faktör	% Etki
Tel gerginliği, $WT$	1	0,015	0,015	0,015	0,225	0,787
Tel ilerleme hızı, $S$	2	0,255	0,128	0,128	1,882	13,170
İlerleme miktarı, $F$	2	0,518	0,259	0,259	3,819	26,721
Dielektrik sıvı basıncı, $DF$	2	0,471	0,236	0,236	3,479	24,339
Artık hata	10	0,678	0,068	0,068		34,983
Toplam	17	1,937				100,000

kesilmesinde,  $R_a$  üzerinde en etkili kontrol faktörü  $S$  bulunmuştur [5]. 4140 çeliğinin kesilmesinde  $R_a$  üzerinde  $S$   $DF$ 'den çok az miktarda daha etkili olmuştur [8]. Alüminyum 24345'in kesilmesinde; kontrol faktörlerinin  $R_a$  üzerindeki etkileri sırasıyla;  $WT$  (% 9,13),  $DF$  (% 4,99) şeklinde olmuş iken  $S$  (% 0,96) ve  $F$ 'nin (% 0,66) anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir [11]. Farklı gruplardaki malzemelerin WEDM'de kesilebilirliği ve kesilen malzemelerin yüzey pürüzlülükleri üzerinde kesme parametrelerinin değerlendirilmesi için yapılmış çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, kesilen malzemelerin değişmesiyle kontrol faktörlerinin  $R_a$  üzerindeki pozitif ve negatif etkilerinin ve etki derecelerinin de değiştiği görülmektedir. Bu durum; kesilen malzemelerin farklı mikro yapı, fiziksel ve mekaniksel özelliklere sahip olmasına ve seçilen kontrol faktörleri aralığının değişkenliğine atfedilebilir.

### 3.3. Doğrulama Deneyleri (Confirmation Experiments)

TM'nin son adım olan doğrulama deneyleri kalite özelliklerini incelemek için yapılmaktadır. Doğrulama deneylerinde kullanılan model kontrol faktörleri tarafından oluşturulan toplam etki ile tanımlanmaktadır. Bu faktörler her faktörün etkisinin toplamına eşittir. Optimum seviyeler hata kayıpları göz önüne alınarak değerlendirilir [22]. Optimal tahminsel yüzey pürüzlülüğü  $R_{a,opt}$  Tablo 7'de verilen varyans analizinde etkili faktörlerin belirlenmesi (% Etki > % 5) ve yine Tablo 5'ten kontrol faktörlerinin optimum kombinasyonları  $WT_2S_3F_3DF_2$  dikkate alınarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$R_{a,opt} = T_{Ra_{ort}} + (S_3 - T_{Ra_{ort}}) + (F_3 - T_{Ra_{ort}}) + (DF_2 - T_{Ra_{ort}}) \quad (5)$$

Eş. 5'te; ölçülmüş tüm yüzey pürüzlülüklerinin ortalaması  $T_{Ra_{ort}}=3,317 \mu\text{m}$  ve etkili kontrol faktörlerinin optimum seviyelerindeki yüzey pürüzlülük değerleri  $S_3=3,163 \mu\text{m}$ ,  $F_3=3,099 \mu\text{m}$ ,  $DF_2=3,182 \mu\text{m}$  değerleri ile  $R_{a,opt}=2,81 \mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Tüm kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde  $R_{a,tah}=2,781 \mu\text{m}$  tahminsel en düşük yüzey pürüzlülük değeri hesaplanmış iken sadece etkili faktörlerin dikkate alınmasıyla optimal tahminsel yüzey pürüzlülüğü  $R_{a,opt}=2,81 \mu\text{m}$  hesaplanmıştır.

### 3.4. Güven Aralığının (CI) Hesaplanması (Calculation of Confidence Interval (CI))

Doğrulama deneyleri kalite karakteristiğini ( $R_a$ ) belirlemek için Güven Aralığı (CI) Eş. 2 ve Eş. 3 yardımı ile hesaplanmıştır. Eş. 2'de sayısal değerler yerine konulduğunda; tahminsel optimal değerler için güven aralığı  $CI=0,412 \mu\text{m}$  hesaplanmıştır.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,V_2} \cdot V_e \cdot \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} = \sqrt{5,39,0,068,0,463} = \sqrt{0,169} = 0,412$$

