



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

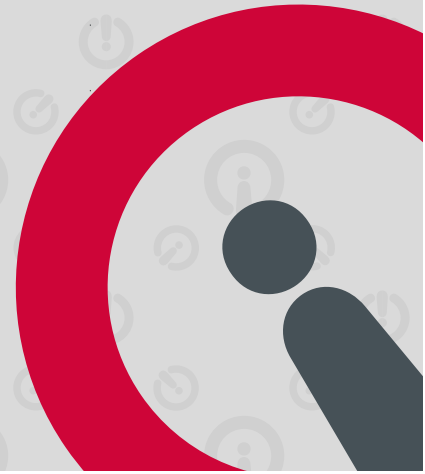
**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**SLEİPNER SOĞUK İŞ
TAKIM ÇELİĞİNİN BAKIR VE
PİRİNÇ ELEKTROT KULLANILARAK
ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİYLE
DELİNMESİNİN İNCELENMESİ**

Elif Simay GÖKKAYA

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

AĞUSTOS 2022





**SLEİPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN BAKIR VE PİRİNÇ
ELEKTROT KULLANILARAK ELEKTRO EROZYON
YÖNTEMİYLE DELİNMESİNİN İNCELENMESİ**

Elif Simay GÖKKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2022

Elif Simay GÖKKAYA tarafından hazırlanan “BAKIR VE PİRİNÇ ELEKTROTLAR KULLANILARAK SLEİPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİ KULLANILARAK DELİNEN DELİKLERİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir,

Danışman: Doç, Dr, Erdogan KANCA

İSTE Müh, ve Doğa Bil, Fak, Makine Müh, ABD

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum,

„„„„„
„„„„„

İkinci Danışman: Dr, Ferhat CERİTBİNMEZ

Renta Elektrikli ev Aletleri San, ve Dış, Tic, Limited

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum,

„„„„„
„„„„„

Başkan: Prof, Dr, Ahmet YAPICI

İSTE Müh, ve Doğa Bil, Fak, Makine Müh, ABD

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum,

„„„„„
„„„„„

Üye: Dr, Öğr, Üyesi Mehmet Veysel ÇAKIR

Kilis 7 Aralık Üni, Makine Müh, ABD

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum,

„„„„„
„„„„„

Üye: Dr, Öğr, Üyesi Mehmet DEMİR

İSTE Müh, ve Doğa Bil, Fak, Makine Müh, ABD

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum,

„„„„„
„„„„„

Tez Savunma Tarihi: 31/08/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum,

„„„„„

Doç, Dr, Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi lisansüstü eğitim enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim,

İmza

Elif Simay GÖKKAYA

31/08/2022

SLEIPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN BAKIR VE PİRİNÇ ELEKTROT
KULLANILARAK ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİYLE DELİNMESİNİN
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Elif Simay GÖKKAYA

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2022

ÖZET

Soğuk iş takım çelikleri başta kalıpcılık olmak üzere birçok makina ve ekipmanlarında yüksek aşınma dayanımı, tokluk, ısıl işleme uygunluk, boyutsal kararlılık, yüksek sertlik gibi özelliklerinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu çeliklerinin kullanım yerlerine montaj edilebilmesi için işlenmeleri ve üzerlerine delik açılması gerekmektedir. Sert malzemelere konvansiyonel delme, orbital frezeleme, lazer kesim, su jeti kesim, zımba ile delme gibi yöntemlerle işlem yapmak takım aşınması, maliyet ve işlem süresi açısından pek uygun olmamaktadır. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada, 60-62 Rockwell (HRC) sertliğe sahip Sleipner soğuk iş takım çeliğine elektro erozyonla işleme (EEİ) yönteminde bakır ve pirinç elektrotlar kullanılarak üç farklı akım değeri (50, 25, 12,5 A), üç farklı ark süresi (3, 6, 9 μ s) ve bekleme süreleri (4, 6, 8 μ s) parametreleri kullanılarak delikler delinmiş, bu çalışma parametrelerinin operasyon süreleri başta olmak üzere değişen talaş kaldırma oranı (TKO) ve elektrot aşınma oranı (EAO), işlenen parçaların delik giriş-çıkış çaplarına ve yüzey sertliklerine, iş parçası ve elektrot üzerindeki kerf'e etkileri analiz edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, bakır elektrot kullanımında talaş kaldırma oranı (TKO) pirinç elektrot kullanımına göre ortalama %311,25 artarken, elektrot aşınma oranı (EAO) ve işleme süresi sırasıyla %42,01 ve %38,46 oranında azalmıştır. Bu durumlara bakır elektrotun termal ve elektrik iletkenliğinin pirinç elektrota göre daha yüksek olması sebep olmuştur. İş parçası ile elektrot arasındaki kıvılcımlanmanın ve termal etkilerin artması talaş kaldırma oranının (TKO) artması ve işleme süresinin azalmasını sağlamıştır. Farklı işleme parametreleriyle bakır ve pirinç elektrot kullanımında delinen deliklerin giriş çaplarının çıkış çaplarından büyük olduğu görülmüş, aşınan elektrotlar sebebiyle debris tahliyesine bağlı olarak düzensiz bir kerf oluşumuna rastlanmıştır. Ayrıca bakır elektrotla yapılan delme işlemi sonrasında iş parçası yüzeyinde sertlik verilerinin arttığı buna karşın pirinç elektrotla yapılan işlem sonrası sertlik verilerinin düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Kullanılan elektrotların elektrik iletkenlik katsayı farklılıkları ve işleme süreleri bakır elektrotun aynı koşullarda pirinç elektrota göre ısı yoğunluğunun (W/mm²) daha yüksek olmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler : Elektro Erozyonla İşleme, Kerf, Sleipner, Bakır, Pirinç

Sayfa Adedi : 42

Danışman : Doç, Dr, Erdogan KANCA

INVESTIGATION OF ELECTRO-EROSION DRILLING OF SLEIPNER COLD WORK
TOOL STEEL USING COPPER AND BRASS ELECTRODES
(Master's Thesis)

Elif Simay GÖKKAYA

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE

AUGUST 2022

ABSTRACT

Cold work tool steels are widely used in industry, especially in molding, in many machines and equipment due to their properties such as high wear resistance, toughness, compatibility with heat treatment, dimensional stability and high hardness, However, these steels must be processed and holes must be drilled in order to be mounted to the places of use, Processing hard materials with methods such as conventional drilling, orbital milling, laser cutting, water jet cutting, punching is not very suitable in terms of tool wear, cost and processing time, For these reasons, in this study, holes were drilled on Sleipner cold work tool steel with a hardness of 60-62 HRC by using copper and brass electrodes, three different current values (50, 25, 12,5 A) , three different pulse on times (3, 6, 9 μ s) and pulse off times (4, 6, 8 μ s) parameters in the electrical discharge machining (EDM) method, the effects of these working parameters on the changing metal removal rate and electrode wear rates, especially the operation times, the hole inlet-outlet diameters and surface hardness of the machined parts, the kerf on the workpiece and the electrode were analyzed, As a result of the analyzes made, in the use of copper electrodes, the MRR increased by % 311,25 on average compared to the use of brass electrodes, while the EWR and machining time decreased by % 42,01 and % 38,46, respectively, These conditions were caused by the higher thermal and electrical conductivity of the copper electrode than the brass electrode, The increase in sparking and thermal effects between the workpiece and the electrode resulted in an increase in the MRR and a decrease in the machining time, In the use of copper and brass electrodes with different processing parameters, the inlet diameters of the drilled holes were found to be larger than the outlet diameters as well as an irregular kerf formation was observed due to debris evacuation due to worn electrodes, In addition, it was observed that the hardness data on the workpiece surface increased after the drilling process with the copper electrode, whereas the hardness data decreased after the process with the brass electrode, The differences in the electrical conductivity coefficients and processing times of the electrodes used made the copper electrode have a higher heat density (W/mm^2) than the brass electrode under the same conditions.

