



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Elektro erozyonla tornalama yöntemiyle işlenen soğuk iş takım çeliğinin yorulma ömrünün tahmini

Estimation of fatigue life of cold work tool steel machined by electrical discharge turning

Yazar(lar) (Author(s)): Ramazan ÇAKIROĞLU¹, Mustafa GÜNAY²

ORCID¹: 0000-0002-3120-1599

ORCID²: 0000-0002-1281-1359

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çakıroğlu R. ve Günay M., “Elektro erozyonla tornalama yöntemiyle işlenen soğuk iş takım çeliğinin yorulma ömrünün tahmini”, *Politeknik Dergisi*, 24(2): 495-502, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.705903

Elektro Erozyonla Tornalama Yöntemiyle İşlenen Soğuk İş Takım Çeliğinin Yorulma Ömrünün Tahmini

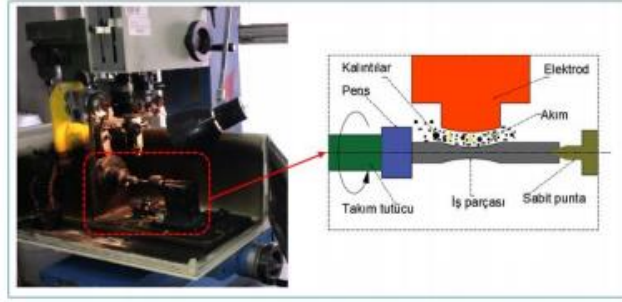
Estimation of Fatigue Life of Cold Work Tool Steel Machined by Electrical Discharge Turning

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Elektro erozyon ile tornalama (EET)/ Electrical discharge turning (EDT)
- ❖ İşleme parametrelerinin R_z , S_m ve sertlik değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi / Determining the effect of processing parameters on R_z , S_m and hardness values
- ❖ \sqrt{area} modeli ile yorulma ömrü tahmini / Fatigue life estimation with \sqrt{area} model
- ❖ Taguchi analizine göre optimum parametre tahmini / Optimal parameter estimation according to Taguchi analysis

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Elektro erozyonla tornalama yöntemiyle işlenen soğuk iş takım çeliğinin yorulma ömrünün tahmin edilmesi. / Estimating the fatigue life of cold work tool steel processed by electro erosion turning method.



Şekil. Deneysel düzeneği ve EET işlemi / (Experimental setup and EDT process)

Amaç (Aim)

Elektro erozyonla tornalama yöntemiyle işlenen soğuk iş takım çeliğinin yorulma ömrünün tahmin edilmesi. / Estimating the fatigue life of cold work tool steel processed by electro erosion turning method

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Klasik dalma elektro erozyon tezgahına tornalama sistemi tasarlanarak monte edilmesi / Turning system designed and mounted on the classical electro erosion machine

Özgünlük (Originality)

Elektro erozyon ile tornalama ve \sqrt{area} modeli uygulanarak işlenen parçaların yorulma ömrünün tahmin edilmesi / Estimating the fatigue life of machined parts by applying electro erosion turning and \sqrt{area} model

Bulgular (Findings)

Boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresindeki artışla birlikte S_m pürüzlülük parametresinde belirgin artış meydana gelmiştir. / There was a significant increase in S_m roughness parameter with the increase in discharge current, pulse on and off time.

Sonuç (Conclusion)

EET ile işlenen parçada yorulma ömrünün artmasında R_z değerinin düşük, S_m değerinin ise yüksek olmasının etkili olduğu sonucuna varılmıştır. / It was concluded that low R_z value and high S_m value were effective in increasing fatigue life of the part processed with EDT.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Elektro Erozyonla Tornalama Yöntemiyle İşlenen Soğuk İş Takım Çeliğinin Yorulma Ömrünün Tahmini

Araştırma Makalesi / Research Article

Ramazan ÇAKIROĞLU^{1*}, Mustafa GÜNAY²

¹Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Tasarım Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.03.2020 ; Kabul/Accepted : 13.04.2020)

ÖZ

Bu çalışmada, elektro erozyon ile tornalamada (EET) işleme parametrelerinin yüzey bütünlüğü ve işlenmiş parçanın yorulma ömrüne etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, iş parçasının dönmesini sağlamak amacıyla bir mekanizma tasarlanarak imal edilmiştir. EET deneyleri, AISI L2 takım çeliği üzerinde üçer farklı boşalım akımı, vuruş süresi ve bekleme süresi ile sabit devir sayısı kullanılarak yapılmıştır. Deneyler, L_9 dikey dizisine göre yapılmış olup, işleme performans çıktıları olarak R_z , S_m ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Son olarak, \sqrt{area} modeli uygulanarak işlenen parçaların yorulma ömrü tahmin edilmiş ve işleme parametrelerine göre teorik yorulma ömrünün değişimi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, boşalım akımı ve vuruş süresinin artmasıyla R_z ve S_m parametrelerinde bir artış belirlenmiştir. En düşük R_z ve S_m değerleri 3 A boşalım akımı, 3µs vuruş süresi ve 5 µs bekleme süresinde elde edilmiştir. Taguchi analizine göre optimum teorik yorulma gerilmesi A1Ton1Toff3 deney dizisinde işlenen parça için \sqrt{area} modeli ile 643.932 MPa olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektro erozyon, tornalama, yüzey pürüzlülüğü, yorulma ömrü, takım çeliği.

Estimation of Fatigue Life of Cold Work Tool Steel Machined by Electrical Discharge Turning

ABSTRACT

In this study, it was aimed to determine the effects of machining parameters on the surface integrity and fatigue life of the machined part in electrical discharge turning (EDT). Initially, a mechanism was designed and manufactured to ensure rotation of the workpiece. EDT experiments were carried out on AISI L2 tool steel using three different discharge currents, pulse on time, pulse off time and constant rotational speed. The experiments were carried out according to the L_9 orthogonal array, and R_z , S_m and hardness values were measured as processing performance outputs. Finally, the fatigue life of the machined parts was estimated by applying the \sqrt{area} model and the change of theoretical fatigue life according to the machining parameters was investigated. According to experimental results, an increase in R_z and S_m parameters was determined with increasing the discharge current and pulse on time. The lowest R_z and S_m values were obtained at 3 A discharge current, 3 µs pulse on time and 5 µs pulse off time. Based on Taguchi analysis, the optimum theoretical fatigue stress was calculated as 643.932 MPa with \sqrt{area} model for the machined workpiece in the A1Ton1Toff3 experiment sequence.

