

## EDM Hızlı Delik Delme Parametrelerinin Kerf ve İşlem Süresine Etkileri

Ferhat CERİTBİNMEZ<sup>1\*</sup>

### Öz

Bu çalışmada konvansiyonel yöntemlerle delinmesi maliyetli ve zor olan yüksek sertlikteki (60-62HRC) X153CrMoV12 soğuk iş takım çeliğine elektro erozyonla hızlı delik delme tezgahında 3 mm pirinç elektrotlar kullanılarak delikler delinmiştir. Bu kapsamda üç farklı amper (5, 6, 7 A), üç farklı voltaj (1, 2, 3 V), altı farklı ark süresi (18, 22, 24, 26, 28, 29 µs), dört farklı bekleme süresi (3, 6, 8, 10 µs) parametrelerinin işleme süresi ve delinen deliklerde oluşan kerf üzerine etkileri makro analizler ve analitik ölçümlerle tespit edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde kerf açısına ve işleme zamanına etkisi en yüksek parametrenin işleme akımı olduğu tespit edilmiştir. Akım, voltaj ve ark süresinin artması işleme süresini azaltırken, bekleme süresinin artmasıyla işleme süresi artmıştır. Genel olarak elektrot malzemesinin içerisinden ve dışarısından dielektrik sıvı püskürtülmesiyle aşınan partiküllerin ortamdaki tahliye edilmesine bağlı olarak işleme parametrelerinin kerf üzerinde doğrusal olmayan bir etki yaptığı tespit edilmiştir. En düşük kerf açısı ve en yüksek işleme süresine maksimum akım değeri 7A, 3V voltaj, 29 µs ark süresi ve 3 µs bekleme süresi çalışma parametreleri kullanılarak ulaşılmıştır. Ayrıca delik giriş çapında 170 µm, çıkış çapında ise 220 µm boyutsal tamlık elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hızlı Delik Delme, X153CrMoV12, Kerf, İşleme Süresi.

## Effects of EDM Fast Drilling Parameters on Kerf and Process Time

### Abstract

In this study, holes were drilled on X153CrMoV12 cold work tool steel with high hardness (60-62HRC), which is difficult and costly to drill with conventional methods, using 3 mm brass electrodes on a fast hole drilling machine by electro-erosion. In this context, the effects of three different amperes (5, 6, 7 A), three different voltages (1, 2, 3 V), six different pulse on-time (18, 22, 24, 26, 28, 29 µs), four different pulse off-time (3, 6, 8, 10 µs) parameters on the processing time and the Kerf formed in the drilled holes were determined by macro analysis and analytical measurements. As a result of the analysis, it has been determined that the parameter with the highest effect on the kerf angle and machining time is the machining current. The processing time increased with the increase of the pulse off time on the other hand the increase in current, voltage and pulse on time decreased the machining time. In general, it has been determined that the processing parameters have a non-linear effect on the kerf due to the pressure flushing of dielectric liquid from the inside and outside of the electrode material, and the evacuation of the abraded particles from the environment. The lowest kerf angle and the highest processing time were achieved using the operating parameters of 7A maximum current, 3V voltage, 29 µs pulse on time and 3 µs pulse off time. In addition, a dimensional accuracy of 170 µm in the hole inlet diameter and 220 µm in the output diameter was obtained.

**Keywords:** Fast Drilling, X153CrMoV12, Kerf, Machining Time.

<sup>1</sup>Haier Europe, Candy - Hoover Group, Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Eskişehir, Türkiye, ferhatceritbinmez@gmail.com

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-5615-3124>

## 1. Giriş

Elektro Erozyon ile İşleme (Electric Discharge Machining-EDM) iletken malzemelerden elektrik enerjisini kullanarak kıvılcım boşalımı, ergime ve buharlaşma yoluyla talaş kaldırma yöntemidir (Paul ve ark., 2013; Singh ve ark., 2022). Bu yöntem dalma erozyon, tel erozyon, EEİ ile hızlı delik delme gibi çeşitleriyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Kliuev ve Wegener, 2020). Ayrıca bu yöntemlerde mekanik kuvvet yerine termal etkinin kullanılması, malzemeye temas olmaması, geleneksel teknolojilerle “kesilmesi zor” kabul edilen sert ve yüksek mukavemetli malzemelerin sertliğinden bağımsız talaş kaldırılması ve çapak oluşmaması gibi sebeplerle bir çok alanda kullanımı cazip hale gelmektedir (Sapkal ve Jagtap, 2018; Weiwen ve ark., 2018). Genel olarak EEİ yönteminin havacılık, otomotiv ve biyomedikal alanlarında yoğun kullanımı vardır (Singh ve ark., 2022; Maccarini ve ark., 2020). Özellikle kalıpcılık sektöründe kullanılan sert çeliklerin işlenmesi sırasında kırılan takımların (rayba, klavuz, matkap, freze çakısı) çelik içerisinden çıkarılmasında, tel erozyon işlemi öncesi tel elektrota klavuzluk yapan ön deliklerin delinmesinde, konvansiyonel yöntemlerle delinmesi mümkün olmayan sert çeliklerin mikro veya makro delinmesinde EEİ ile hızlı delik delme yöntemi çözüm olmaktadır. İmalat süreçlerinde malzemelere delik delmek için harcanan zaman tüm imalat süresinin yaklaşık %50-70’ini oluşturmaktadır bu sebeple önemi çok büyüktür (Tanjilul ve ark., 2018; Kuppan ve ark., 2008). Kalıp veya makine parçalarında kullanılan yüksek sertlikteki çeliklerin kullanım yerlerine montaj edilmesi için üzerlerine bağlantı delikleri veya klavuz delikler açılmaktadır. Endüstride yaygın kullanım alanına sahip olan soğuk iş takım çeliği 1.2379 (X153CrMoV12) sert kalıp çeliklerindedir (Ceritbinmez, 2021). Bu çelik yaklaşık 60-62HRC sertliğe ulaştığı için konvansiyonel yöntemlerle delinmesi pek mümkün değildir (Younis ve ark., 2015). Bu sebeple EEİ yöntemi ile hızlı delik delme bu tür sert çeliklerin delinmesinde avantaj sağlamaktadır. Pushpendra ve Bharti, titanyum alaşım (Ti-6Al-4V) malzemesini EEİ yönteminde 500µm çapında boru şeklinde pirinç elektrot ile delerek akım, ark süresi ve bekleme süresi giriş parametrelerinin delme hızı ve elektrot aşınma oranı üzerine etkilerini incelemiştir. Yapmış oldukları Anova analiz sonuçlarına göre yüksek akım değerinin yüksek deşarj enerjisi yarattığını bu sebeple kıvılcım boşalımı’nın artmasıyla hızlı ergime ve yüksek delme hızına ulaşıldığını bildirmişlerdir. Ayrıca bekleme süresinin artmasının ergiyen malzeme miktarının tahliyesinde avantaj sağladığını fakat işlem süresini arttırarak kesme hızının düşmesine sebep olduğunu vurgulamışlardır. Akım ve ark süresinin artmasıyla elektrot aşınma oranının arttığını, artan deşarj enerjisi ile işlenmiş yüzeylerdeki krater ve beyaz tabaka kalınlığının arttığını rapor etmişlerdir (Pushpendra ve Bharti, 2022). Göv, EEİ yönteminde pirinç tüp elektrot kullanarak DIN 1.2379 malzemesinin delinmesine yönelik çalışmalar yapmıştır. Çalışmasında 10 A akım, 30 V voltaj, 200 dev/dak elektrot dönüş hızı, 100 bar dielektrik sıvı basıncı, 27 µs ark ve 10 µs bekleme sürelerini sabit tutarak dielektrik sıvı

