

Inconel 718'in tel erozyon ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çok kriterli optimizasyonu

Multi-Criteria optimization of surface roughness in wire EDM of Inconel 718 by Taguchi based gray relational analysis method

Meltem ALTIN KARATAŞ^{1*} 

¹Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Gerede Meslek Yüksekokulu, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu, Türkiye.
meltemaltin@ibu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 15.08.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 14.10.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.74501

Kabul Tarihi/Accepted: 22.10.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, Inconel 718 (IN718) süperalaşımının CNC tel erozyon tezgâhında işlenmesi sonucunda malzeme kesim yüzeyinde ölçülen Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü), Rq (kuadratik ortalama pürüzlülük) ve Rz (maksimum pürüzlülük) değerleri üzerinde işleme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. İşleme parametreleri; tel erozyon tezgâhı değişkenlerinden gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı basıncı olarak belirlenmiştir. Deneylerde dielektrik sıvı olarak saf su ve tel olarak ise 0.3 mm pirinç tel kullanılmıştır. Çalışmanın amacı; en düşük Ra, Rq ve Rz değerlerini elde edebilmek için kesme parametrelerinin optimum değerlerini belirlemektir. Tel erozyon tezgâhı ile kesme işleminde işleme parametrelerinin optimizasyonu için, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan Gri İlişkisel Analiz (GİA) uygulanmıştır. Deneyler ve kullanılan parametrelerin seviyeleri Taguchi L₉ (3³) ortogonal dizisine göre tasarlanmıştır. Varyans Analizi (ANOVA) kesme parametrelerinin etki yüzdelerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. En yüksek etkiye sahip olan parametre Ra için %79.18, Rq için %84.05, Rz için ise %89.25 oran ile gerilim olarak tespit edilmiştir. En düşük Ra, Rq ve Rz değerleri sırasıyla 0.123 µm, 0.178 µm ve 0.740 µm olarak elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Inconel 718, Tel erozyon, Yüzey pürüzlülüğü, Taguchi Metodu, Gri ilişkisel analiz.

Abstract

In this study, the effect of machining parameters on Ra (average surface roughness), Rq (quadratic average roughness) and Rz (maximum roughness) values were measured on the material cut surface as a result of machining Inconel 718 (IN718) superalloy on a CNC wire erosion machine were investigated. As the processing parameters; voltage, wire feed rate and dielectric fluid pressure were determined. In the experiments, pure water was used as the dielectric fluid and 0.3 mm brass wire was used as the wire. The aim of the study is to determine the optimum values of the cutting parameters in order to obtain the lowest Ra, Rq and Rz values. Gray Relational Analysis (GRA), which is one of the multi-criteria decision-making methods, has been applied for the optimization of the machining parameters in the cutting process with the wire erosion machine. The experiments and the levels of the parameters used were designed and optimized according to the Taguchi L₉ (3³) orthogonal array. Analysis of Variance (ANOVA) was used to determine the effect percentages of the cut-off parameters. The parameter with the highest effect was determined as voltage with a ratio of 79.18% for Ra, 84.05% for Rq, and 89.25% for Rz. The lowest Ra, Rq and Rz values were obtained as 0.123 µm, 0.178 µm and 0.740 µm, respectively.

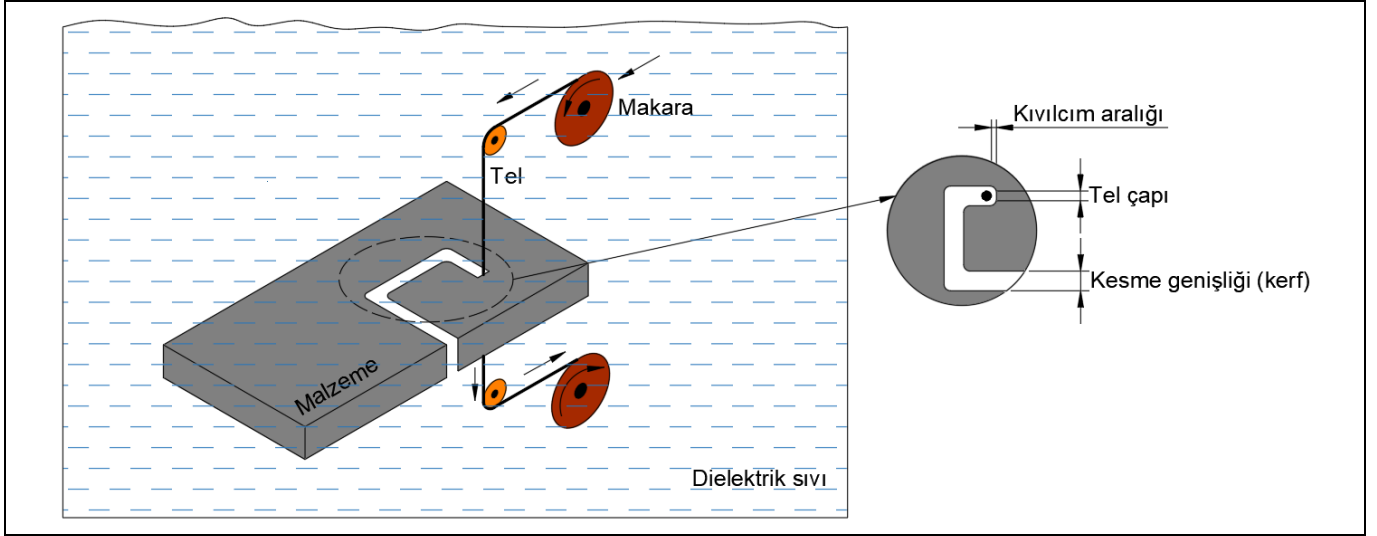
Keywords: Inconel 718, WEDM, Surface roughness, Taguchi method, Grey relational analysis.

1 Giriş

Son kırk yılda, nikel bazlı süperalaşımın hızlı bir gelişme yaşamış ve çeşitli alanlardaki uzmanlardan çok fazla ilgi görmüştür [1]. Bunlar arasında, ana elementleri Ni, Cr, Fe, Mo, Co, Nb olan tipik bir östenitik süperalaşım olan Inconel 718 (IN718); mükemmel mekanik özellikleri, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık koşullarında yüksek oksidasyon direnci nedeniyle uzay ve havacılık, gaz türbinlerinde yüksek basınçlı kompresör diskleri ve benzeri alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2]-[4]. IN718; 650 °C'ye kadar korozyon direnci göstermektedir [5]-[7]. Bununla birlikte; bu malzemelerin zayıf işlenebilirlik özellikleri ve işleme parametrelerinin kontrolünün zorluğu, geleneksel imalat yöntemlerinin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum da; parçanın boyutsal doğruluğunu etkileyen ciddi takım aşınmasına ve yüksek yüzey pürüzlülüğüne neden olmaktadır [1]. Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden biri olan tel erozyon ile işleme (TEİ); elektriksel, ısı, kimya gibi çeşitli konularla entegre edilmiş bir teknolojidir [8]. TEİ, bir tel elektrot ile iletken bir iş parçası arasındaki darbeli voltaj

farkının kıvılcım başlatmasıyla iş parçasını aşındıran geleneksel olmayan bir işleme sürecidir (Şekil 1), [9]. Tel erozyon ile kesme prensibinde; hareketli tel elektrot ile iş parçası arasında meydana gelen elektrik boşalması (kıvılcım) ile malzemeler işlenmektedir. Her kıvılcımın ısı, (iş parçasını eriterek ve buharlaştırarak) malzemenin küçük bir parçasını aşındırır ve aynı zamanda tel malzemesinin de bir kısmı aşınır [10]. Deiyonize sıvı ise; bu parçacıkları hem kesimden uzaklaştırmak hem de iş parçasında ısı oluşumunu engellemek için kullanılmaktadır. Soğutma işlemi uygulanmazsa; iş parçasında meydana gelecek termal genleşme, boyutunu ve doğruluğunu etkileyecektir. Malzemenin bu şekilde çıkarılması; iş parçası malzemesinin yüksek mukavemet, sertlik, tokluk vb. nedenlerle geleneksel takım tezgâhlarıyla işlenmesi zor olduğunda avantajlıdır [11]. Modern işleme endüstrilerinin en büyük mücadelesi; iş parçasının boyutsal doğruluğu, yüzey kalitesi, yüksek üretim hızı, kesici takımlarda daha az aşınma, maliyet tasarrufu açısından işleme ekonomisi ve iş parçasının boyutsal doğruluğu açısından yüksek kalitenin elde edilmesine odaklanmaktadır [12],[13].

*Yazışılan yazar/Corresponding author



Şekil 1. Tel erozyon ile kesme işleminin şematik görüntüsü.

Figure 1. Schematic view of wire electrical discharge machining process.

Ayrıca; nikel bazlı alaşımlar arasında IN718 en yaygın kullanılan alaşım olduğundan; yüzey bütünlüğü, artık gerilme ve işlenebilirlik yönünden de kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır [14]-[32]. TEİ'de çok fazla işleme parametresi olduğundan dolayı, optimum parametreleri belirlemek zordur. TEİ'de kesme işlemini etkileyen faktörler Şekil 2'de gösterilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü, işlenen parçaları yorulma mukavemeti, korozyon direnci, aşınma oranı ve tribolojik özellikler vb. bakımından etkilemekte olup, mekanik parça performansının önemli bir belirleyicisidir [33]. Genellikle Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından karakterize edilmektedir [34]. Yüzey pürüzlülüğü; malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyip malzeme yüzeylerini değerlendirmek için tribolojideki en önemli faktörlerden biri olduğundan dolayı, işleme operasyonunun kalitesini değerlendirmek için kullanılmaktadır [35],[36]. Pürüzlülük parametreleri arasında; Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü), Rq (kuadratik ortalama pürüzlülük) ve Rz (maksimum pürüzlülük) parametreleri, yüzey karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır [37]-[39]. Ra parametresi, yükseklik değişimlerinin çok iyi genel bir tanımını verir, ancak; herhangi bir dalgalanma bilgisi sağlamaz ve profildeki küçük değişikliklere duyarlı değildir [37],[39]. Ra değerleri Denklem 1'de verilen formül kullanılarak ölçülmektedir [34]. Rq parametresi, ana hattan sapmalara karşı Ra'ya göre daha hassastır ve yüzeyde mevcut olan tepeleri ve derinlikleri göstermektedir [37]-[39]. Rq değerleri Denklem 2'de verilen formül kullanılarak ölçülmektedir [34]. Rz parametresi ise; profildeki tepelerin maksimum yüksekliği ile profildeki derinliklerin en yüksek derinliğinin toplamına karşılık gelmektedir [38],[39]. Rz değerleri Denklem 3'te verilen formül kullanılarak ölçülmektedir [34]. Rz parametresi, pürüzlülüğü temsil etmeyen gözenekler ve çizikler gibi yüzey kusurlarını tespit ettiğinden, yüzey hakkında yanıtıcı bilgiler üretebilmektedir [38],[39].

$$Ra \text{ (Ortalama yüzey pürüzlülüğü)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (1)$$

Denklem 1'de " Y_i " sapma değerini, " n " toplam sapma sayısını göstermektedir [34].

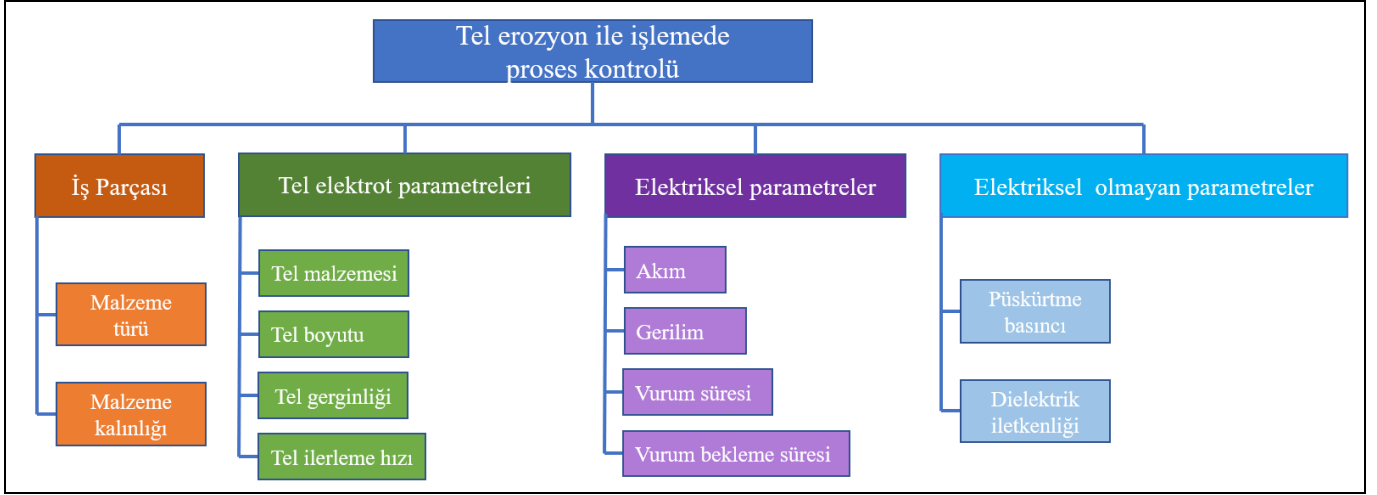
$$Rq \text{ (Kuadratik ortalama pürüzlülük)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2} \quad (2)$$

Denklem 2'de " Y_i " sapma değerini, " n " toplam sapma sayısını göstermektedir [34].

$$Rz \text{ (maksimum pürüzlülük)} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{Pi} - R_{Vi} \quad (3)$$

Denklem 3'te " R_{Pi} " en yüksek tepe değerini, " R_{Vi} " en düşük derinlik değerini göstermektedir [8],[12],[34],[40].