Keywords: Electro erosion, turning, surface roughness, fatigue life, tool steel

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüzey bütünlüğü, işlenen yüzeylerde oluşacak içyapı değişikliği, yüzey sertliği, geometrik süreksizlikler, oluşabilecek oksit tabakalar, mikro çatlaklar ve yüzey pürüzlülük durumu gibi imalat sonrasında meydana gelen değişiklikleri kapsamaktadır [1]. İmalat işlemi sonucunda oluşan bu faktörler, makine elemanlarının kullanımı süresince bazı beklenmedik hasar mekanizmalarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Yüzey bütünlüğünü oluşturan bu faktörlerin oluşturduğu en büyük hasar mekanizması ise yorulma olayıdır [2]. Yorulma, makine elemanlarında yüzeyde başlayıp elemanın iç kesitine doğru ilerleyen aşamalı bir hasar mekanizmasıdır. Genellikle, yeni üretilen malzemelerin yorulma davranışı endüstriyel veya üniversitelerin Ar-Ge laboratuvarlarında standart deneyler ile imalat işlemleri

öncesinde tespit edilmektedir. Bu değerler, makine parçalarının tasarımı aşamasında mukavemet analizlerinde doğrudan kullanılmakta ve çalışma şartlarında tahmini ömürlerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Ancak, yorulma olayı deneylerle tespit edilen ve bilimsel olarak kabul edilmiş akma, kopma, eğilme ve sertlik dayanımlarının altındaki değerlerde beklenmedik zamanlarda gerçekleşerek makine elemanlarının aniden plastik deformasyona uğramasına ve kullanılamaz hale gelerek çeşitli kazalara sebebiyet verebilmektedir [3,4].

Diğer yandan, işlenen parçaların yorulma mukavemeti işlenmiş malzeme, işleme yöntemi ve parametrelerine göre değişmektedir. Bu nedenle, işlenmiş bileşenlerin yüzey bütünlüğü korozyon direnci, yorulma mukavemeti ve tribolojik özellikler gibi fonksiyonel performansların belirlenmesi için çok önemlidir [5]. Bu bağlamda, özellikle yüksek alaşımlı çelikler, biyomalzemeler,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : rcakiroglu@gazi.edu.tr

karbürler, seramikler vb. işlenebilirliği zor malzemelerin işlenmesinde elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır [6,7]. EEİ yöntemi çeşitli kalıplar, küçük pompalar, motorlar, robotlar, nükleer güç reaktörlerinin parçaları, biyomedikal cihazlar gibi elektromekanik sistemlerde ve özellikle kompleks geometriye sahip parçalar, silindirik veya prizmatik mikro takımlar, mikro boyutlu kanal veya delikli parçaların imalatında uygulanmaktadır [8,9]. Aynı zamanda, yüksek ölçü hassasiyeti ve yüzey bütünlüğü gerektiren bu parçalar, temel işleme prensibi aynı kalmak koşuluyla elektro erozyon ile delme, taşlama, dalma, tel ile kesme ve tornalama gibi çeşitli uygulamaları sayesinde imal edilebilmektedir [10,11]. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak bu yöntemlerde temel işleme prensibi, bir dielektrik sıvı ortamında takım ve iş parçası arasında temas olmadan meydana gelen elektriksel kıvılcımlar tarafından üretilen ısı ile şekillendirilmez [12]. İş parçasının yüzeyine uygulanan kıvılcım, noktasal olarak erime ve buharlaşmaya neden olur ve küçük metal parçacıklarının iş parçasından kopmasını sağlar [13,14]. Elektro erozyon yöntemi ile elektriksel iletken, çok yüksek sertlik ve mukavemetli ve karmaşık geometriye sahip malzemelerin kolaylıkla işlenebilmesi bu yöntemi modern imalat yöntemleri arasında seçkin bir noktaya getirmiştir [15]. Yukarıda bahsedilen özelliklerinin yanı sıra klasik elektro erozyon tezgahlarında takım veya iş parçasına dönme hareketi kazandırılarak silindirik geometriye sahip parçaların üretimi yapılmaktadır [16,17]. Ancak, EEİ yöntemleri işlenen malzemelerin yüzey ve yüzey altı karakteristiklerini değiştirme kapasitesine sahiptir [18]. Elektro erozyon ile işlemede oluşan yüzeylerde krater şeklinde bir yapı oluşur. Bu yüzey morfolojisi, işleme esnasında takımın alt yüzeyinden rastgele boşalan kıvılcımların iş parçası yüzeyinde oluşturduğu ergitme ve buharlaşmanın bir sonucu olup, geleneksel işleme tekniklerinin hiçbirinde oluşmayan bir yapıya sahiptir. Ayrıca talaş kaldırma işlemi iletken olmayan bir sıvı ortamında gerçekleştirildiğinden her bir kıvılcımın iş parçası yüzeyine düşerek erittiği yüzeyi dielektrik sıvının hızlı soğutması ve ergitilen bölgedeki ısı transferinden dolayı yüzeylerde ısıl etkilenmiş katmanlar meydana gelmektedir [19,20]. Bu nedenle krater boyutları ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü tümüyle farklı bir yapı sergilemekle beraber iş parçası yüzeyinin tüm özellikleri işleme parametrelerine göre değişiklik göstermektedir [21]. Bu imalat tekniği ile elde edilen yüzey morfolojisi nedeniyle ilgili makine parçası değişken yüklerle karşılaştığında parçanın kullanım ömrü değişebilmektedir [22]. Dolayısıyla, imalat sürecinden sonra tespit edilen yüzey kalitesini tanımlayan pürüzlülük ve yüzey sertliği parametrelerine bağlı yorulma davranışının ve ömrünün pratik ve teorik olarak tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle yorulma ömrünün tahmin edilmesi üzerine son yıllarda yoğun bir şekilde çalışılmış ve özellikle son zamanlarda bitişik küçük kusurlar, kalıntı gerilme, çatlakların yönelimi, ortalama yük, yükleme koşulu, tane boyutu ve

