

Elektrokimyasal Jet İşleme (EJİ) Parametrelerinin İşlenen Kanal Geometrilerine Etkisi

Emre AYHAN^{*a}, Mustafa YURDAKUL^b, Can ÇOĞUN^c

^{a*} Gazi Üniversitesi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 06560, Ankara, Türkiye

^b Gazi Üniversitesi Üniversitesi Makina Mühendisliği, 06570, Ankara, Türkiye

^c Çankaya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği, 06790, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 17.05.2021
Kabul: 22.10.2021

Anahtar Kelimeler:

Elektrokimyasal
işleme,
Elektrokimyasal jet
işleme, Alışılmamış
imal usulleri

ÖZ

Bu çalışmada alışılmamış imal usullerinden elektrokimyasal jet işleme yöntemi (EJİ) kullanılarak YHÇ malzeme üzerine kanallar oluşturularak, işleme parametrelerinin kanal kesit geometrisine etkileri incelenmiştir. Çalışmada, işleme parametreleri olarak takım ilerleme hızı, işleme gerilimi, elektrolit sıvı basıncı ve elektrolit tuz derişimi ele alınmıştır. Her deneye ait kanal kesit geometrileri için profil tamlık değerleri, ortalama kanal derinliği ve genel uyum değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan genel uyum değerlerinde en iyi sonuçların işleme geriliminin 20 V olduğu deneylerde elde edildiği görülmüştür. Takım ilerleme hızının 0,5 mm/dak olduğu deneylerde genel uyum değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.04>

The Effect of Electrochemical Jet Machining (EJI) Parameters on Processed Channel Geometries

ARTICLE INFO

Received: 17.05.2021
Accepted: 22.10.2021

Keywords:

Electrochemical
machining,
Electrochemical jet
machining, Non-
traditional
manufacturing
methods

ABSTRACT

In this study, channels were formed on the HSS material by using the electrochemical jet machining method, which is one of the unconventional manufacturing methods. Then, the effect of machining parameters on the channel cross section geometry was investigated. In the study, experiments were carried out in which the effects of electrochemical machining parameters such as tool feed rate, machining voltage, electrolyte pressure and electrolyte concentration were observed. Profile precision values, average channel depth values and overall fit values were calculated for the channel section geometries of each experiment. When the overall fit value were examined, the results of the processing parameters were obtained. Based on the overall fit values obtained, it was seen that the best results were obtained at 20 V for the processing voltage. In the experiments where the tool feed rate was 0.5 mm/min, it was seen that the overall fit values were the higher.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.04>

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan elektrokimyasal işleme yöntemi, geleneksel imalat yöntemleriyle işlenebilmesi zor olan iletken

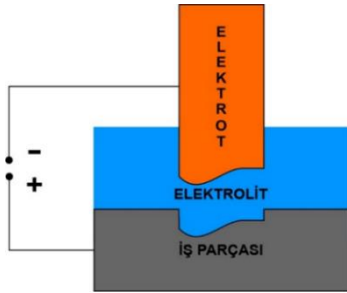
malzemelerin sertlik, dayanım ve kırılma gibi mekanik özelliklerinden etkilenmeden işlenebilmesine imkân sağlamaktadır [1]. Ayrıca düşük enerji tüketimi, iyi yüzey kalitesi ve hassasiyet sağlaması yöntemin öne çıkan yönleri olarak

*Sorumlu yazar: ayhanemre@gazi.edu.tr

To cite this article: E. Ayhan, M. Yurdakul and C. Çoğun "The Effect of Electrochemical Jet Machining (EJI) Parameters on Processed Channel Geometries", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 213-221, 2021.
doi:10.30855/gmbd.2021.03.04

sayılabilir [2]. Özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayisinin ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilen üstün özelliklere sahip malzemelerin işlenmesinde elektrokimyasal işleme yöntemi ön plana çıkmaktadır.

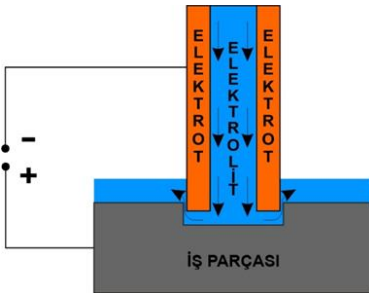
Elektrokimyasal işleme yöntemi Faraday kanunu ve elektroliz prensibine dayanarak kontrollü bir şekilde iş parçası üzerinden elektronların uzaklaştırılmasıyla gerçekleşmektedir [3]. Elektrokimyasal işleme mekanizması, doğru akım güç kaynağının pozitif kutbuna iş parçasının (anot), negatif kutbuna ise takımın (katot) bağlanması ve takım ile iş parçası arasındaki boşluğun elektrolit sıvıyla doldurulmasıyla sağlanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Elektrokimyasal işleme yöntemi
(Electrochemical machining)

Literatürde, yönteminin öne sürüldüğü tarihten günümüze elektrokimyasal işleme üzerine çok sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmaları iki grup altında toplamak mümkündür. Birinci grup, yöntemi geliştirmek adına ortaya çıkan yeni ve hibrit yöntemleri konu alan makalelerdir. İkincisi ise yöntemin kullanımı sonucunda uygun işleme parametrelerini tespit etmeyi hedefleyen makalelerdir.

Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan yöntemlerden biri elektrokimyasal jet işleme (EJİ) yöntemidir [4]. EJİ yönteminin, elektrokimyasal işleme yönteminden farkı elektrolitin elektrot (takım) içerisinde basınç ile işleme ortamına gönderilmesidir (Şekil 2). Böylece, iş parçasının yalnızca basınçlı elektrolitle temas halinde olan yüzeylerinde elektrokimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu durum bölgesel ve kontrollü malzeme kaldırımı sağlar [5].



Şekil 2. EJİ yöntemi (EJM method)

Konu ile ilgili yapılmış çalışmalardan birinde, EJİ yöntemi kullanılarak kanal açılmış ve işleme geriliminin sürekli veya darbeleri olarak uygulanmasının malzeme kaldırmaya, hassasiyete ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi incelenmiştir [6]. Başka bir çalışmada elektrolit püskürtme başlığının iş parçasına göre farklı açılarla konumlandırılmasının kanal geometrisine olan etkisi incelenmiş ve elektrolitin yüzeye çarpma açısının etkili bir parametre olduğu ifade edilmiştir [7]. Bir diğer çalışmada, eş zamanlı olarak çoklu kanalların işlenebilmesi ve işleme yapılmayacak bölgelerdeki korozyonun önlenmesi için yapılan yalıtımın etkisi incelenmiştir [8]. Başka bir çalışmada, paslanmaz çelik numune üzerine derin kanalların elde edilmesine yönelik deneyler ile deneylerin çoklu fizik simülasyonu yapılarak optimum parametreler tespit edilmiştir [9]. Başka bir çalışmada, takım uç geometrisinde yapılan değişikliklerin kanal geometrisine olan etkisi incelenmiştir [10]. Bir diğer çalışmada ise, elektrokimyasal jet işleme yönteminde farklı elektrolit akışı yönlendirmelerinin kanal geometrisine olan etkisi incelenmiştir [11]. Literatür incelendiğinde EJİ yöntemi kullanılarak kanal açılması ve açılan kanalın geometrisinin incelenmesi konularının gelişmeye açık olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada EJİ yöntemi kullanılarak YHÇ malzeme üzerine kanal açılmış ve elektrokimyasal işleme parametrelerinin kanal kesit geometrisi üzerine olan etkisi incelenmiştir.

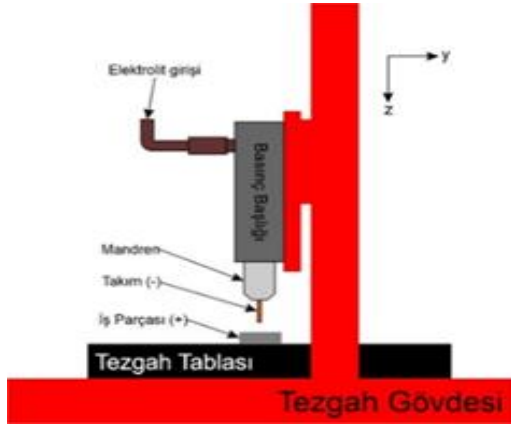
2. EJİ TEZGAHI (EJM MACHINE)

Deneylerde bu çalışma kapsamında tasarlanarak üretilen prototip masaüstü tezgah kullanılmıştır (Şekil 3). Tezgah, ana gövde, kontrol birimi, elektrolit basınçlandırma ünitesi ve doğru akım güç kaynağından meydana gelmektedir.



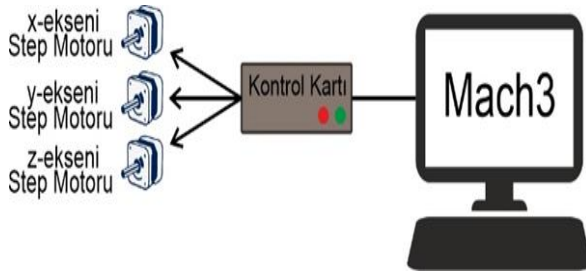
Şekil 3. EJİ tezgahı (EJM machine)

Tezgha ana gövdesi x, y, z eksenlerinde hareketi sağlayan motorlar, vidalı miller ve basınç başlığı kısımlarından oluşmaktadır. Step motorların ucuna bağlanmış vidalı miller sayesinde takımın hareketi sağlanmaktadır. Basınç başlığının giriş kısmına pompadan gelen elektrolit hortumu, çıkış kısmına ise tüp takım (elektrot) mandren aracılığıyla bağlanmıştır. Bu sayede yüksek basınçlı elektrolit işleme ortamına püskürtülmektedir (Şekil 4).