Thejasree ve diğ. IN718 süperalaşımının tel erozyon ile işlenmesinde Taguchi metodunu kullanarak tek kriterli optimizasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Vurum süresi, vurum bekleme süresi, akım gibi işleme parametrelerinin malzeme kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve aşırı kesim etkilerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda en önemli işleme parametresini vurum süresi olarak tespit etmişlerdir [41]. Kumar ve diğ. IN718 süperalaşımının kaplamalı ve kaplamasız pirinç tel kullanılarak tel erozyon ile işlenmesinde, proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve köşe hatası üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çinko kaplı pirinç telin yüzey pürüzlülüğü ve köşe hatası üzerinde kaplamasız pirinç tele göre daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir [42]. Marelli ve diğ. inconel, titanyum ve alüminyum alaşımlarının tel erozyon kullanılarak kesilmesi ile ilgili çalışmalarında optimum kesme parametreleriyle 1.626 μm ortalama yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir [43]. Marelli ve diğ. başka bir çalışmalarında süperalaşımların tel erozyon ile işlenmesinde optimum yüzey pürüzlülüğü değerini vurum süresinin %66.70 katkı oranıyla 0.16 μm olarak tespit etmişlerdir [44]. Kumar ve diğ. Inconel 825 süperalaşımının tel erozyon ile işlenmesinde giriş parametrelerinin optimum kombinasyonu ile ortalama yüzey pürüzlülüğünde 2.842 μm 'den 2.445 μm 'ye düşüş sağlamışlardır [45].



Şekil 2. Tel erozyon ile kesme işlemini etkileyen faktörler.

Figure 2. Factors affecting machining by wire electrical discharge.

Vani ve diğ. IN718 süperalaşımının iki farklı tel kullanılarak (0.25 mm yarı sert pirinç tel ve çinko kaplı pirinç tel) tel erozyon ile kesilmesinde işleme parametrelerinin kesme genişliği (kerf), malzeme kaldırma oranı (MRR/Material Removal Rate) ve Ra üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlardan, vurum süresi ve akımın artmasıyla kerf, MRR ve Ra'nın arttığını gözlemlemişlerdir [10]. Dhanunjaya ve diğ. aynı şekilde IN718 süperalaşımının iki farklı tel kullanılarak (yarı sert pirinç tel ve çinko kaplı pirinç tel) tel erozyon ile kesilmesinde işleme parametrelerinin kerf, MRR ve Ra üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda; minimum Ra için çinko kaplı pirinç telin kullanılabilirliği sonucuna varmışlardır [46]. Kumar ve Singh, IN718 süperalaşımının tel erozyon ile işlenmesinde pirinç tel kullanarak vurum süresi, açık devre gerilimi, tel gerilimi ve tel ilerleme hızı gibi işlem parametrelerinin malzeme kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Malzeme kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin vurum süresi olduğunu tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü için en uygun işleme parametrelerini ise; 0.25 µs vurum süresi, 50 V açık devre gerilimi, 1100 gr tel gerginliği ve 1 m/dk. tel ilerleme hızı olarak tespit etmişlerdir [47]. Abhilash ve Chakradhar, IN718 süperalaşımının tel erozyon ile işlenmesi sonucu elde edilen iş parçasının yüzey bütünlüğünü araştırmışlardır. Daha yüksek stabilitede işlenmiş numunelerin daha az stabil koşullarda işlenmiş numunelere kıyasla daha iyi yüzey bütünlüğüne sahip olduğunu, daha yüksek stabilitede işleme yapıldığında düzensizliklerin ve yüzey pürüzlülüğünün daha az olduğunu tespit etmişlerdir [48]. Abhilash ve Chakradhar'ın başka bir çalışmasında, Uyarlanabilir Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS/Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) metodu kullanılarak, ortalama boşluk voltajı değişimi (ΔV_m) ile tel kopmasının ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmacılar; yüksek ΔV_m 'de düşük ΔV_m 'ye göre daha yüksek tel aşınması gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde; yüksek ΔV_m tahminlerinde daha büyük yüzey hasarları ile birlikte daha yüksek Ra elde edildiğini belirtmişlerdir [49].

IN718, yüksek sıcaklıktaki ortamlarda, yüksek performanslı uçaklarda ve füze silah sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [50]. Bu malzeme, işleme anında mekanik

özelliklerini korumasından dolayı tercih edilmektedir. Ancak; geleneksel imalat yöntemlerini kullanarak bu malzemelerin işlenmesi çok zordur. Aynı zamanda; bu tür yüksek mukavemetli malzemelerin geleneksel imalat yöntemleri ile işlenmesi esnasında meydana gelen yüksek sıcaklıklar hem takım ömrünü olumsuz etkilemekte hem de elde edilen yüzey kalitesi düşük olmaktadır. Ayrıca, bu durum işleme maliyetinin artmasına da neden olmaktadır. TEİ; malzemenin sertliğinden bağımsız olarak (iş parçası ile elektrot arasında temas olmadığından dolayı) her türlü iletken malzemeye uygulanabilen geleneksel olmayan imalat yöntemi olup [50]; ultra sert, yüksek mukavemetli, sıcaklığa dayanıklı malzemelerin ve alaşımların işlenmesinde geleneksel imalat yöntemlerindeki kısıtlamaların üstesinden gelmek için etkili çözüm sunmaktadır [51]. TEİ'de en önemli çıkış parametrelerinden biri de yüzey pürüzlülüğü olup işlenen malzemenin yüzey pürüzlülüğü, işleme optimizasyon problemlerinde geniş çapta incelenmesi gereken hayati performans ölçütlerinden biridir [52]. IN718'in kesilmesinde işleme parametrelerinin doğru seçilmemesi nedeniyle yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilmekte ve bu durumda da ekstra bitirme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır [53]. Yüksek pürüzlülük değerleri de malzemenin yorulma direncini arttırmakta ve erken deformasyona neden olmaktadır [54],[55].

Bu çalışmada da amaç; savunma sanayisinde sıklıkla kullanılan ve işlenmesi zor malzemelerden biri olan IN718'in TEİ ile işlenmesinde hem minimum yüzey pürüzlülüğü elde ederek malzeme deformasyonunu en aza indirmek, hem de işleme sonrasında ekstra bir bitirme işlemine gerek kalmadan malzemeyi hassas bir biçimde kesmek için işleme parametrelerini optimize etmektir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için, üç boyutlu yüzey profili çıkaran optik profilometre cihazı kullanılmıştır. Üç boyutlu mikroskop, karmaşık ve hacimli hassas yüzey topografyası ölçümleri için hızlı ve ekonomiktir. Araştırmacılar genellikle, TEİ'de en etkili parametrelerden olan vurum süresi ve vurum bekleme süresini kullanarak optimizasyon yapmaya çalışmışlardır [9],[41],[56]. Gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı basıncını işleme parametresi olarak kullanan çalışmalar ise kısıtlıdır. Bu sebeple; farklı işleme parametrelerinin (gerilim, tel ilerleme

hızı ve dielektrik sıvı basıncı) etkisi araştırılarak Ra, Rq ve Rz değerlerinin minimum olanını belirleyebilmek için kesme parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. İşleme parametrelerinin optimizasyonu için, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan Taguchi tabanlı Gri İlişkisel Analiz (GİA) uygulanmıştır. Varyans analizi (ANOVA) kesme parametrelerinin etki yüzdelerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. IN718'in TE1 ile işlenmesi sonucunda çok kriterli GİA yöntemi kullanılarak mühendislik çalışmalarında büyük öneme sahip olan yüzey pürüzlülük karakteristiklerinden Ra, Rq ve Rz değerlerinin (parametrelerin tek başına kullanılması yanıltıcı olabileceği için) optimizasyonunun literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2 Malzeme ve metot

2.1 Malzeme

Bu deneysel çalışmada, 150x20x9 mm ölçülerinde IN718 süperalaşım malzeme iş parçası olarak kullanılmıştır. IN718 malzemenin, kimyasal bileşimi Tablo 1'de, mekanik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

2.2 Metot

IN718 süperalaşımının kesilmesinde 2008 model CNC kontrollü Mitsubishi FA20 tel erozyon tezgâhı kullanılmıştır

(Şekil 3). IN718 süperalaşıma üç farklı gerilim (46, 56 ve 66 V), üç farklı dielektrik sıvı basıncı (10, 12 ve 14 kg/cm²) ve üç farklı tel ilerleme hızında (8, 10 ve 12 m/dk.) kesme işlemi uygulanmış olup akım (Ip) değeri (10 A) sabit tutulmuştur. Deneylerde dielektrik sıvı olarak saf su ve tel olarak 0.3 mm pirinç tel kullanılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü, çoğunlukla referans düzlemine göre yüzeyin yüksekliğindeki değişimi ifade etmektedir [34]. Pürüzlülük, temas halinde veya optik olabilen bir profilometre ile ölçülebilmekte olup; bir profil (çizgi) veya bir yüzey (alan) üzerinde hesaplanabilmektedir [58]. Pürüzlülük parametreleri arasında, tüm profil değerlerinin toplamalarının aritmetik ortalaması olan Ra daha yaygındır [58]. Ancak; bu değer tek başına kullanılması (Ra değeri ortak olan farklı malzeme yüzeylerinin pürüzlülük değerleri farklı olabileceği için) yanıltıcı olabilmektedir. Üç boyutlu mikroskop standart yüzey pürüzlülüğü ölçümünden farklı olarak; Z derinlik ölçümü, üç boyutlu yüzey topografyası, pürüzlülük değeri ve adım yüksekliği ölçümlerini bir arada gerçekleştirebilen bir mikroskop olduğundan yüzey ile ilgili daha kapsamlı bilgiler elde edilebilmektedir [59].

Tablo 1. IN718 süperalaşımının kimyasal bileşimi (%) [57].

