

CNC Tel Elektro Erozyon Tezgâhında Tel Elektrot Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Modellenmesi

Hüseyin Gürbüz

huseyin.gurbuz@batman.edu.tr

Batman Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Batman

Şehmus Baday

Batman Üniversitesi,
Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü,
Batman

İbrahim Hamarat

Şazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Ankara

*Bu çalışmada, geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden CNC tel elektro erozyon tezgâhında tel elektrot özelliklerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile modellenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü deneyleri tel elektrot çapı, tel malzemesi ve kaplama türü, soğutma yöntemi ve iki farklı tip iş parçası malzemesi göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri bağımlı değişken olarak seçilirken bağımsız değişken olarak tel elektrot kaplama türü, tel elektrot çapı, soğutma yöntemi ve iş parçası malzemesi olarak seçilmiştir. Bağımsız değişkenler her biri için iki seviye ve dört faktör belirlenerek L16 (2**4) ortogonal deney tasarım yöntemi seçilmiştir. Belirlenen ortogonal Taguchi tasarım yöntemi ile yüzey pürüzlülüğü üzerinde kontrol faktörlerini etkisi Sinyal/Gürültü (S/N) oranlarına göre tespit edilmiştir. Ayrıca kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ANOVA testi yapılarak ortaya konulmuştur. En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri kaplamasız tel elektrotlarla en düşük yüzey pürüzlülük değerleri ise Zn (çinko) kaplı tel elektrotlarla ortaya çıkmıştır. İş parçası türüne bağlı olarak, AISI D2 çeliğinin işlenmiş yüzeyinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri daha düşük olduğu tespit edilmiştir.*

Anahtar Kelimeler: CNC tel elektro erozyon, tel elektrot çapı, tel malzemesi, soğutma yöntemi, Taguchi deney tasarımı, ANOVA testi

1. GİRİŞ

Geleneksel ve geleneksel olmayan imalat operasyonlarında yüzey kalitesi ve ölçü tamlığı şartlarını yerine getirmek için doğru işleme parametrelerini ayarlamak oldukça önemlidir. Tel Elektro-Erozyon tezgâhları “Wire Electro Discharge Machining (WEDM)”, iletken malzemelerde ihtiyaç duyulan karmaşık şekilleri istenilen yüzey kalitesinde ve yüksek ölçü tamlığında üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Tel Elektro-Erozyon ile işlemede kullanılan tel elektrotun boyutları, malzemesi ve performansı farklılık gösterebilir. WEDM’de işleme parametrelerinden biri de tel elektrotun kendisidir ve karalı bir işleme süreci sağlamak için doğru tel elektrot seçimi çok önemlidir. Genellikle, tel elektrot çapları tel elektro-erozyon uygulamalarında 0.25-0.33 mm tercih edilirken [2-5], kaplama türü olarak çinko kaplı, tel elektrot malzemesi olarak ise pirinç tel elektrotlar [1-10] yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Saha ve Mondal, yüzey pürüzlülüğü üzerinde kaplamalı ve kaplamasız tel elektrotların etkisini belirlemek için

bir çalışma yürütmüşlerdir. Daha iyi soğutma özelliğine sahip çinko kaplamalı pirinç tel elektrotların kaplamasız tel elektrotlara göre daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri elde etmişlerdir [9]. Khan ve ark., tel elektrot çaplarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisini araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünün tel elektrot çapı artışına bağlı olarak kötüleştiğini tespit etmişlerdir [5]. Newton ve ark. Inconel 718 malzemesini çinko (Zn) kaplamalı bakır tel elektrot ile işlemiş ve işlenmiş yüzeyinin karakteristiğini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrelerden birinin de tel elektrot çapının olduğunu tespit etmişlerdir [8]. Kuriakose ve Shunmugam, İşlenmesi zor olan Ti6Al4V malzemesinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde kaplamalı tel elektrotların etkisini incelemek için bir çalışma yürütmüşlerdir. Yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde kaplamanın önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır [7]. Manjaiah ve ark., yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde farklı tip tel elektrotların etkilerini değerlendirmişlerdir. Çinko kaplı tel elektrotlarla elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin Pirinç tel elektrotlarla elde ettikleri

yüzeý pürüzlüklük değerlerinin daha düşük çıktığını bulmuşlardır [10]. Sharma ve ark., tel elektro erozyon ile Inconel 706 iř parçası malzemesinin işlenmesinde yüzeý pürüzlüklükü üzerinde tel elektrot çapının etkisini tespit etmişlerdir. tel elektrot çapının artışına bağlı olarak yüzeý pürüzlüklük değerlerinin arttığını tel elektrot çapını azalmasına bağlı olarak ise azaldığını bulmuşlardır [6]. Ayrıca literatürde WEDM ile işlemede yüzeý pürüzlüklükü etkileyen birçok parametrenin olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda yüzeý pürüzlüklükü üzerinde vuruş süresi (t_{on}), vuruş ara süresi (t_{off}), deşarj akımı (I), tel gerginliği (Wt), ilerleme oranı v.b. parametrelerin etkileri incelenmiştir [11-17].