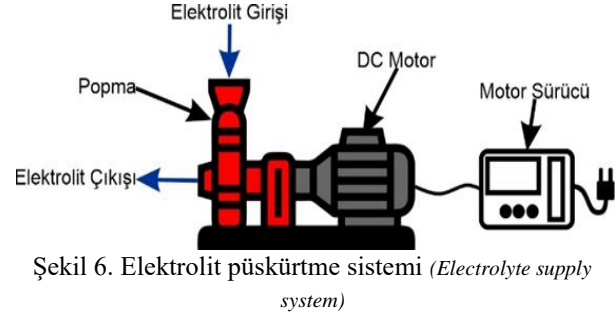
Şekil 4. Tezgha ana gövdesi şeması (Main body schema of the machine)

Tezghanın kontrol birimi 3 adet step motor, Mach3 kontrol kartı ve bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 5). Bilgisayarda bulunan kontrol yazılımı aracılığıyla kontrol kartı üzerinden takımın pozisyon kontrolü sağlanmaktadır. Kontrol biriminde işleme ortamındaki anlık akım ve gerilim değerlerini bilgisayarda kayıt altına alınmasını sağlayan sensör ve mikroişlemci bulunmaktadır.



Şekil 5. Tezgha kontrol sistemi şeması (Control system schema of the machine)

Elektrolit püskürtme sistemi; pompa, elektrik motoru ve elektrik motor sürücüsünden oluşmaktadır (Şekil 6). Motor sürücüsü ile pompayı çalıştıran motorun devri kontrol edilmektedir. Motor sürücüsü pompa çıkışında stabil elektrolit basıncı elde edilmesini sağlamaktadır. İşleme ortamına verilen elektrolit basıncı pompa çıkışındaki manometre ile tespit edilmektedir.



Şekil 6. Elektrolit püskürtme sistemi (Electrolyte supply system)

Elektrokimyasal işleme tezghasında 0 – 30 V gerilim aralığında ayarlanabilen doğru akım güç kaynağı mevcuttur. Güç kaynağının teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. DA güç kaynağının teknik özellikleri (Specifications of the DC power supply)

Gerilim	0-30 V
Akım	0-5 A
Gerilim kararlılığı	$\leq 0,01 + 2 \text{ mV}$
Yük stabilitesi	$\leq 0,01 + 2 \text{ mV}$

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

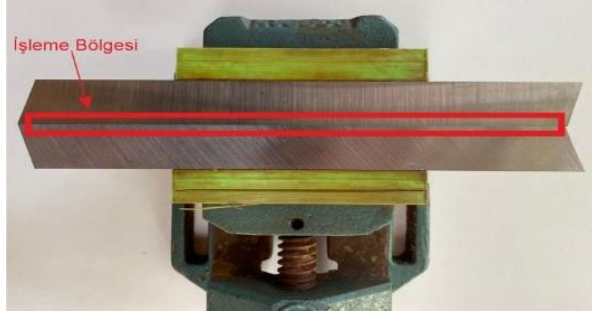
Yapılan deneysel çalışmanın amacı iş parçasına Eİ yöntemi ile kanalların açılması ve oluşturulan kanalların kesitine işleme parametrelerinin etkisini incelemektir. Elektrokimyasal işleme yönteminin geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan malzemelerin şekillendirilmesinde başarılı olduğu bilinmektedir [3]. Bu nedenle, deney numunesi olarak yüksek dayanıma sahip olması, takım malzemesi olarak yaygın kullanılması ve geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesinin zor ve maliyetli olması sebebiyle HSS olarak bilinen yüksek hız çeliği (YHÇ) seçilmiştir. Deney numunesinin kompozisyonu Tablo 2’de verilmiştir. Deney numunesi 20 mm eninde, 200 mm boyunda ve 4 mm kalınlığındadır.

Tablo 2. YHÇ numunenin bileşenleri (%) (Components of HSS sample (%))

C	Si	Cr	W	Mo	V	Co
1,08	0,45	3,85	1,50	9,50	1,20	8,00

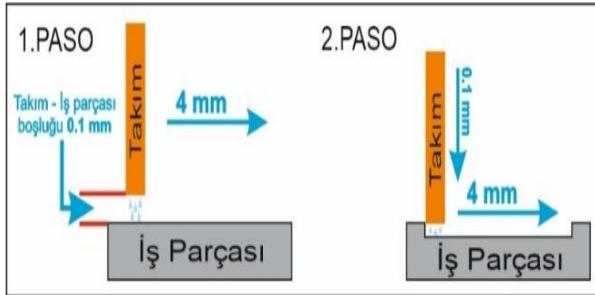
YHÇ numune üzerine açılacak kanalların kesit geometrilerini inceleyebilmek için, numunenin deneyler sonunda hassas bir şekilde kesilmesi gerekeceği öngörüldüğü için, iki farklı deney numunesi mengene yardımıyla birbirine bitleştirilmiş ve deneyler bu iki numunenin ayırma yüzeyinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Daha sonra numuneler birbirinden ayrılarak kesme işlemine ihtiyaç

duyulmadan kanalların kesit görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 7. Mengenede bir araya getirilmiş deney numunelerinin görüntüsü (View of test specimens brought together in a vise)