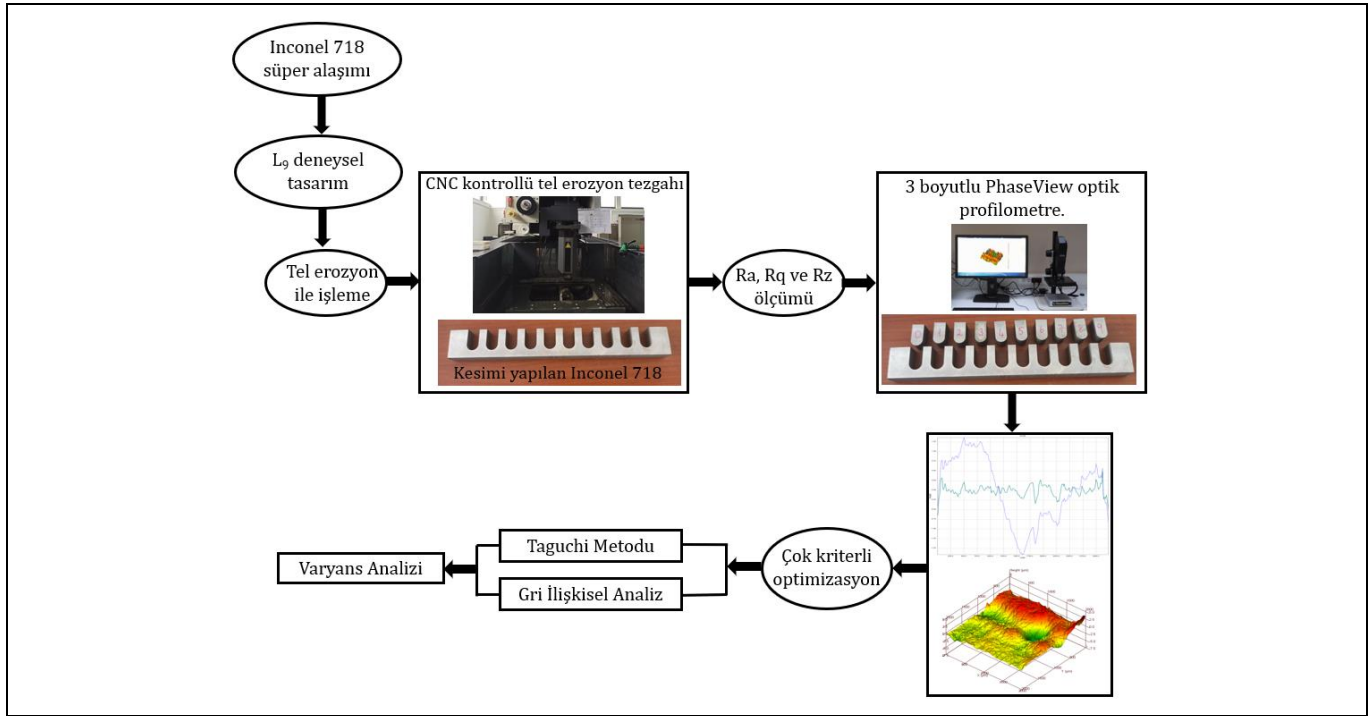
Table 1. Chemical composition (%) of IN718 superalloy [57].

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Mn	Si	C	Cu	P
51.34	17.89	5.04	3.14	0.99	0.57	0.18	0.16	0.046	0.031	0.011

Tablo 2. IN718 süperalaşımının bazı mekanik özellikleri [57].

Table 2. Some mechanical properties of IN718 superalloy [57].

Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1032	1072	0.14



Şekil 3. Deneysel, modelleme ve çok kriterli optimizasyon çalışmasının işlem basamakları.

Figure 3. Process steps of experimental, modeling, and multi-criteria optimization study.

Bu çalışmada; IN718 süperalaşımın tel erozyon ile kesilmesi sonucu, işlenen iş parçalarının farklı yüzey pürüzlülük parametrelerini (Ra, Rq ve Rz) ölçmek için üç boyutlu yüzey profili çıkaran PhaseView optik profilometre cihazı kullanılmıştır. Yüzey muayenesi ISO 4287 Standardına göre uygulanmıştır. Her kesim için; kesilen yüzey üzerinde 2500x2500 µm alandaki bölgelerden üç farklı yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmıştır. Üç farklı bölgeden elde edilen Ra, Rq ve Rz değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak her bir kesim için Ra, Rq ve Rz değerleri tespit edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3'te şematik olarak verilmiştir.

Tüm işleme parametrelerini girdi olarak kabul etmek zordur ve girdi parametrelerinin sayısı arttıkça yapılacak deneylerin sayısı da artacaktır [34]. Deney sayısını, maliyeti ve zamanı azaltmak için Denichi Taguchi, "ortogonal dizi" adı verilen bir tasarım oluşturmuştur. Ortogonal dizi, en az sayıda deneyle tüm parametrik alanı kapsamakta ve daha iyi çıktı elde etmek için optimum koşulları bulmak için kullanılmaktadır [60]-[62]. Deneylerde; gerilim (VG), dielektrik sıvı basıncı (LQ) ve tel ilerleme hızı (WS) tel erozyon ile işlemede kontrol faktörü olarak seçilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. IN718 süperalaşımın kesilmesinde kullanılan kontrol faktörleri ve bunların seviyeleri.

Table 3. Control factors used for machining IN718 superalloy and their levels.

Sembol	Kontrol faktörleri	Seviyeler
VG	Gerilim (V)	46, 56, 66
LQ	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	10, 12, 14
WS	Tel ilerleme hızı (m/dk.)	8, 10, 12

TEİ değişkenlerinden "VG", iş parçası ile elektrot arasındaki işleme durumuna bağlı olarak değişmektedir. Bu parametrenin daha büyük değerleri, daha büyük elektrik deşarj enerjilerine yol açmakta ve VG arttıkça tepe akımı da artmaktadır [58]. Elektrik deşarjını stabilize etmek, verimli soğutma ve talaş kaldırma gerçekleştirmek için dielektrik sıvı gerekmektedir. "LQ"; TEİ tezgâhlarında farklı birimlerde (bar, kg/cm² vb.) kullanılmakta olup, özellikle ısı iletkenliği düşük iş parçaları için yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilemektedir [58]. "WS", dakika başına metre cinsinden ölçülmekte ve büyük ölçüde tel tipine bağlı olmaktadır. Tel hızının artmasıyla tel tüketimi artmakta ve bunun sonucunda işleme maliyeti de artmaktadır. Düşük tel hızlarında ise; tel aşınma oranı önemli ölçüde artmakta ve özellikle kaba işlemede tel kırılmasına neden olabilmektedir [58].

Optimize edilecek kalite karakteristiği olarak Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülük değerleri alınmıştır. Kesme parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemek ve belirlenen kesme parametrelerinin Ra, Rq ve Rz pürüzlülük değerlerine etkisini analiz etmek için Taguchi Metodu kullanılmış ve en uygun ortogonal dizi olan L₉ (3³) seçilmiştir (Tablo 4).

Bu çalışmada; Taguchi metodunda kullanılan kalite tanımlarından ("nominal en iyidir", "daha küçük daha iyidir" ve "daha büyük daha iyidir") [63] Ra, Rq ve Rz pürüzlülük değerleri için minimum değer alınmış olup daha iyi ürün kalitesi ve en düşük maliyet için en uygun olan S/N oranını hesaplamak için "daha küçük daha iyidir" seçilmiştir (Denklem 4) [64]. Bu analiz için Minitab 19 paket programı kullanılmıştır. Ayrıca; Varyans Analizi (ANOVA), IN718 süperalaşımının tel erozyon ile kesilmesinde işleme parametrelerinin etki

derecelerini belirlemek için P 0.05 anlamlılık seviyesi ve %95 güvenirlilik seviyesinde uygulanmıştır [65].

Tablo 4. Taguchi L₉ (3³) ortogonal dizisi.

Table 4. Taguchi L₉ (3³) orthogonal array.

Deney No	Kesme Parametreleri ve Seviyeleri		
	VG (V)	LQ (kg/cm ²)	WS (m/dk.)
	Gerilim	Dielektrik Sıvı Basıncı	Tel İlerleme Hızı
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Daha küçük (düşük)daha iyidir :

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi^2 \right] \quad (4)$$

Denklem 4'te; "yi" işleme parametrelerinin sonuçları, "n" tekrar sayısıdır.

Optimizasyon işlemi ile tahmin edilen optimum ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra_{opt}), kuadratik ortalama pürüzlülük (Rq_{opt}) ve maksimum pürüzlülük (Rz_{opt}) faktörleri belirlenmiştir. Doğrulama deneyleri için Güven Aralığı (CI), Denklem 5 kullanılarak hesaplanmıştır [66],[67].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1,V2} \cdot V_e \cdot \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (5)$$

Denklem 5'te;

α = Anlamlı seviye

$F_{\alpha;1,V2}$ = α 'nın F-oranı

$V2$ = 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}) da Denklem 6 ile hesaplanmıştır.

$$n_{eff} = \frac{T_{exp}}{1 + dof} \quad (6)$$

Denklem 6'da; T_{exp} =toplam deney sayısı; dof=tahmin için kullanılan faktörlerin toplam serbestlik derecesidir.

Taguchi metodunda yalnızca tek bir çıktı parametresi optimize edilebilir ve çıktı parametre sayısı birden fazlaysa çok kriterli optimizasyon yapılamaz. Bu nedenle, çok kriterli optimizasyon problemlerini çözmek için Taguchi tabanlı Gri İlişkisel Analiz (GİA) uygulanmıştır [34]. Taguchi tabanlı GİA yöntemi ise; belirsizliğin söz konusu olduğu durumlarda farklı kriterleri dikkate alarak faktörler arasındaki ilişkinin derecesini değerlendirmek için kullanılmaktadır [68]. GİA'da öncelikle farklı birimlere sahip olan veriler aynı birime dönüştürülerek

(0 ile 1 arasında) normalleştirilir. Bu normalizasyon işleminde hangi ölçütün ("daha yüksek daha iyi", "daha düşük daha iyi" veya "nominal en iyi") kullanılacağını doğru belirlemek önemlidir. Bu çalışmada Ra, Rq ve Rz için Denklem 7'de verilen "daha düşük daha iyi" karakteristiği kullanılarak normalizasyon yapılmıştır.

Daha düşük (küçük)daha iyidir:

$$x_i(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (7)$$

Denklem 7'de;

$x_i(k)$ = i serisinin k aralığındaki normalleştirilmiş değer

$\max x_i(k)$ = i serisindeki maksimum değer

$\min x_i(k)$ = i serisindeki minimum değerdir.

Normalizasyon işleminden sonra elde edilen verilerle Gri İlişkisel Katsayı (GİK) ($\xi_i(k)$) belirlenir (Denklem 8) [68].

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (8)$$

Denklem 8'de;

Δ_{oi} = referans dizinin sapma değeri

Δ_{\min} = mutlak farklılıkların minimum değeri

Δ_{\max} = mutlak farklılıkların maksimum değeri

ξ = tanımlama katsayısı olup 0 ile 1 aralığındadır. Bu değer genellikle 0.5 alınmaktadır [69].

Gri ilişkisel katsayı değerinin bulunmasından sonra, Gri İlişkisel Derece (GİD) hesaplanır (Denklem 9) [68].

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (9)$$

Denklem 9'da;

γ_i = i serisinin gri ilişkisel derece değeri

n = tepki karakteristiğinin sayısıdır.

Son olarak; optimum işleme parametreleri belirlenir.

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmanın amacı; IN718 süperalaşımının CNC kontrollü tel erozyon tezgahında işlenmesi sonucunda en düşük Ra, Rq ve Rz değerlerini elde edebilmek için kontrol faktörlerinin optimum

seviyelerini belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için deney tasarımında Taguchi metodu kullanılmış olup $L_9(3^3)$ ortogonal dizi deseni seçilmiştir.

3.1 Deneysel sonuçlar ve Taguchi optimizasyonu

Taguchi metoduna göre analiz yapmak için; Ra, Rq ve Rz ölçüm sonuçlarının aritmetik değerlerinin ortalaması, "daha küçük daha iyidir" yaklaşımına göre Sinyal/Gürültü (S/N) oranına dönüştürülmüştür. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri temsil ederken, gürültü faktörü ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil etmektedir [68]. Yapılan kesme işlemi sonrası elde edilen Ra, Rq ve Rz pürüzlülük değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Deneysel çalışmada, ortalama Ra değeri 0.216 μm , ortalama Rq değeri için ortalama S/N oranı 13.696 dB olarak elde edilmiştir. Ortalama Rq değeri 0.258 μm ve ortalama Rz değeri için ortalama S/N oranı da 11.969 dB olarak tespit edilmiştir. Ortalama Rz değeri 0.965 μm ve ortalama Rz değeri için ortalama S/N oranı da 0.410 dB olarak belirlenmiştir. Bazı araştırmacılar optimum kesme parametreleriyle Ra=1.626 μm yüzey pürüzlülüğü elde ederken [43], bazıları da optimum yüzey pürüzlülük değerini Ra=0.160 μm olarak tespit etmişlerdir [44]. Kumar ve diğ. optimum işleme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğünde 2.842 μm 'den 2.445 μm 'ye düşüş sağlamışlardır [45].

Her bir kontrol faktörünün (VG, LQ ve WS) Ra, Rq ve Rz değerine etkisi, S/N oranı tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiştir (Tablo 6, 7). Optimum seviyeler, ortogonal dizide oluşturulan kontrol faktörlerinin tüm kombinasyonlarından elde edilen farklı seviyeler değerlendirilerek bulunmuştur [71]. Kontrol faktörlerinin ve seviyelerinin Ra, Rq ve Rz değerine etkisi Şekil 4'te verilmiştir. Ra ve Rq değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri, $VG_1LQ_3WS_1$ olarak elde edilmiştir. Rz değeri için ise; $VG_1LQ_1WS_1$ olarak belirlenmiştir. Ra ve Rq değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri; düşük gerilim, yüksek su basıncı ve düşük tel ilerleme hızında elde edilirken; Rz'nin kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri; düşük gerilim, düşük su basıncı ve düşük tel ilerleme hızında tespit edilmiştir.