Birçok araştırmacı tarafından araştırılan veya hedeflenen sonuçları ve bu sonuçlar neticesinde meydana gelen sapmaları doğru bir şeklide analiz etmek için kullanılan deney grubunu en etkili bir şekilde planlamak için deney tasarımı kullanılmaktadır. Tel elektro erozyon tezgahlarında kullanılan işleme parametrelerinin yüzeý pürüzlüklükü üzerindeki etkisini ortaya koymak için birçok araştırmacı tarafından Taguchi deney tasarım metodunu kullanmış ve bu çalışmalarla ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir. Pramanick ve ark., WEDM tezgahında, yüzeý pürüzlüklükü ve kesme hızı üzerinde işleme parametrelerinin optimizasyonu araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada giriş parametrelerine bağlı olarak kesme hızı ve yüzeý pürüzlüklük değerlerini tahmin etmek için deney tasarım yöntemi olan L32 ortogonal dizilimi kullanmışlardır. Deney tasarım yöntemi ile giriş parametrelerinin bağımlı değişken üzerindeki etkisini Sinyal/Gürültü oranı göre değerlendirmişlerdir. Makine parametreleri ve çıkış parametreleri arasındaki etkiyi görmek için regresyon analizi yapmışlardır [18]. Kumar ve ark., Taguchi yöntemiyle tel elektrotun aşınmasını optimize etmişlerdir. Giriř parametresi olarak akım, vuruş süresi ve vuruş ara süresi seçilerek tel elektrot aşınması tahmin etmişlerdir. Taguchi modelinde L9 ortogonal sıralama kullanarak sonuçları elde etmişlerdir. Giriř parametrelerinin tel elektrot aşınmasına etkisini Sinyal/Gürültü oranı göre belirlemişlerdir [19]. Selvakumar ve ark., WEDM tezgahında işleme parametrelerinin kesme hızı ve yüzeý pürüzlüklük üzerindeki etkisini optimize etmek için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Giriř parametrelerine bağlı olarak L9 ortogonal dizim seçilerek Sinyal/Gürültü oranları elde edilmişlerdir. Elde etmiş oldukları Sinyal/Gürültü oranlarına göre giriş parametrelerinin kesme hızı ve yüzeý pürüzlüklükü üzerinde etki sıralamasını ortaya koymuşlardır [20]. Sudhskara ve ark., çalışmalarında takım çeliğinin WEDM tezgahında işlenmesi sonucu iř parçalarının yüzeýlerinde oluşan yüzeý pürüzlüklük değerlerini Taguchi yöntemine uygulamışlardır.

Yüzeý pürüzlüklükü üzerine giriř faktörleri olarak vuruş süresi ve vuruş ara süresi, servo voltaj, maksimum akım, tel gerginlięi ve su basıncı ve her bir faktör için üç seviye belirleyerek Sinyal/Gürültü oranı göre faktörlerin etkinlięini belirlemiřlerdir. Ayrıca faktörlerin birbirleri ile olan iliřkilerini ve ANOVA testi yaparak da ortaya koymuřlardır [21]. Razak ve ark., çalıřmalarında iřleme parametrelerinin maksimum akım, voltaj vuruş süresi ve vuruş ara süresi yüzeý pürüzlüklükü üzerinde etkisini Taguchi yöntemi ile belirlemiřlerdir. Seçilen parametreler için üç seviye belirleyerek L9 ortogonal dizim ile Sinyal/Gürültü oranlarını belirlemiřlerdir. Sinyal/Gürültü oranlarına göre yüzeý pürüzlüklükü üzerinde vuruş süresi en büyük etkiye sahip olduęunu bulmuřlardır. Ayrıca Kahan ve ark., tarafından yapılan benzer bir çalıřmada faktörlerin yüzeý pürüzlüklükü üzerinde en büyük etkiye vuruş süresi olduęunu tespit etmiřlerdir [22]. Ugrasen ve ark., WEDM tezgahında iřleme parametrelerinin yüzeý pürüzlüklük üzerindeki etkilerini Taguchi L27 (3^{*4}) ortogonal deney tasarım yöntemi ile belirlemiřlerdir. Sinyal/Gürültü oranına göre parametrelerin yüzeý pürüzlüklük üzerindeki etkisini belirlemiřlerdir. Sonuç olarak yüzeý pürüzlüklükü üzerinde vuruş süresi en etkili parametre olduęunu bulmuřlardır [23]. Chandramouli ve ark., yapmıř oldukları çalıřmada WEDM tezgahında, iřleme parametrelerinin yüzeý pürüzlüklükü üzerindeki etkisini belirlemek için Taguchi metodu kullanmıřlardır. Dört faktörlü ve üç seviyeli L27 (3^{*4}) ortogonal deney tasarım yöntemini seçerek faktörlerin yüzeý pürüzlüklüküne etkisini ortaya koymuřlardır. Sinyal/Gürültü oranına göre vuruş süresi yüzeý pürüzlüklükü üzerinde en büyük etkiye sahip olduęunu bulmuřlardır [24]. Kumar ve ark., çalıřmalarında yüzeý pürüzlüklükü üzerinde iřleme parametrelerinin etkisini görmek için Taguchi L27 (3^{*4}) ortogonal deney tasarım yöntemini kullanmıřlardır. Sinyal/Gürültü oranına göre yüzeý pürüzlüklükü üzerinde boşalış akımı olduęunu bulmuřlardır [25]. Tonday ve ark. yüzeý pürüzlüklükü üzerinde faktörlerin etkisini belirlemek için Taguchi deney tasarımını kullanmıřlardır. Sinyal/Gürültü oranına göre kıvılcım voltajı yüzeý pürüzlüklükü üzerinde en etkili parametre olduęunu tespit etmiřlerdir [26]. Kollı ve ark., yüzeý pürüzlüklük deęerleri tahmin etmek için Taguchi L9 ortogonal deney tasarım yöntemini kullanmıřlardır. Gerçekleřtiren tasarım yöntemiyle Sinyal/Gürültü oranları belirlenmiř ve yüzeý pürüzlüklük üzerinde en etkili olan faktörü belirlemiřlerdir. Sonuç olarak en etkili parametrenin boşalış akımı olduęu bulmuřlardır [27]. Chakraborty ve ark., çalıřmalarında, L16 ortogonal dizilimi seçerek yüzeý pürüzlüklük deęerlerine etki eden parametreleri tespit etmek için Taguchi deney tasarım metodunu seçmiřlerdir. Sinyal/Gürültü oranına göre yüzeý