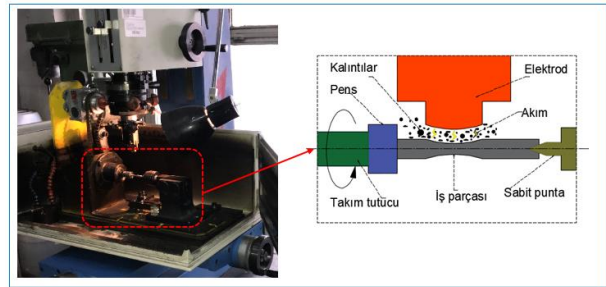
yüzey bütünlüğü üzerine araştırmalar yapılmaktadır [23-25]. Bununla birlikte, Murakami tarafından geliştirilen $\sqrt{\text{area}}$ modelini [26] uygulayarak metalik malzemelerin yorulma ömrünün iyi bir şekilde tahmin edilebildiği birçok çalışmanın yapıldığı belirlenmiştir [27-31].

Bu çalışmada, öncelikle elektro erozyon ile tornalama (EET) sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğünün işleme parametrelerine (boşalım akımı, vurum süresi, bekleme süresi) göre değişimi araştırılmıştır. Daha sonra, yüzey pürüzlülük parametrelerine bağlı teorik yorulma ömrü hesaplanmış ve en uygun işleme parametreleri belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Deney Düzenekinin Tasarımı (Design of Experiment Setup)

Bu çalışmada, klasik dalma elektro erozyon tezgâhında silindirik geometriye sahip iş parçalarını işleyebilmek amacıyla döner mekanizma tasarlanıp, tezgahın ana tablasına monte edilerek tornalama deneyleri yapılmıştır. Deney düzenekinin tezgaha monte edilmiş görünümü ve çalışma prensibi Şekil 1'de verilmiştir.

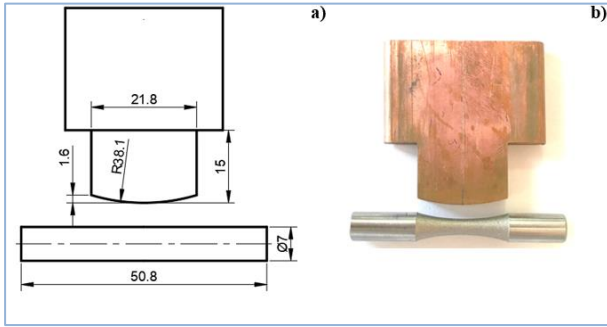


Şekil 1. Deney düzenek ve EET işlemi (Experimental setup and EDT process)

Tasarlanan sistemde elektrik motoru, dielektrik sıvının içerisinde kalmayacak şekilde yapılmıştır. Elektrik motorundan alınan dönme hareketi, dişli kayış vasıtasıyla hassas işlenmiş pensli tutucuya aktarılmıştır. İş parçasının bir ucu pense bağlanırken diğer tarafı sabit punta ile desteklenmiştir. İş parçasının paralelliği ve salgısı 0.001 mm hassasiyetli komparatör ile kontrol edilerek kalibre edilmiştir. Deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Furkan M25 model dalma elektro erozyon tezgahında yapılmıştır. Tezgah sinyal jeneratörü, 3 kVA kapasitede ve açık devre voltajı 80 V özdeş darbelerden oluşacak şekilde ayarlanmıştır. Dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmış olup 2 bar püskürtme basıncı ile takım iş parçası arasındaki boşluğa yanal püskürtme uygulaması yapılarak işleme artıklarının uzaklaştırılması sağlanmıştır.

2.2. Takım ve İş parçası Tasarımı (Tool and Workpiece Design)

Bu çalışmanın temel amaçlarından biri farklı işleme parametreleri kullanılarak elektro erozyon ile tornalama (EET) sonucunda elde edilen iş parçalarının yüzey kalitesinin yorulma ömrüne etkisinin belirlenmesidir. Yüksek aşınma direnci nedeniyle kesici takım ve silindirik geometri kalıp elemanlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan AISI L2 soğuk iş takım çeliği iş parçası olarak seçilmiştir. Bu bağlamda, iş parçası malzemesi üzerindeki olumsuzlukları gidermek ve EET'da işleme süresini kısaltmak amacıyla CNC torna tezgahı kullanılarak ön şekillendirme yapılmıştır. EET deneylerinde iş parçası geometrisi olarak ASTM E466 standardında yorulma numuneleri üretilmiştir. Deney numunelerinin işlenmesinde, takım (elektrot) olarak bakır malzeme kullanılmıştır. Bakır elektrotlar, standart yorulma numunesi ölçüleri esas alınarak tel erozyon tezgahında imal edilmiştir. İş parçası ve bakır elektrotun ölçüleri Şekil 2a'da ve tel erozyonda kesilen bakır elektrot ve EET yöntemiyle işlenmiş iş parçasının görünümü Şekil 2b'de verilmiştir.