Deneylerde 1,5 mm dış çapa sahip olan pirinç malzemeden imal edilmiş tüp elektrotlar takım olarak kullanılmıştır. Kanal geometrisini oluşturabilmek için takım hareketi G kodları ile oluşturulmuş, iki pasodan oluşan bir takım yolu tercih edilmiştir. 1. pasoda takım y-ekseninde 4 mm hareket etmekte, ardından 50 mm/dak ilerleme hızı ile başlangıç noktasına geri dönmektedir (Şekil 8). 2. pasoda ise takım numuneye (z-ekseninde) 0.1 mm'lik bir dalma gerçekleştirdikten sonra y-ekseninde 4 mm ilerleyerek işleme çevrimini tamamlamaktadır. Oluşturulan G kodu ile bu işlem 3 farklı ilerleme hızı aynı numune üzerinde 5 mm aralılarla tekrar edilmektedir.



Şekil 8. Takım yolu şeması (Shema of the tool path)

Deneylerde işleme gerilimi, elektrolit basıncı, elektrolit derişimi ve takım ilerleme hızı parametrelerinin kanal kesit geometrisine etkisini incelemek için her parametre için üç farklı değer belirlenmiştir (Tablo 3 ve 4).

Tablo 3. Deney parametreleri (Experiment parameters)

İşleme Gerilimi (V)	15, 20, 25
Elektrolit Basıncı (Bar)	30, 40, 50
Elektrolit Derişimi (g/L)	50, 100, 150
Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	0,5, 0,75, 1
Elektrolit Bileşenleri	Su ve NaCl
Takım-İş Parçası Boşluğu (mm)	0,1

Tablo 4. Deney tasarımı (Experiment design)

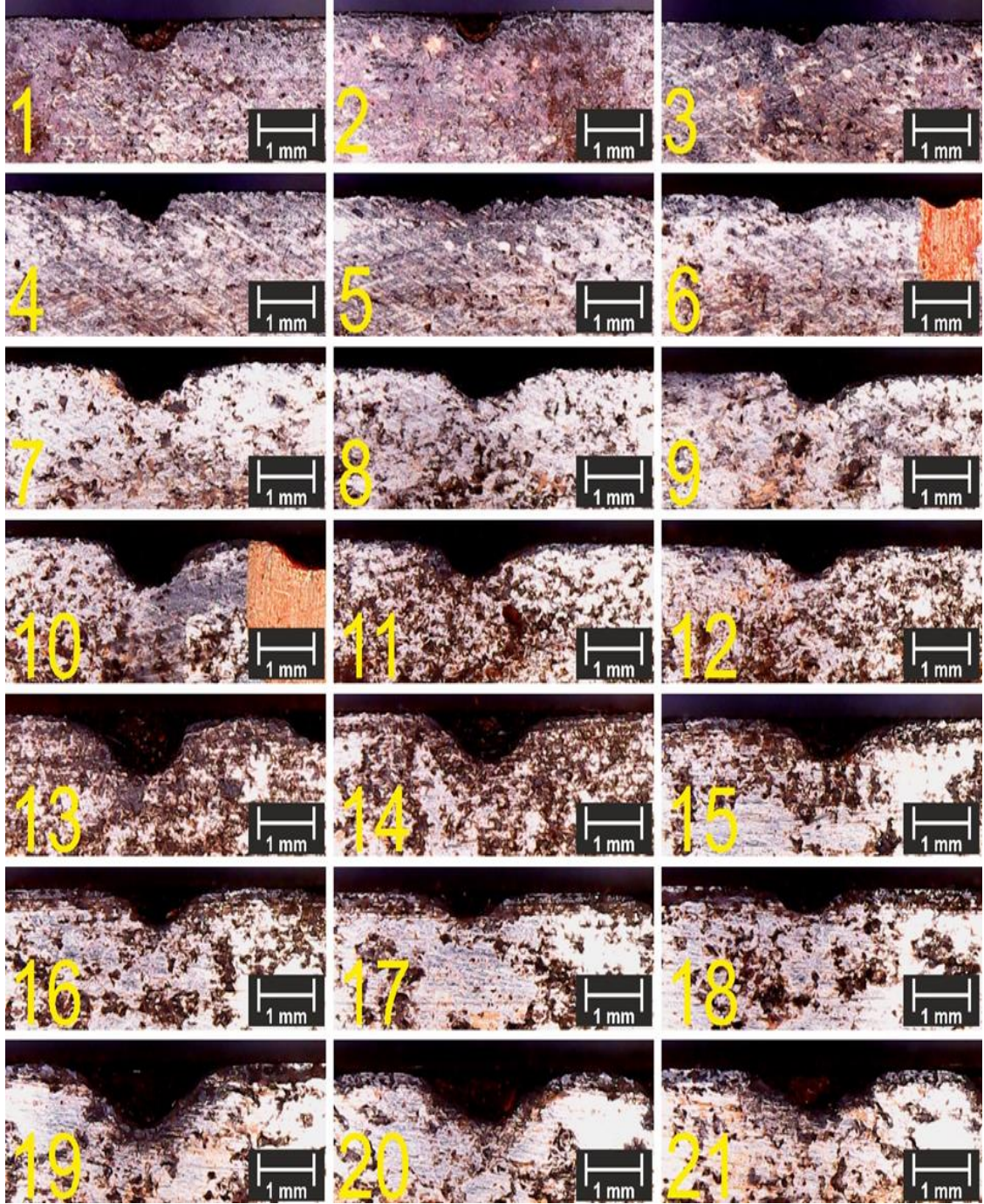
Deney Numarası	Deney Parametreleri			
	İşleme Gerilimi (Volt)	Elektrolit Basıncı (Bar)	Elektrolit Derişimi (g/L)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)
1	20	40	100	0,50
2	20	40	100	0,75
3	20	40	100	1,00
4	15	40	100	0,50
5	15	40	100	0,75
6	15	40	100	1,00
7	25	40	100	0,50
8	25	40	100	0,75
9	25	40	100	1,00
10	20	30	100	0,50
11	20	30	100	0,75
12	20	30	100	1,00
13	20	50	100	0,50
14	20	50	100	0,75
15	20	50	100	1,00
16	20	40	50	0,50
17	20	40	50	0,75
18	20	40	50	1,00
19	20	40	150	0,50
20	20	40	150	0,75
21	20	40	150	1,00