pürüzlülüğü üzerinde vuruş süresinin diğere parametrelere kıyasla daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir [28]. Tosun ve arkadaşları WEDM tezgâhında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini ANOVA' testi yaparak araştırmışlardır. ANOVA ve F-test analizlerine göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili parametrelerin açık devre gerilimi ve vuruş süresinin olduğunu bulmuşlardır [29].

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu yürütülen deneysel çalışmada, AISI D2 ve AISI 304 iş parçası malzemelerinin tel elektro erozyon tezgâhında hem daldırmalı hem de püskürtmeli soğutma yöntemiyle işlenmesinde tel elektrot çapına, kaplamalı ve kaplamasız durumlarına bağılı olarak yüzey pürüzlülük sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca taguchi metodu ve varyans analizi yöntemi kullanılarak tel elektrot kaplama türü, tel elektrot çapı, soğutma yönteminin etkilerini araştırmak ve optimum koşulları tespit edip buna bağılı olarak yüzey pürüzlülük değerlerini minimize etmektir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Tel Elektrotlar

Deneşlerde yüzey pürüzlülük değerleri üzerine tel elektrot çap farkının, kaplamalı ve kaplamasız tel elektrotların etkisini görmek için dört farklı tel elektrot kullanılmıştır. Tüm kesme deney şartlarında kullanılan tel elektrotlara ait çaplar ve fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

2.2. İş Parçası Malzemesi

Havacılık, ekstrüzyon kalıplar, medikal ve gıda gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılan AISI 304

paslanmaz çeliğı ve sac-metal kalıplarında tercih edilen AISI D2 soğuk iş takım çelikleri deneşlerde iş parçası malzemesi olarak kullanılmıştır. Her iki iş parçası için prizmatik 10x10x25 mm ölçümündeki kare parçalar 300x80x25 mm ebadındaki iş parçası malzemelerinden çıkarılmıştır. Yüzey pürüzlülük deneşlerinde kullanılan malzemelere ait kimyasal bileşimleri ve elektrik özdirençleri Tablo 2-3'te verilmiştir.

2.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı

Perthometer M1 model masa tipi yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmek için kullanılmıştır. Tel elektrotlarla işlenen iş parçası malzemeleri üzerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri her bir işlenmiş numunenin üç yüzeyinden üç ölçüm alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmış ve bu hesaplanan değerler ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri Ra (μm) olarak alınmıştır.

2.4. WEDM Tezgâhı Parametreleri ve Soğutma Yöntemi

Makino U32 tip Tel elektro Erozyon tezgâhında tel elektrot özelliklerine ve iş parçası malzemesine bağılı olarak kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneşlerde Püskürtmeli ve Daldırmalı (Sub Merged) olmak üzere iki farklı tip soğutma yöntemi kullanılmıştır. Kesme işlemlerinde kullanılan tezgâh parametreleri tezgâh üreticisinin önerdiği parametreler dikkate alınarak Tablo 4'te verilmiştir. WEDM parametreleri tüm deney şartlarında sabit tutulmuştur.

Tablo 1. Tel elektrotların fiziksel özellikleri

Tel Elektrotlar	Çekme Dayanımı, MPa	Kopma Yüğü, N	İletkenlik %
0,25 mm çaplı Pirinç	980	48.2 N	22
Zn Kaplı 0,25 mm çaplı Pirinç	883	43.3 N	20
0,30 mm çaplı Pirinç	980	69.3 N	22
Zn Kaplı 0,30 mm çaplı Pirinç	883	62.4 N	20

Tablo 2. AISI D2 çeliğın bileşenleri ve elektrik özdirenç

C%	Si%	Mn%	Cr%	Mo%	V%	Elektrik özdirenç (ρ) $\Omega \cdot \text{m} \cdot 10^{-9}$
1,55	0,3	0,4	11,8	0,8	0,8	650

Tablo 3. AISI 304 çeliğın bileşenleri ve elektrik özdirenç

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	N%	Ni%	Elektrik özdirenç (ρ) $\Omega \cdot \text{m} \cdot 10^{-9}$
0,07	1,00	2,00	0,045	0,030	17,5-19,5	0,11	8,0-10,5	710