Şekil 2. a) Takım ve iş parçası boyutları, b) Elektrot ve işlenmiş parça (a) Dimensions of tool and workpiece, b) Electrode and machined part)

2.3. Deney Tasarımı ve Ölçümler (Experimental Design and Measurements)

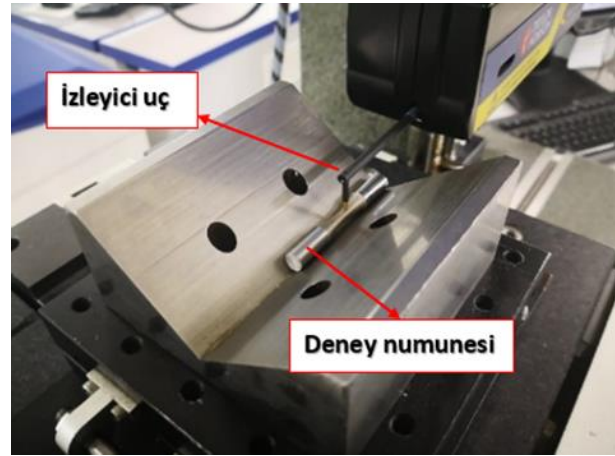
Deney tasarımından önce, farklı dönme hızlarında (20-300 dev/dak aralığında) EET ile ön deneyler gerçekleştirilmiş ve işlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Pürüzlülük değerinin literatürde bahsedildiği gibi artan dönme hızıyla arttığı, ancak Ra değerleri ölçümlerine göre %0.8'lik bir farkın olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, gerçek deneyler sırasında elektrik tüketimini azaltmak için dönme hızı 60 dev/dak olarak seçilmiştir. İşleme parametrelerinin seviyeleri, EET tezgahı üreticisi tarafından minimum Ra için önerilen değerlere göre belirlenmiştir. Bu nedenle, işleme parametreleri olarak üç farklı boşalım akımı (3, 6 ve 12 A), vuruş süresi (3, 6 ve 8 µs) ve bekleme süresi (5, 6 ve 7 µs) kullanılmıştır. EET deneyleri Çizelge 1'deki L9 dikey dizisine göre gerçekleştirilmiştir.

Rz ve Sm pürüzlülük parametreleri Talysurf PGI tip pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Pürüzlülük parametrelerinin belirlenmesinde, işlenen yüzeylerden 3'er ölçüm yapılmış ve ölçüm değerlerinin aritmetik

Çizelge 1. Deney tasarımı (Experimental design)

Deney no	Boşalım akımı (A)	Vuruş Süresi (Ton)	Bekleme süresi (Toff)
1	3	3	5
2	3	6	6
3	3	8	7
4	6	3	6
5	6	6	7
6	6	8	5
7	12	3	7
8	12	6	5
9	12	8	6

ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 3'te, numune üzerinden ölçüm alınırken, numunenin ve cihazın algılayıcı iğne ucunun konumlandırılması görülmektedir.



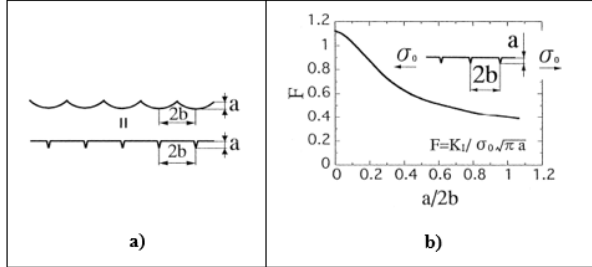
Şekil 3. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü (Surface roughness measurement)

Deney numunelerinden Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak mikro sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler, SHIMADZU marka sertlik cihazında birim alana 0.1 kg yük uygulanarak tepe açısı 136°'lik elmas piramit uç batırılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçüm numuneleri geleneksel metalografi işlemleri uygulanarak hazırlanmıştır. Deney numunelerinin her birinde 50 µm aralık ile dıştan merkeze doğru altı farklı noktadan mikro sertlik ölçümü yapılmış ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır (Çizelge 2).

2.4. Yorulma Ömrü Tahmininde $\sqrt{\text{area}}$ Modeli Uygulaması ($\sqrt{\text{area}}$ Model Application in Fatigue Life Estimation)

Mühendislik malzemelerinde yorulma ömrünü azaltan çeşitli faktörler ve kusurlar vardır. Özellikle, kusurlar kritik boyuta ulaştığında malzemelerde hasar mekanizmaları çok hızlı meydana gelir. Kritik kusur boyutunun malzemenin sertliği, yüzey kalitesi, yüzey ve yüzey altındaki mikroyapı değişimleri ve imalat sonrası farklı tabakaların oluşumu ile değiştiği bilinmektedir [1, 26]. Bu çalışmada, imalat sonrası tespit edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin kullanılması ile $\sqrt{\text{area}}$ modeli yardımıyla teorik yorulma ömrü tahmin edilmiştir. Bu modelde, Şekil 4a'da gösterildiği gibi periyodik bir pürüzlülük çentığının yorulma hasarını tetikleyen çatlak

hasarına eşdeğeri ve Şekil 4b'de ise periyodik yüzey çatlaklıkları için gerilme yoğunluğu faktörü ΔK_{th} eğrisini pürüzlülük tepe vadi profilinin derinliğine ve genişliğine bağlı olan geometrik bir düzeltme faktörü olarak tanımlanmıştır [26].



Şekil 4. a) Periyodik yüzey pürüzlülüğü çentikleri ve eş değer çatlakları, b) Periyodik yüzey çatlakları için gerilme yoğunluk faktörü (a) Periodic surface roughness notches and equivalent cracks, b) Stress density factor for periodic surface cracks)

Bu modele göre sınır gerilme faktör aralığı ΔK_{th} sadece iki pürüzlülük parametresi kullanılarak tahmin edilebilmekte olup, Eş.1'de verilmiştir [31]. Bu parametrelerden birincisi \sqrt{area} (pürüzlülük dalgasının tepe vadi arasında kalan alanın karekökü), ikincisi yüzeyin Vickers sertlik değeridir.