4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Yapılan deneyler sonrası kanalların üstten görüntüsü Şekil 9'da verilmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra mengene ile bir araya getirilmiş olan numuneler birbirinden ayrılmıştır. Çalışmada, oluşan kanal kesit geometrilerinin mikroskop fotoğrafları Şekil 10'da sunulmuştur.



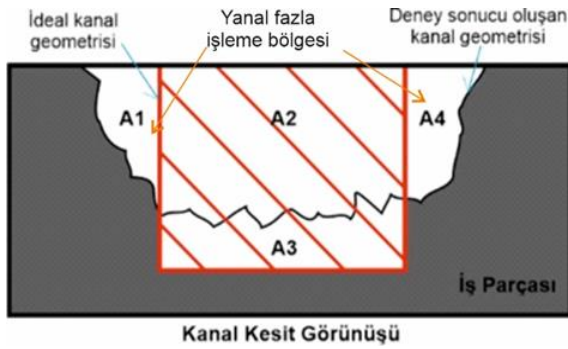
Şekil 9. Deney numunesinin görünüşü (View of test specimens)



Şekil 10. Kanalların kesit görünüşü (Section view of the channels)

Bu çalışmada, işleme parametrelerinin işlenmiş kanal geometrisine etkisini somut olarak ortaya koymak için profil tamlık (PT) yaklaşımı kullanılmıştır [12]. Bu yaklaşımda PT değeri deney sonucunda elde edilen kesit alanında teorik oluşması gereken kanal kesit alanına göre alan sapmalarının (A1, A3 ve A4 alanları) teorik kesit alanına ($A_{elektrot}$) bölünmesiyle bulunmaktadır (Eşitlik 1). A1 ve A4 alanları yanal fazla işleme bölgelerini ifade etmektedir (Şekil 11).

$$PT = \frac{A_{elektrot} - (A_1 + A_3 + A_4)}{A_{elektrot}}, A_{elektrot} = A_2 + A_3 \quad (1)$$