sıcaklığını -50, -20, 0, 10 ve 20 °C arasında değişken olarak kullanmıştır. Derin deliklerin elde edilmesinde dielektrik sıvı sıcaklığının -50 °C'ye düşürülmesiyle işleme hızında yaklaşık % 30 iyileşme sağlandığını, 0 °C altına inildikçe elektrot aşınma oranının % 17 azaldığını rapor etmiştir. Elektrot aşınmasının azalmasıyla delik giriş ve çıkış ölçü farkının azaldığını, buna bağlı olarak delik konik açısının azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca dielektrik sıvı sıcaklığının düşmesi ile işlenen yüzeylerdeki yeniden döküm tabakasının kalınlığının azalmasıyla iş parçasının servis ömrü ve yorulma mukavemetinin artış gösterdiğini vurgulamıştır (Göv, 2017). Chiou ve diğerleri, yüksek hız çeliği alaşımı (SKH59) malzemesini mikro EDM frezeleme yönteminde üç farklı elektrot malzemesi ile işleyerek elektrot kaplama ve iyileştirilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Elektrotlar üzerine yapılan kaplamaların daha iyi elektriksel ve termal özellikler sağlamasından dolayı; gümüş (Ag) film ile kaplanmış tungsten karbür elektrot kullanımında işlenmiş yüzeylerin en düşük pürüzlülükte olduğunu, bakır (Cu) film ile kaplanmış tungsten karbür elektrotlar ile en yüksek talaş kaldırma oranına ulaşıldığını, tungsten karbür(WC) elektrotların ise en düşük aşınmayı sergilediğini rapor etmişlerdir (Chiou ve ark, 2015). Liu ve Bai, EEİ yönteminde hızlı delik delerek elektrot aşınma ve boşluk akışkan alanı simülasyon analizi yapmıştır. Elektrot aşınmasının özelliklerini elde etmek ve işlemede akış alanı dağılımının etkisini doğrulamak için yapılan çalışmalar neticesinde derinlik-çap oranlarının artmasıyla elektrodun aksel aşınma miktarının arttığını rapor etmişlerdir (Liu ve Bai, 2020). Ceritbinmez ve Yapıcı, krom-molibden-vanadyum alaşımli 60-62 HRC sertliğindeki sleipner soğuk iş takım çeliğinden elektro erozyon yönteminde bakır krom zirkonyum alaşımı elektrot kullanarak talaş kaldırmıştır. İşleme parametrelerinden düşük ark süresi ve yüksek bekleme süresi değerlerinde elektrot malzemesinin birim zamanda daha çok çalışmasıyla aşındığını bu aşınma neticesinde iş parçası üzerinde kerf değerinin arttığını bildirmişlerdir (Ceritbinmez ve Yapıcı, 2021). Ahmed ve diğerleri, Inconel 718'in pirinç, bakır (Cu) ve bakır tungsten (CuW) gibi farklı elektrot malzemeleri ve hibrit EDM kullanılarak ultra hızlı delinmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Pirinç elektrot kullanımında en yüksek talaş kaldırma oranının elde edildiğini, bunu Cu ve CuW elektrotların izlediğini bildirmişlerdir. Ayrıca CuW'in sahip olduğu yüksek mukavemet değerlerinden dolayı en düşük elektrot aşınma oranını (EWR) sergilediğini, sırasıyla bakır ve pirinç elektrodun ise düşük ergime noktasına sahip olmalarından dolayı en yüksek aşınmayı gösterdiğini vurgulamışlardır. EEİ gibi termal yöntemlerle delik delme esnasında yüksek sıcaklıklar altında aşınan ve buharlaşan iş parçası ve elektrot malzeme kalıntılarının ortamdaki tahliye edilmesi için kullanılan su bazlı dielektrik sıvıların kimyasal tepkimeler sonucu hidrojen ve oksijene dönüşmesiyle iş parçası ve elektrot üzerinde oksit tabakası oluştuğunu rapor etmişlerdir (Ahmed ve ark, 2020). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde endüstriyel kullanım alanı yüksek olan konvansiyonel yöntemlerle işlenmesi zor ve maliyetli olan malzemelere EEİ yöntemi ve farklı elektrot malzemeleri kullanılarak makro ve mikro delikler delinmeye çalışılmıştır. İş parçası, elektrot malzemeleri ve dielektrik sıvıların mekanik ve

termal özellikleri ne kadar farklılıklar gösterebilir elektrot malzemesi işlem sırasında aşınır. Elektrot malzemesinin aşınmasından kaynaklı iş parçası delik giriş ve çıkış ölçüleri farklı olur. Kullanım yerine uygunluk ve boyutsal tamlik sağlanması için bu ölçülerin kontrol altında tutulması gereklidir. Bunun en uygulanabilir yolu akım, voltaj, ark ve bekleme süresi gibi çalışma parametrelerinin etkilerinin tespiti ve bu parametrelerin uygun değerlerde kullanılması ile mümkündür (Nas ve ark., 2021).