3. TAGUCHI DENEY TASARIMI YÖNTEMİ

Tel elektrot kaplama tipi, soğutma tipi, malzeme tipi ve tel elektrot çapı faktörleri ve herbir faktör için belirlenen iki seviye için elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Oluşturulan deney tasarımı ve analiz için Minitab paket programı kullanılmıştır. Geleneksel olmayan tel elektrot ile işlemede kontrol faktörleri olarak kaplama tipi, soğutma tipi, malzeme tipi ve tel elektrot çapı faktörleri seçilmiş ve her bir faktör için iki seviye belirlenmiştir. Oluşturulan bu deney tasarımındaki kontrol faktörleri ve seviyeler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5'te verilen dört faktör ve her bir faktörün için iki seviye göz önünde bulundurulduğunda 2x4 toplam 16 adet deneyin yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Faktörleri sembolize eden seviyeler ve yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Geleneksel ve geleneksel olmayan imalatlarda iş parçalarından istenilen ilk gereksinim iş parçalarının istenilen tamlık ve toleranslarda elde edilmesi ve iş parçası yüzey kalitesinin en uygun değerlerde olması istenir.

Yüzey pürüzlülük değerinin düşük olması yüzey kalitesinin iyi olduğunun ifadesi olmuştur. Bundan dolayı elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçlarının değerlendirilmesi açısından yüzey

pürüzlülük değerlerinin en düşük seviyede kalması istenilmektedir. Bu istenen gereksinim için Sinyal/Gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında "en küçük en iyidir" formülü kullanılmıştır. Sinyal gürültü formül aşağıda bulunan Eşitlik 1'de gösterilmiştir.

$$S/N = -10 \times \log\left(\frac{\sum y^2}{n}\right) \quad (1)$$

Burada; : Performans karakteristik değeri (yüzey pürüzlülüğü), : değerlerinin sayısıdır.

Yüzey pürüzlülük değerlerine etki eden kaplama tipi, tel çapı, soğutma tipi ve malzeme cinsi olmak üzere dört faktör ve her bir faktör için iki seviye belirlenmiştir. Her bir seviye ve faktör için Sinyal/Gürültü oranlarını gösteren değerler Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'deki değerler incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde faktörlerin etkisi Delta değerinin büyüklüğü ile doğrudan ilgilidir. Yani Delta değerinin büyük olması Sinyal/Gürültü oranının bağımsız değişken üzerindeki etki sıralamasını göstermektedir. Ayrıca Delta değeri iki faktör arasındaki farkı göstermektedir. Bağımlı değişken olan yüzey pürüzlülüğü üzerinde faktörlerin etkisi sırasıyla kaplama tipi, malzeme tipi, soğutma tipi ve tel çapı şeklinde sıralandığı Tablo 7'de görülmektedir.

Tablo 4. Makina parametreleri

Deneylerde kullanılan işleme parametreleri	
Vurum süresi (On Time), µs	15
Vurum ara süresi (Off Time), µs	50
Akım (Current), Amp	39
Boşalım akımı (Ignition current) Amp	39
Volt Gerilim (Voltage), V	40
Su basıncı (Water Pressure), MPa	30-40
Tel Hızı (Wire Feed) m/dak	10

Tablo 5. Faktörler ve seviyeler

Faktörler	Seviyeler	
	1	2
Kaplama tipi	Kaplamasız (K1)	Kaplamalı (K2)
Soğutma tipi	Daldırmalı (C1)	Püskürtmeli (C2)
Malzeme tipi	AISI 304 (M1)	AISI D2 (M2)
Tel Çapı	0,25 mm (T1)	0,30 mm (T2)

Tablo 6. Faktörlerin sembolleri ve gerçek değerleri.

Deney No	Faktörler				
	Kaplama Tipi	Tel Çapı	Soğutma Tipi	Malzeme Tipi	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
1	K1	T1	C1	M1	3,93
2	K1	T1	C1	M2	3,69
3	K1	T1	C2	M1	3,85
4	K1	T1	C2	M2	3,76
5	K1	T2	C1	M1	3,88
6	K1	T2	C1	M2	3,79
7	K1	T2	C2	M1	3,92
8	K1	T2	C2	M2	3,71
9	K2	T1	C1	M1	3,44
10	K2	T1	C1	M2	3,13
11	K2	T1	C2	M1	3,57
12	K2	T1	C2	M2	3,49
13	K2	T2	C1	M1	3,54
14	K2	T2	C1	M2	3,22
15	K2	T2	C2	M1	3,53
16	K2	T2	C2	M2	3,49

Tablo 7. Her bir Seviye ve Faktörler için Sinyal/Gürültü oranları (En düşük en iyidir)

Seviye	Faktörler			
	Kaplama Tipi	Tel Çapı	Soğutma Tipi	Malzeme Tipi
1	-11,63	-11,12	-11,04	-11,37
2	-10,69	-11,19	-11,27	-10,95
Delta	0,94	0,07	0,23	0,42
Sıralama	1	4	3	2

Faktörlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkinliği gösteren grafikler Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'deki grafiğe bakıldığında, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiye sahip olan seviyeler arasındaki farkın mutlak değerce büyük olan kaplama tipi faktörünün olduğu görülmektedir. Benzer şekilde bağımlı değişken üzerinde faktörlerin ana etkisini gösteren grafik Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'deki grafik incelendiğinde, bağımsız değişken üzerinde en büyük etkiye kaplama tipi sahipken en düşük etkiye ise tel çapı olduğu görülmektedir.