Key Words : Electric Discharge Machining, Kerf, Sleipner, Copper, Brass
Page Number : 42
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Erdoğan KANCA

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresi boyunca akademik tecrübelerini, bilgisini, benimle paylaşan, çalışmalarımın yönlendirilmesinde, araştırmalarımın her aşaması ile ilgilenen ve bu süreçte benden sabrını, desteğini ve özverisini esirgemeyip ilerlememe destek veren danışman hocam Doç, Dr, Erdoğan KANCA' ya en içten duygular ile teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam süresi boyunca tüm olanaklarını, deneyimlerini, düşünceleri ve önerileri ile her aşamada desteğini esirgemeyen ikinci danışman hocam sayın Dr. Ferhat CERİTBİNMEZ hocama sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca aldığım kararlarda yaptığım işlerde her zaman desteği ve güveni ile yanımda olan desteğini hiçbir zaman bırakmayan arkadaşım Azize YALÇIN' a sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez süresince araştırmalarımda bana yardımlarını esirgemeyen, motivasyonumu hep yüksek tutmaya çalışan, her zaman çalışmalarımda sabırla yanımda olan eşim Göker ÖZ' e en içten sevgilerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca en iyi şekilde eğitim almamı sağlayan, meslek sahibi olmam ve kendi ayaklarım üzerinde başarılı bir şekilde durmam için gösterdikleri özveri için annem Mesrür GÖKKAYA, babam Kâmil GÖKKAYA, eğitim hayatımın ilk öğretmenleri olan ablam Seçil SARAÇ ve abim Haşim Serbay GÖKKAYA' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın endüstriyel uygulamalara ve akademik çalışmalara fayda sağlamasını temenni ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. EDM Prosesi (Dalma Erozyon).....	3
2.2. WEDM Prosesi (Tel Erozyon)	4
2.3. Mikro Elektro Erozyon (Hızlı Delik Delme)	5
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	11
4.1. Materyal.....	11
4.1.1. Uddeholm Sleipner.....	11
4.1.2. Cupro MAX Elektrot	12
4.1.3. Piriç Elektrot.....	13
4.2. Yöntem.....	14
4.2.1. EDM İle İşleme.....	14
4.2.2. Talaş Kaldırma Oranı (MRR) Ölçümleri	14
4.2.3. Elektrot Aşınma Oranı (EWR) Ölçümleri.....	15

	Sayfa
4.2.4. Mikrosertlik Testi.....	15
4.2.4. Kerf ölçümleri	16
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	18
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	35
6.1. Sonuç.....	35
6.2. Öneriler.....	36
KAYNAKLAR.....	37



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Şekil 1, EDM aşamaları (a) Ark: Kıvılcım, iyonize bir dielektrik sıvı sütunu içinde meydana gelir, (b)Ark: elektrot ve iş parçası malzemesi buharlaşır, (c) Bekleme: buharlaşmış bulut katılarak talaş (debris) oluşturur, (d) Bekleme: akan dielektrik sıvı ile debrisin tahliyesi	3
Şekil 2.2. TEİ şematiği (Dayakar, Krishnam Raju, Rama Bhadri Raju, 2019)	4
Şekil 2.3. Hızlı delik delme (Liang ve diğerleri, 2019).....	5
Şekil 4.1. Uddeholm Sleipner malzemenin bazı kullanım alanları.....	11
Şekil 4.2. EDM için hazırlanan tornalanmış bakır elektrotlar	13
Şekil 4.3. EDM için hazırlanan tornalanmış bakır elektrotlar	13
Şekil 4.4. Furkan EDM makinasında erozyon işlemi: a Erozyon başlangıcı, b Dielektrik Dielektrik sıvı altında erozyon	14
Şekil 4.5. Qness 60 M EVO Mikro sertlik tez cihazı.....	15
Şekil 4.6. Kerf konik açısının ölçüm açıklaması:(a) Tam delik, (b)kör delik,(c)elektrot Ucu.....	16
Şekil 4.7. Elektrot Kerf ölçümü: (a) Gövde ölçümü, (b) Uc ölçümü.....	17
Şekil 5.1. Artan işleme akımına bağlı talaş kaldırma oranı ve işleme süreleri (a) Bakır, (b) Pirinç.....	19
Şekil 5.2. Artan Ark süresine bağlı talaş kaldırma oranı ve işleme süreleri(a)Bakır, (b) Pirinç.....	21
Şekil 5.3. Bekleme Süresine bağlı talaş kaldırma oranı ve işleme süreleri (a)Bakır, (b) Pirinç.....	21
Şekil 5.4. Deneyleerde kullanılan bakır elektrotlar ve aşınmış yüzeyleri	23
Şekil 5.5. Deneyleerde kullanılan pirinç elektrotlar ve aşınmış yüzeyleri	24
Şekil 5.6. Artan işleme akımına bağlı Kerf açıları ve delik çapları(a)Bakır,(b)Pirinç ...	24
Şekil 5.7. Artan bekleme süresine bağlı Kerf açıları ve delik çapları(a)Bakır,(b)Pirinç	25
Şekil 5.8. Artan Ark süresine bağlı Kerf açıları ve delik çapları (a) Bakır, (b) Pirinç ...	26

	Sayfa
Şekil 5.9. Bakır ve Pirinç elektrotların performans değerleri	27
Şekil 5.10. Mikro sertlik ölçümünde kullanılan yön doğrultuları.....	28
Şekil 5.11. Bakır ve Prinç elektrot kullanılarak yapılan delme işlem sonrası delik kenarından iç kısımlara doğru sertlik değişimleri	30
Şekil 5.12. Pirinç elektrot kullanılarak yapılan delme işlem sonrası delik kenarından iç kısımlara doğru sertlik iz görüntüleri	31
Şekil 5.13. Bakır elektrot kullanılarak yapılan delme işlem sonrası delik kenarından iç kısımlara doğru sertlik iz görüntüleri	32



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Sleipner Kimyasal bileşeni	12
Çizelge 4.2. Sleipner Mekanik Özellikleri.....	12
Çizelge 4.3. Cupro MAX Kimyasal bileşeni	12
Çizelge 4.4. Cupro MAX Mekanik Özellikleri.....	12
Çizelge 4.5. Cupro MAX Fiziksel Özellikleri	12
Çizelge 4.6. Cuprass 3 Kimyasal bileşeni.....	13
Çizelge 4.7. Cuprass 3 Mekanik Özellikleri	13
Çizelge 4.8. Cuprass 3 Fiziksel Özellikleri.....	13
Çizelge 5.1. EEİ değerleri ve bakır elektrotla işleme sonuçları.....	18
Çizelge 5.2. EEİ değerleri ve pirinç elektrotla işleme sonuçları.....	18
Çizelge 5.3. Bakır elektrotlarla işlenen iş parçasının delik çapları ve kerf açısı	23
Çizelge 5.4. Pirinç elektrotlarla işlenen iş parçasının delik çapları ve kerf açısı.....	24
Çizelge 5.5. Pirinç ve Bakır elektrotlarla delme sonrası iş parçasında yüzeyden iç Kısmına doğru değişimi	29

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

MPa

 μm

mm

V

A

 $^{\circ}\text{C}$

g

 cm^3

Mw

Açıklamalar

Megapascal

Mikrometre

Milimetre

Volt

Amper

Santigrat

Gram

Santimetre küp

Molekül ağırlığı

Kısaltmalar

WEDM**EDM****MRR****EWR****SEM****EEİ****TKO****EAO**

Açıklamalar

Wire Electric Discharge Machining

Electric Discharge Machining

Material Removal Rate

Electrode Wear Rate

Scanning electron microscope

Elektro erozyonla işleme

Talaş kaldırma oranı

Elektrot aşınma oranı

1. GİRİŞ

Elektro erozyonla işleme (EEİ), iş parçası ve elektrot arasında tekrarlanan yoğun kıvılcımlanma neticesinde iş parçasından ergime ve buharlaşma yoluyla talaş kaldırılan konvansiyonel olmayan ileri imalat tekniğidir (Kumar ve diğerleri, 2018). Bu yöntemde aşınan iş parçası ve elektrot kalıntıları ortama püskürtülen dielektrik sıvı ile ortamdaki tahliye edilir (Raj ve ark, 2020). Ayrıca iş parçası ve takım (elektrot) arasında mekanik bir temas yoktur bu sebeple konvansiyonel yöntemlerde olduğu gibi işleme kuvveti yoktur (Lin ve ark, 2009). İş parçasının termal olarak aşındırılması için elektrot malzemesi olarak bakır, pirinç veya benzeri elektrot malzemeler kullanılmaktadır (Pavan ve Sateesh, 2021). Konvansiyonel yöntemlerle işlenmesi pek mümkün olmayan yüksek sertlikteki sıcak ve soğuk iş takım çelikleri bu yöntemde yüksek hassasiyetle kolayca işlenebilmektedir (Kabini, 2018).

Uddeholm Sleipner, krom-molibden-vanadyum alaşımlı genel amaçlı soğuk iş takım çeliğidir (Pantazopoulos ve diğerleri, 2006). Bu çelik sahip olduğu yüksek aşınma direnci, yüksek basınç dayanımı, ısı işleme uygunluk ve boyutsal kararlılık, tel erozyon veya dalma erozyonla işlemeye uygun oluşu gibi sebeplerle sac-metal kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, kuvvet ve dayanım gerektiren kesme bıçakların da yaygın olarak tercih edilmektedir (Özlu, 2021). Yüksek sertliğe sahip bu tür çeliklerin konvansiyonel yöntemlerle işlenebilmesi takım aşınması, işleme süresi, maliyet, ölçüm hassasiyeti gibi sebeplerle çok zordur (Wang ve diğerleri, 2014). Bu sebeplerden dolayı sertliği yüksek, elektrik iletkenliği olan birçok metal, alaşım ve kompozit malzemelerin kesilmesi veya delinmesinde tel erozyon ve dalma erozyon yöntemlerinin kullanımı giderek artmaktadır (Gopalsamy ve diğerleri, 2010).