Kuriachen ve diğ. minimum yüzey pürüzlülüğünü, düşük vuruş süresinde (20 μs) ve yüksek dielektrik sıvı basıncı değerinde (15 kgf/cm^2) elde etmişlerdir [72]. Ra değerinin belirlenmesinde ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçülse de tepe ve çukur değerler ölçülmez. Bu da farklı profillerdeki malzeme yüzeylerinin aynı Ra değerine sahip olabileceğini göstermektedir [73].

Tablo 5. Taguchi $L_9(3^3)$ ortogonal dizinine göre elde edilen deneysel sonuçlar ve S/N oranları.

Table 5. Experimental results and S/N ratios obtained according to Taguchi $L_9(3^3)$ orthogonal array.

Deney No	VG (V)	LQ (kg/cm^2)	WS (m/dk.)	Ra (μm)	S/N Ra (dB)	Rq (μm)	S/N Rq (dB)	Rz (μm)	S/N Rz (dB)
1	46	10	8	0.123	18.202	0.178	14.977	0.740	2.615
2	46	12	10	0.159	15.986	0.193	14.289	0.846	1.448
3	46	14	12	0.168	15.489	0.213	13.414	0.887	1.038
4	56	10	10	0.228	12.837	0.259	11.731	0.920	0.724
5	56	12	12	0.236	12.531	0.277	11.165	0.934	0.592
6	56	14	8	0.170	15.388	0.232	12.677	0.887	1.037
7	66	10	12	0.334	9.522	0.369	8.667	1.219	-1.720
8	66	12	8	0.260	11.701	0.292	10.694	1.088	-0.733
9	66	14	10	0.263	11.612	0.312	10.106	1.163	-1.315
		Ortalama		0.216		0.258		0.965	

Tablo 6. Ra, Rq ve Rz'ye ait S/N oranları için tepki tablosu.

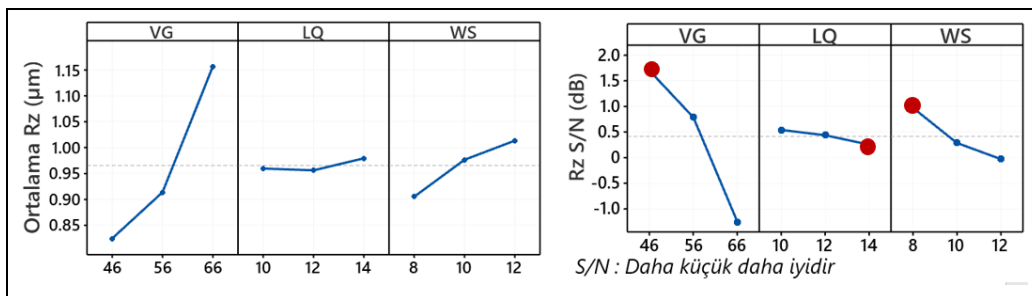
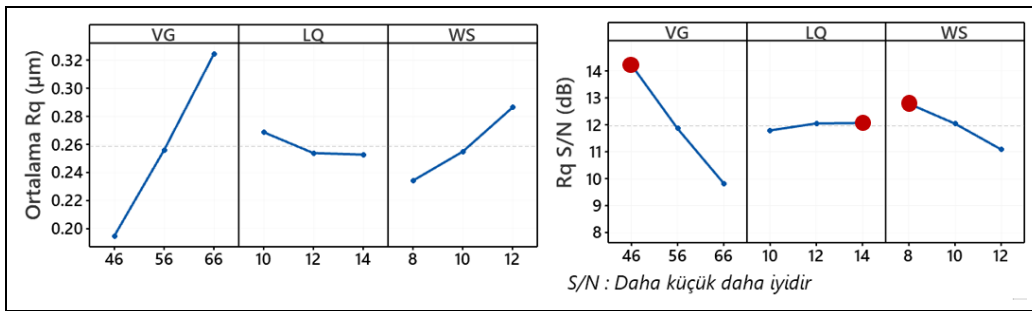
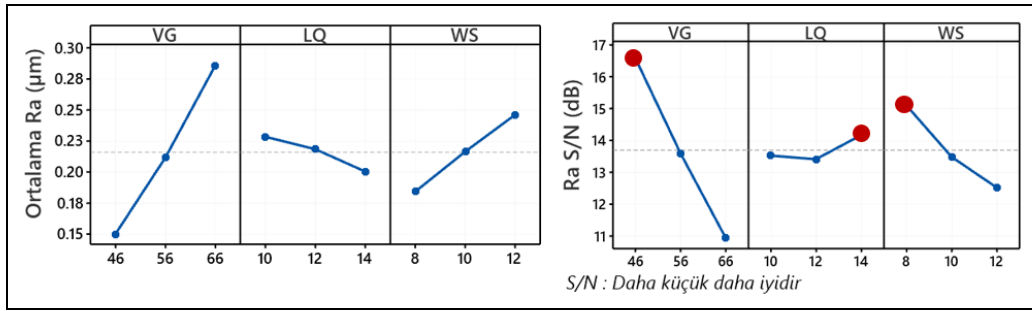
Table 6. Response table for S/N ratios for Ra, Rq and Rz.

Seviye	Ra			Rq			Rz		
	VG	LQ	WS	VG	LQ	WS	VG	LQ	WS
	S/N Oranı (dB)			S/N Oranı (dB)			S/N Oranı (dB)		
1	16.560	13.520	15.100	14.227	11.791	12.783	1.700	0.539	0.973
2	13.590	13.410	13.480	11.857	12.049	12.042	0.784	0.436	0.286
3	10.950	14.160	12.510	9.822	12.066	11.082	-1.256	0.254	-0.030
Fark	5.610	0.760	2.580	4.405	0.274	1.701	2.956	0.286	1.003
Sıralama	1	3	2	1	3	2	1	3	2

Tablo 7. Ra, Rq ve Rz'ye ait ortalama değerler için tepki tablosu.

Table 7. Response table for mean values for Ra, Rq and Rz.

Seviye	Ra			Rq			Rz		
	VG	LQ	WS	VG	LQ	WS	VG	LQ	WS
	Ortalama (μm)			Ortalama (μm)			Ortalama (μm)		
1	0.150	0.228	0.184	0.195	0.269	0.234	0.825	0.960	0.905
2	0.212	0.218	0.217	0.256	0.254	0.255	0.914	0.956	0.977
3	0.286	0.200	0.246	0.324	0.253	0.286	1.157	0.979	1.014
Fark	0.136	0.028	0.062	0.129	0.016	0.052	0.332	0.023	0.108
Sıralama	1	3	2	1	3	2	1	3	2



Şekil 4. Ortalama ve Sinyal-Gürültü Oranları için elde edilen grafikler a) Ra b) Rq c) Rz.

Figure 4. Graphs for Mean and Signal-to-Noise Ratios a) Ra b) Rq c) Rz.

Rq; tepe ve çukur değerlere daha duyarlı bir ölçüm parametresidir. Rq, yüzey profilinin merkez çizgisinden ortalama kuadratik sapması, (profilin ordinatlarından standart sapmayı ifade ettiği için) Ra'dan istatistik olarak daha önemlidir [74]. Rz ise; değerlendirme uzunluğunda en yüksek 5 tepe değer ile 5 çukur değer in ortalamasıdır [75]. İşleme parametreleri, tel elektrot üzerindeki aşınmış kraterlerin boyutunu (çap ve derinlik) etkilemektedir. Tel üzerindeki daha büyük boyuttaki kraterler, tel kopma riskini arttırmakta ve ayrıca iş parçası yüzey kalitesinin ve işleme hassasiyetinin düşük olmasına neden olmaktadır. Vurum süresi, tepe akımı ve tel ilerleme hızının artırılması krater boyutunu arttırırken, aşırı dielektrik sıvı basıncı krater boyutunu azaltmaktadır [58],[76].

Malzemenin yüzey dokusu, bileşenlerin [77] işlevselliğini ve güvenilirliğini etkileyen kilit bir faktördür ve yüzey pürüzlülüğü, malzemelerin optik ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği için malzeme yüzeylerini değerlendirmek için çok önemli bir parametredir [36]. Aşınma, sürtünme, yağlama, korozyon, yorulma, ısı transferi, optik özellikler, sıvı akışı ve ölçüm yüzeylerinin özelliklerini belirlemektedir [36, 78]. Yüzey pürüzlülüğü tribolojideki en önemli faktörlerden biridir ve bir işleme operasyonunun kalitesini değerlendirmek için kullanılabilir [36],[79]. Bu nedenle de TEİ'de yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi için farklı araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapılmıştır [10],[45],[46],[56],[80]-[85]. Bu deneysel çalışmadaki deney numunelerinin üç boyutlu topoğrafik görüntüleri ve iki boyutlu yüzey profilleri Şekil 5'te verilmiştir.

Optik profilometre ile ölçüm; dokunmalı ölçüm ile hasar görebilecek hassas yüzeylerde ve çok küçük/erişilemeyen ölçüm pozisyonları için kullanılmaktadır. Şekil 5'te verilen yüzey topografisi ve profili incelendiğinde malzeme yüzeyinde dalgalanmalar görülmektedir. Şekilde verilen malzemenin

yüzey topoğrafyasında farklı renkler görülmekte olup, renklere ait pürüzlülük değerleri görüntünün sağında bulunan skalada belirtilmiştir. Görüntülerde kırmızı renk malzeme yüzeyindeki tepe noktaları, mavi renk ise çukur yerleri ifade etmektedir. İki boyutlu yüzey profilinde de; ölçüm uzunluğunda elde edilen tepe ve çukur bölgeler ile birlikte yüzeydeki dalgalanmalar gösterilmiştir. Bu deneysel çalışmada; Ra, Rq ve Rz değerleri için en uygun değerler düşük gerilim ve düşük tel ilerleme hızında elde edilmiştir (Tablo 6) (Şekil 4). Bu parametreler için dielektrik sıvı basıncının ise anlamlı bir etkisi olmamıştır. En düşük Ra, Rq ve Rz pürüzlülük değerleri 1 numaralı deneyden elde edilirken, en yüksek Ra, Rq ve Rz değerleri 7 numaralı deneyden elde edilmiştir (Tablo 5). Elde edilen yüksek yüzey pürüzlülüğünün; malzeme işlenirken her kıvılcımın iş parçasını eritirken, eriyen malzemenin büyük bir kısmının dielektrik sıvı tarafından uzaklaştırılırken kalan erimiş malzemenin hızla yeniden katılışp malzeme yüzeyinde büyük kraterler oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

IN718 süperalaşımının tel erozyon tezgâhında kesilmesi işlemi sonrası işleme parametrelerinin Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülükleri üzerindeki etkilerini belirlemek için Varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Analiz, P 0.05 anlamlılık seviyesi ve %95 güvenilirlik seviyesinde gerçekleştirilmiştir [67, 68]. Faktörlerden hangilerinin Ra, Rq ve Rz ölçüm değerlerinde etkili oldukları ve faktörlerin etki yüzdeleri belirlenmiştir. Bu analiz, Minitab 19 paket programı kullanılarak yapılmıştır. ANOVA tablosundan anlamlı etkileri tespit edilen kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ile tahmin edilen optimum kalite karakteristikleri olan tahmin edilen optimum ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra_{opt}), kuadratik ortalama pürüzlülük (Rq_{opt}) ve maksimum pürüzlülük (Rz_{opt}) değerleri belirlenmiştir. Yapılan deney sonucunda; Ra, Rq ve Rz için elde edilen ANOVA değerleri Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Ra, Rq ve Rz için ANOVA sonuçları.

Table 8. ANOVA results for Ra, Rq, and Rz.