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (HV + 120) (\sqrt{area})^{1/3} \quad (1)$$

Dış kuvvetlerin etkisinde pürüzlülük tepe vadi bölgelerindeki gerilme yoğunluğu (gerilme yığılması) faktör aralığının maksimum değeri ΔK Eş.2 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta K = f \Delta \sigma \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (2)$$

Burada yüzey pürüzlülükleri için $f=0.65$, iç çatlaklar veya kusurlar için $f=0.5$ olarak alınmaktadır. Murakami'nin önerdiği kestirim modelinde $R=-1$ (gerilme oranı) olarak tanımlanmıştır. Yani tam değişken dinamik yorulma durumu göz önünde bulundurulmuştur. Burada \sqrt{area} ifadesi yüzeydeki profil dalgalarını ifade eden hata boyutudur. Eşitlik 3 ve 4 genel yorulma ömrü formülünde pürüzlülük tepe ve çukur değerlerinin hangi aralıkta olduğunu göstermektedir. Bu durumda:

$a/2b < 0.195$ koşulunda,

$$(area)^{1/2}/2b \cong 2.97(a/2b) - 3.51(a/2b)^2 - 9.74(a/2b)^3 \quad (3)$$

$a/2b > 0.195$ koşulunda,

$$(area)^{1/2}/2b \cong 0.38 \quad (4)$$

Yorulma sınır gerilme değeri ise " σ_w " Eş. 1 ve 2 birleştirilerek Eş. 5 ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_w = \frac{1.43 (HV+120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \left[\frac{1-R}{2} \right]^2 \quad (5)$$

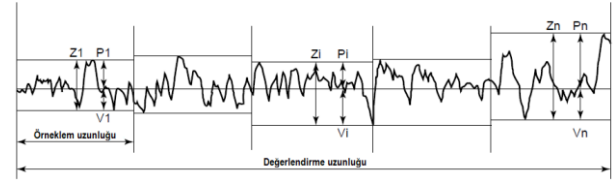
Gerilme hassasiyet faktörü ise Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır.

$$\alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4} \quad (6)$$

Murakami, geliştirdiği \sqrt{area} modelinde a ve $2b$ terimleri ile tanımlanmış olduğu yüzey pürüzlülük dalgasının genişliği ve derinliğini ifade eden parametreler olarak R_z ve S_m değerlerini kullanmıştır. Yorulma modelinde S_m pürüzlülük parametresi $2b$ terimini, R_z parametresi ise a terimini ifade etmektedir. Şekil 5'te gösterilen her örneklem uzunluğu içindeki profil tepe yüksekliği " P_i " ve çukur derinliği " V_i " nin toplamıyla " Z_i " elde edilir (Eş. 7). Değerlendirme uzunluğu içerisindeki maksimum pürüzlülük yüksekliğinin ortalaması R_z değerini vermektedir (Eş. 8).

$$Z_i = P_i + V_i \quad (7)$$

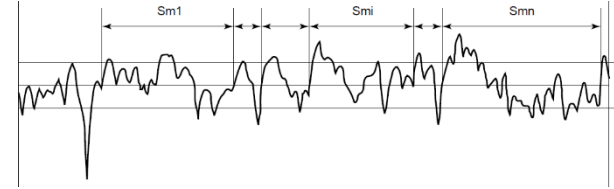
$$R_z = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n) / n \quad (8)$$



Şekil 5. Yüzey pürüzlülüğünün maksimum yüksekliği (Maximum height of surface roughness)

S_m değeri ise Şekil 6'da gösterildiği gibi değerlendirme uzunluğunda pürüzlülük profilindeki tepe noktaları arasındaki mesafelerin ortalaması olup, Eşitlik 9 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i} \quad (9)$$



Şekil 6. Pürüzlülük profilinin tepe noktaları arasındaki mesafenin ortalaması (Mean spacing of roughness profile peaks)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

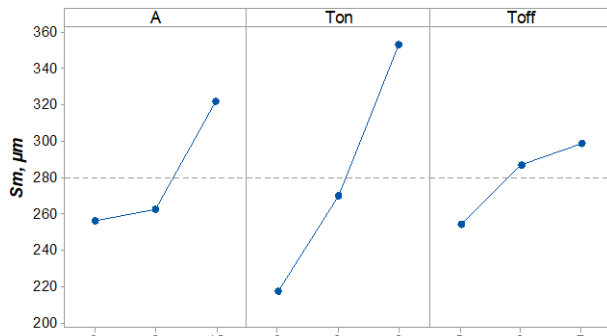
3.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughness)

Elektro erozyonla tornalama deneylerinde kullanılan farklı işleme parametrelerine bağlı olarak oluşturulan deney tasarımı ve elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri her deney numunesinin orta bölgesinden alınan üç ölçüm sonucunda aritmetik ortalama alınarak analiz edilmiştir. Aynı çizelgede, yorulma ömrü tahmininde kullanılacak maksimum pürüzlülük yüksekliğinin ortalaması (R_z), pürüzlülük profilindeki tepe noktaları arasındaki mesafelerin ortalaması (S_m) ve mikro sertlik değerleri verilmiştir. Ayrıca, işleme parametrelerine göre S_m ve R_z değerlerindeki değişimler sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'deki grafikler yardımıyla analiz edilmiştir.

Çizelge 2. Deneysel tasarım ve ölçülen pürüzlülük parametreleri ve mikro sertlik (Experimental design and measured roughness parameters and microhardness)

Deneysel no	Boşalım akımı (A)	Vurum Süresi (µs)	Bekleme süresi (µs)	Rz (µm)	Sm (µm)	Vickers sertlik (HV)
1	3	3	5	14.039	164.486	674
2	3	6	6	18.898	247.375	724
3	3	8	7	16.873	355.753	705
4	6	3	6	20.885	215.041	688
5	6	6	7	24.541	267.934	735
6	6	8	5	23.802	304.866	742
7	12	3	7	21.202	272.493	748
8	12	6	5	32.877	293.961	729
9	12	8	6	36.012	398.187	734