Şekil 2'deki grafik incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülük değerleri çinko kaplı (K2) tel elektrotlarla elde edilirken en yüksek yüzey pürüzlülük değerleri ise kaplamasız (K1) tel elektrotla elde edilmiştir. Ortaya çıkan bu sonuç tel elektrotun kaplama özelliğine atfedilmiştir. Çinko kaplı tel elektrotların kaplama özelliğinin sahip

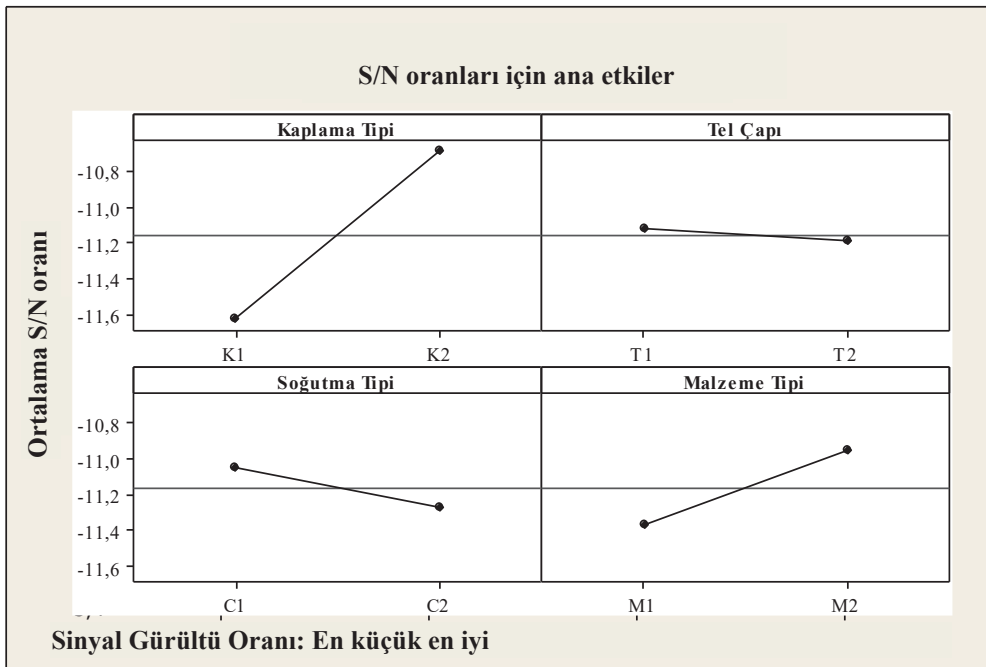
olduğu yüksek sıcaklıklarda mükemmel ısı dayanıklılığına, yüksek çekme gerilmesinden dolayı titreşim ve gerilim altında tel elektrotun daha düzgün bir şekilde sürdürebilirliğini sağlamasıyla daha iyi işlenmiş yüzeyler elde edilmiştir [7, 9]. Aynı zamanda çinko kaplamanın sağlamış olduğu daha iyi soğutma özelliğiyle ve boşalım kabiliyetini homojen bir şekilde sağlamasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesine yardımcı olmaktadır [9,10]. İş parçası türüne bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 2'deki grafik incelendiğinde en yüksek yüzey pürüzlülük değerleri AISI 304 (M2) paslanmaz çeliğinin işlenmiş yüzeyinden elde edilirken en düşük yüzey pürüzlülük değerleri ise AISI D2 (M1) çeliği işlenmiş yüzeyinde tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin bu şekilde elde edilmesi iş parçalarının elektrik iletkenlik öz dirençleri ile ilişkilendirilmiştir. AISI 304 iş parçası malzemesinin elektrik iletkenlik öz direnci

yüksek iken AISI D2 iş parçası malzemesinin elektrik öz direnci daha düşüktür. Elektrik öz direnç değeri bakımından AISI D2 çeliğinin AISI 304 çeliğinden daha düşük olması [Tablo 2-3] iş parçasının daha iyi işlenmesine ve iş parçasından geçen elektriğin daha iyi iletmesine yardımcı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesine katkı sağlamaktadır. Şekil 2'deki grafik soğutma yöntemlerine bağlı olarak incelendiğinde daldırmalı soğutma (C1) yöntemiyle elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin püskürtmeli soğutma (C2) yöntemiyle elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinden daha yüksek çıktığı görülmektedir. Ortaya çıkan bu eğilim daldırmalı soğutmanın püskürtmeli soğutmaya göre daha iyi soğutma etkisine bağlı olarak açıklanabilir. Daldırmalı soğutma yöntemiyle işleme sırasında iş parçası malzemesi ve tel elektrot tamamen suyun içinde olduğu için kesme bölgesinde daha iyi bir soğutmanın sağlanmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesine katkı sağlayacaktır. Tel elektrot çaplarına göre Şekil 2'deki grafik incelendiğinde tel elektrot çapı 0.25 mm'den (T1) 0.30 mm'ye (T2) arttığında yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmüştür.