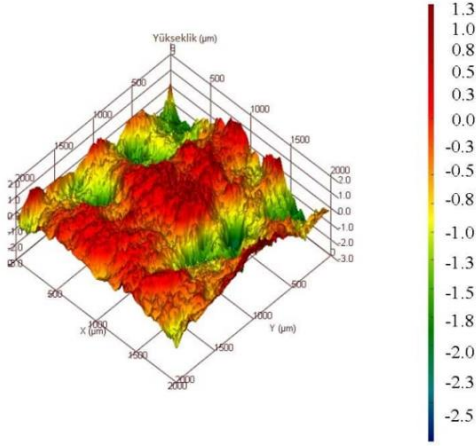
	Kaynak	Serbestlik derecesi (DoF)	Düzeltilmiş kareler toplamı (Adj SS)	Düzeltilmiş kareler ortalaması (Adj MS)	F	Anlamlılık (P)	Katkı (%)
Ra (μm)	VG	2	0.027674	0.013837	86.04	0.011*	79.18*
	LQ	2	0.001219	0.00061	3.79	0.209	3.49
	WS	2	0.005735	0.002868	17.83	0.053	16.41
	Artık Hata	2	0.000322	0.000161			0.92
	Toplam	8	0.03495				100.00
S= 0.0127 R ² = % 99.08 R ² (adj) = % 96.32 * İstatistik olarak anlamlı etkisi olan parametre.							
Ra (μm)	VG	2	0.025156	0.012578	141.59	0.007*	84.05*
	LQ	2	0.000477	0.000239	2.69	0.271	1.59
	WS	2	0.004119	0.00206	23.18	0.041*	13.76*
	Artık Hata	2	0.000178	0.000089			0.59
	Toplam	8	0.02993				100.00
S=0.0094 R ² = % 99.41 R ² (adj) = % 97.63 * İstatistik olarak anlamlı etkisi olan parametre.							
Ra (μm)	VG	2	0.177337	0.088668	80.11	0.012*	89.25*
	LQ	2	0.000939	0.00047	0.42	0.702	0.47
	WS	2	0.018202	0.009101	8.22	0.108	9.16
	Artık Hata	2	0.002214	0.001107			1.11
	Toplam	8	0.198692				100.00
S = 0.0333 R ² = % 98.89 R ² (adj) = % 95.54 * İstatistik olarak anlamlı etkisi olan parametre.							

Deney
No

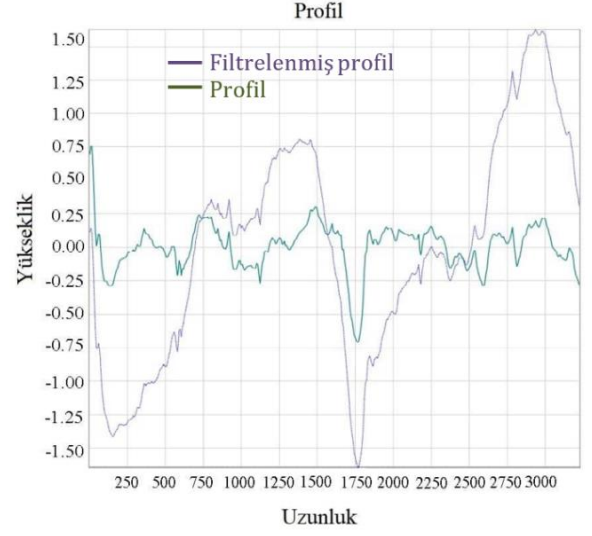
Üç Boyutlu Yüzey Topografisi

Yüzey Profili

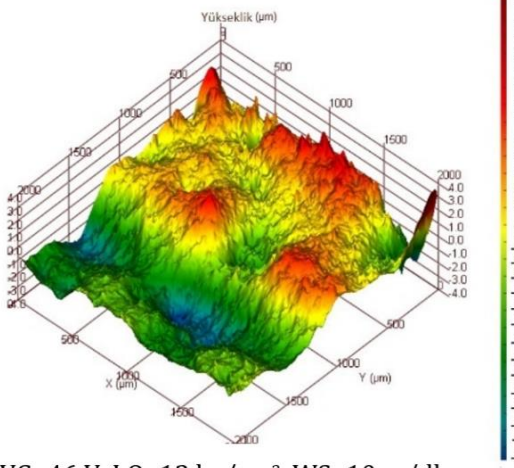
1



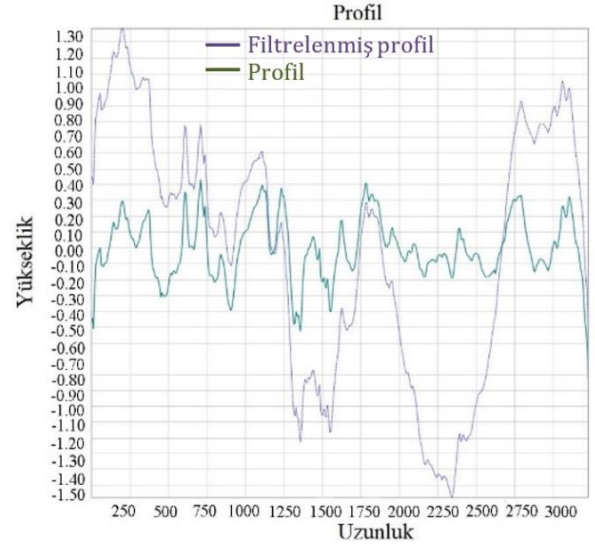
VG=46 V, LQ=10 kg/cm², WS=8 m/dk.



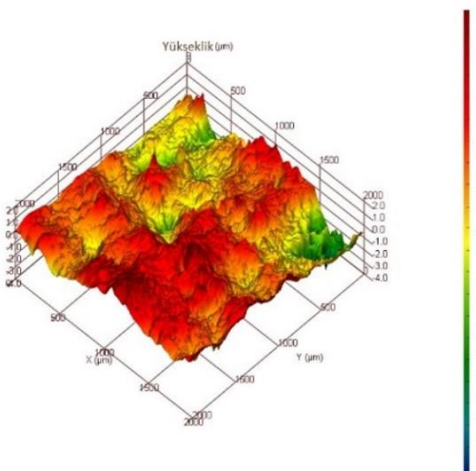
2



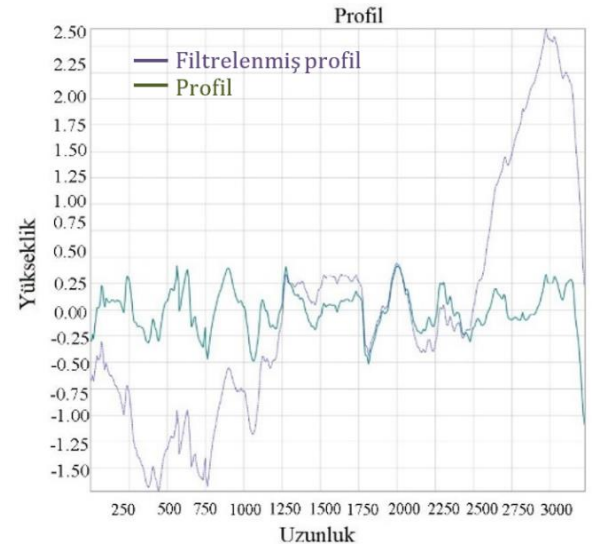
VG=46 V, LQ=12 kg/cm², WS=10 m/dk.



3



VG=46 V, LQ=14 kg/cm², WS=12 m/dk.



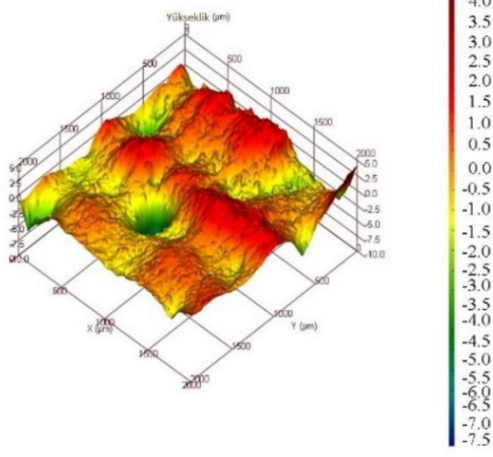
Şekil 5'in Devamı.
Figure 5. Continued.

Deney
No

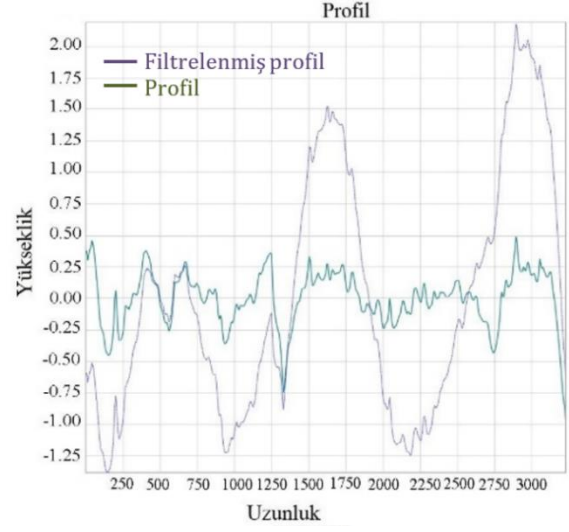
Üç Boyutlu Yüzey Topografisi

Yüzey Profili

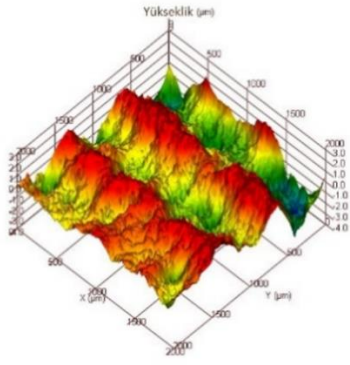
4



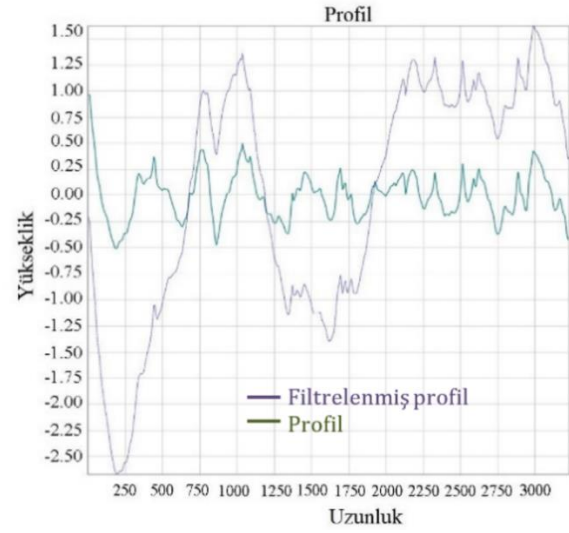
VG=56 V, LQ=10 kg/cm², WS=10 m/dk.



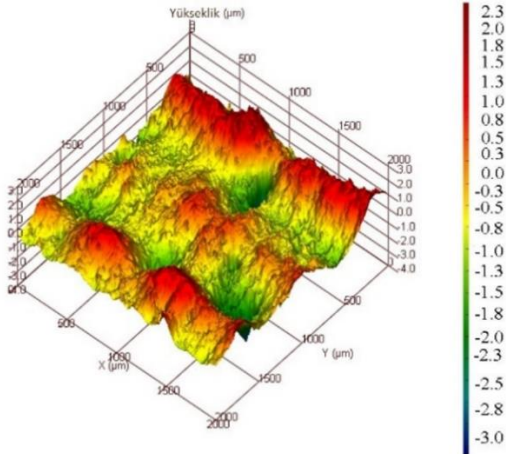
5



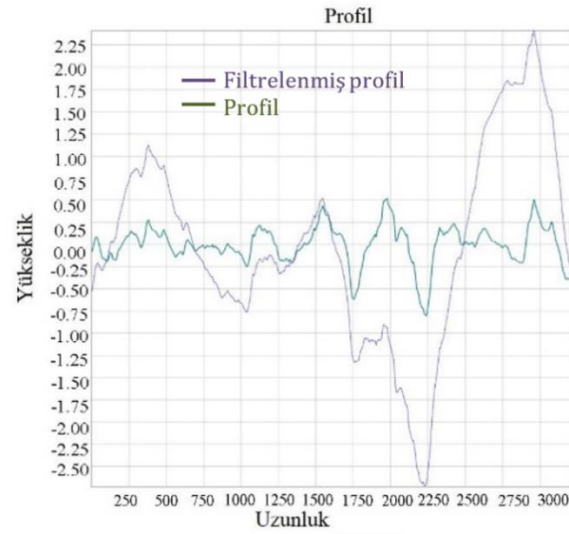
VG=56 V, LQ=12 kg/cm², WS=12 m/dk.



6



VG=56 V, LQ=14 kg/cm², WS=8 m/dk.