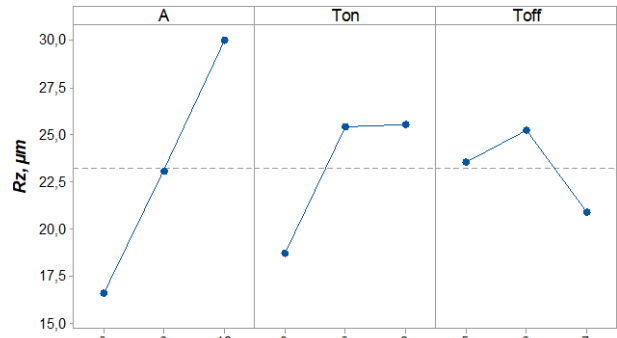
En yüksek Sm değeri $398.187 \mu m$ olarak $12 A$, $8 \mu s$ vurum süresi ve $6 \mu s$ bekleme süresi ile işlemede; en düşük Sm değeri $3 A$, $3 \mu s$ vurum süresi ve $5 \mu s$ bekleme süresinde $164.486 \mu m$ olarak ölçülmüştür (Çizelge 2). Boşalım akımına göre Sm değerlerindeki oransal değişim değerlendirildiğinde, vurum süresinin artmasıyla $3 A$ değerindeki işlemlerde Sm artışı %53.76 ile en yüksek değerde çıkmıştır. Sırasıyla $6 A$ ve $12 A$ değerlerinde ise Sm değerinin değişim oranı %29.5 ve %31.5 olarak tespit edilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, işleme parametreleri seviyelerinin artmasıyla Sm değerlerinin belirli bir oranda arttığı görülmekte olup, en etkin parametrenin vurum süresi olduğu söylenebilir. Boşalım akımı ve vurum süresindeki artış ile yüksek enerjiye sahip kıvılcımların oluşması nedeniyle iş parçası yüzeyinden daha derin ve geniş kraterlere sahip bir yüzey morfolojisinin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu durum geleneksel elektro erozyon ile işlemenin fiziksel mantığı ile uyumlu olup, Çoğun ve ark. tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir [32].



Şekil 7. Sm değerinin işleme parametrelerine göre değişimi (Change of Sm value according to processing parameters)

Şekil 8'den görüldüğü gibi, boşalım akımının artmasıyla Rz değerlerinin doğru orantılı olarak arttığı, vurum süresi ve bekleme süresinin artışı ile Rz 'nin önce artma sonra azalma şeklinde bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. En

yüksek Rz değeri $36.012 \mu m$ ile $12 A$, $8 \mu s$ vurum süresi ve $6 \mu s$ bekleme süresi işleme değerlerinde; en düşük Rz değeri $14.039 \mu m$ ile $3 A$, $3 \mu s$ vurum süresi ve $5 \mu s$ bekleme süresinde elde edilen yüzeylerden ölçülmüştür. Ayrıca, boşalım akımına göre Rz 'nin değişimi değerlendirildiğinde, vurum süresinin artmasıyla en büyük değişim $12 A$ değerinde %41.1 olarak elde edilmiştir. Sırasıyla $3 A$ ve $6 A$ değerlerinde ise Rz değerinin değişim oranları %16.8 ve %15.01 olarak hesaplanmıştır. Rz değerindeki bu değişim, boşalım akımının artmasıyla artan kıvılcım sayısı sonucunda iş parçası yüzeyinde daha fazla ısıl deformasyon meydana geldiğine işaret etmektedir. Aynı zamanda vurum süresinin artışıyla artan boşalım enerjisi nedeniyle iş parçası yüzeyinde daha uzun süreli ergitme ve buharlaşma meydana gelir [16,17]. Böylece daha derin kraterlerin olduğu yüzey morfolojisi oluşarak pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Diğer yandan, bekleme süresinin maksimum değerinde Rz değerinde bir azalma gözlenmekte olup, bu azalma bahsedilen deneyde vurum süresinin küçük olmasından kaynaklanmaktadır (Çizelge 2).



Şekil 8. Rz değerinin işleme parametrelerine göre değişimi (Change of Rz value according to processing parameters)

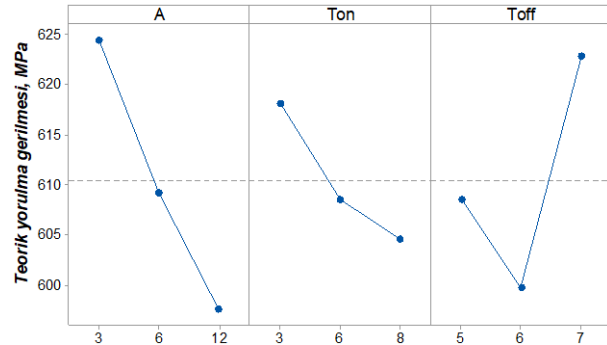
3.2. Yüzey Pürüzlülüğüne Bağlı Teorik Yorulma Ömrü Tahmini (Theoretical Fatigue Life Estimation Based on Surface Roughness)

Soğuk iş takım çeliğinin (L2) elektro erozyonla tornalama (EET) yöntemiyle işlenmesinde oluşan yüzey pürüzlülüğü (Rz), Sm ve mikrosertlik değerleri teorik yorulma ömrü modelinde kullanılarak, işlenen parçaların yorulma ömrü ile eşik gerilme şiddeti faktörü değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3'te verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne göre teorik yorulma ömrü modelinde, Rz değeri işlenen parçanın yüzeyindeki krater derinliğini, Sm değeri ise dalgalı krater yapısının tepe noktaları arasındaki mesafe yani kraterin genişliğini temsil etmektedir. Yorulma hasarının tetiklenmesinde bu iki faktör \sqrt{area} modeli için en uygun yüzey pürüzlülük parametreleri olarak değerlendirilir. Makine elemanları dış yükler etkisinde kaldığında, çatlak başlangıcının Şekil 4'te görülen pürüzlülük tepe-vadi bölgelerinden başladığı ve en yüksek gerilme yığılmasının bu bölgelerde meydana geldiği bilinmektedir [26].