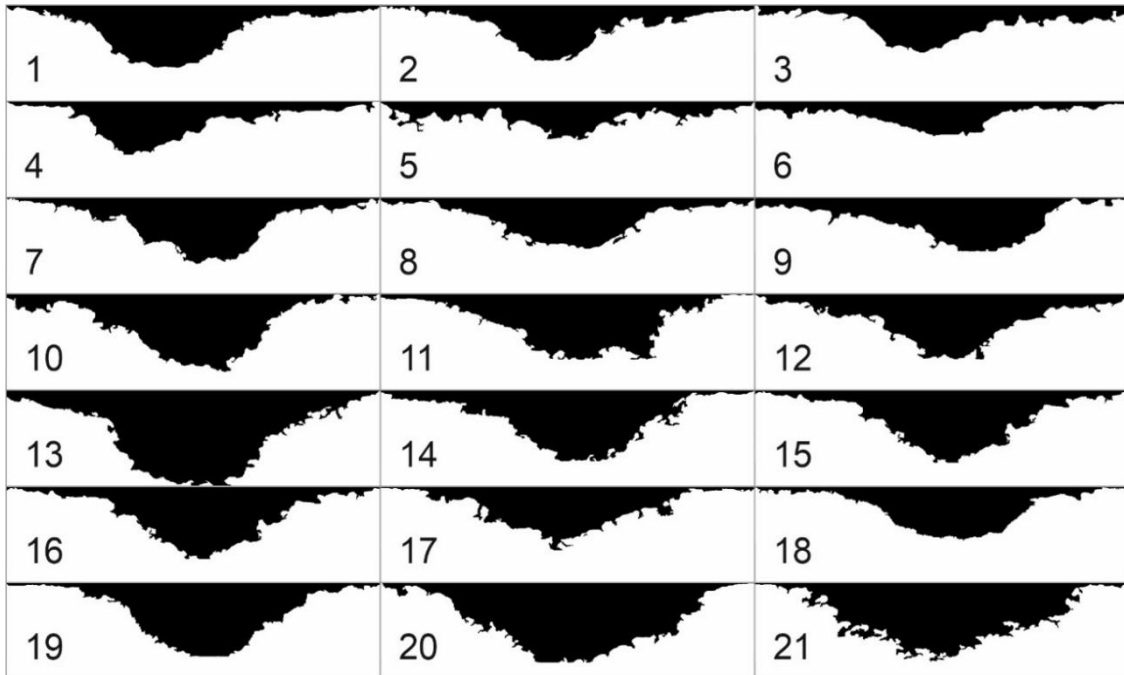


Şekil 11. Profil tamlık hesabı (Calculation of the profile precision)

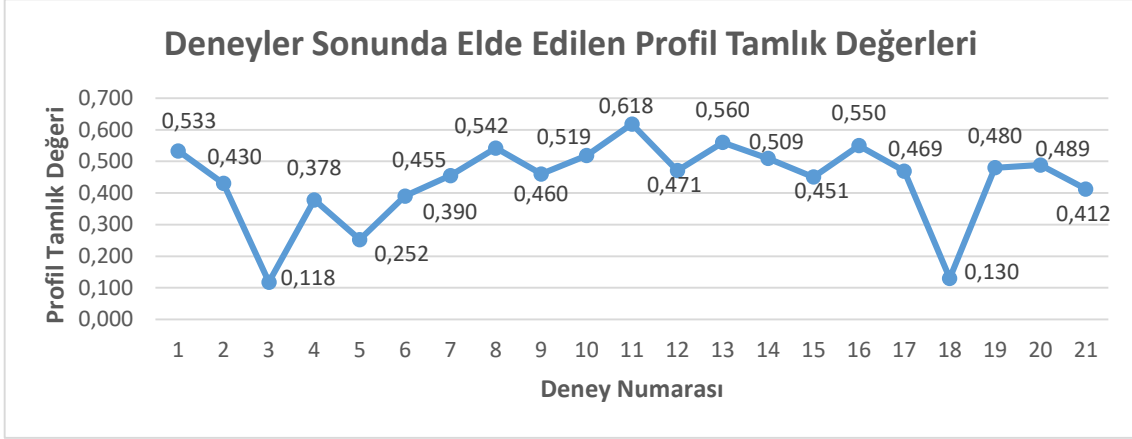
PT değerini hesaplamak için mikroskop görüntüleri görüntü işleme editörü olarak çalışan ImageJ programına aktarılmıştır. ImageJ yazılımı piksel boyutlarından alan hesabı yapılmasına ve aynı zamanda yüzey geometrisinin oluşturulmasına imkân vermektedir (Şekil 12). Ayrıca, ImageJ programı

aracılığıyla kanalların kesit alanları hesaplanmış ve bu değerler kullanılarak PT değerleri elde edilmiştir.