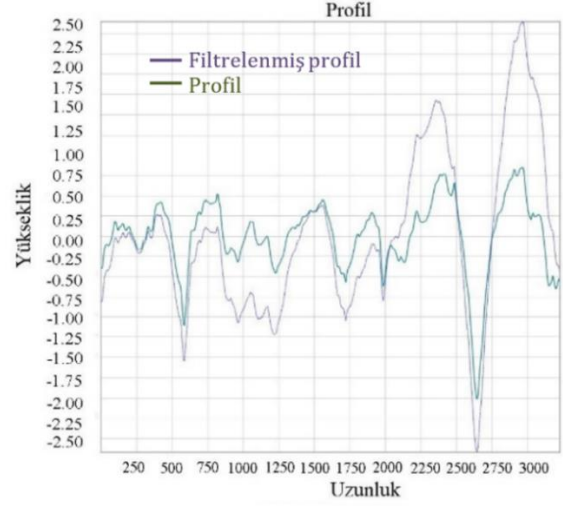
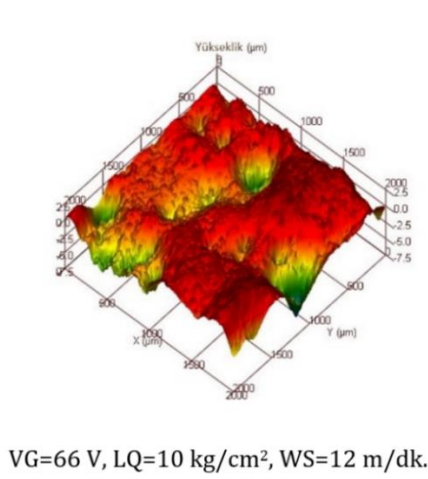
Şekil 5'in Devamı.
Figure 5. Continued.

Deney
No

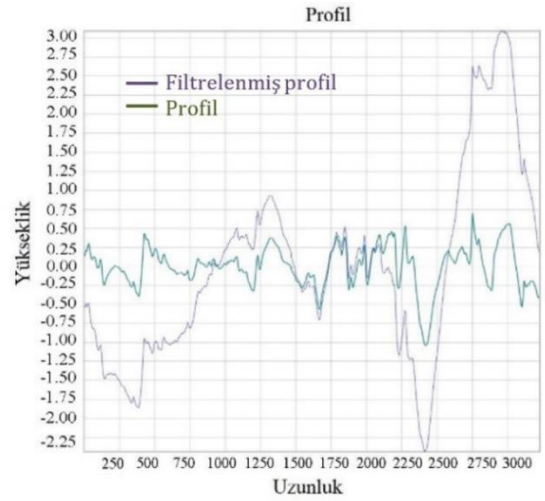
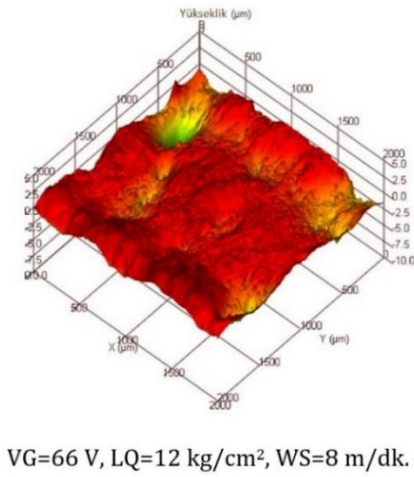
Üç Boyutlu Yüzey Topografisi

Yüzey Profili

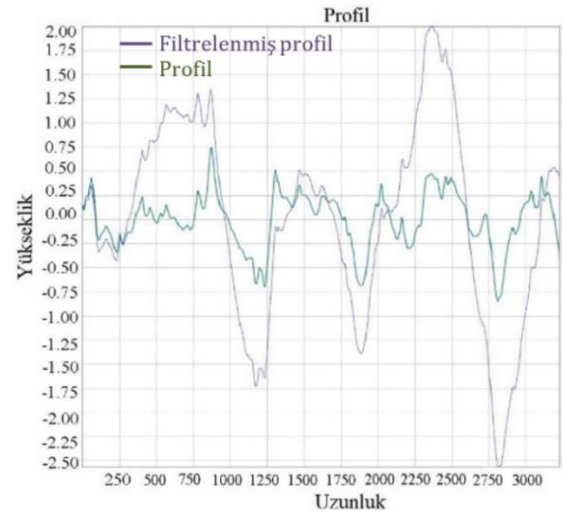
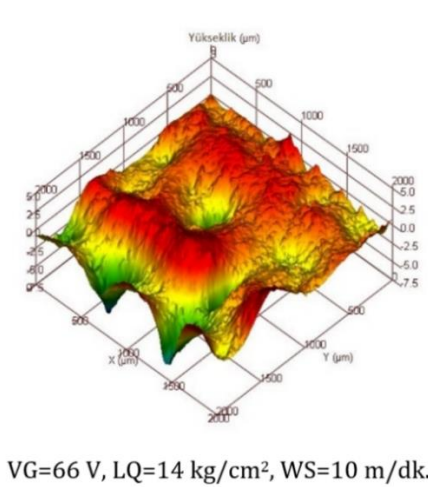
7



8



9



Şekil 5. Deney numuneleri pürüzlülük ölçüm yüzeylerinin topoğrafik görüntüleri ve yüzey profilleri.
Figure 5. Topographic images and surface profiles of roughness measurement surfaces of test samples.

Tabloda gösterildiği gibi, VG, LQ ve WS faktörlerinin Ra değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %79.18, %3.49 ve %16.41; Rq değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %84.05, %1.59 ve %13.76 ve Rz değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %89.25, %0.47 ve %9.16 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar; Ra, Rq ve Rz üzerinde en etkili faktörün sırasıyla gerilim ve tel ilerleme hızı olduğunu göstermektedir. Dielektrik sıvı basıncının etkisi istatistik olarak anlamlı olmamıştır (P>0.05). Jahan, Sarkar ve diğ. yüzey pürüzlülüğünün vuru süresinden, tepe akımından ve kesme hızından önemli ölçüde etkilendiğini; vuru süresinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör olduğunu; artması durumunda yüzey pürüzlülüğünün artmasına (zayıf bir yüzey kalitesi üreten "çift kıvılcım" olgusu nedeniyle) neden olduğunu belirtmişlerdir [58],[70].

3.2 Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz

İşleme parametrelerinin optimizasyonu genellikle sinyal-gürültü oranı (S/N) kullanılarak geleneksel Taguchi yaklaşımına göre yapılmaktadır. Daha yüksek sinyal-gürültü oranı, işleme parametrelerinin optimum olanına daha yakın olduğu anlamına gelmektedir. Taguchi metodu yalnızca tek yanıt optimize edebilir ve yanıt sayısı birden fazlaysa aynı anda optimize edemez. Bu nedenle, çok kriterli optimizasyon problemlerini çözmek için Taguchi yaklaşımıyla birleştirilmiş Gri İlişkisel Analiz (GİA) uygulanmıştır [34]. GİA'nın ilk adımında; Ra, Rq ve Rz için "daha düşük daha iyi" karakteristiği kullanılarak normalizasyon işlemi yapılmıştır (Denklem 7). GİA normalizasyon değerleri Tablo 9'da verilmiştir. Normalizasyon değerleri kullanılarak Gri İlişkisel Katsayı (GİK) değerleri hesaplanmıştır (Denklem 8). GİK, istenen ve gerçek deneysel veriler arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir [34]. Mühendislik tasarımlarında işleme parametrelerinin önem derecesi farklı olduğundan dolayı GİA'da her çıkış parametresi için ağırlık faktörlerinin belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir [86]. Bununla birlikte, araştırmacıların çoğu, çoklu yanıtların gri ilişkisel derecesini belirlemek için eşit ağırlık kullanmaktadır

[87],[88] ve bu durum sonuçların güvenilirliğini sorgulanır hale getirmektedir [86]. GİA'da işleme parametrelerinin ağırlık dereceleri eşit olmadığında GİD'de değişmekte ve ağırlık faktörlerinin hesaplanması optimum sonuçlar için çok önemli hale gelmektedir [89]. Sonuç olarak, IN718 süperalaşımının tel erozyon ile işlenmesi sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan Ra, Rq ve Rz pürüzlülük değerleri üzerinde işleme parametrelerinin etkisine göre ağırlık faktörlerini hesaplamak için uygulanabilir bir prosedürün izlenmesi gerekmektedir [86].

1. Her tepki için her parametrenin Fark değeri hesaplanır.
2. Her tepki için Fark toplamı hesaplanır.
3. Her tepkinin Fark toplamının tüm tepkilerin toplam Fark değerine oranı faktörlerin ağırlık derecelerini vermektedir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^p Fark_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p Fark_{ij}} \quad (10)$$

Denklem 10'da;

w_i = her parametrenin ağırlık derecesi,

p = işleme parametrelerinin sayısı,

m = tepki sayısıdır.

IN718 süperalaşımının tel erozyon ile işlenmesi sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan Ra, Rq ve Rz pürüzlülük değerleri üzerinde işleme parametrelerinin etkisine göre ağırlık faktörlerini hesaplamak için uygulanan prosedür Tablo 10'da verilmiştir.

Bu değerler yardımıyla Gri İlişkisel Derece (GİD) değerleri hesaplanır (Denklem 9). Temel olarak, gri ilişkisel derece ne kadar büyükse, çoklu performans özellikleri o kadar iyidir [90]. GİD'nin en yüksek değeri en ideal değeri göstermektedir.

Tablo 9. Gri ilişki normalizasyon değerleri.

Table 9. Gray relation normalization values.

Deney No	VG	LQ	WS	Normalizasyon		
				Ra	Rq	Rz
1	46	10	8	1.0000	1.0000	1.0000
2	46	12	10	0.8306	0.9228	0.7780
3	46	14	12	0.7864	0.8154	0.6925
4	56	10	10	0.5021	0.5756	0.6242
5	56	12	12	0.4633	0.4840	0.5947
6	56	14	8	0.7771	0.7161	0.6922
7	66	10	12	0.0000	0.0000	0.0000
8	66	12	8	0.3510	0.4031	0.2735
9	66	14	10	0.3385	0.2957	0.1161

Tablo 10. Her seviyedeki her parametre için ortalama değerler.

Table 10. Mean values for each parameter at each level.

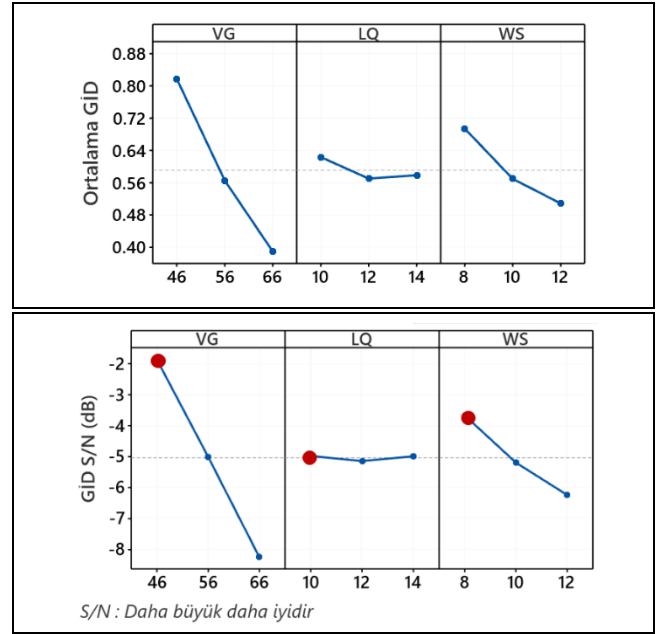
Seviye	Ra			Rq			Rz		
	VG	LQ	WS	VG	LQ	WS	VG	LQ	WS
S/N Oranı									
1	0.7689	0.5800	0.6338	0.8602	0.6165	0.6543	0.8159	0.6115	0.7089
2	0.3912	0.5176	0.5045	0.5283	0.6042	0.611	0.5583	0.5548	0.5595
3	0.3931	0.4557	0.4150	0.3490	0.5169	0.4722	0.3997	0.6076	0.5054
Fark	0.3777	0.1243	0.2188	0.5112	0.0996	0.1821	0.4162	0.0566	0.2035
Σ Fark	0.7208			0.7929			0.6763		
Ağırlık Derecesi	% 32.91			% 36.21			% 30.88		

Sıralama ise gri ilişki analizine göre en ideal değerlerin sıralamasını göstermektedir. GİD değeri en yüksek değerinin sıralaması 1'dir. En ideal dizilim için elde edilen sıralama Tablo 11'de verilmiştir. Sıralama değeri 1. olan yani; en yüksek GİD değerine sahip olan 1. deney olarak tespit edilmiştir. 1. deneyin GİD değeri 1.00 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar Ra, Rq ve Rz değerlerinin tümü için en ideal deney dizilimini göstermektedir. Taguchi optimizasyonunda her bir sonuç için ayrı ayrı bir parametre belirlenirken, GİA bu optimizasyonu tüm sonuçlar için ortak vermektedir.