Bu çalışmada yüksek aşınma dayanımı ve yüksek tokluk özelliklerinden dolayı otomotiv, beyaz eşya, demir çelik ve kalıpcılık gibi sektörlerde kullanımı çok yüksek olan soğuk iş takım çeliğinin EEİ yöntemi ile delinmesi çalışılmıştır. Endüstriyel uygulamalarda işleme zamanı ve iş parçasının kullanım yerine uygunluğu ve boyutsal tamlığı maliyet açısından büyük önem arz eder. Bu sebeple bu çalışmada EEİ’de kullanılan işleme parametrelerinin deliklerin boyutsal tamlığını etkileyen kerf ve işleme zamanına etkileri incelenmiştir. Bu makaleden elde edilen sonuçlar, işleme süresinin azaltılmasında ve kerf ölçüsünün asgari düzeyde tutulmasında endüstriyel uygulamalar için çok değerli bir referans olma potansiyelini barındırmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. X153CrMoV12 İş Parçası

Bu çalışmada iş parçası olarak endüstriyel uygulamalarda özellikle saç metal kalıplarında, zımba imalatında ve biçimleme merdanelerinde kullanılan yüksek karbonlu soğuk iş takım çeliği olan AISI D2 (EN X153CrMoV12) kullanılmıştır (Ociepa ve ark., 2021). Ticari ismi ile 1.2379 (X153CrMoV12) olarak adlandırılan bu malzeme %1,55 karbon, %1 molibden, %1 vanadyum ve %12 krom içeren ledeburitik bir soğuk iş takım çeliğidir ayrıca tavlanmış ve ısıtılarak 60-62 HRC sertliğine getirilmiştir (Aragaw ve ark., 2020). Bu çeliğin kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri sırası ile Tablo 1 ve 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** 1.2379 (X153CrMoV12) Kimyasal Bileşeni (Sağlam Metal, 2022)

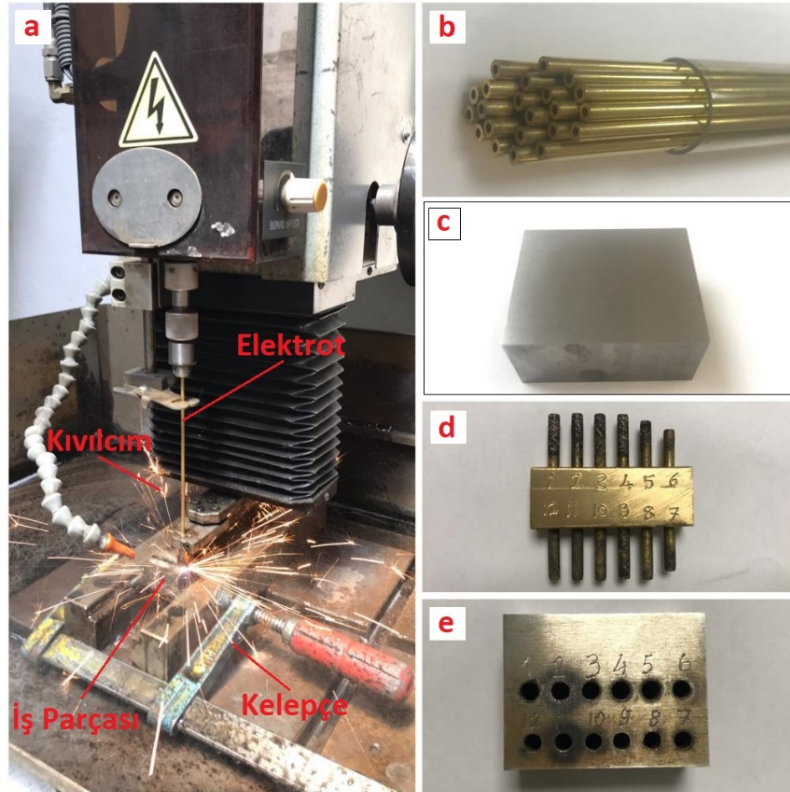
Karbon (% C)	Krom (% Cr)	Molibden (% Mo)	Vanadyum (% V)
1,55	12	0,8	0,9

**Tablo 2.** 1.2379 (X153CrMoV12) Mekanik Özellikleri (Sağlam Metal, 2022)

Sertlik (HRC)	Termal İletkenlik (W/mK)	Akma Dayanımı (MPa $\geq$ )	Termal Genleşme katsayısı ( $^{\circ}\text{K}$ ) $^{-1}\times(10)^{-6}$	Yoğunluk (g/cm $^3$ )
60-62	16,7	420	10.5 - 13.00	7,85

## 2.2. İşleme Metodu

X153CrMoV12 malzemesinin elektro erozyon işleme yöntemi ile delinmesinde Oscarmax SD 400 ZNC PLUS 50 Amper gücünde hızlı delik delme EDM (electric discharge machining) makina kullanılmıştır (Şekil 1a). EEİ ile delme öncesi iş parçası Makino S33 (CNC) ve Proth satıh taşlama tezgahları kullanılarak 0,005 mm ölçüm hassasiyeti ile işlenerek taşlanmıştır (Şekil 1c). Hazırlanan test malzemeleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Tüm yüzeyleri taşlanmış iş parçası CNC tezgahlarında işlenerek 40 x 30 x 20 mm kütük profiline getirilmiştir daha sonra EEİ yönteminde iş parçasına 3 mm çapında delikler delinmiştir. Delik delme işleminde dış çapı 3 mm, iç çapı 1.5 mm olan pirinç elektrot tüpler kullanılmıştır (Şekil 1b). Her bir delik için yeni bir pirinç elektrot kullanılarak işlem sonrası kullanılan elektrot ucu kesilerek analiz edilmiştir (Şekil 1d). Tüm deneylerde elektrot malzeme iş parçasını 20 mm yüksekliğinde boydan boya delmiştir (Şekil 1e).