Çizelge 3. Teorik yorulma gerilmesi ve ΔK_{th} değerleri
(Theoretical fatigue stress and ΔK_{th} values)

Deney No	\sqrt{area} (μm)	Teorik yorulma gerilmesi (MPa)	Eşik gerilme şiddeti faktörü
1	36.493	623.428	8.680
2	49.985	628.836	10.246
3	46.934	621.167	9.807
4	52.990	596.185	10.001
5	62.991	612.945	11.210
6	62.756	618.349	11.288
7	55.929	634.720	10.939
8	80.732	583.985	12.091
9	92.654	574.093	12.733

Murakami'nin \sqrt{area} modeli ile elde edilen teorik yorulma ömrü sonuçlarının EET yöntemi işleme parametrelerine göre değişimini analiz etmek amacıyla Minitab16 programı kullanılarak Şekil 9'daki ana etki grafiği oluşturulmuştur. Taguchi yöntemine göre optimum parametrelerin belirlenmesinde ana yaklaşım sinyal/gürültü (S/N) oranlarının kullanılmasıdır. Bu yöntemde, S/N oranının en büyük değeri ilgili parametrenin optimum seviyesine işaret etmektedir. Aynı zamanda, uygulanan Taguchi yaklaşımına göre ana etki grafiklerinin gösterdiği optimum parametre seviyeleri S/N oranları yardımıyla belirlenen parametreler ile uyumludur. Bu bağlamda, Taguchi metodolojisinin "en büyük en iyi" yaklaşımına göre ana etki grafikleri esas alınarak en büyük yorulma ömrü için optimum parametre kombinasyonu A1Ton1Toff3 (3 A, 3 μs ve 7 μs) olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. Teorik yorulma gerilmesinin ana etki grafiği (Main effect graph of theoretical fatigue stress)

Şekil 9 incelendiğinde, boşalım akımı ve vurum süresindeki artışın teorik yorulma ömrünün azalması yönünde bir etkide bulunduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, bekleme süresinin belli bir değerden sonra yorulma ömrüne pozitif bir katkı sağladığı görülmektedir. 3 A akım, 3 μs vurum süresi ve 7 μs bekleme süresi değerinde yapılan üç tekrarlı doğrulama deneyi sonucunda elde edilen yüzeylerden ölçülen pürüzlülük parametrelerinden R_z ve Sm değerlerinin ortalaması sırasıyla 9.780 μm ve 367.914 μm olarak belirlenmiştir. Doğrulama deneyleri sonucunda ölçülen pürüzlülük parametreleri kullanılarak Eş.5 ile hesaplanan teorik yorulma gerilmesi 643.932 MPa olarak tespit edilmiştir. Çizelge 3'teki teorik yorulma ömrü değerleri

dikkate alındığında, en uygun işleme kombinasyonunun doğru bir şekilde belirlendiğini göstermektedir.

Diğer yandan, optimum işleme parametreleri ile elektro erozyonla tornalama sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük parametreleri teorik yorulma ömrü ile uyumludur. Ölçülen pürüzlülük parametreleri açısından en yüksek yorulma ömrünün hesaplandığı yüzeyde, diğer işleme şartlarına göre R_z değerinin en düşük Sm değerinin ise yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 2). Buradan, EET ile işlenen parçada yorulma ömrünün artmasında R_z değerinin düşük, Sm değerinin ise yüksek olmasının etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Başka bir deyişle, yüzey morfolojisini oluşturan tepe-vadi arasındaki yüksekliğin işlenmiş parçanın yorulma ömrünü azaltan en etkin faktör olduğu anlaşılmaktadır. Mevcut işleme şartlarında, en düşük teorik yorulma gerilmesi ise 12 A akım, 8 μs vurum süresi ve 6 μs bekleme süresi değerlerindeki işlemede 574.093 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu işleme parametrelerinde elde edilen yüzey pürüzlülük parametreleri R_z ve Sm değerleri sırasıyla 36.012 μm ve 398.187 μm olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden görüldüğü gibi, en yüksek teorik yorulma ömrünün hesaplandığı doğrulama deneyindeki R_z değerinden çok fazla olduğu görülmektedir. Diğer yandan, Sm değerinde kayda değer bir değişim olmadığı belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük parametrelerindeki bu değişim, EET ile işlenmiş parçanın teorik yorulma ömrünü etkileyen temel pürüzlülük parametresinin R_z olduğunu kanıtlamaktadır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, soğuk iş takım çeliğinin (AISI L2) elektro erozyon ile tornamasında oluşan yüzey pürüzlülüğünün işleme parametrelerine göre değişimi araştırılmıştır. Ayrıca, ölçülen yüzey pürüzlülük parametrelerine (R_z ve Sm) bağlı olarak \sqrt{area} modeli ile teorik yorulma ömrü hesaplanmıştır. Deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresindeki artışla birlikte Sm pürüzlülük parametresinde belirgin artış meydana gelmiştir. Diğer yandan, boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla R_z parametresinde bir artış olurken, vurum süresinin en yüksek seviyesinde R_z 'de bir azalma görülmüştür.
- EET uygulamasında, en küçük R_z ve Sm değerleri 3 A, 3 μs vurum süresi ve 5 μs bekleme süresinde sırasıyla 14.039 μm ve 164.486 μm elde edilmiştir. En büyük R_z ve Sm değerleri ise 12 A, 8 μs vurum süresi ve 6 μs bekleme süresinde sırasıyla 36.012 μm ve 398.187 μm olarak ölçülmüştür.
- Taguchi deney tasarımı ve analizine göre 3 A akım, 3 μs vurum süresi ve 7 μs bekleme süresinin en uygun işleme parametreleri olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerde yapılan doğrulama deneyi sonucunda işlenen parçanın teorik yorulma gerilmesi 643.932 MPa olarak hesaplanmıştır.
- Yorulma ömrüne, küçük R_z değeri ve büyük Sm değeri olumlu etki etmektedir. Dolayısıyla elektro