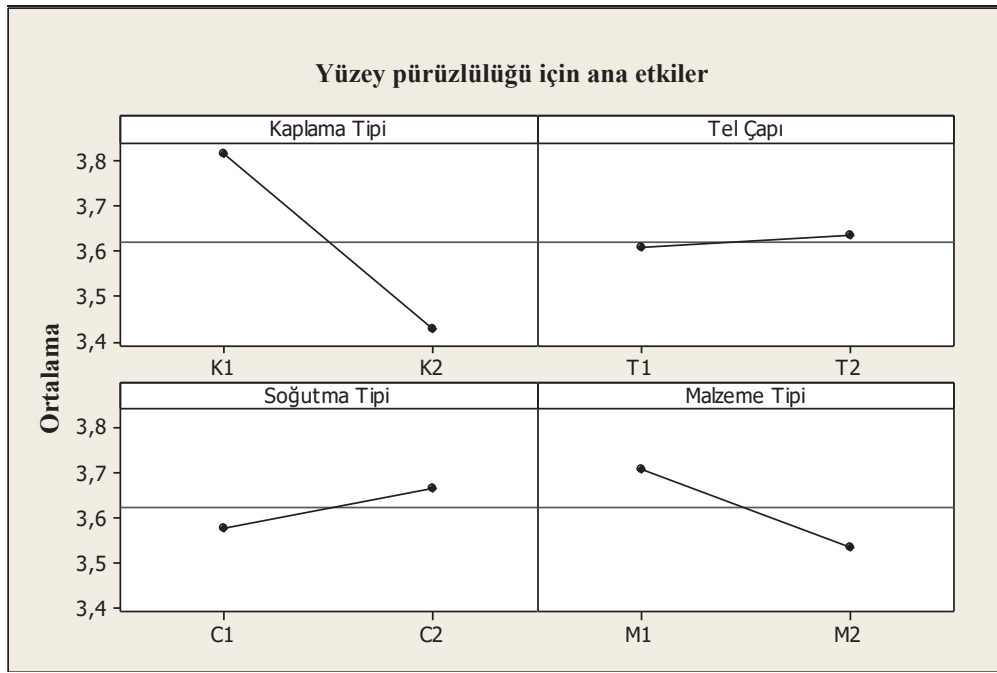
Literatürde, tel elektrot çapının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin artması beklenen bir durum olduğu ifade edilmiştir [6, 8, 30]. Büyük tel elektrot çapının düşük çapta ki tel elektrota oranla iletim hızı (transport speed) daha düşüktür. Buda kısmen tel elektrotun ilerlemesini ve işleme

bölgesinden sıçrayan erimiş metal miktarı önemli ölçüde azaltmasına yardımcı olacaktır. Bundan dolayı işlenmiş yüzeyde mikro deliklerin ve mikro küreciklerin oluşumuna yol açarak biraz daha yüksek yüzey pürüzlülük değerlerini çıkmasına sebep olacaktır [6, 8]. Ayrıca, büyük bir tel elektrot çapı küçük çaplı bir tel elektrota göre her bir kıvılcımın sebep olduğu ısıdan etkilenmiş bölgenin artmasına daha fazla katkı sağlayacağından yüzey pürüzlülük değerlerinde artacaktır [5]. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde faktörlerin etkisi gösteren bir diğer analiz ise Varyans analizidir (ANOVA: Analysis of Variance). Gerçekleştirilen Varyans analizinde güven aralığı %95 olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri için yapılan Varyans analizi sonuçlarını gösteren değerler Tablo 8'de verilmiştir.

Bağımsız değişkenlerin anlamlılık değerleri $P < 0,05$ aralığında olmalıdır. Tablo 8'de gösterilen soğutma tipi ve tel çapının "P" değerlerinden de anlaşılacağı gibi yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olmadıkları görülmektedir. Bunun ile birlikte toplam hataların karesi R^2 değeri %89,39 olarak hesaplanmıştır. Varyans analizi sonucunda elde edilen artık değerlerin grafiksel olarak gösterimi Şekil 3'de verilmiştir. Artık değerlerin lineer çizgi etrafında dağılımı oluşturması bu modelin tutarlılığını gösteren bir diğer grafiksel gösterimdir.



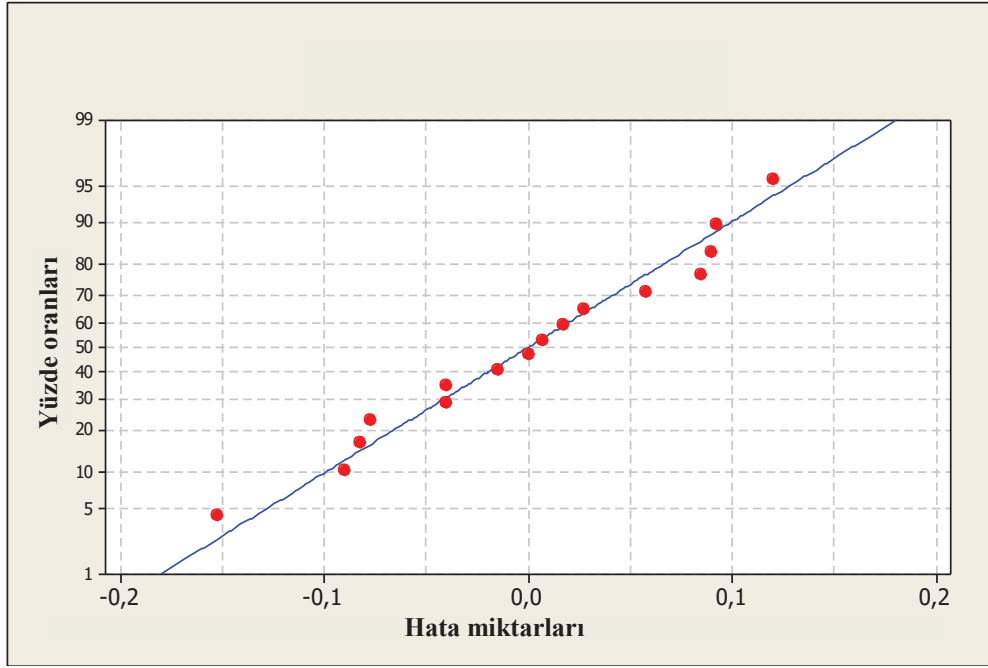
Şekil 1. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama Sinyal/Gürültü oranı grafikleri