**Şekil 1.** Test Malzemeleri: (a) SD 400 ZNC PLUS 50A (b) Pirinç elektrotlar (c) İş parçası (d) İşlenmiş elektrotlar (e) Delinmiş iş parçası

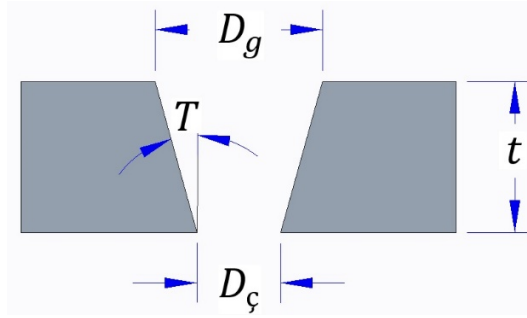
Elektrot ve iş parçası arasındaki talaşın tahliyesi için elektrot içerisinden ve spiral hortumlar ile elektrot dışından dielektrik sıvı (saf su) püskürtülerek erozyon işlemi dielektrik sıvı altında gerçekleştirilmiştir (Şekil 1a). Deney öncesinde iş parçası EEİ tezgahına vidalı kelepçeler ile sabitlenmiştir. Elektrot diklik ayarı her bir deney öncesi makine mandreni kullanılarak hassas şekilde yapılmıştır.

### 2.3. Delinen Deliklerin Kerf Analizi

EEİ ile delme sonrası test malzemesi yüksek basınçlı hava kullanılarak dielektrik sıvı ve curuf kalıntılarından temizlenmiştir. Talaş kaldırma işlemi sonrası delik giriş ve çıkış ölçüleri Mitutoyo kumpas kullanılarak tespit edilmiştir. Her bir delik çapı için 3 farklı ölçüm yapılarak ortalama değerler rapor edilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde delik giriş çaplarının delik çıkış çaplarından büyük olduğu bu sebeple kerf açısı olduğu görülmüştür. Oluşan kerf açısının hesaplanmasında denklem 1’de belirtilen eşitlik kullanılmıştır.

$$\text{Kerf Açısı } (T) = \text{Arctan} \left( \frac{D_g - D_ç}{2 \cdot t} \right) \quad (1)$$

Bu eşitlikte belirtilen  $D_g$  elektrodun iş parçasına girişte açtığı delik giriş çapı,  $D_ç$  ise elektrodun iş parçasından çıktığı anda oluşturduğu delik çıkış çapıdır. İş parçası kalınlığı olan  $t$  ise tüm deneylerde eşit olan 20 mm değeridir. Delik giriş ve çıkış farklılıklarından kaynaklanan kerf açısı  $T$  ise Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kerf Açısı Ölçümü (Skrabalak et al., 2018)