Malzemelerin endüstri alanında bağlantı yerlerinin montaj işlemi sağlanabilmesi için perçin, pim, civata – somun, perno, kama gibi bağlantı elemanları kullanılır, Bundan dolayı bu tür malzemelerde kama, delik ve slot ihtiyacı oluşur, (Matthews, Davies, Hitchings, Soutis, 2000).

Bu çalışmada; endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan soğuk iş takım çeliği olan Sleipner malzemesi, konvansiyonel olmayan ileri imalat tekniklerinden elektro

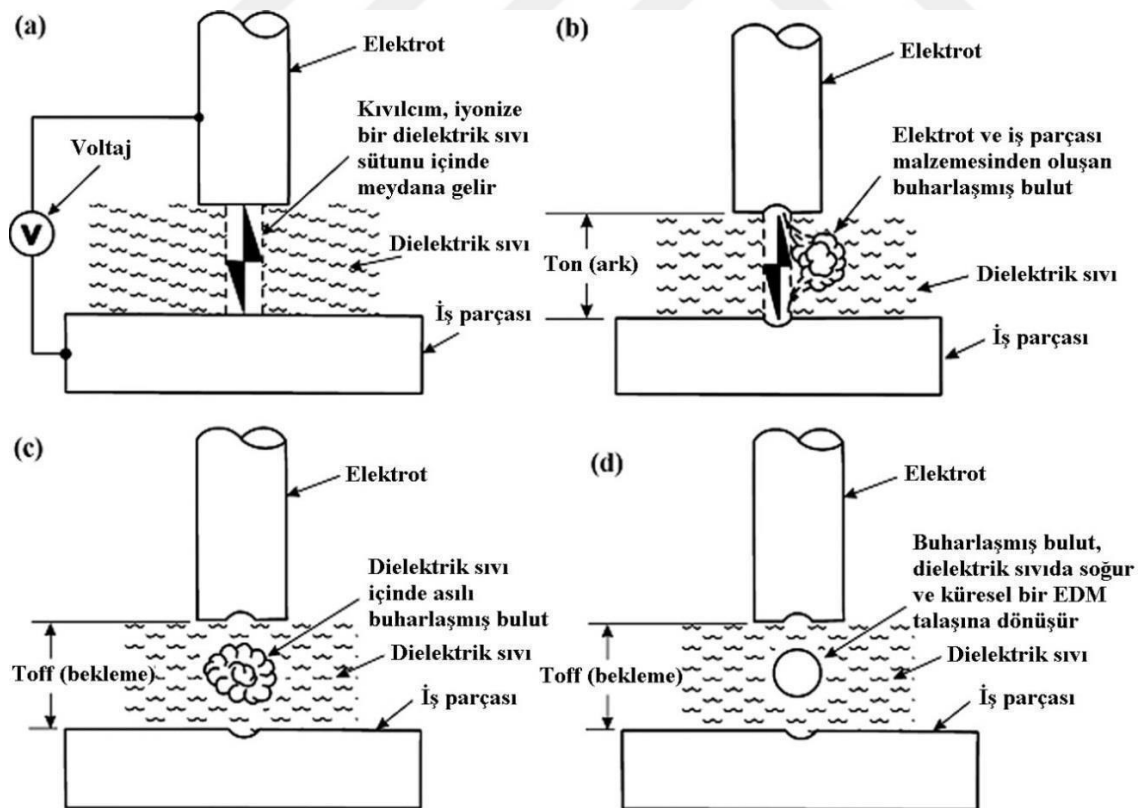
erozyonla işleme yönteminde bakır ve pirinç elektrotlar kullanılarak delinmiştir. Bu süreçte girdi parametreleri olarak kullanılan akım, voltaj, ark süresi, bekleme süresi ve elektrot malzeme cinsi değişkenlerinin; işleme süresine, talaş kaldırma oranına (TKO), elektrot aşınma oranına (EAO), işlenen parçaların delik giriş-çıkış çaplarına, iş parçası ve elektrot üzerindeki kerf'e, delinen delik çevresindeki sertlik değişimine etkileri analiz edilmiştir.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. EDM Prosesi (DalmaErozyon)

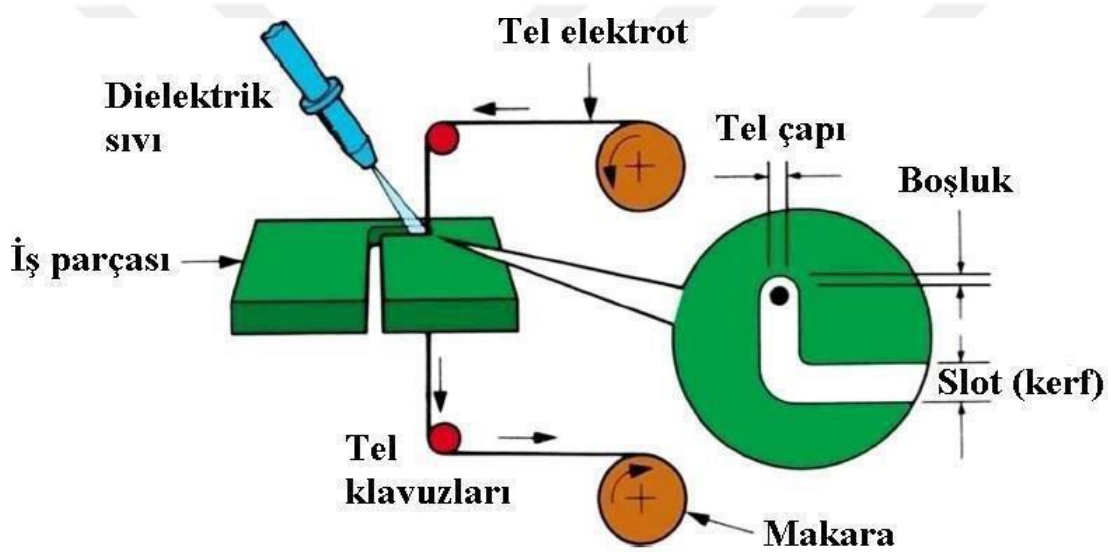
Konvansiyonel talaş kaldırma yöntemlerinden bağımsız olarak dielektirik bir ortamda iş parçası (anot) üzerinden elektrik iletkenliği olan bir elektrot (katot) arasında meydana gelen ardışık kıvılcımlanmalar neticesinde iş parçası üzerinden ısı, ergime ve buharlaşma yoluyla talaş kaldırma prensibine dayanan yöntem Elektro erozyonla işleme (EEİ) olarak adlandırılmaktadır (Kuppan, Rajadurai, Narayanan, 2008). İş parçasının sertliği ne olursa olsun elektrik iletkenliği olan tüm malzemeler erozyon esnasından ark bölgesinde meydana gelen kıvılcım geçişleri sebebiyle oluşan ısı, ergime ve buharlaşmadan dolayı aşındırılabilir (Kalyon ve Fatatit, 2019; Lee ve Li, 2001). Elektro termal talaş kaldırma olarak ta adlandırılan bu yöntemde dielektrik ortamda elektrot formu iş parçası üzerinde boşaltılır (Bari ve ark, 2017; Gupta ve ark, 2016). Şekil 1’de EEİ aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. EDM aşamaları (a) Ark: Kıvılcım, iyonize bir dielektrik sıvı sütunu içinde meydana gelir. (b) Ark: elektrot ve iş parçası malzemesi buharlaşır. (c) Bekleme: buharlaşmış bulut katılaşarak talaş (debris) oluşturur. (d) Bekleme: akan dielektrik sıvı ile debrisin tahliyesi. (Hourmand, Sarhan, Noordin, Sayuti, 2017)

2.2. Tel Erozyon Prosesi (WEDM)

Tel erozyonla işleme teli olarak ta bilinen WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) bakır, pirinç gibi iletken bir tel elektrot kullanılarak iş parçasının termal yöntemle kesilmesidir. Bu yöntemde iş parçası tamamen saf su altında veya ark bölgesine dielektrik sıvı püskürtülerek kesim yapılır (Ceritbinmez, 2021). TEİ prosesinde iş parçası ve elektrot tel arasında hiçbir mekanik kuvvet ve temas olmaması sebebiyle özellikle havacılık ve otomotive sektörlerinde kullanılan sert ve kompleks şekilli parçalar kolaylıkla kesilebilmektedir (Gowthaman ve Jeyakumar, 2019; Ziętała, Durejko, Łazińska, 2015).