Şekil 2. Faktörlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki ana etkisi

Tablo. 8 Varyans analizi

Kontrol Faktörleri	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Düzeltilmiş Kareler Toplamı (Adj SS)	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması (Adj MS)	F	P
Kaplama Tipi	1	0,608400	0,608400	0,608400	74,1130	0,000003
Tel Çapı	1	0,003025	0,003025	0,003025	0,3685	0,556149
Soğutma Tipi	1	0,030625	0,030625	0,030625	3,7306	0,079586
Malzeme Tipi	1	0,119025	0,119025	0,119025	14,4992	0,002904
Regresyon	4	0,761075	0,761075	0,190269	23,1778	0,000026
Hata	11	0,090300	0,090300	0,008209		
Toplam	15	0,851375				



Şekil 3. Varyans analizi sonucunda elde edilen artık değerler

4. SONUÇLAR

Tel elektro erozyon ile işlemede yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde tel elektrot kaplama türü, tel elektrot çapı, soğutma yönteminin etkilerini araştırmak ve optimum koşulları tespit edip buna bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri minimize etmek için Taguchi metodu ve Varyans analizi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Genel olarak tel elektrot çapı arttığında yüzey pürüzlülük değerlerinde artış görülmüştür.
- En düşük yüzey pürüzlülük değeri (3,13 μm) Zn (çinko) kaplı tel elektrotla elde edilirken en yüksek yüzey pürüzlülük değeri (3,93 μm) ise kaplamasız tel elektrotla elde edilmiştir.
- AISI D2 çeliğinin işlenmiş yüzeyinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri, AISI 304 paslanmaz çeliğinin işlenmiş yüzeyinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinden daha düşük çıkmıştır.
- ANOVA analizine göre yüzey pürüzlülük üzerinde tel elektrot malzemesi ve iş parçası malzemesi anlamlı iken tel elektrot çapı ve soğutma yöntemi anlamsız çıkmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğü değerlerini tahmin etmek için bulunan toplam hataların karesi, R^2 %89,39 olarak bulunmuştur.
- Sinyal/Gürültü oranlarına göre yüzey pürüzlülük üzerinde en etkili parametrenin tel elektrot kaplama tipi olduğu ortaya çıkmıştır.

MODELING THE EFFECT OF WIRE ELECTRODE PROPERTIES ON SURFACE ROUGHNESS IN CNC WIRE ELECTRO DISCHARGE MACHINING BY TAGUCHI METHOD

In this study, the effect of wire electrode properties on the surface roughness in CNC wire electro discharge machining which is one of non-traditional manufacturing methods was modeled by Taguchi experimental design method. Surface roughness tests were performed considering wire electrode diameter, wire material and coating type, cooling method and two different types of workpiece material. The surface roughness values obtained as a result of the experiments were selected as dependent variables, while the wire electrode coating type, wire electrode diameter, cooling method and workpiece material were selected as independent variables. The L16 (2**4) orthogonal test design method was chosen by determining two levels and four factors for each of the independent variables. With the determined orthogonal Taguchi design method, the effect of the control factors on the surface roughness was determined according to the Signal to Noise (S/N) ratios. In addition, the effect of control factors on the surface roughness was determined by performing ANOVA test. The highest surface roughness values emerged with uncoated wire electrodes while the lowest surface roughness values emerged with Zn (zinc) coated wire electrodes. Depending on the workpiece type, the surface roughness values obtained on the machining surface of the AISI D2 steel were found to be lower.

Anahtar Kelimeler: CNC wire electro discharge machining, Wire electrode diameter, Wire electrode material, Cooling method, Taguchi design method, ANOVA test.