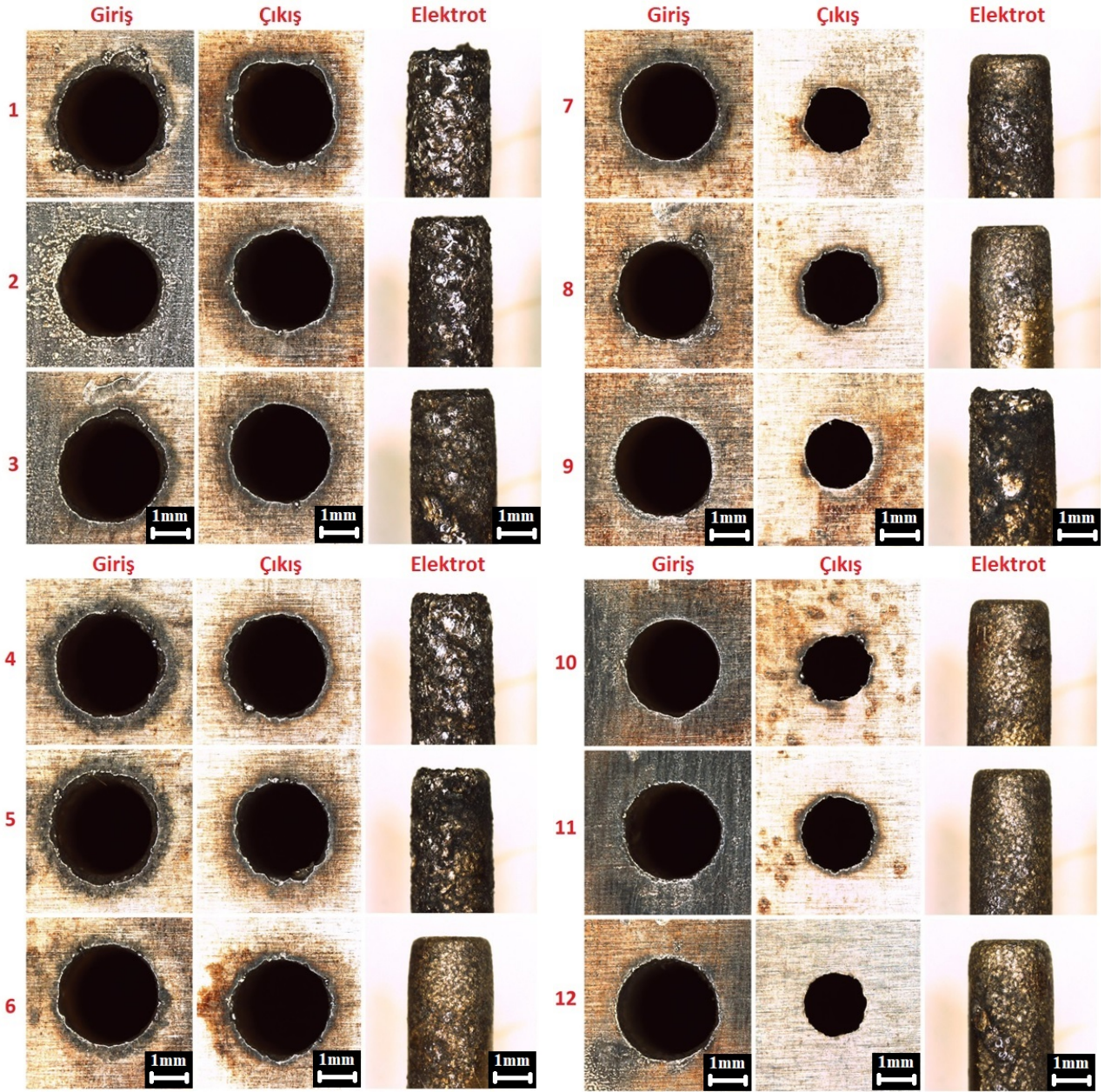
### 3. Bulgular ve Tartışma

Farklı hızlı delik delme parametreleri kullanılarak delinen deliklerin giriş-çıkış ölçüleri, kerf bilgisi ve işleme süreleri Tablo 3’te listelenmiştir. Deneylerde kullanılan akım, voltaj, ark ve bekleme sürelerinin delinen deliklerin giriş-çıkış çaplarına, giriş-çıkış çap farklılıklarından kaynaklı kerf oluşumuna ve işleme süresine etki ettiği görülmüştür.

**Tablo 3.** Hızlı delik delme işleme parametreleri ve analiz sonuçları

Deney No	Akım (A)	Voltaj (V)	Ark Süresi ( $\mu$ s)	Bekleme Süresi ( $\mu$ s)	Delik Giriş Ölçüsü (mm)	Delik Çıkış Ölçüsü (mm)	Kerf Açısı (derece)	İşleme Süresi (sn)
1	7	3	29	3	3,48	3,43	0,072	120
2	6	3	29	3	3,44	3,30	0,201	240
3	5	3	29	3	3,40	3,27	0,187	300
4	7	3	28	3	3,60	3,44	0,230	240
5	7	3	26	3	3,50	3,30	0,287	180
6	7	3	24	3	3,30	3,22	0,115	180
7	6	3	22	3	3,20	2,26	1,351	120
8	6	2	22	3	3,19	2,56	0,906	180
9	6	1	22	3	3,17	2,30	1,250	240
10	6	3	18	6	3,23	2,25	1,409	180
11	6	3	18	8	3,32	2,60	1,035	240
12	6	3	18	10	3,37	2,14	1,768	300

Yapılan deneylerde çalışma parametrelerinin etkilerinin anlaşılması için her bir giriş parametresi için en az 3 değişken seçilerek diğer parametreler sabit tutulmuştur. Hızlı delik delme sonrası her bir delik giriş-çıkış çapları ve yüzeyleri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Delik daireselliğinin, giriş-çıkış deformasyonlarının ve elektrot aşınmalarının tespit edildiği makro görüntüler Nikon SMZ 745T mikroskop kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3). Elektro erozyonla delik delme işlemi elektro-termal işleme prosesidir. Burada elektrik enerjisi elektrik kıvılcımı (ark) oluşturmak için kullanılır ve neticesinde termal enerji ile talaş kaldırılır (Ye ve ark, 2020). Elektrot (katot) malzemesinden iş parçasına (anot) aktarılan yoğun elektriksel deşarj neticesinde yoğun kıvılcım boşalımı meydana gelerek iş parçası yüzeyinde yüksek ısı ve ergime meydana gelir. Bu süreçte iş parçası yüzeyinden kopan partiküller ortama püskürtülen dielektrik sıvı yardımı ile tahliye edilir. Elektrot ve iş parçası arasında daima işleme boşluğu vardır (Güven ve ark, 2022). Aşınan elektrot ve iş parçası bu boşlukta katılaşırlar ve dielektrik sıvının akışına katılırlar (Feng ve ark, 2018). Eğer yeterli tahliye sağlanamazsa aşınan partiküller elektrot yüzeyine veya iş parçası yüzeyine yapışarak katılaşmaya çalışırlar. Bu durum çalışma parametrelerinin işlevini yapmasına engel olur.