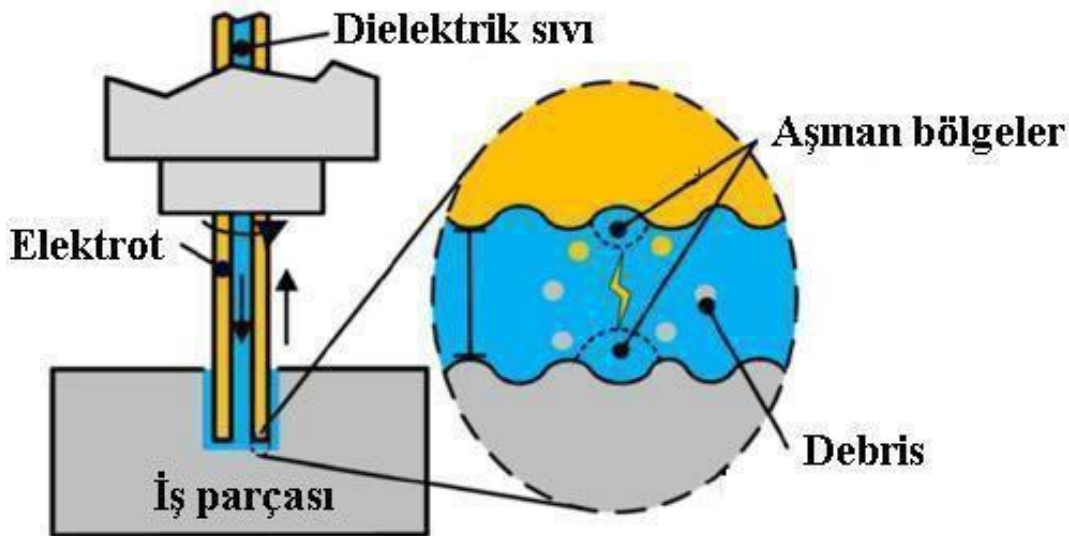


Şekil 2.2. TEİ şematığı (Dayakar, Krishnam Raju, Rama Bhadri Raju, 2019)

Bu yöntemde genellikle 0,25 mm çapında iletken kaplamalı veya kaplamasız teller kullanılmaktadır. İş parçası ve elektrot arasında da boşluk bulunur kesim sonrası tel elektrodun iş parçası üzerinde kestiği genişlik yaklaşık 0,30 mm olur. TEİ-EEİ yöntemleri genellikle yüksek sertlikteki sulu çelik (ısıl işlem görmüş) malzemelerini kesmek veya delmek için kullanılır. Bu sebeple tel elektrotun iş parçası içerisinde kesime başlayabilmesi için bir pilot deliğe ihtiyaç duyulur, Bu pilot delik (ön delik) hızlı delik delme yönteminde pirinç tüp elektrotlar yardımı ile açılır, Daha sonra açılan bu deliklerden tel elektrot geçirilerek kesim yapılır.

2.3. Mikro Elektro Erozyonla İşleme (Mikro-EEİ)

İmalat sektörlerinde iş parçalarına delik delmek için matkap ile konvansiyonel delme, freze çakısı ile orbital delme, lazer kesim, su jeti kesim gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Kesici takım kullanılan yöntemlerde iş parçasının çok sert olduğu durumlarda yüksek takım aşınması ve kırılması görülmektedir (Ceritbinmez ve Kanca, 2022), Lazer kesim ve su jeti kesim yöntemlerinde ise kerf oluşumu delik daireselliği ve derinliği gibi problemler görülmektedir. Ayrıca söz konusu \varnothing 2 mm altında delikler elde etmek olunca konvansiyonel yöntemler yetersiz kalmaktadır. Yüksek sertlikteki çeliklerin tel erozyon yönteminde kesilebilmesi için ihtiyaç duyulan ön deliklerde, derinliği yüksek ve küçük çaplı deliklerin elde edilmesinde EEİ ile hızlı delik delme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır (Xi, Ye, Yu, Zhao, 2020), Şekil 3'te EEİ yönteminde hızlı delik delme şematiği görselleştirilmiştir. Bu yöntemde mandrene bağlı olan içi boş bir pirinç boru elektrot iş parçasına dönerek yaklaşmakta ve iş parçasına temas etmeden noktasal ark oluşturmaktadır. Meydana gelen yoğun kıvılcımlanma iş parçası yüzeyinde yüksek sıcaklıkların oluşmasına sebep olmakta ve iş parçasının yüzeyinden parça kopmasına sebep olmaktadır. İş parçası yüzeyinden kopan ergimiş partiküller elektrot içerisinden püskürtülen dielektrik sıvı yardımı ile ani soğuma ve katılaşmaya uğramaktadır. Daha sonra aşınan iş parçası ve elektrot kalıntıları (debris) ark bölgesinden sıvı sürkülasyonu ile tahliyeedilmektedir.



Şekil 2.3. Hızlı delik delme (Liang ve diğerleri, 2019)

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Lee ve diğerleri (2004), EEI parametrelerinin AISI 1045 karbon çeliğinin yüzey bütünlüğünün çeşitli yönleri üzerindeki etkisini belirlemek için düşük aşınmalı bakır tungsten elektrot kullanarak 1,5 mm çapında küçük bir alanın elektro-erozyonla işlenmesini gerçekleştirdi, Talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü, IEE darbe alanı ve cüruf tabakasının yüksek deşarj akımlarında ve darbe sürelerinde artma eğiliminde olduğunu gözlemlemişlerdir, (Lee ve diğerleri, 2004).

Guu (2005), EEI yöntemiyle işlenen AISI D2 takım çeliğinin yüzey topografisini, yüzey pürüzlülüğünü ve mikro çatlakları analiz etmek için atomik kuvvet mikroskobu (AKM) kullanılmıştır. Atomik kuvvet mikroskobu başarılı bir şekilde uygulanarak nano ölçekli 3 boyutlu görüntülerin elde edilmesi ve üzerinde oluşan mikro çatlakların derinliğinin değerlendirilmesi; deşarj enerjisindeki artışın daha yüksek yüzey pürüzlülüğü ve artan mikro çatlak derinliği ile sonuçlandığını ve EEI sonrası yüzey dokusunu raporlamanın işlem sırasında deşarj enerjisi ile belirlendiğini gözlemlemişlerdir, Daha yüksek deşarj enerjisi ile daha zayıf yüzey yapılarına neden olduğunu incelemiştir, (Guu, 2005).

Payal ve diğerleri (2008), dielektrik akışkanlar olarak bakır, pirinç, grafit elektrotlar ve kerosen kullanılarak EN-31 takım çeliği işlemede elde edilen yüzey pürüzlülüğünü ve talaş kaldırma oranını analiz etmek için EEI yöntemini kullanmışlardır. Taramalı electron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop analizi (OMA) ile yüksek deşarj akımı parametrelerinde bakır elektrotlar ile en yüksek talaş kaldırma oranları elde edilirken, en iyi yüzey kalitesi pirinç elektrotlar ile elde edilmiştir, Grafit elektrotlar kullanıldığında, çalışma yüzeyindeki eşit olmayan ısı dağılımı nedeniyle yüzey kalitesinin düştüğünü gözlemlemişlerdir, (Payal ve diğerleri, 2008).

Yılmaz ve diğerleri (2015) AISI 1040 çeliği üzerindeki mikro gözenekleri IEE yöntemini, üç farklı deşarj akımı (6, 12, 24 A) ve üç farklı elektrot devri (200, 400, 600 rpm) kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir, Sabit darbe süresi (12 μ s), sabit darbe aralığı (3 μ s) ve uygulanan üç farklı dielektrik sıvı basıncı (40, 80, 120 bar) gibi işleme parametrelerinin işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve bağıl aşınma hızı üzerindeki etkilerini ve diğer performansın etkileriyle birlikte aşınma analizi çıktılarını incelemişlerdir, Analiz sonuçlarına

göre delme süresini etkileyen en önemli parametrenin deşarj akımı olduğu vurgulamışlardır.

İş parçası işleme hızının, elektrot aşınma hızının ve deşarj akımı ile bağıl aşınmanın arttığı bildirilmiştir (Özdemir ve ark., 2015).

Dhanabalan Taguchi yöntemi ile yüzey pürüzlülüğünü (YP) incelemiş olup bu yöntem sonucunda EAF, TKO ve FC'nin işleme akışı ile arttığını bildirmişlerdir, Ayrıca, pirinç elektrotlar kullanıldığında en yüksek EAO ve TKO belirlemişlerdir, Elektrot malzemelerinin termal iletkenliği ve erime noktasının EAF ve TKO'yu etkilediği bildirilmiştir (Dhanabalan ve diğerleri, 2015).