GİD sonuçları için hazırlanan ortalama ve S/N oranı tablosu Tablo 12'de verilmiştir. GİD ve S/N oranı grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Grafikte S/N oranı incelendiğinde S/N oranı yüksek olan parametreler ideal değerlerdir. Buradan en ideal dizilim VG₁LQ₁WS₁ olarak belirlenmiştir. İdeal şartlar; 46 V gerilim, 10 kg/cm² dielektrik sıvı basıncı ve 8 mm/dk. tel ilerleme hızı olarak belirlenmiştir. Buna göre; düşük gerilim ve düşük ilerleme hızı uygulanması sonuçlara olumlu katkı sağlamıştır. Elde edilen işleme parametrelerinin optimum seviyeleri, deney deseninde 1. deneye (VG₁LQ₁WS₁) denk gelmektedir. Bu işleme parametreleri kullanılarak deney gerçekleştirildiğinden dolayı da doğrulama deneyi yapılmamıştır.

GİD'e ait ANOVA sonuçları da Tablo 13'te verilmiştir. Analize göre; Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülük değerlerinin aynı anda en düşük değerinin elde edilmesinde etkili parametre %79.87 katkı değeriyle gerilim olmuştur. Tel ilerleme hızı %15.46 oran ile ikinci etkili parametre olmuştur. Ancak; tel ilerleme hızı ile

dielektrik sıvı basıncının etkisi istatistik olarak anlamlı olmamıştır (P>0.05).



Şekil 6. GİD için ortalama ve S/N oranı grafikleri.
Figure 6. Graphs of mean and S/N Ratio for GRG.

Tablo 11. Gri ilişki katsayı ve gri ilişki derecesi.

Table 11. Gray relational coefficient and gray relational grade.

Deney No	Gri İlişkisel Katsayı (GİK)			Gri İlişkisel Derece (GİD)	Sıralama
	Ra	Rq	Rz		
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1
2	0.7362	0.9710	0.7470	0.7686	2
3	0.5706	0.6096	0.7006	0.6834	3
4	0.4067	0.5162	0.5011	0.5376	5
5	0.3411	0.4736	0.4823	0.5089	6
6	0.4259	0.5951	0.6917	0.6495	4
7	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	9
8	0.4755	0.3679	0.4352	0.4329	7
9	0.3705	0.3458	0.4305	0.4023	8

Tablo 12. GİD için S/N oranlarının ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Table 12. Response table of S/N ratios and mean values for GRG.

Seviye	GİD Ortalaması			GİD S/N Oranı		
	VG	LQ	WS	VG	LQ	WS
1	0.817	0.624	0.694	-1.864	-4.978	-3.674
2	0.565	0.570	0.570	-5.002	-5.142	-5.195
3	0.390	0.578	0.509	-8.241	-4.988	-6.239
Fark	0.428	0.054	0.186	6.377	0.164	2.565
Sıralama	1	3	2	1	3	2

Tablo 13. GİD için ANOVA sonuçları.

Table 13. ANOVA results for GRG.

Kaynak	Serbestlik derecesi (DoF)	Düzeltilmiş kareler toplamı (Adj SS)	Düzeltilmiş kareler ortalaması (Adj MS)	F	Anlamlılık (P)	Katkı (%)
VG	2	0.277422	0.138711	24.65	0.039*	79.87*
LQ	2	0.004982	0.002491	0.44	0.693	1.43
WS	2	0.053694	0.026847	4.77	0.173	15.46
Artık Hata	2	0.011252	0.005626			3.24
Toplam	8	0.34735				100.00

S= 0.0750 R² = % 96.76 R² (adj) = % 87.04; * GİD üzerinde istatistik olarak anlamlı etkisi olan parametre.

4 Sonuçlar

Yapılan bu deneysel çalışmada, Inconel 718 (IN718) süperalaşımının CNC tel erozyon tezgâhında işlenmesi sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü), Rq (kuadratik ortalama pürüzlülük) ve Rz (maksimum pürüzlülük) değerleri üzerinde işleme parametrelerinin etkisi araştırılmış ve işleme parametrelerinin optimum seviyeleri elde edilmeye çalışılmıştır. İşleme parametrelerinin seviyelerini optimize etmek için Taguchi tabanlı Gri İlişkisel Analiz (GİA) uygulanmıştır. Kontrol faktörlerinin/işleme parametrelerinin etkilerini belirlemek için ANOVA kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- En düşük Ra, Rq ve Rz değerleri sırasıyla 0.123 µm, 0.178 µm ve 0.740 µm olarak elde edilmiştir,
- İşleme parametrelerinin optimum seviyelerinde (VG₁, LQ₁, WS₁) yapılan işleme ile elde edilen Ra, Rq ve Rz değerlerinde sırasıyla %63.17, %51.76 ve %39.29 oranında iyileşme sağlanmıştır,
- Kontrol faktörlerinin (gerilim, dielektrik sıvı basıncı ve tel ilerleme hızı) Ra, Rq ve Rz değeri üzerinde en fazla katkıya sahip parametre gerilim ve ardından tel ilerleme hızı olarak belirlenmiştir. Gerilimin; Ra, Rq ve Rz değerine katkı oranı sırasıyla %79.18, %84.05 ve %89.25 olarak elde edilmiştir. Ancak; tel ilerleme hızı ile dielektrik sıvı basıncının etkisi istatistik olarak anlamlı olmamıştır (P>0.05),
- Taguchi tabanlı Gri İlişkisel Analiz yöntemine göre yapılan çok kriterli optimizasyona göre; IN718 süperalaşımının tel erozyon ile işlenmesinde Ra, Rq ve Rz için optimum şartlar VG₁LQ₁WS₁ (VG=46 V, LQ=10 kg/cm² ve WS=8 mm/dk.) olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın tamamlayıcısı olarak; tel erozyon yöntemi ile kesilen malzemenin kesme genişliği (kerf) ve malzeme kaldırma Oranı (Material Removal Rate/MRR) karakteristik özelliklerinin değerlendirilmesi tamamlanarak mümkün olan en kısa sürede değerlendirilecektir.

5 Conclusions

In this experimental study, the effect of machining parameters on Ra (average surface roughness), Rq (quadratic average roughness) and Rz (maximum roughness) values formed on the material surface as a result of machining Inconel 718 (IN718) superalloy on a wire electrical discharge machining (WEDM) was investigated. For this purpose, optimum levels of processing parameters were tried to be obtained. Taguchi-based Gray Relational Analysis (GRA) was applied to optimize the levels of processing parameters and ANOVA was used to evaluate the experimental results. The findings obtained as a result of the study are listed below:

- The lowest Ra, Rq and Rz values were obtained as 0.123 µm, 0.178 µm and 0.740 µm, respectively,
- Ra, Rq and Rz values obtained by machining at optimum levels of machining parameters (VG₁, LQ₁, WS₁) were improved by 63.17%, 51.76% and 39.29%, respectively,
- The parameter with the highest contribution on the Ra, Rq and Rz values of the control factors (tension, dielectric fluid pressure and wire feed rate) was

determined as the voltage followed by the wire feed rate. The contribution rate of the voltage to Ra, Rq and Rz values was obtained as 79.18%, 84.05% and 89.25%, respectively. The contribution rate of wire feed rate is 16.41%, 13.76% and 9.16%, respectively. However, the effect of wire feed speed and dielectric fluid pressure was not statistically significant (P>0.05),

- According to the Multi-Criteria Optimization made with the Taguchi-based Gray Relational Analysis method; The optimum conditions for Ra, Rq and Rz in WEDM of IN718 superalloy were determined as VG₁LQ₁WS₁ (VG=46 V, LQ=10 kg/cm² and WS=8 mm/min).

As a complement to this study, the evaluation of the characteristics of the cut width (kerf) and material removal rate (MRR) of the material cut by wire erosion method will be completed and evaluated as soon as possible.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan malzemelerin temin edilmesi, sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Liu X, Wang K, Hu P, He X, Yan B, Zhao X. "Formability, microstructure and properties of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting additive manufacture technology". *Materials*, 14(4), 1-17, 2021.
- [2] Malmelöv A, Fisk M, Lundbäck A, Lindgren LE. "Mechanism based flow stress model for alloy 625 and alloy 718". *Materials*, 13(24), 1-18, 2020.
- [3] Ni T, Dong J. "Creep behaviors and mechanisms of Inconel718 and Allvac718plus". *Materials Science and Engineering: A*, 700, 406-415, 2017.
- [4] Zhao M, Zhao Z, Liu L, Luo G, Chen W. "Influence of heat treatment on cyclic response of nickel-based superalloy Inconel 718 up to very-high cycle regime". *Materials*, 13(23), 1-15, 2020.
- [5] Holland S, Wang X, Chen J, Cai W, Yan F, Li L. "Multiscale characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 fabricated by selective laser melting". *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 182-194, 2019.
- [6] Ankit K, Prasad N. "Simulation of creep cavity growth in Inconel 718 alloy". *Materials Science and Engineering: A*, 528(12), 4209-4216, 2011.
- [7] Zhang S, Lin X, Wang L, Yu X, Yang H, Lei L, Huang W. "Influence of grain inhomogeneity and precipitates on the stress rupture properties of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting". *Materials Science and Engineering: A*, 803, 1-11, 2021.

- [8] Han F, Jiang J, Yu D. "Influence of machining parameters on surface roughness in finish cut of WEDM". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(5), 538-546, 2007.
- [9] Kuş A, Motorcu AR. "Nikel esashı waspaloı alaşımasının tel erozyon yöntemiyle işlenmesinde Taguchi metodu ile yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametrelerinin tahmini". *Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University*, 32(1), 195-204, 2017.
- [10] Vani PN, Arun K, Reddy MCS, Madduleti M. "Optimizing the process parameters of EDM using Taguchi Method and Anova on Inconel 718". *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 5 (12), 487-494, 2018.
- [11] Newton TR, Melkote SN, Watkins TR, Trejo RM, 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, 208-215, 2009.
- [12] Thamizhmanii S, Sagarudin S, Hasan S. "Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20(1-2), 503-506, 2007.
- [13] Thamizhmanii S, Hasan S. "Analyses of roughness, forces and wear in turning gray cast iron". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 17(1-2), 401-404, 2006.
- [14] Sharman A, Hughes J, Ridgway K. "Workpiece surface integrity and tool life issues when turning Inconel 718™ nickel based superalloy". *Machining Science and Technology*, 8(3), 399-414, 2004.
- [15] Kitagawa T, Kubo A, Maekawa K. "Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti 6Al 6V 2Sn". *Wear*, 202(2), 142-148, 1997.
- [16] Ezugwu E, Tang S. "Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools". *Journal of Materials Processing Technology*, 55(2), 63-69, 1995.
- [17] Liao Y, Shiue R. "Carbide tool wear mechanism in turning of Inconel 718 superalloy". *Wear*, 193(1), 16-24, 1996.
- [18] Rahman M, Seah W, Teo T. "The machinability of Inconel 718". *Journal of Materials Processing Technology*, 63(1-3), 199-204, 1997.
- [19] Ezugwu E, Wang Z, Okeke C. "Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD- and CVD-coated tools". *Tribology Transactions*, 42(2), 353-360, 1999.
- [20] Darwish S. "The impact of the tool material and the cutting parameters on surface roughness of supermet 718 nickel superalloy". *Journal of Materials Processing Technology*, 97(1-3), 10-18, 2000.
- [21] Li L, He N, Wang M, Wang Z. "High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts". *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1-3), 127-130, 2002.
- [22] Arunachalam R, Mannan M, Spowage A. "Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14), 1481-1491, 2004.
- [23] Arunachalam R, Mannan M, Spowage A. "Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(9), 879-887, 2004.
- [24] Coelho R, Silva L, Braghini Jr A, Bezerra A. "Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning Inconel 718™ at high cutting speeds". *Journal of Materials Processing Technology*, 148(1), 147-153, 2004.
- [25] Dudzinski D, Devillez A, Moufki A, Larrouquere D, Zerrouki V, Vigneau J. "A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy". *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 44(4), 439-456, 2004.
- [26] Mitrofanov A, Babitsky V, Silberschmidt V. "Finite element analysis of ultrasonically assisted turning of Inconel 718". *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 233-239, 2004.
- [27] Sharman A, Hughes J, Ridgway K. "An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718™ when turning". *Journal of Materials Processing Technology*, 173(3), 359-367, 2006.
- [28] Sharman A, Hughes J, Ridgway K. "Surface integrity and tool life when turning Inconel 718 using ultra-high pressure and flood coolant systems". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(6), 653-664, 2008.
- [29] Pawade R, Joshi SS, Brahmankar P, Rahman M. "An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718". *Journal of Materials Processing Technology*, 192, 139-146, 2007.
- [30] Pawade R, Joshi SS, Brahmankar P. "Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718". *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 48(1), 15-28, 2008.
- [31] Courbon C, Kramar D, Krajnc P, Pusavec F, Rech J, Kopac J. "Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: an experimental study". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(14), 1114-1125, 2009.
- [32] Lorentzon J, Järvsträt N, Josefson B. "Modelling chip formation of alloy 718". *Journal of Materials Processing Technology*, 209(10), 4645-4653, 2009.
- [33] Majumder H, Maity K. "Prediction and optimization of surface roughness and micro-hardness using grnn and MOORA-fuzzy-a MCDM approach for nitinol in WEDM". *Measurement*, 118, 1-13, 2018.
- [34] Rao CM, Venkatasubbaiah K, Rao KJ. "Experimental investigation of surface roughness characteristics Ra, Rq and Rz". *International Journal of Hybrid Information Technology*, 9(7), 373-388, 2016.
- [35] Jang DY, Choi Y-G, Kim H-G, Hsiao A. "Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(4), 453-464, 1996.
- [36] Dobes J, Leal JES, Profeta J, de Sousa MM, Neto FPL, Piratelli-Filho A, Arencibia RV. "Effect of mechanical vibration on Ra, Rq, Rz, and Rt roughness parameters". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1), 393-406, 2017.
- [37] Sedlaček M, Podgornik B, Vižintin J. "Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear". *Wear*, 266(3-4), 482-487, 2009.