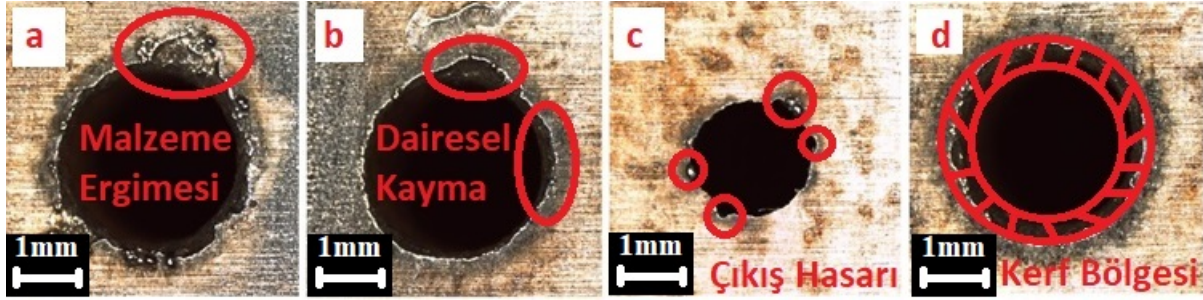


Şekil 3. Deney numunelerinin optik mikroskop görüntüleri

7 A, 3 V, 29  $\mu$ s ark ve 3  $\mu$ s bekleme süresi çalışma parametreleri ile elde edilen Şekil 4(a)'da elektrodun iş parçasına ilk giriş yaptığı anda iş parçasını ergittiği ve yüksek akım ve kıvılcım boşalımı sebebiyle malzemenin delik etrafına yığılıp katılaştığını göstermektedir. EEİ ile delik delmede tüp şeklinde elektrot mandren yardımı ile sisteme bağlanır ve yaklaşık 1000 dev/dak ile döner (Ni ve ark, 2018). Elektrot içerisinden ve spiral hortumlar yardımı ile elektrot dışından ark bölgesine dielektrik sıvı püskürtülür. Gerek su basıncı gerekse elektrot malzemesinin dönme esnasında aşınması ve özellikle iş parçasına ilk giriş yaptığı andaki dalgalanmadan dolayı; 5 A, 3 V, 29  $\mu$ s ark ve 3  $\mu$ s bekleme süresi çalışma parametreleri ile elde edilen Şekil 4(b)'de gösterilen dairesel kayma tespit edilmiştir. Elektrot tüp'ün iş parçasını boydan boya tam delik olarak delmesi neticesinde elektrodun iş parçasından çıktığı anda aşınan partiküller iş parçası çıkış yüzeyine saçılır ve orada katılır bu durum 6 A, 3 V, 18  $\mu$ s ark ve 6  $\mu$ s bekleme süresi çalışma parametreleri ile elde edilen şekil 4(c)'de

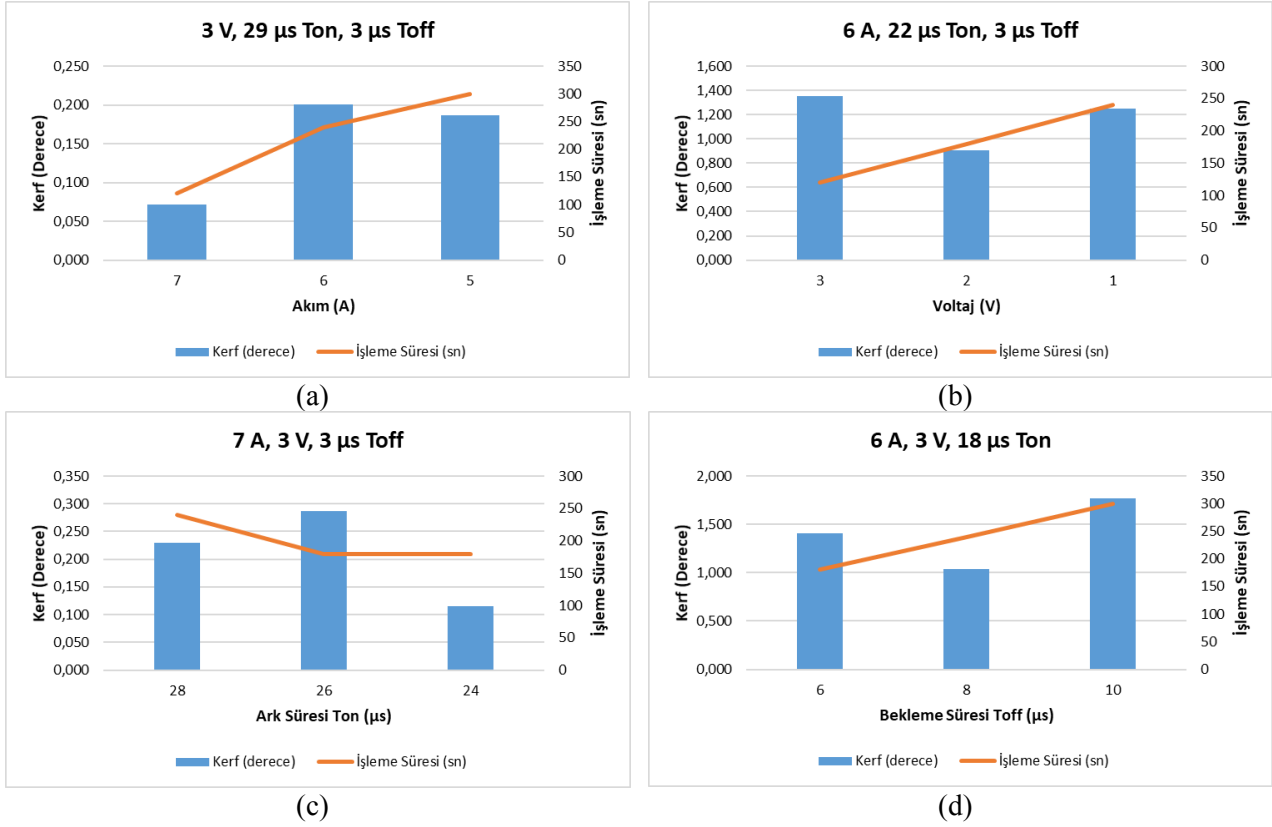


belirtilen çıkış hasarı olarak görülmüştür. Elektrot malzemesi iş parçasına ilk yaklaştığında en büyük çap ölçüsündedir bu sebeple iş parçası giriş delik çapı elektrot çapına yakın değerdedir. Fakat elektrodun iş parçası içerisinde ilerlemesi esnasında uç ve kenar kısımları aşınır yani çapı azalır bu sebeple iş parçası çıkış deliği giriş deliğine göre daha küçük çapta olur. İş parçası giriş ve çıkış çaplarının farklı olması sebebi ile 7 A, 3 V, 26  $\mu$ s ark ve 3  $\mu$ s bekleme süresi çalışma parametreleri ile elde edilen Şekil 4(d)'de belirtilen taralı alanda kerf bölgesi oluşur.