Yıldız (2017), deşarj akımı ve darbe süresinin işlenebilirlik üzerindeki etkisini ve magnezyum-kalsiyum (Mg-0,8Ca) alaşımlarının işlenmesi için regresyon analizi gibi istatistiksel yöntemleri EEI yöntemini kullanarak belirlemeye çalışmıştır, Araştırma sonucunda da, deşarj akımının 10, 15, 20, 25 A olduğunu, darbe süresinin 20, 40, 60, 80 μ s olduğunu, talaş kaldırma hızının 4,22 mm³/sn olduğunu, ortalama elektrot aşınma oranının %0,37'ye ulaştığını göstermiş bulunmaktadır, Yüzey pürüzlülüğü 9,69 μ m olarak rapor edilmiştir, Deşarj akımının talaş kaldırma hızına şok süresinden daha fazla etki ettiği durumlarda daha yüksek talaş kaldırma oranları elde etmek için daha yüksek değerler kullanılması gerektiği öne sürülmüştür (Yıldız., 2017).

Nas ve diğerleri (2018), EEI yönteminde 100, 200 ve 300 μ s darbe süreleri, 10, 20 ve 30 μ s bekleme süreleri ve 10, 20 ve Proses parametreleri gibi bakır ve grafit elektrotlar kullanarak AISI 1,2738 malzemedan talaşları uzaklaştırmıştır, Bir deşarj akımı ve elde edilen verileri Taguchi Orthogonal Array Design L54 istatistiksel yöntemini kullanarak minimum yüzey pürüzlülüğü için ideal parametreleri belirlemek için kullanmışlardır. Analiz sonuçları, yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrelerin sırasıyla akım, darbe süresi, bekleme süresi ve elektrot malzeme tipi olarak belirlendiğini göstermektedir. Bakır elektrotları kullanırken, 4,73 μ m minimum ortalama yüzey pürüzlülük değerini hesaplamak için Ton 300 μ s, Toff 30 μ s ve 10 A parametreleri seçilmiş olup model elektrot kullanımında 4,35 μ m parametreleri olarak hesaplamak için Ton 100 μ s Toff 10 μ s ve 20 A seçmiştir. (Nas ve diğerleri 2018). Mahajan ve arkadaşları (2018), yüksek mukavemetli, sıcaklığa dayanıklı çeliklerin EEI yönteminde bakır, pirinç, grafit, bakır tungsten vb, elektrotlarla işlenmesi üzerine araştırma yapmışlardır.

Bakır elektrotun termal iletkenliği ve erime noktasının pirinç elektroda göre daha fazla olması sebebiyle pirinç elektrotun aşınma oranının bakır elektrota göre daha fazla olduğunu ve bakır elektrotun talaş kaldırma oranının pirinç elektrot kullanıma göre daha fazla olduğunu bildirmişlerdir (Mahajan ve arkadaşları., 2018).

Sahu ve Mahapatra (2019), Titanyum alaşımlarının ve AISI 1040 çeliğinin EEI yöntemiyle dielektrik akışkanı olarak EDM-30, elektrot malzemesi, bakır, pirinç ve AlSi10Mg RP kullanılmıştır, Akım ve ark süresi gibi işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü, yüzey çatlak yoğunluğu, beyaz tabaka kalınlığı ve beyaz tabaka mikrosertliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yüzey çatlaklarını gözlemek ve SEM, optimal parametreleri analiz etmek için Gray-TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. En iyi yüzey özellikleri, düşük akım ve ark süresi işleme parametrelerinde AlSi10Mg RP elektrotlarında gözlemişlerdir (Sahu ve Mahapatra., 2019).

Kalyon (2020) AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Bakır Elektrotlar Kullanılarak EEI Yöntemiyle İşlenmesi, İşleme parametreleri 6, 12, 25 A deşarj akımı ve 50, 100, 200 µsn darbe süresinin yüzey pürüzlülüğü, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve bağlı aşınma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel olarak SEM ve optik mikroskopi analizleri, artan darbe süresi ve deşarj akımı ile yüzey pürüzlülüğünün, iş parçası işleme hızının ve elektrot aşınma oranının arttığını gözlemişlerdir, Bu deşarj akımı ve darbe süresi değerleri kullanılarak yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyetin oluşabileceğini rapor etmişlerdir (Kalyon, 2020).

Mouralova ve diğerleri (2020), Elektrotların köş ve kenar aşınmalarını, bir EEI yönteminde bakır ve grafit elektrotlar kullanılarak farklı işleme parametrelerine sahip 1,2363 ve 1,2343 ESR Çeliklerin den talaş çıkarılarak elektron mikroskobu altında incelemişlerdir, Ayrıca kullanılan elektrotların aşınma oranını, işlenmiş numunelerin morfolojisini ve yüzey morfolojisini araştırdılar. Grafit elektrot kullanımının daha az aşındığını ve elektrot formunun tutulması nedeniyle daha kesin şekil ve boyutlara yol açtığını bildirmişlerdir (Mouralova ve diğerleri, 2020). Pavan ve diğerleri (2020), Pirinç, bakır ve tungsten-bakır elektrotlar kullanılarak IEE'de Inconel 600 alaşım işlenebilirliğini inceleyerek, Taguchi analizi ile ark süresi, bekleme süresi, akım, elektrot-iş parçası etkileşimi ve işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranı (TKO) ve elektrot aşınma oranını (EAO)

incelemişlerdir.

Sonuç olarak, en yüksek talaş kaldırma oranı (0,01579 cm³/dk) ve en düşük elektrot aşınması (0,00045 cm³/dk) tungsten bakır elektrotlarla elde edildiğini gözlemlemişlerdir (Pavan vd, 2020).

Rizvi ve diğerleri (2020), bir EEI yönteminde bakır tungsten elektrotları kullanarak AISI 4340 çeliğinin işlenmesi sırasında AISI 4340 yüzey pürüzlülüğünü modelleme üzerinde çalışmıştır. Akım, voltaj, ark süresi ve darbe boşluk oranı gibi işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri varyans analizi ile analiz edilmiştir, Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün ark süresi olduğunu, diğer parametrelerin ihmal edilebilir olduğunu ve daha düşük ark süresi değerlerinin daha düşük yüzey pürüzlülüğü için geçerli olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca iyi yüzeyler elde etmek için düşük ark süresi ve akımı, orta darbe-boşluk oranı ve daha düşük voltaj parametrelerinin kullanılmasını önermişlerdir (Rizvi ve diğerleri, 2020).

Joshi ve diğerleri (2020), EEI yönteminde bakır elektrotlar kullanarak EN8 kalıp çeliğinin işlenmesini ve işleme parametrelerinin işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüksek işleme parametre değerlerinde elektrot aşınma hızının talaş kaldırma oranı ile orantılı olduğunu vurgulamışlardır (Joshi vd, 2020).

Kumar ve arkadaşları (2020), Silisyum nitrür-titanyum nitrür seramik kompozitlerden EEI tezgâhında bakır elektrotlarla talaş kaldırmıştır. Akım (I), kıvılcım aralığı voltajı (V), ark (Ton) ve bekleme (Toff) sürelerini girdi parametreleri olarak; talaş kaldırma oranı (MRR) ve elektrot aşınma oranlarını (EWR) çıktı parametreleri olarak seçerek sonuçları Anova ile analiz etmişlerdir, Akımın MRR ve EWR üzerine en çok etki eden parametre olduğunu vurgulamışlardır, En yüksek talaş kaldırma oranına I: 6 A, Ton: 7 µs, Toff: 10 µs, V: 35 V değerlerinde; en düşük elektrot aşınma oranına I: 4 A, Ton: 6 µs, Toff: 10 µs, V: 40V değerlerinde ulaştıklarını rapor etmişlerdir (Kumar ve arkadaşları, 2020).

Kalyon (2020) AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Bakır Elektrotlar Kullanılarak EEI Yöntemi ile işleme parametreleri 6, 12, 25 A deşarj akımı ve 50, 100, 200 µsn darbe süresinin yüzey pürüzlülüğü, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve bağıl aşınma üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir. Deneysel olarak SEM ve optik mikroskop görüntüleri, artan darbe süresi ve deşarj akımı ile yüzey pürüzlülüğünün, iş parçası işleme hızının ve

elektrot aşınma oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Düşük deşarj akımı ve darbe süresi değerleri kullanılarak yüksek yüzey kalitesi ve boyutuna ulaşılabilceğini incelemişlerdir (Kalyon, 2020).