%95 güven seviyesinde yüzey pürüzlülüğü için doğrulama testlerinin  $2,81 \pm 0,412 \mu\text{m}$  ya da  $2,398 \mu\text{m} - 3,222 \mu\text{m}$

aralığında olması beklenmiştir. Kontrol faktörlerinin  $WT_2S_3F_3DF_2$  şeklinde belirlenen optimum seviyelerinin Tablo 4'teki 18 nolu deneyin parametre seviyeleri ile aynı olduğu görülmektedir. 18 nolu deneyin yapılmasıyla elde edilmiş yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalaması  $R_{a,ort}=2,683 \mu\text{m}$  olup bu çalışmada yapılmış tüm deneyler içerisinde elde edilmiş en düşük  $R_{a,ort}$  değeridir. Kontrol faktörlerinin optimum seviyesinde elde edilmiş bu değer güven aralığının hesaba katılmasıyla elde edilen üst sınır ve alt sınır yüzey pürüzlülük değerleri içerisinde ( $2,398 \mu\text{m} < 2,683 \mu\text{m} < 3,222 \mu\text{m}$ ) kalmaktadır. Bu nedenle, % 95 güven seviyesinde TM kullanılarak yüzey pürüzlülüğü için sistem optimizasyonu sağlanmıştır. Waspaloyun seçilen kesme şartları aralığında işlenmesinde  $3,317 \mu\text{m}$  ortalama değerinde  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir (Tablo 4). Ancak, bu çalışmada tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri ile  $2,398 \mu\text{m} < 2,683 \mu\text{m} < 3,222 \mu\text{m}$  sınırları arasında yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilerek yüzey pürüzlülüğü iyileştirilmiştir. Optimal tahminsel yüzey pürüzlülüğü  $R_{a,opt}=2,81 \mu\text{m}$  değeri ile kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde (18 nolu deney şartları) yapılan kesmede elde edilen ( $R_{a,ort}=2,683 \mu\text{m}$ ) ortalama yüzey pürüzlülük değerleri arasında % 4,73 fark elde edilmiştir.

### 3.5. Yüzey Pürüzlülüğü İçin Tahminsel Denklem (Predictive Equation for Surface Roughness)

Waspaloy süperalaşımının WEDM ile kesilmesinde  $R_{a,ort}$  üzerinde etkili olan temel kontrol faktörleri arasındaki korelasyon lineer regresyon analizi ile elde edilmiştir. Tahminsel yüzey pürüzlülük denklemi, Tablo 3'te verilen  $R_a$  yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarının ortalamasından ( $R_{a,ort}$ ); kontrol faktörleri, kontrol faktörleri etkileşimleri ile karelerinin etkilerini de içerecek şekilde geliştirilmiştir. Kontrol faktörlerinin ana etkilerinin ve karelerinin yanı sıra etkileşim etkilerini de içeren ikinci dereceden tahminsel denklem ise Eş.6'daki gibi elde edilmiştir.

$$R_{a,ort} = 9,61 - 3,90.WT + 0,209.S - 0,0268.F - 2,13.DF - 0,0017.S^2 - 0,000117.F^2 + 0,339.DF^2 + 0,076.WT.S + 0,0390.WT.F + 0,122.WT.DF - 0,0025.S.F - 0,0455.S.DF + 0,00256.F.DF \quad (6)$$

Eş. 6'daki ikinci dereceden bu tahminsel denklemin belirleme katsayısı ise  $R^2=0,936$  bulunmuştur. Belirleme katsayısı  $R^2$  1'e yakın olması sebebiyle ikinci dereceden denklemin tahmin yeteneğinin yüksek olduğu görülmektedir. İkinci dereceden denklemle elde edilmiş  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerleriyle ( $R_{a,tah}$ ) deneysel çalışmada elde edilen ortalama  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerleri ( $R_{a,ort}$ ), artıklar ( $R_{a,ort} - R_{a,tah}$ ) ve % hatalar Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 4'te ikinci dereceden tahminsel  $R_a$  yüzey pürüzlülük denklemi kullanılarak hesaplanmış yüzey pürüzlülük değerleri ile ölçülmüş yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki artıkların (farkların) yüksek olmadığı, % hatanın (% E) 18 deney için de %5'in altında kaldığı ve % hata ortalamasının ise 1,997 olarak hesaplandığı görülmektedir. Yine, TM kullanılarak "Daha küçük daha iyi" kalite karakteristiği seçeneğine göre  $S/N$  denkleminde  $WT_2S_3F_3DF_2$  olarak belirlenmiş kontrol faktörlerinin



optimal seviyeleri ikinci dereceden tahminsel denklemde yerine konulduğunda, tahminsel  $R_a$  yüzey pürüzlülük değeri;  $R_{a\_tah}=2,777 \mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Kontrol faktörlerinin optimal seviyelerinde (18 nolu deney) deneysel çalışma sonucu elde edilmiş  $R_a$  yüzey pürüzlülük değeri ( $R_{a\_ort}=2,683\mu\text{m}$ ) ile ikinci dereceden tahminsel denklem (18 nolu deney)  $R_a$  yüzey pürüzlülük sonucu ( $R_{a\_tah}=2,777 \mu\text{m}$ ) arasındaki fark %3,258 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4).