Şekil 4. Yüzey analizi: (a) Malzeme ergimesi (b) Dairesel kayma (c) Çıkış hasarı (d) Kerf bölgesi

EEİ yönteminde anot ve katot arasında elektriksel yük taşıyan parçacıkların hareketi akımın artması ile artar. Voltaj, ark ve bekleme sürelerinin sabit tutularak akımın artırıldığı deney sonucu Şekil 5(a)'da verilmiştir. Burada akımın artması işleme süresini kısaltmıştır; artan kıvılcım boşalımı elektrodun boydan aşınmasını arttırarak tükenmesine ve kerf açısının azalmasına sebep olmuştur. Akım, ark ve bekleme sürelerinin sabit tutularak voltajın azaltıldığı deney sonuçlarının grafiği Şekil 5(b)'de gösterilmiştir. Uygulanan voltaj kıvılcımın toplam enerjisini belirler. Voltaj değerinin yüksek olduğu durumlarda erozyon oranı artar ve daha yüksek işleme hızı elde edilir (Jahan, 2013). Voltaj arttıkça işleme zamanının azaldığı, kerf açısının arttığı tespit edilmiştir. Ark süresi EEİ esnasından akımın iş parçasına aktığı süredir yani işin yapıldığı zamandır. Kıvılcım döngüsünün 'iş' kısmıdır. Mevcut akışlar ve iş sadece bu süre zarfında yapılır. Ark süresinin 29  $\mu$ s olduğu deneyde işleme süresinin en düşük olduğu görülmüştür; genel olarak Şekil 5(c)'de görüldüğü üzere ark süresi arttıkça işleme süresi azalmıştır. Bekleme süresi iki ardışık kıvılcım boşalımı (ark süresi) arasındaki bekleme (yeniden iyonizasyon için gerekli dinlenme veya duraklama) süresidir (Jahan, 2013). Bu süre içinde kıvılcım boşalımı boşluğunda bulunan erimiş malzemenin katılaşması ve dielektrik sıvı yardımı ile ortamdaki tahliyesi olur. Akım, voltaj ve ark süresinin sabit tutularak bekleme süresinin artırılması neticesinde Şekil 5(d)'de görüldüğü gibi bekleme süresi arttıkça işleme süresi artmıştır ayrıca kerf açısı ise önce azalmış daha sonra artmıştır. Genel olarak kerf açısı ve işleme zamanı aşınan iş parçası ve elektrot kalıntılarının ortamdaki tahliye edilmesine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. En yüksek bekleme süresinde aşınan partiküllerin elektrot gövdesine yapışarak elektrot uç kısımlarının gövdesine göre daha fazla aşınmasına sebep olduğu, bu durumun da kerf açısını arttırdığı görülmüştür.



Şekil 5. Çalışma parametrelerine bağlı olarak değişen Kerf ve işleme süreleri: (a) Akım, (b) Voltaj, (c) Ark süresi, (d) Bekleme süresi

Yüksek en boy oranına sahip mikro delikler EEİ yöntemi kullanılarak kolayca delinebilmektedir. Ancak artan delik derinliği ile elektrot uç kısımları konik hale gelir; böylece deliklerde koniklik görülür. Koniklik oranı 12 mm derinliğe kadar artar ancak daha sonra neredeyse sabit kalır çünkü elektrot uç kısımlarında oluşan aşınma neticesinde elektrot malzeme incilir ve tükenir (Kumar ve ark., 2019).

#### 4. Genel Sonuçlar

EEİ ile delik delme deneyleri sonrası elde edilen deliklerin makro görüntü ve kerf ölçüm analiz sonuçlarına göre;

- EEİ esnasında pirinç elektrotların uç kısımlarındaki aşırı elektrik yoğunluğundan dolayı en çok aşınma uç kısımlarında meydana gelmiştir. İş parçası üzerinde delinen delikler elektrot formunu aldığı için tüm deneylerde delik giriş çaplarının delik çıkış çaplarından daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

- Akımın artması iş parçası ve elektrot arasında yoğun kıvılcım boşalımı sağlayarak ergime ve buharlaşmayı arttırmıştır bunun neticesinde işleme süresini kısaltmıştır. Artan kıvılcım boşalımı elektrodun boydan aşınmasını arttırarak tükenmesine ve kerf açısının azalmasına sebep olmuştur.

- Voltaj değeri artmasıyla kıvılcımın toplam enerjisinin paralel olarak artmasına bağlı olarak erozyon oranı artmıştır ve daha yüksek işleme hızı elde edilmiştir. Ayrıca voltaj arttıkça işleme zamanının azaldığı, kerf açısının arttığı tespit edilmiştir.

- Ark süresinin 29  $\mu$ s olduğu deneyde işleme süresinin en düşük olduğu görülmüştür; genel olarak ark süresi arttıkça işleme süresi azalmıştır.

- Bekleme süresi arttıkça işleme süresi artmıştır ayrıca kerf açısı ise önce azalmış daha sonra artmıştır. Genel olarak kerf açısı ve işleme zamanı aşınan iş parçası ve elektrot kalıntılarının ortamdan tahliye edilmesine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. En yüksek bekleme süresinde aşınan partiküllerin elektrot gövdesine yapışarak elektrot uç kısımlarının gövdesine göre daha fazla aşınmasına sebep olduğu, bu durumun da kerf açısını arttırdığı görülmüştür.

- En düşük kerf açısı ve en yüksek işleme süresine maksimum akım değeri 7A, 3V voltaj, 29  $\mu$ s ark süresi ve 3  $\mu$ s bekleme süresi çalışma parametreleri kullanılarak ulaşılmıştır. Ayrıca delik giriş çapında 170  $\mu$ m, çıkış çapında ise 220  $\mu$ m boyutsal tamlık elde edilmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışmadaki Oscarmax SD400 EDM makinasının çalıştırılmasında görev alan Haier Europe, Candy-Hoover kalıphane çalışanlarına, mikroskobik görüntülerin elde edilmesine olanak sağlayan MEGEM (meslek edindirme ve geliştirme merkezi) ve mekanik test laboratuvarı teknik sorumlusu / Teknik Öğretmen Yasin ÖZEN'e teşekkür ederim.

## Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## Kaynaklar

- Ahmed, A., Tanjilul, M., Rahman, M., & Kumar, A. S. (2020). Ultrafast drilling of Inconel 718 using hybrid EDM with different electrode materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5), 2281-2294. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04769-w>
- Aragaw, E. M., Gärtner, E., & Schubert, A. (2020). Combined laser hardening and laser surface texturing forming tool 1.2379. *Procedia CIRP*, 94, 914-918. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.072>
- Ceritbinmez, F. (2021), "An investigation on cutting of the cold work steel X153CrMoV12 by WEDM", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 93 No. 10, pp. 1674-1680. <https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2021-0028>
- Ceritbinmez, F. & Yapıcı, A. (2021). Sleiþner Soğuk İş Takım Çeliğinin Elektro-Erozyon Tezgahtında Bakır Krom Zirkonyum Alaşımı Elektrot ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Kerf ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin İncelenmesi . *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* , 11 (2) , 570-583. <https://doi.org/10.31466/kfbd.948444>

- Chiou, A. H., Tsao, C. C., & Hsu, C. Y. (2015). A study of the machining characteristics of micro EDM milling and its improvement by electrode coating. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9), 1857-1864.
- Feng, Y., Guo, Y., Ling, Z., & Zhang, X. (2019). Micro-holes EDM of superalloy Inconel 718 based on a magnetic suspension spindle system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5), 2015-2026. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3075-6>
- Günen, A., Ceritbinmez, F., Patel, K., Akhtar, M. A., Mukherjee, S., Kanca, E., & Karakas, M. S. (2022). WEDM machining of MoNbTaTiZr refractory high entropy alloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 547-559. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.05.021>
- Gov, K. (2017). The effects of the dielectric liquid temperature on the hole geometries drilled by electro erosion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1), 1255-1262. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0231-3>  
<https://www.saglammetal.com/tr/celik/takim-ceklikleri/soguk-is-takim-ceklikleri/12379-x153crmov12> (Erişim 11.04.2022)
- Jahan, M.P. (2013). Micro-Electrical Discharge Machining. In: Davim, J. (eds) Nontraditional Machining Processes. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5179-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5179-1_4)
- Kliuev, M., & Wegener, K. (2020). Method of Machining Diffusers in Inconel 718 Turbine Blades for Film Cooling using EDM Drilling and Shaping. *Procedia CIRP*, 95, 511-515. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.10.001>
- Kumar, K., Singh, V., Katyal, P., & Sharma, N. (2019). EDM  $\mu$ -drilling in Ti-6Al-7Nb: experimental investigation and optimization using NSGA-II. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5), 2727-2738. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04012-6>
- Kuppan, P., Rajadurai, A., & Narayanan, S. (2008). Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(1), 74-84. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1084-y>
- Liu, H., & Bai, J. (2020). The Tool Electrode Wear and Gap Fluid Field Simulation Analysis in Micro-EDM Drilling of Micro-hole Array. *Procedia CIRP*, 95, 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.278>
- Maccarini, G., Pellegrini, G., & Ravasio, C. (2020). Effects of the properties of workpiece, electrode and dielectric fluid in micro-EDM drilling process. *Procedia Manufacturing*, 51, 834-841. DOI:10.1016/j.promfg.2020.10.117
- Nas, E., Zurnacı, E. & Yıldırım, S. (2021). Sertleştirilmiş AISI H13 Takım Çeliğinin Delme Performansını İyileştirmek İçin Elektro Erozyon İşleme Parametrelerinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak Modellenmesi ve Optimizasyonu. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 99-110. <https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.03>
- Ni, H., Gong, H., Dong, Y. H., Fang, F. Z., & Wang, Y. (2018). A comparative investigation on hybrid EDM for drilling small deep holes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 1465-1472. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1282-1>
- Ociepa, M., Jenek, M., & Kuryło, P. (2021). The Geometric Surface Structure of EN X153CrMoV12 Tool Steel after Finish Turning Using PCBN Cutting Tools. *Coatings*, 11(4), 428. <https://doi.org/10.3390/coatings11040428>
- Paul, G., Roy, S., Sarkar, S., Hanumaiah, N., & Mitra, S. (2013). Investigations on influence of process variables on crater dimensions in micro-EDM of  $\gamma$ -titanium aluminide alloy in dry and oil dielectric media. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(5), 1009-1017. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4235-8>
- Sapkal, S. U., & Jagtap, P. S. (2018). Optimization of micro EDM drilling process parameters for titanium alloy by rotating electrode. *Procedia Manufacturing*, 20, 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.017>
- Singh, N., & Bharti, P. S. (2022). Multi-Objective parametric optimization during micro-EDM drilling of Ti-6Al-4 V using teaching learning Based optimization algorithm. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.257>
- Singh, S. K., Mali, H. S., Unune, D. R., Abdul-Rani, A. M., & Wojciechowski, S. (2022). Material independent effectiveness of workpiece vibration in  $\mu$ -EDM drilling. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 531-546. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.063>
- Singh, R., Dharmi, S. S., & Rajput, N. (2022). Comparison of EDM and ECM machined AISI 304 steel: Surface roughness, hardness and morphological characteristics. *Materials Today: Proceedings*, 48, 965-974. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.031>

- Skrabalak, G. (2018). Influence of electrode tool length on the micro EDM drilling performance. *Procedia CIRP*, 68, 594-598. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.120>
- Tanjilul, M., Ahmed, A., Kumar, A. S., & Rahman, M. (2018). A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.016>
- Weiwen, X., Junqi, W., & Wansheng, Z. (2018). Break-out detection for high-speed small hole drilling EDM based on machine learning. *Procedia CIRP*, 68, 569-574. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.115>
- Ye, L., Xi, X., Bellotti, M., Qian, J., & Reynaerts, D. (2020). Investigation of advanced control schemes for high-speed small-hole EDM drilling. *Procedia CIRP*, 95, 539-544. DOI:10.1016/j.procir.2020.02.263
- Younis, M. A., Abbas, M. S., Gouda, M. A., Mahmoud, F. H., & Abd Allah, S. A. (2015). Effect of electrode material on electrical discharge machining of tool steel surface. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(3), 977-986. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.02.001>