Valentinčić ve diğerleri (2021), bir mikro-EEI'deki elektrotların doğrusal ve hacimsel aşınma ölçümlerini ve belirsizliklerini temassız (lazer) ölçüm yöntemleriyle belirlemeye çalışmışlardır, Yeterli boyutta elektrotlar kullanıldığında ve yeterince işlendiğinde, doğrusal aşınma ölçümlerinin touch yöntemi (temas) kullanılarak verimli bir şekilde gerçekleştirilebileceğini ve hacimsel aşınmanın lazer yöntemi kullanılarak ölçülmesi gerektiğini bildirmişlerdir. Daha küçük çaplı elektrotlar kullanılırken elektrot aşınmasını etkili bir şekilde telafi etmek için bir lazer yöntemi kullanılmasını önerirler, Lineer aşınma ölçümünün lazer yönteminin yalnızca elektrot aşınmasını yaklaşık 40 µm'nin altında ölçerken kullanıldığını ve lazer ölçüm yöntemini kullanan standart ölçüm belirsizliğinin touch on (temas) ölçüm yönteminden önemli ölçüde daha düşük olduğunu vurgulamışlardır (Valentinčić et al, 2021).

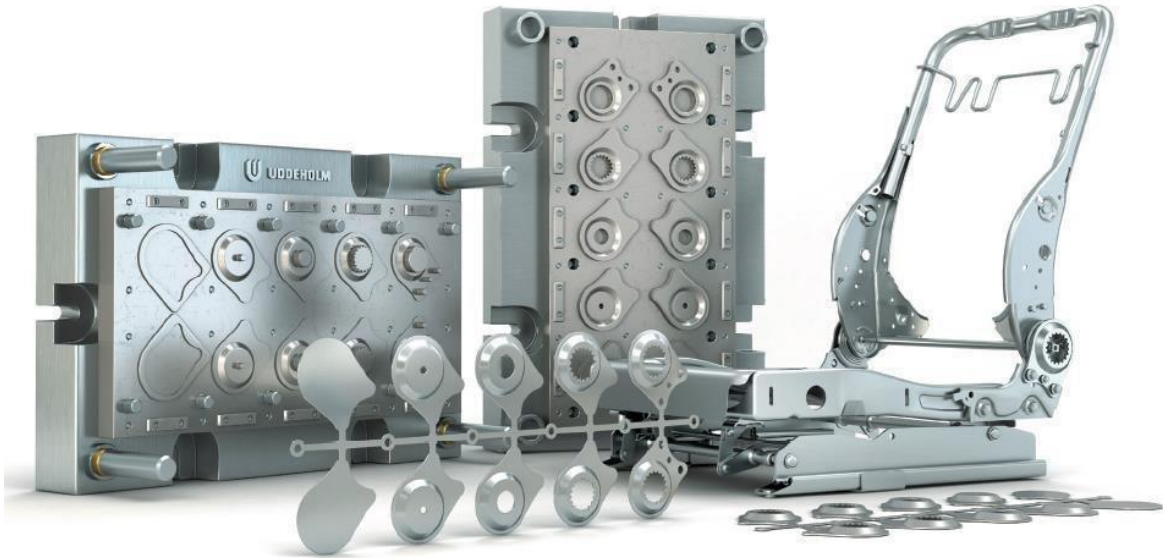
Ceritbinmez ve Kanca (2021), bir elektrokorozyon yöntemi ve bir Cupro MAX CuCrZr elektrot kullanarak sertliği 60-62 HRC olan ısıtılmış soğuk iş takım çeliklerinden, talaş kaldırmanın neden olduğu elektrot aşınmasını araştırmışlardır. Bu kapsamda üç farklı akım değeri (6,25, 12,5, 25 A), üç farklı ark süresi (3, 6, 9 µs) ve bekleme süresi (4, 6, 8 µs) kullanılarak korozyon gerçekleştirilmiştir. Bu işleme parametreleri için elektrot aşınma oranları ayrı ayrı belirlenmiş olup kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğünün etkileri makroskopik ve analitik ölçümlerle analiz edilmiştir. Artan ark süresi ile elektrot aşınma hızının azaldığını ve elektrot aşınmasındaki azalmanın, iş parçasından salınan dielektrik sıvı ve karbon parçacıklarının yapışmasıyla oluşan koruyucu tabaka nedeniyle elektrot mukavemetindeki artıştan kaynaklandığını bildirmişlerdir (Ceritbinmez ve Kanca, 2021).

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1 Materyal

4.1.1. Uddeholm Sleipner

Bu çalışmada, iş parçası olarak endüstride kullanımı giderek artan soğuk iş takım çeliği Uddeholm Sleipner seçilmiştir. Sertliği yüksek bir çelik olan Uddeholm Sleipner malzemesi otomotiv, sivil ve askeri uçaklar, uydular ve uzay araçları alanlarında ihtiyaç duyulan parçaların yanı sıra bu sektörlerde kullanılan kesme, delme ve çekme kalıplarında kullanılmaktadır. Bu çeliğin otomotiv sektöründe kullanımı ile ilgili Resim 1’te kalıp malzemesi gösterilmiştir. Bu çelik, krom-molibden-vanadyum alaşımı, yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip genel amaçlı soğuk iş takım çeliğidir (Pantazopoulos et al, 2006; Kirkhorn et al, 2012). Bu çelik sahip olduğu krom- molibden- vanadyum alaşım bileşenleri sayesinde yüksek aşınma direnci ve dayanım, yüksek sertlik ve ısıl işleme uygunluk, Eer (Electric Discharge Machining) ve TEI (Wire Electric Discharge Machining) işlemeye uygunluk benzeri özelliklere sahiptir. Alseko Metal işletmesinden ısıl işlemleri olarak elde edilen teknik spesifikasyonları; kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri sırası ile Çizelge 1 ve 2’de gösterilmiştir. Deneyleerde kullanılan iş parçası ebatları 80 x 80 x 3 mm olup, bu numuneler 250 x 300 x 80 mm kütük olarak sertleştirilmiş malzemelerden TEI tezgâhı kullanılarak dilimlenmiştir.



Şekil 4.1. Uddeholm Sleipner malzemenin bazı kullanım alanları (VOESTALPINE ONE STEPAHEAD).

Çizelge 4.1. Sleipner Kimyasal bileşeni

Krom (% Cr)	Molibden (% Mo)	Silisyum (% Si)	Karbon (% C)	Manganez (% Mn)	Vanadyum (% V)	Demir (% Fe)
7,8	2,5	0,9	0,9	0,5	0,5	Kalan

Çizelge 4.2. Sleipner Mekanik Özellikleri

Termal İletkenlik (W/m•°C)	Özgül IsıSığası (J/kg•°C)	Elastisite Modülü (kN/mm ²)	Sertlik (HRC)	Yoğunluk (g/cm ³)	Termal Genleşme katsayısı
400-500	460	205	60-62	7,73	12,7x10 ⁻⁶

4.1.2. cupro max elektrot

EEİ’de kullanılan elektrot malzemenin cinsi işlem süresi, yüzey kalitesi ve maliyet açısından büyük önem taşır, Dalma erozyon işleminde elektrotlardan beklenen en önemli özelliklerin başında elektrik iletkenliği ve aşınma direnci gelir. Elektrot üzerine verilen şekil veya formun iş parçası üzerinde boşaltılması hedeflenir. Bu çalışmada Sağlam Metal firmasından temin edilen krom ve zirkonyumla alaşımlandırılmış Cupro MAX marka bakır elektrot kullanılmıştır, Bu malzemenin kimyasal özellikleri ve mekanik bileşenleri sırası ile Çizelge 3 ve 4’te belirtilmiştir.

Çizelge 4.3. Cupro MAX Kimyasal bileşeni

krom(%Cr)	Bakır(%Cu)	Zirkonyum(%Zr)	Diğerleri(%Cr)
0,5-1,2	Kalanı	0,03-0,3	Maks,0,2

Çizelge 4.4. Cupro MAX Mekanik Özellikleri

Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HB)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
400-500	122	135-170	320-410	18

Çizelge 4.5. Cupro MAX Fiziksel Özellikleri

Elektrik iletkenliği (MS/m)	Isı iletkenliği (W/mK)	Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	Yoğunluk (g/cm ³)
45	320	17	8,9

Cupro MAX fiziksel özellikleri de Çizelge 4.5'te listelenmiştir, Tedarikçiden çubuk (mil) şeklinde temin edilen elektrotlar torna tezgâhında Ø 8 mm çap ve 20 mm boy ölçülerinde olacak şekilde tornalanmıştır (Şekil 4.2). Bu elektrotların, EEİ tezgâhında elektrot tutucuya bağlanabilmesi için arka kısımlarına M5x10 ölçülerinde diş açılmıştır.