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Waspaloyun tel erozyon tezgâhında kesilmesinde, tel gerginliği, tel ilerleme hızı, ilerleme miktarı ve dielektrik sıvı basıncı kontrol faktörlerinin optimal seviyelerini belirlemek ve kesilmiş yüzeylerin  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılan bu deneysel çalışmada;

Kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü değerleri 2,683-4,052  $\mu\text{m}$  aralığında ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla ilerleme miktarı (%26,721), dielektrik sıvı basıncı (%24,339) ve tel ilerleme hızı (%13,170) olmuş iken tel gerginliğinin (%0,787) anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir. Seçilen kontrol faktörlerinden; tel gerginliğinin ikinci seviyesi ( $WT=1,4 \text{ kg.f}$ ), tel ilerleme hızının üçüncü seviyesi ( $S=10 \text{ m/min}$ ), ilerleme miktarının üçüncü seviyesi ( $F=100 \text{ mm/min}$ ) ve dielektrik sıvı basıncının ikinci seviyesi ( $DF=3 \text{ kg/cm}^2$ ) en düşük ortalama  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesini sağlayan kesme parametrelerinin optimum seviyeleri olarak belirlenmiştir. Tüm kontrol faktörleri değerlerinin artırılmasıyla  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerleri azalmıştır. Yani yüzey iyileşmiştir. Ancak, dielektrik sıvı basıncının;  $DF=3 \text{ kg/cm}^2$ 'nin üzerine çıkartılmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri artmaktadır. Tüm deneysel  $R_a$  değerleri ile Taguchi Metodu ile elde edilen tahminsel  $R_a$  değerleri arasındaki farklar (artıklar) % hata olarak değerlendirildiğinde, hata ortalaması %4,964 olarak belirlenmiştir. İkinci dereceden tahminsel denklemle elde edilen tahminsel  $R_a$  değerleri ile deneysel  $R_a$  değerleri ile arasındaki bu fark ise %1,997'dir. Bu nedenle, bu çalışmada ikinci dereceden tahminsel denklemlerin tahmin yeteneği daha yüksek bulunmuştur. Geliştirilen denklemin tahmin yeteneğinin yüksek çıkmasının sebebi kontrol faktörlerinin ana etkilerinin yanı sıra bu faktörlerin karelerinin ve etkileşimlerin etkilerinin de denklemi oluşturmasıdır.

#### 5. SİMGELER (SYMBOLS)

$b_0, b_1, \dots, b_{34}$  parametre katsayıları,-  
 $DF$  dielektrik sıvı basıncı,  $\text{kg/cm}^2$   
 $dof$  tahmin için kullanılan faktörlerin toplam serbestlik derecesi,-  
 $E$  yüzde hata,-  
 $F$  ilerleme miktarı,  $\text{mm/min}$   
 $F_{\alpha,1,V2}$  anlamlı seviye  $\alpha$ 'nın F oranı,-  
 $I$  akım miktarı, A

$n$  deney sayısı, adet  
 $n_{eff}$  geçerli ölçüm sonuçlarının sayısı, adet  
 $P_{off}$  iki vurum arası geçen süre,  $\mu\text{s}$   
 $P_{on}$  vurum süresi,  $\mu\text{s}$   
 $r$  tekrar deneylerinin sayısı, adet  
 $R^2$  belirleme katsayısı, -  
 $R_a$  ortalama yüzey pürüzlülüğü,  $\mu\text{m}$   
 $R_{a\_ort} - R_{a\_tah}$  artık,  $\mu\text{m}$   
 $R_{a\_ort}$  ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri aritmetik ortalaması,  $\mu\text{m}$   
 $R_{a\_tah}$  ikinci derece denklemle elde edilmiş  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerleri,  $\mu\text{m}$   
 $R_{a\_opt}$  tahminsel optimal  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü,  $\mu\text{m}$   
 $S$  tel ilerleme hızı,  $\text{m/min}$   
 $S/N$  sinyal/gürültü oranı, dB  
 $T_{den}$  toplam deney sayısı, adet  
 $V$  açık devre gerilimi, V  
 $v_2$  birleştirilmiş hata varyansının serbestlik derecesi,-  
 $V_e$  birleştirilmiş hata varyansı,-  
 $WT$  tel gerginliği,  $\text{kg.f}$   
 $x_0$  sabit değişken,-  
 $x_1, x_2, \dots, x_3, x_4$  kontrol faktörlerinin logaritmik dönüşümleri,-  
 $y$  logaritmik ölçekte ölçülen yüzey pürüzlülüğü,-  
 $y_i$  elde edilen i. veri, -