5. KAYNAKÇA

1. Dabade, U.A., Karidkar, S.S., Analysis of response variables in WEDM of Inconel 718 using Taguchi technique, *Procedia CIRP*, 41 (2016), 886-891.
2. Klocke, F., Lung, D., Thomaidis, D., Antonoglou, G., Using ultra thin electrodes to produce micro-parts with wire-EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, 149 (2004), 579-584.
3. Prasad, N.B.V., ParameswaraRao, Ch.V.S., Sivanaga MalleswaraRao, S., Studies on Wire Selection for Machining with WEDM, *International Journal of Computer Science Trends and Technology*, 3 (2015) 3, 300-303.
4. Straka L., Corny I., Pitel, J., Properties Evaluation of Thin Microhardened Surface Layer of Tool Steel after Wire EDM, *Metals*, 6 (2016), 95, 1-16.
5. Khan, A.A., Ali, M.Bt.M., Shaffiar, N.Bt.M., Relationship of Surface Roughness with Current and Voltage During Wire EDM, *Journal of applied sciences*, 6 (2006) 10, 2317-2320.
6. Sharma, P., Chakradhar, D., Narendranath, S., Effect of wire diameter on surface integrity of wire electrical discharge machined Inconel 706 for gas turbine application, *Journal of Manufacturing Processes*, 24 (2016), 170-178.
7. Kuriakose, S., Shunmugam, M.S., Characteristics of wire-electro discharge machined Ti6Al4V surface, *Materials Letters*, 58 (2004), 2231-2237.
8. Newton, T.R., Melkote, S.N., Watkins, T.R., Trejo, R.M., Reister, L., Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718, *Materials Science and Engineering A*, 513–514 (2009), 208–215.
9. Saha, A., Mondal S.C., Multi-objective optimization in WEDM process of nanostructured hardfacing materials through hybrid techniques, *Measurement*, 94 (2016), 46-59.
10. Manjaiah, M., Narendranath, S., Basavarajappa, S., Gaitonde, V.N., Effect of electrode material in wire electro discharge machining characteristics of $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ shape memory alloy, *Precision Engineering*, 41(2015), 68-77.
11. Fard, K.R., Afza R.A., Teimouri, R., Experimental investigation, intelligent modeling and multi-characteristics optimization of dry WEDM process of Al–SiC metal matrix composite, *Journal of Manufacturing Processes*, 15 (2013), 483-494.
12. Sharma, P., Chakradhar, D., Narendranath, S., Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application, *Materials and Design*, 88 (2015), 558–566.
13. Soundararajan, R., Ramesh, A., Mohanraj, N., Parthasarathi N., An investigation of material removal rate and surface roughness of squeeze casted A413 alloy on WEDM by multi response optimization using RSM, *Journal of Alloys and Compounds*, 685 (2016), 533-545.
14. Alias, A., Abdulla. B., Abbasa, N.M., WEDM: Influence of Machine Feed Rate in Machining Titanium Ti-6Al-4V Using Brass Wire and Constant Current (4a), *Procedia Engineering*, 41 (2012), 1812-1817.
15. Liao, Y. S., Huang, J.T., Su, H.C. (1997), “A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 71, pp 487-493.
16. Rozenek, M., Kozak, J., Dańbrowski, L., ěubkowski K., Electrical discharge machining characteristics of metal matrix composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 109 (2001), 367-370.
17. Zhang, C., Effect of wire electrical discharge machining (WEDM) parameters on surface integrity of nanocomposite ceramics, *Ceramics International*, 40 (2014), 9657-9662.
18. Pramanick, A., Sarkar, S., Dey, P.P., Das, P.K., Optimization of wire electrical discharge machining parameters for cutting electrically conductive boron carbide, *Ceramics International*, 42 (2016), 15671-15678.
19. Kumar, U.A., Laxminarayana, P., Optimization of Electrode Tool Wear in micro holes machining by Die Sinker EDM using Taguchi Approach, *Materials Today:Proceedings*, 5 (2018), 1824-1831.
20. Selvakumar, G., Sornalatha, G. Sarkar, S. Mitra, S., Experimental investigation and multi-objective optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) of 5083 aluminum alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. of China*, 24 (2014), 373-379.
21. Sudhakara, D., Prasanthi, G., Application of Taguchi Method for Determining Optimum Surface Roughness in Wire Electric Discharge Machining of P/M Cold Worked Tool Steel (Vanadis-4E), *Procedia Engineering*, 97 (2014), 565-1576.
22. Razak, M.A., Abdul-Rani, A.M., Rao, T.V.V.L.N., Pedapati, S.R., Kamal, S., Electrical Discharge Machining on Biodegradable AZ31

- Magnesium Alloy using Taguchi method, *Procedia Engineering*, 48 (2016), 916-922.
23. Ugrasen, G., Ravindra, H.V., Prakash, G.V.N., Prasad, Y.N.T., Optimization of process parameters in wire EDM of HCHCr material using Taguchi's technique, *Materials Today: Proceedings*, 2 (2015), 2443-2452.
 24. Chandramouli, S., Eswaraiah, K., Optimization of EDM Process parameters in Machining of 17-4 PH Steel using Taguchi Method, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 2040-2047.
 25. Kumar, A., Mishra, H., Vivekananda, K., Maity, K.P., Multi-Objective Optimization of Wire Electrical Discharge Machining Process Parameters on Inconel 718, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 2137-2146.
 26. Tonday, H.R., Tigga, A.M., Evaluation of the Influence of Wire Electrical Discharge Machining Parameters on Material Removal Rate and Surface Characteristics in Cutting of Inconel 825, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 9865-9869.
 27. Kolli, M., Adepu, K., Effect of dielectric fluid with surfactant and graphite powder on Electrical Discharge Machining of titanium alloy using Taguchi Method, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18 (2015), 524-535.
 28. Chakraborty, S., Kar, S., Ghosh, S.K., Dey, V., Parametric optimization of electric discharge coating on Aluminium-6351 alloy with green compact silicon carbide and copper tool: A Taguchi coupled utility concept approach, *Surfaces and Interfaces*, 7 (2017), 47-57.
 29. Tosun, N., Coğun C., İnan A., The Effect of Cutting Parameters on Workpiece Surface Roughness in Wire EDM, *Machining Science and Technology*, 7/2 (2003), 209-219,
 30. Newton T.R., Investigation of the effect of process parameters on the formation of recast layer in wire-EDM of Inconel 718, (*Master's dissertation*), Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, 2008.