Şekil 4.2. EDM için hazırlanan tornalanmış bakır elektrotlar

4.1.3. pirinç elektrot

Bu çalışmada, elektrot malzeme cinsinin işlem kalitesine ve işleme süresine etkilerinin tartışılabilmesi için mangan bronzları ailesine mensup Cuprass 3 marka yüksek mukavemetli özel bir pirinç alaşımı kullanılmıştır. Bu malzeme sağlam metal firmasından tedarik edilmiş olup kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 4.6 - 4.7 ve 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Cuprass 3 Kimyasal bileşeni

Alüminyum (% Al)	Demir (% Fe)	Manganez (% Mn)	Çinko (% Zn)	Bakır (% Cu)
3 Tem	1,5-4	2,5-5	Kalan	60-67

Çizelge 4.7. Cuprass 3 Mekanik Özellikleri

Sertlik (HB)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Elastisite Modülü (GPa)	Uzama (%)
180-225	820	460	105	14

Çizelge 4.8. Cuprass 3 Fiziksel Özellikleri

Elektrik iletkenliği (MS/m)	Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	Isı İletkenliği (W/mK)	Yoğunluk (g/cm ³)
5	22	36	7,7

Çubuk (mil) şeklinde temin edilen bu elektrotlar torna tezgahında Ø 8 mm x 20 mm ölçülerinde tornalanarak, EEİ tezgahında elektrot tutucuya bağlanabilmesi için arka kısımlarına M5x10 ölçülerinde diş açılmıştır (Şekil 4.3)

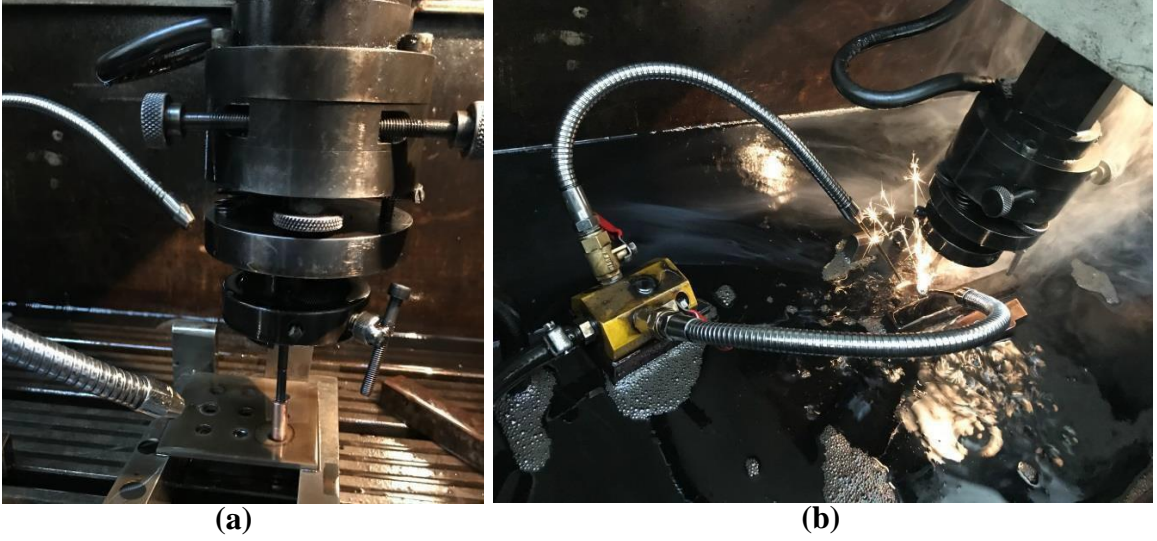


Şekil 4.3. EDM için hazırlanan tornalanmış pirinç elektrotlar

4.2 Yöntem

4.2.1. Elektro erozyon ile işleme

EEİ için Furkan Marka 50 Amper EEI (Elektro Erozyon İle İşleme) makinesi, Elektrot ile iş parçası arasındaki talaşı tahliye etmek için Eralube marka dielektrik akışkan spiral metal hortum kullanılarak püskürtülmüş ve dielektrik akışkanın altında dağlama işlemi yapılmıştır (Resim 4), Korozyondan önce, iş parçasını dielektrik sıvıya tamamen batırmak için ve dielektrik sıvıyı püskürtmek için bir spiral metal hortum kullanılır, ardından iş parçası korozyondan sonra ortamdan dışarı çekilmiştir,



Şekil 4.4. Furkan EDM makinasında erozyon yöntemi: **a)** Erozyon başlangıcı, **b)** Dielektrik sıvı altında erozyon

4.2.2. Talaş kaldırma oranı (tko) ölçümleri

Farklı işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkilerinin hesaplanmasında denklem 1’de gösterilen eşitlik kullanılmıştır (Raj ve diğerleri 2020). Her bir deney öncesi vesonrası iş parçası 0,001g hassasiyete sahip terazide tartılarak aşındırılan malzeme miktarı tespit edilmiştir, Ayrıca her bir deney süresi kronometre yardımı ile kayıt altına alınarak talaş kaldırma oranı hesabında kullanılmıştır.

$$TKO \left(\frac{g}{dak} \right) = \frac{\text{İş parçasının ilk ağırlığı} - \text{İş parçasının son ağırlığı}}{\text{İşleme süresi}}$$

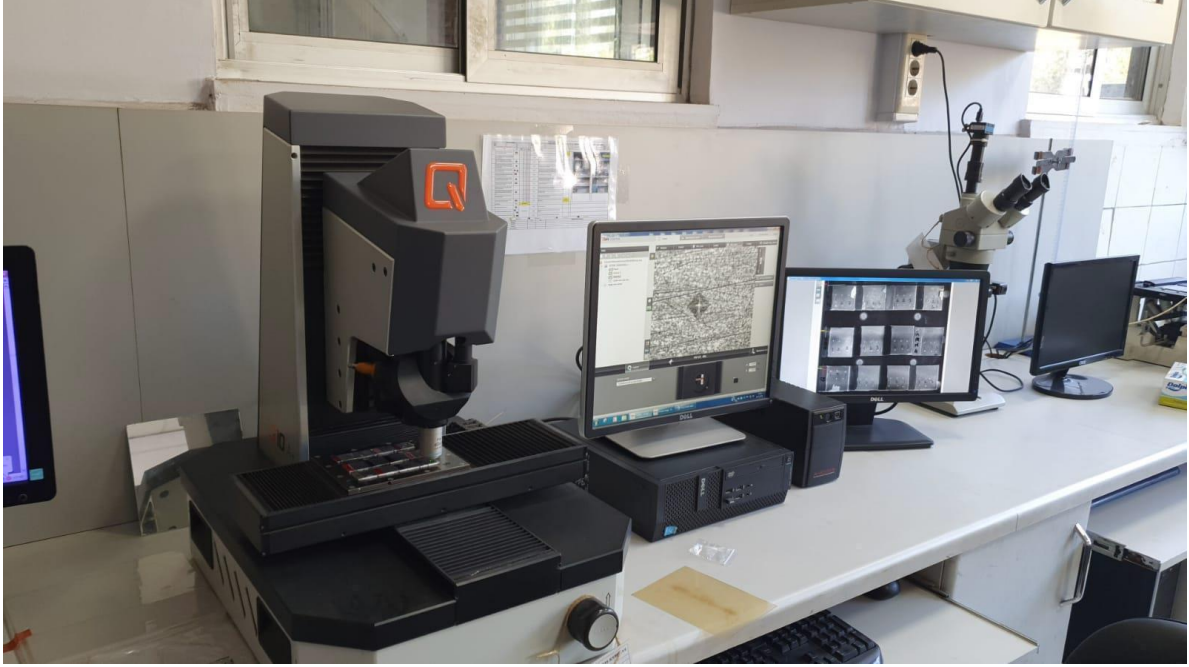
4.2.3. Elektrot Aşınma Oranı (EAO) Ölçümleri

Deneylerde kullanılan her bir elektrot malzemenin işleme öncesi ve sonrası ağırlığı işlem süresine oranlanarak elektrot aşınma oranları denklem 2 kullanılarak tespit edilmiştir (Raj ve diğerleri 2020).

$$EAO \left(\frac{g}{dak} \right) = \frac{\text{Elektrodun ilk ağırlığı} - \text{Elektrodun son ağırlığı}}{\text{İşleme süresi}}$$

4.2.4. Mikrosertlik testi

Bakır ve pirinç elektrotlarla delinen her bir delik çevresine 15, 50, 100, 150, 200, 250 μ m mesafede bulunan bölgelerden sertlik ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerin alınmasında Resim 5’te gösterilen Qness 60 M EVO Mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır.