#### Yunan Harfleri (Greek Symbols)

$\varepsilon$  deneysel hata  
 $\alpha$  anlamlı seviye

#### Kısaltmalar (Abbreviations)

ANOVA varyans analizi  
HRC Rockwell C sertliği  
TM Taguchi metodu  
WEDM tel erozyon yöntemi ile işleme

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Erdem O., Çoğun C., Urtekin L., Özerkan H.B., Usulan İ., The effect of powder mixed and heated dielectric on drilling performance of electric discharge machining (EDM), Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 531-544, 2016.
2. Sarıkavak Y., Çoğun C., Thermal modelling of machining mechanism in electrical discharge machining, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (3), 517-531, 2010.
3. Gülcan O., Usulan İ., Usta Y., Çoğun C., Effect of use of Cu-Cr P/M electrodes on machining performance of electric discharge machining, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (3), 381-394, 2015.
4. Gökler M.İ., Ozanoğuz A.M., Experimental investigation of effects of cutting parameters on surface roughness in the WEDM process, Int. J. Mach. Tools. Manuf., 40 (13), 1831-1848, 2000.

5. Esme U., Sagbas A., Kahraman F., Prediction of surface roughness in wire electrical discharge machining using design of experiments and neural networks, *Iran J. Sci. Technol. B.*, 33 (B3), 231–240, 2009.
6. Han F., Jiang J., Yu D., Influence of machining parameters on surface roughness in finish cut of WEDM, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 34 (5), 538–546, 2007.
7. Özdemir N., Özek C., An investigation on machinability of nodular cast iron by WEDM, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 28, 869–872, 2006.
8. Tosun N., The effect of the cutting parameters on performance of WEDM, *KSME Int. J.*, 17 (6), 816–824, 2003.
9. Tosun N., Cogun C., Inan, A., The effect of cutting parameters on workpiece surface roughness in wire EDM, *Mach. Sci. Technol.*, 7 (2), 209–219, 2003.
10. Rao P.S., Ramji K., Satyanarayana B., Effect of WEDM conditions on surface roughness: A parametric optimization using Taguchi method”, *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, 6 (1), 41–48, 2011.
11. Huang J.T., Liao Y.S., Hsue W.J., Determination of finish-cutting operation number and machining-parameters setting in wire electrical discharge machining, *J. Mater. Process. Technol.*, 87 (1-2), 69–81, 1999.
12. Mahapatra S.S., Patnaik A., Optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process parameters using Taguchi method, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 34 (9), 911–925, 2007.
13. Rozenek M., Kozak J., Dobrovwki L., Lubkovwki K., Electrical discharge machining characteristic of metal matrix composites, *J. Mater. Process. Technol.*, 109 (3), 367-370, 2001.
14. Rebelo J.C., Dias A.M., Mesquita R., Vassalo P., Santos M., An experimental study on electro-discharge machining and polishing of high strength copper-beryllium alloys, *J. Mater. Process. Technol.*, 103 (3), 389-397, 2000.
15. Tosun N., Çoğun C., An investigation on wire wear in WEDM, *J. Mater. Process. Technol.*, 134 (3), 273–278, 2003.
16. Prohaszka J., Mamalis A.G., Vaxevanidis N.M., The effects of electrode material on machinability in wire electro-discharge machining, *J. Mater. Process. Technol.*, 69 (1-3), 233–237, 1997.
17. Aspinwall D.K., Soon S.L., Berrisford A.E., Walder G., Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 using minimum damage generator technology, *Cirp. Ann.-Manuf. Techn.*, 57 (1), 187–190, 2008.
18. Haşçalık A., Çaydaş U., Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel, *J. Mater. Process. Technol.*, 148 (3), 362–367, 2004.
19. Motorcu A.R., Nikel esaslı süperalaşımın ve titanyum alaşımlarının işlenebilirliği, II.Bölüm: Seramik kesici takımların performanslarının değerlendirilmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7 (2), 1-17, 2010.
20. High Temp Metals. Waspaloy Technical Data. <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempWaspaloydata.php#1>, Yayın Tarihi 2015. Erişim Tarihi Eylül 14, 2015.
21. Ezentaş R., The investigation of the machinability of Inconel 718 and Waspaloy super alloys in CNC milling machines, *Uludağ University Scientific Research Projects*, Project Number 2008/74, 2010.
22. Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiment*, Wiley, A.B.D. 2008.
23. Kuş A., Motorcu A.R., Ekici E., Wire electrical discharge machining of a hybrid composite: Evaluation of kerf width and surface roughness, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21 (1), 243-257, 2016.
24. Yurdakul, M., Güneş, S., İç, Y.T., Improvement of the surface quality in the honing process using Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 347-360, 2016.
25. Çaydaş U., Haşçalık A., CNC tel erozyon tezgahlarında farklı malzemelerin işlenebilirliğinin araştırılması, *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 6, 201-214, 2.