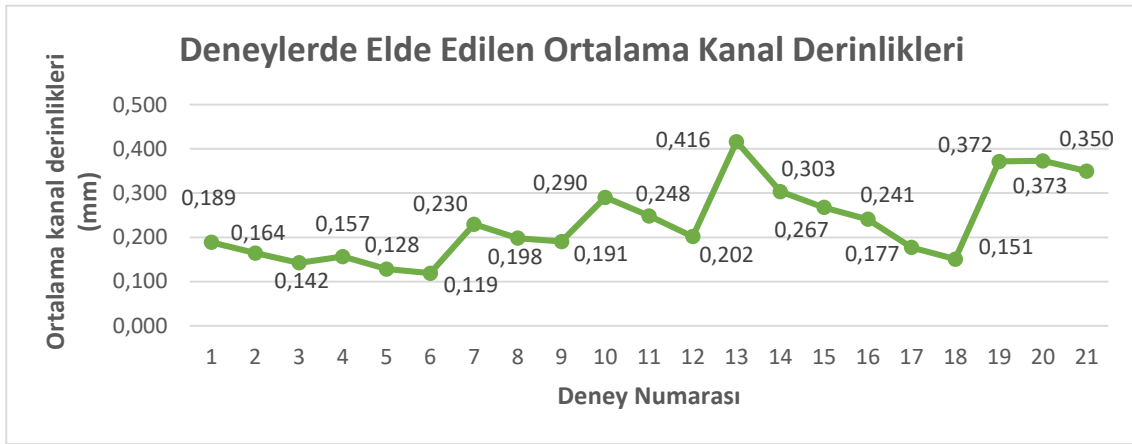
Şekil 13'te verilen grafikte en yüksek PT değerinin (0,618) 11 numaralı deneyde elde edildiği görülmektedir. Takip eden büyük PT değerleri (0,56 ve 0,55) ise 13 ve 16 numaralı deneylere aittir. Sonuç olarak yüksek PT değerlerinin 20 V'luk işleme gerilimi parametresinde elde edildiği tespit edilmiştir. En düşük PT değerlerinin ise 3 ve 18 numaralı deneylerde (0,118 ve 0,13) elde edildiği görülmektedir. Bu PT değerleri yüksek takım ilerleme hızı değerinde (1,0 mm/dak) elde edilmiştir. Bu çalışmada PT yaklaşımı tek başına kanal geometrileri hakkında tam bir bilgi veremeyeceği için bunun yanında kanal görüntülerinden kanal derinlikleri de (KD) hesaplanmıştır (Şekil 14). En yüksek ortalama KD 0,416 mm ile 13 numaralı deneyde elde edilmiştir. 13 numaralı deneyde 0,560 değeri ile en yüksek ikinci PT değeri elde edilmişti. Buna karşın, en yüksek PT değerinin elde edildiği 11 numaralı deneyde ait ortalama KD değeri 0,290 mm idi. Buradan da anlaşılacağı üzere, en yüksek PT ve KD değerleri aynı işleme koşulunda elde edilmemiştir. Bu durumda, "en iyi işlenmiş kanal geometrisi" kararı işleme sonucunda elde edilecek kanal kesitinin alan uyumluluğunun mu (Yani PT değeri) yoksa kanalın derinliğinin mi önemli olduğu ile ilgilidir. Bu nedenle, işleme parametrelerinin PT ve KD üzerine olan etkisini bir arada ortaya koymak için Genel Uyum (GU) değeri tanımı yapılmıştır. GU değeri Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 12. ImageJ programında oluşturulan kanal kesit geometrileri (Channel section geometries created in ImageJ program)



Şekil 13. PT değerleri (PT values)



Şekil 14. Ortalama KD değerleri (Average KD values)

$$GU = 0,5PT + 0,5(KD/NK) \quad (2)$$

NK: Numune kalınlığı (mm)

Bu alışmada, GU değerinin hesaplanmasında PT ve KD değerlerinin etkisinin eşit önemde olduğu kabul edilmiştir. Bu sebeple önem katsayıları eşit alınmıştır. KD veya PT değerinin daha kritik olduğu

uygulamalarda önem faktörleri farklı katsayılarla tanımlanabilir. Elde edilen kanal geometrileri için GU değerleri hesaplanmış ve Tablo 5'te sunulmuştur.

Hesaplanan GU değerlerine bakıldığında en yüksek değerlerin 11 ve 13 numaralı deneylerde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca en yüksek GU

Tablo 5. GU değerleri (GU values)

Deney Numarası	PT	KD (mm)	GU
1	0,533	0,189	0,290
2	0,430	0,164	0,236
3	0,118	0,142	0,077
4	0,378	0,157	0,209
5	0,252	0,128	0,142
6	0,390	0,119	0,210
7	0,455	0,230	0,256
8	0,542	0,198	0,296
9	0,460	0,191	0,254
10	0,519	0,290	0,296
11	0,618	0,248	0,340
12	0,471	0,202	0,261
13	0,560	0,416	0,332
14	0,509	0,303	0,293
15	0,451	0,267	0,259
16	0,550	0,241	0,305
17	0,469	0,177	0,257
18	0,130	0,151	0,084
19	0,480	0,372	0,286
20	0,489	0,373	0,291
21	0,412	0,350	0,250

değerlerinin elde edildiği 14 deneyin ortak parametresinin 20 V'luk işleme gerilimidir. Ayrıca, 0,5 mm/dak'lık ilerleme hızında işlenen kanal geometrilerinin GU değerlerinin daha yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Elde edilen kanal geometrileri literatür çalışmaları ile benzerlik göstermektedir. Bununla beraber EJİ yöntemine etki eden parametre sayısının fazla olması ve yapılan çalışmalarda direkt olarak PT ve GU değerleri yaklaşımının kullanılmamış olması deney sonuçlarının literatür ile nicel olarak kıyaslanmasına imkân vermemektedir. Ancak, literatür çalışmalarının birçoğunda ortaya çıkan yanal fazla işleme problemiyle bu çalışmada da karşılaşmıştır. Yanal fazla işleme numune yüzeyinde elektrolit birikmesinden kaynaklanmaktadır. Yanal fazla işlemenin oluşması hesaplanan PT ve GU değerlerini azaltmaktadır.