- [38] Svahn F, Kassman-Rudolphi Å, Wallén E. "The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings". *Wear*, 254(11), 1092-1098, 2003.
- [39] Munhoz MR, Dias LG, Breganon R, Ribeiro FSF, de Souza Goncalves JF, Hashimoto EM, de Silva Junior CE. "Analysis of the surface roughness obtained by the abrasive flow machining process using an abrasive paste with oiticica oil". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11), 5061-5070, 2020.
- [40] Rao PS, 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.
- [41] Thejasree P, Binoj J, Manikandan N, Krishnamachary P, Raju R, Palanisamy D. "Multi objective optimization of wire electrical discharge machining on Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis". *Materials Today: Proceedings*, 39, 230-235, 2021.
- [42] Kumar A, Abhishek K, Vivekananda K, Maity K. "Effect of wire electrode materials on die-corner accuracy for wire electrical discharge machining (WEDM) of Inconel 718". *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12641-12648, 2018.
- [43] Divya M, Sateesh N, Subbiah R. "Review on multi objective optimization of wire cut EDM process parameters using grey relational analysis". *Materials Today: Proceedings*, 26, 3124-3130, 2020.
- [44] Marelli D, Singh S, Nagari S, Subbiah R. "Optimisation of machining parameters of wire-cut EDM on super alloy materials—A review". *Materials Today: Proceedings*, 26, 1021-1027, 2020.
- [45] Kumar P, Meenu M, Kumar V. "Optimization of process parameters for WEDM of Inconel 825 using grey relational analysis". *Decision Science Letters*, 7(4), 405-416, 2018.
- [46] Dhanunjaya M, Madduleti M, Boosa GC. "The process of EDM cutting parameters optimizing by using Taguchi Method and Anova on Inconel 718". *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(12), 1305-1311, 2018.
- [47] Kumar A, Singh S. "Parametric optimization of wire electro discharge machining of Inconel 718 using Taguchi's methodology". *Materials Today: Proceedings*, 43, 2025-2031, 2021.
- [48] Abhilash P, Chakradhar D. "Surface integrity comparison of wire electric discharge machined Inconel 718 surfaces at different machining stabilities". *Procedia CIRP*, 87, 228-233, 2020.
- [49] Abhilash P, Chakradhar D. "ANFIS modelling of mean gap voltage variation to predict wire breakages during wire EDM of Inconel 718". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 153-164, 2020.
- [50] Yang CB, Lin CG, Chiang HL, Chen CC. "Single and multiobjective optimization of Inconel 718 nickel-based superalloy in the wire electrical discharge machining". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 3075-3084, 2017.
- [51] Garg M, Kumar A, Sahu C. "Mathematical modeling and analysis of WEDM machining parameters of nickel-based super alloy using response surface methodology". *Sādhanā*, 42(6), 981-1005, 2017.
- [52] Devarasiddappa D, Chandrasekaran M, Arunachalam R. "Experimental investigation and parametric optimization for minimizing surface roughness during WEDM of Ti6Al4V alloy using modified TLBO algorithm". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering*, 42(3), 1-18, 2020.
- [53] Varol Ozkavak H, Sofu MM, Duman B, Bacak S. "Estimating surface roughness for different EDM processing parameters on Inconel 718 using GEP and ANN". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 33, 306-314, 2021.
- [54] Fatemi A, Molaei R, Sharifimehr S, Shamsaei N, Phan N. "Torsional fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V by powder bed fusion including surface finish effect". *International Journal of Fatigue*, 99, 187-201, 2017.
- [55] Slotwinski JA, Garboczi EJ. "Porosity of additive manufacturing parts for process monitoring". 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Maryland, USA, 21-26 July 2013.
- [56] Sheth M, Gajjar K, Jain A, Shah V, Patel H, Chaudhari R, Vora J. *Multi-Objective Optimization of Inconel 718 Using Combined Approach of Taguchi-Grey Relational Analysis*. Editors: Kalamkar VR, Monkova K. Advances in Mechanical Engineering, 229-235, Singapore, Springer Singapore, 2021.
- [57] Donachie MJ, Donachie SJ. *Superalloys: A Technical Guide*. 2nd ed. USA, ASM International, 2002.
- [58] Jahan MP. *Electrical Discharge Machining (EDM): Types, Technologies and Applications*, Nova Science Publishers, Incorporated, 2014.
- [59] PhaseView. "ZeeScan Microscope 3D Add-On". http://phaseview.com/wp-content/uploads/2014/07/ZeeScan_Rel_05.pdf (03.08.2021).
- [60] Durairaj M, Sudharsun D, Swamynathan N. "Analysis of process parameters in wire EDM with stainless steel using single objective Taguchi method and multi objective grey relational grade". *Procedia Engineering*, 64, 868-877, 2013.
- [61] Chaudhari S, Khedkar S, Borkar N. "Optimization of process parameters using Taguchi approach with minimum quantity lubrication for turning". *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 1(4), 1268-1273, 2011.
- [62] Parashar V, Rehman A, Bhagoria J, Puri Y. "Investigation and optimization of surface roughness for wire cut electro discharge machining of SS 304L using Taguchi dynamic experiments". *International Journal of Engineering Studies*, 1(4), 257-267, 2009.
- [63] Ünverdi M, Küçük H. "Taguchi yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak tasarlanan levhalı ısı değiştiricilerin performanslarının karşılaştırılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 373-386, 2019.
- [64] Akgün M, Yurtkuran H, Ulaş HB. "AA7075 alaşımının işlenebilirliğine suni yaşlandırmanın etkisinin analizi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 75-81, 2020.

- [65] Motorcu AR, Ekici E. "Al/B4C kompozitlerin karbür matkaplarla delinmesinin değerlendirilmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 259-266, 2016.
- [66] Ekici E, Motorcu AR, Kuş A. "Evaluation of surface roughness and material removal rate in the wire electrical discharge machining of Al/B4C composites via the Taguchi method". *Journal of Composite Materials*, 50(18), 2575-2586, 2016.
- [67] Karataş MA, Motorcu AR, Gökkaya H. "Study on delamination factor and surface roughness in abrasive water jet drilling of carbon fiber-reinforced polymer composites with different fiber orientation angles". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering*, 43(1), 1-29, 2021.
- [68] Karataş MA, Motorcu AR, Gökkaya H. "Optimization of machining parameters for kerf angle and roundness error in abrasive water jet drilling of CFRP composites with different fiber orientation angles". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering*, 42(4), 1-27, 2020.
- [69] Bilge T, Motorcu AR, Ivanov A. "Kompakt laminatın delinmesinde boyutsal tamlık için delme parametrelerinin gri ilişkisel analiz ile optimizasyonu". *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(2), 1-22, 2017.
- [70] Sarkar S, Mitra S, Bhattacharyya B. "Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy". *Journal of Materials Processing Technology*, 159(3), 286-294, 2005.
- [71] Karatas MA, Gokkaya H, Nalbant M. "Optimization of machining parameters for abrasive water jet drilling of carbon fiber-reinforced polymer composite material using Taguchi method". *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(2), 128-138, 2019.
- [72] Kuriachen B, Paul J, Mathew J. "Modeling of wire electrical discharge machining parameters using titanium alloy (Ti-6AL-4V)". *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(4), 377-381, 2012.
- [73] International Stainless Steel Forum. "Roughness Measurements of Stainless Steel Surfaces". https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/RoughnessMeasurement_EN.pdf (10.08.2021).
- [74] Yamas. "Yüzey Ölçüm Parametreleri". https://yamas.com.tr/242/1/4/yamas/yuzeyolcumpa_rametreleri.aspx (10.08.2021).
- [75] Precision Devices INC. "Surface Roughness Terminology and Parameters". https://www.predev.com/pdffiles/surface_roughness_terminology_and_parameters.pdf (10.08.2021).
- [76] Kanlayasiri K, Boonmung S. "Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC 53 die steel: Design of experiments and regression model". *Journal of Materials Processing Technology*, 192, 459-464, 2007.
- [77] Chand M, Mehta A, Sharma R, Ojha V, Chaudhary K. "Roughness measurement using optical profiler with self-reference laser and stylus instrument-A comparative study". *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 49(5), 335-339, 2011.
- [78] Bhushan B. Friction. *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices*, 2nd ed. New York, USA, Springer, 1996.
- [79] Jang DY, Choi YG, Kim H-G, Hsiao A. "Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(4), 453-464, 1996.
- [80] Rajyalakshmi G, Ramaiah PV. "Multiple process parameter optimization of wire electrical discharge machining on Inconel 825 using Taguchi grey relational analysis". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5), 1249-1262, 2013.
- [81] Lin J, Tarng Y. "Optimization of the multi-response process by the Taguchi method with grey relational analysis". *Journal of Grey system*, 4(4), 355-370, 1998.
- [82] Julong D. "Introduction to grey system theory". *The Journal of Grey System*, 1(1), 1-24, 1989.
- [83] Lin J, Wang K, Yan B, Tarng Y. "Optimization of the electrical discharge machining process based on the Taguchi method with fuzzy logics". *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1-3), 48-55, 2000.
- [84] Sivaprakasam P, Hariharan P, Gowri S. "Experimental investigations on nano powder mixed micro-wire EDM process of inconel-718 alloy". *Measurement*, 147, 1-12, 2019.
- [85] Shandilya P, Rouniyar AK, Saikiran D. "Multi-objective parametric optimization on machining of Inconel-825 using wire electrical discharge machining". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(20), 4056-4068, 2020.
- [86] Canbolat A, Bademlioglu A, Arslanoglu N, Kaynakli O. "Performance optimization of absorption refrigeration systems using Taguchi, ANOVA and Grey Relational Analysis methods". *Journal of Cleaner Production*, 229, 874-885, 2019.
- [87] Asokan P, Kumar RR, Jeyapaul R, Santhi M. "Development of multi-objective optimization models for electrochemical machining process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(1), 55-63, 2008.
- [88] Kolahan F, Golmezerji R, Moghaddam MA. "Multi objective optimization of turning process using grey relational analysis and simulated annealing algorithm". *Applied Mechanics and Materials*, 110-116, 2926-2932, 2011.
- [89] Yan J, Li L. "Multi-objective optimization of milling parameters—the trade-offs between energy, production rate and cutting quality". *Journal of Cleaner Production*, 52, 462-471, 2013.
- [90] Raghuraman S, Thiruppathi K, Panneerselvam T, Santosh S. "Optimization of EDM parameters using Taguchi method and grey relational analysis for mild steel IS 2026". *International Journal of Innovative research in science, engineering technology*, 2(7), 3095-3104, 2013.