erozyonla işlenmiş parçalarda yorulma ömrünü artırmak için işleme parametreleri belirlenirken, Rz değerini azaltan aynı zamanda Sm değerini artıran değerlerin seçilmesi önemlidir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ramazan ÇAKIROĞLU: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Mustafa GÜNAY: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Davim, J. Paulo, "Surface integrity in machining". *Springer*, Vol. London:1848828742, (2010).
- [2] Rasti, A., Sadeghi, M. H., & Farshi, S. S. "An investigation into the effect of surface integrity on the fatigue failure of AISI 4340 steel in different drilling strategies", *Engineering Failure Analysis*, 95: 66-81, (2019).
- [3] Pramanik, A., & Basak, A. K. "Effect of wire electric discharge machining (EDM) parameters on fatigue life of Ti-6Al-4V alloy", *International Journal of Fatigue*, 128, 105186, (2019).
- [4] Tekauit, İ., "Theoretical Evaluation of the Effect of Surfaces Processed with Abrasive Water Jet on Fatigue Life", *Transactions of FAMENA*, 43(2): 85-98, (2019).
- [5] Jawahir, I. S., Brinksmeier, E., M'saoubi, R., Aspinwall, D. K., Outeiro, J. C., Meyer, D., ... & Jayal, A. D. "Surface integrity in material removal processes: Recent advances", *CIRP annals*, 60(2): 603-626, (2011).
- [6] Amorim FL, Weingaertner WL, "The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel", *J Brazilian Soc Mech Sci Eng*, 29: 366-71, (2007).
- [7] Ho KH, Newman ST., "State of the art electrical discharge machining (EDM)", *Int J Mach Tools Manuf.*, (2003).
- [8] Erdem, O., Çoğun, C., Urtekin, L., Özerkan, H. B., & Uslan, İ. "Toz katkılı ve ısıtılmış dielektrik elektro erozyon ile işlemede (EEİ) delik delme performansı üzerine etkisi", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3): 531-544, (2016).
- [9] Cogun, C., Esen, Z., Genc, A., Cogun, F., & Akturk, N., "Effect of powder metallurgy Cu-B4C electrodes on workpiece surface characteristics and machining performance of electric discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(12): 2190-2203, (2016).
- [10] Gohil V, Puri YM., "Turning by electrical discharge machining: A review", *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf*, 231: 195-208, (2017).
- [11] Gupta K, Gupta MK., "Developments in nonconventional machining for sustainable production: A state-of-the-art review", *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci.*, 233: 4213-32, (2019).
- [12] Kumar, R., Roy, S., Gunjan, P., Sahoo, A., Sarkar, D. D., & Das, R. K. "Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process", *Procedia Manufacturing*, 20: 358-364, (2018).
- [13] Matorian, P., Sulaiman, S., & Ahmad, M. M. H. M., "An experimental study for optimization of electrical discharge turning (EDT) process", *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1-3): 350-356, (2008).
- [14] Pant, P., & Bharti, P. S., "Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review", *Materials Today: Proceedings*, (2019).
- [15] Yue, Xiaoming, Qi Li, and Xiaodong Yang. "Influence of thermal stress on material removal of Cf_SiC composite in EDM." *Ceramics International*, 46(6): 7998-8009, (2020).
- [16] Dwivedi AP, Choudhury SK., "Effect of Tool Rotation on MRR, TWR, and Surface Integrity of AISI-D3 Steel using the Rotary EDM Process", *Mater Manuf Process*, 31: 1844-52, (2016).
- [17] Gohil, V., & Puri, Y. M., "Statistical analysis of material removal rate and surface roughness in electrical discharge turning of titanium alloy (Ti-6Al-4V)", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232(9): 1603-1614, (2018).
- [18] Y.H. Guu, H. Hocheng, N.H. Tai, S.Y. Liu, "Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fiber reinforced carbon composites", *J. Mater. Sci.* 36(8): 2037-2043, (2001).
- [19] Patowari, P. K., Saha, P., & Mishra, P. K., "Taguchi analysis of surface modification technique using W-Cu powder metallurgy sintered tools in EDM and characterization of the deposited layer", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(5-8): 593-604, (2011).
- [20] Zhang, M., Zhang, Q., Dou, L., Liu, Q., & Dong, C., "Comparisons of single pulse discharge crater geometries in EDM and EAM", *Journal of Manufacturing Processes*, 22: 74-81, (2016).
- [21] Mazarbhuiya, R. M., Dutta, H., Debnath, K., & Rahang, M. "Surface modification of CFRP composite using reverse-EDM method", *Surfaces and Interfaces*, 100457, (2020).
- [22] Lundberg, M., Saarimäki, J., Moverare, J. J., & Calmunger, M., "Surface integrity and fatigue behaviour of electric discharged machined and milled austenitic stainless steel", *Materials Characterization*, 124: 215-222, (2017).
- [23] Schönbauer, B. M., & Mayer, H., "Effect of small defects on the fatigue strength of martensitic stainless steels", *International Journal of Fatigue*, 127: 362-375, (2019).
- [24] Aman, M., Okazaki, S., Matsunaga, H., Marquis, G. B., & Remes, H., "Interaction effect of adjacent small defects on the fatigue limit of a medium carbon steel", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(1): 130-144, (2017).

- [25] Nishimura, Y., Yanase, K., Ikeda, Y., Tanaka, Y., Miyamoto, N., Miyakawa, S., & Endo, M., “Fatigue strength of spring steel with small scratches”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(7): 1514-1528, (2018).
- [26] Murakami, Y., “Effect of surface roughness on fatigue strength”, *Metal Fatigue: Effect of Small Defects and Non Metallic Inclusions*, 28-40, (2002).
- [27] Banerjee, A., & Prusty, B. G. “Fatigue and fracture behaviour of austenitic-martensitic high carbon steel under high cycle fatigue: An experimental investigation”, *Materials Science and Engineering: A*, 749: 79-88, (2019).
- [28] Garb, C., Leitner, M., & Grün, F., “Application of \sqrt{a} area-concept to assess fatigue strength of AlSi7Cu0.5Mg casted components”, *Engineering Fracture Mechanics*, 185: 61-71, (2017).
- [29] Murakami, Y., Masuo, H., Tanaka, Y., & Nakatani, M., “Defect Analysis for Additively Manufactured Materials in Fatigue from the Viewpoint of Quality Control and Statistics of Extremes”, *Procedia Structural Integrity*, 19: 113-122, (2019).
- [30] Zhang, J., & Fatemi, A., “Surface roughness effect on multiaxial fatigue behavior of additive manufactured metals and its modeling”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103, 102260, (2019).
- [31] Özerkan, H. B., “Theoretical investigation of the effect of surface roughness on the fatigue life of austenitic stainless steels”, *Materials Today: Proceedings*, 11: 417-422, (2019).
- [32] Çoğun, C., Kocabaş, B., & Özgedik, A., “Elektro Erozyon ile İşlemede (EEİ) İşparçası Yüzey Pürüzlülük Profilinin Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(1): 97-106, (2004).