5. DEĞERLENDİRME (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada EJİ yöntemiyle geleneksel yöntemlerle işlenebilmesi zor olan YHÇ malzeme üzerine kanallar açılmış ve işleme parametrelerinin kanal kesit geometrisine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Çalışmada, işleme parametrelerinin profil tamlık (PT) değeri üzerindeki etkisi hakkında kesin bir yargıya varılamasa da PT yaklaşımının oluşan kanal geometrisi ile teorik kanal geometrisi alanları arasında karşılaştırma için oldukça uygun olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, İlerleme hızının artışıyla ve işleme geriliminin düşüşüyle ortalama kanal derinliğinin (KD) azaldığı tespit edilmiştir.
- Hesaplanan genel uyum (GU) değerleri incelendiğinde, 20 V'luk işleme geriliminde oluşturulan kanalların en yüksek değere sahip olduğu tespit görülmüştür. Ayrıca, düşük takım ilerleme hızı kullanılarak oluşturulan kanalların GU değerlerinin yüksek olduğu anlaşılmıştır.
- İleride yapılacak çalışmalarda, deney sayısının artırılmasının ve deney parametrelerinin elde edilen bulgular ışığında yeniden belirlenmesinin gerektiği düşünülmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Özerkan ve C. Coğun, "Döner Tüp Takım Kullanarak Elektrokimyasal Delme Yönteminin Deneysel İncelenmesi Ve Geliştirilmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 28, sayı. 4, ss. 885-895, Mar. 2014.
- [2] S. Önel, "Otomatik Kontrollü Elektrokimyasal İşlemenin (Eki) İncelenmesi Ve Uygulaması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 29, sayı. 1, ss. 1-8, Mar. 2014. doi:10.17341/gummfd.41007
- [3] H. Demirtaş, O. Yılmaz ve B. Kamber, "Makro ve Mikro Boyutlarda Üretim Yapabilen Elektrokimyasal İşleme Tezgahında İşlem Parametreleri Etkilerinin İncelenmesi", *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, c. 15, sayı. 1, ss 11-18, May. 2017.
- [4] R. Ippolito, S. Tornincasa, G. Capello ve G.F. Micheletti, "Electron-Jet Drilling — Basic Involved Phenomena", *CIRP Annals*, vol. 30, no. 1, pp 87-90, 1981. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60901-9
- [5] Kendall T., Bartolo, P., Gillen, D. ve diğerleri, "A review of physical experimental research in jet electrochemical machining", *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 105, pp 651-667, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04099-x
- [6] W. Vanderauwera, M. Vanloffelt, R. Perez, B. Lauwers, "Investigation on the Performance of Macro Electrochemical Milling", *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 356-361, 2013. doi: 10.1016/j.procir.2013.03.025
- [7] J. Mitchell-Smith, A. Speidel, A.T. Clare, "Advancing electrochemical jet methods through manipulation of the angle of address", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 255, pp. 364-372, 2018. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.12.026
- [8] Jinxing Luo, Xiaolong Fang, Di Zhu, "Jet electrochemical machining of multi-grooves by using tube electrodes in a row", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 283, no. 116705, 2020. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116705

[9] C. Zhanga, J. Yaob, C. Zhangc, X. Chena, J. Liua, Y. Zhanga, “Electrochemical milling of narrow grooves with high aspect ratio using a tube electrode”, *Journal of Materials Processing Tech.* vol. 282, no. 116695, 2020. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116695

[10] J. Mitchell-Smith, A. Speidel, J. Gaskell, A. T. Clare, “Energy distribution modulation by mechanical design for electrochemical jet processing techniques”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 122, pp. 32-46, 2017. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.05.005

[11] X. Wanga, N. Qua, X. Fang, “Reducing stray corrosion in jet electrochemical milling by adjusting the jet shape”, *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 264, pp. 240-248, 2019. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.09.017

[12] C. oğun, T.C. Deniz, G. Küçüktürk, “A geometrical approach for reduction of tool shape degeneration in electric discharge machining (EDM)”, *Machining Science and Technology: An International Journal*, vol. 16, pp. 445-458, 2012. doi: 10.1080/10910344.2012.699369

This is an open access article under the CC-BY license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