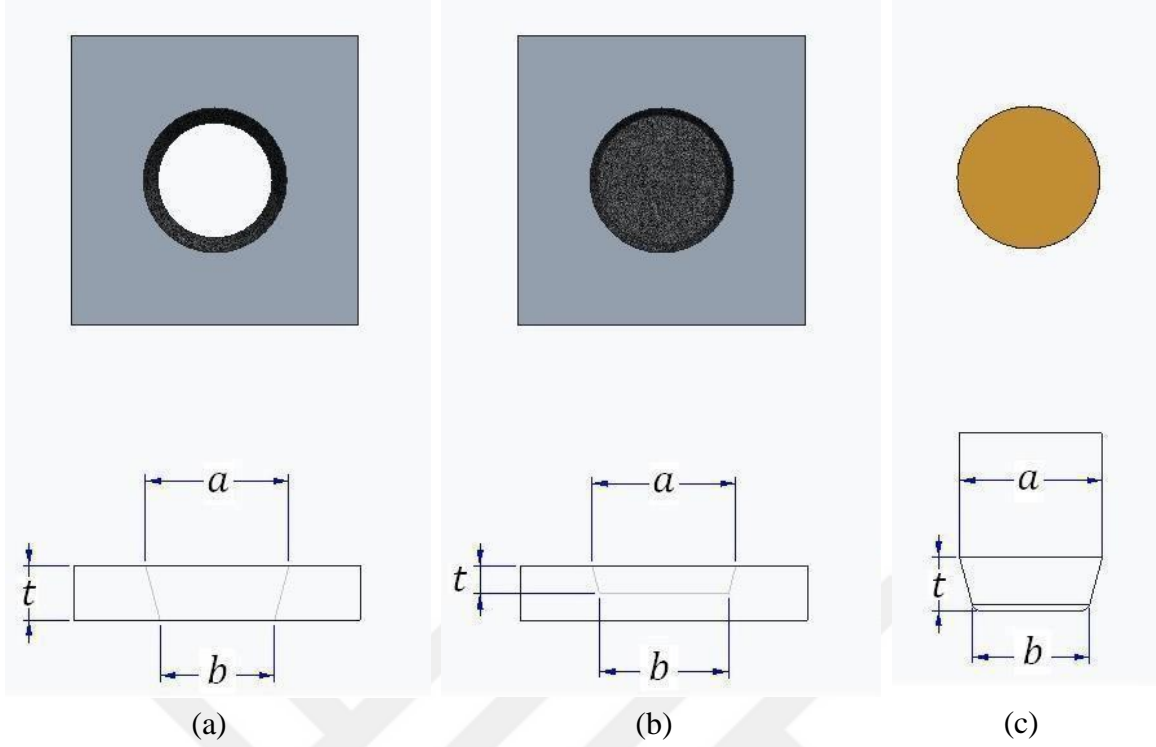


Şekil 4.5. Qness 60 M EVO Mikro sertlik tez cihazı

4.2.5. Kerf ölçümleri

İş parçalarının elektrotlar ile delinmesinde sonra, delik giriş ve çıkış ölçüleri dikkate alınarak kerf konik açısı denklem 3 kullanılarak hesaplandı. Bu denklemde delik giriş ölçüleri ve elektrot gövdelerinin ölçüsü (a); delik çıkış, taban ve elektrot ucu ölçüleri (b); delik derinlik ve elektrot işlem bölgesi ölçüleri t olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.6).

$$\text{Kerf Konik Açısı } (T) = \text{Arctan} \left(\frac{a-b}{2,t} \right) \quad (3)$$



Şekil 4.6. Kerf konik açısının ölçüm açıklaması: (a) tam delik, (b) kör delik, (c) elektrot ucu

EEİ ile delinen iş parçalarının delik giriş ölçüsü (a), delik çıkış ölçüsü (b) ve delik derinliği (t); 0,01 mm ölçüm hassasiyetine sahip Mitutoyo dijital kumpas kullanılarak tespit edildi. Boydan boya delinemeyen iş parçasının kerf ölçümlerinde delik çıkış ölçüsü olarak kör delik tabanındaki çap ölçüsü dikkate alındı (Şekil 4.6 (b)), Yapılan ölçümlerde EEİ ile işlenen malzemenin giriş ve çıkış bölgelerinde ölçüsel farklar olduğu bu sebeple elektrotlar üzerinde de kerf konik açısının oluştuğu tespit edildi. Bu farkların tespitinde Şekil 4. 7’de gösterildiği gibi elektrotların uc ve gövde kısımlarından 0,001 mm ölçüm hassasiyetine sahip Mitutoyo dijital mikrometreler kullanılarak ölçümler yapıldı.



(a)



(b)

Şekil 4.7. Elektrot Kerf ölçümü: (a) Gövde ölçümü, (b) Uc ölçümü

EEİ kullanılan bakır ve pirinç elektrotların işlem gören bölgelerindeki aşınma sebebi ile uc ve gövde kısımlarının çap ölçülerinin birbirlerinden farklı olduğu; uc kısımlarındaki aşınmalardan dolayı kerf açısı oluştuğu görüldü.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Elektro erozyonlu işlemede seçilen işleme parametrelerinin kullanılan elektrot malzemelerinin işleme süresi, talaş kaldırma oranı ve elektrot aşınma oranı üzerindeki etkileri Tablo 9 ve 10'da gösterilmektedir, Farklı işleme akımları, servo dalgalanmaları, ark süreleri ve bekleme süreleri kullanıldığında, özellikle çalışma süresi olmak üzere farklı talaş kaldırma oranları ve elektrot aşınma oranları belirlendi.

Çizelge 5.1. EEİ değerleri ve bakır elektrotla işleme sonuçları

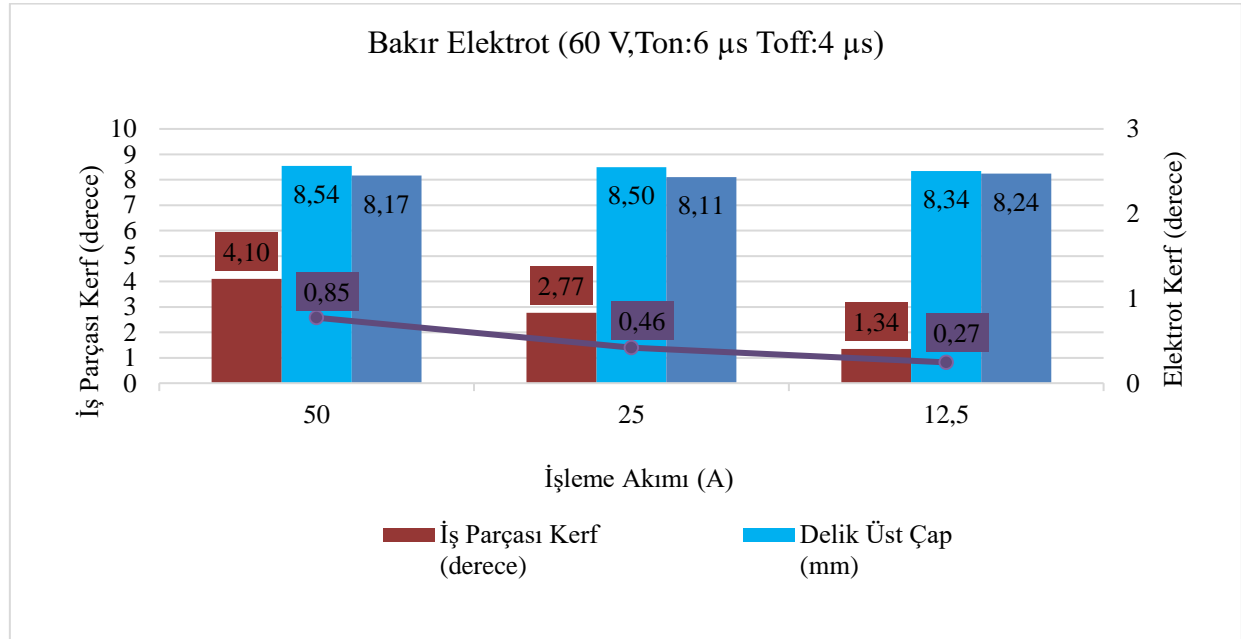
Deney No	İşleme Akımı (A)	Servo Voltajı (V)	Ark Süresi (μ s)	Bekleme Süresi (μ s)	İşleme Süresi (dak)	Talaş Kaldırma Oranı (g/dak)	Elektrot Aşınma Oranı (g/dak)
1	50	60	6	4	2	0,640	0,326
2	25	60	6	4	3	0,413	0,149
3	12,5	60	6	4	6	0,209	0,033
4	25	60	9	8	3	0,438	0,119
5	25	60	9	6	4	0,310	0,078
6	25	60	9	4	4	0,328	0,078
7	25	60	9	6	4	0,321	0,060
8	25	60	6	6	5	0,254	0,015
9	25	60	3	6	25	0,050	0,024

Çizelge 5.2. EEİ değerleri ve pirinç elektrotla işleme sonuçları

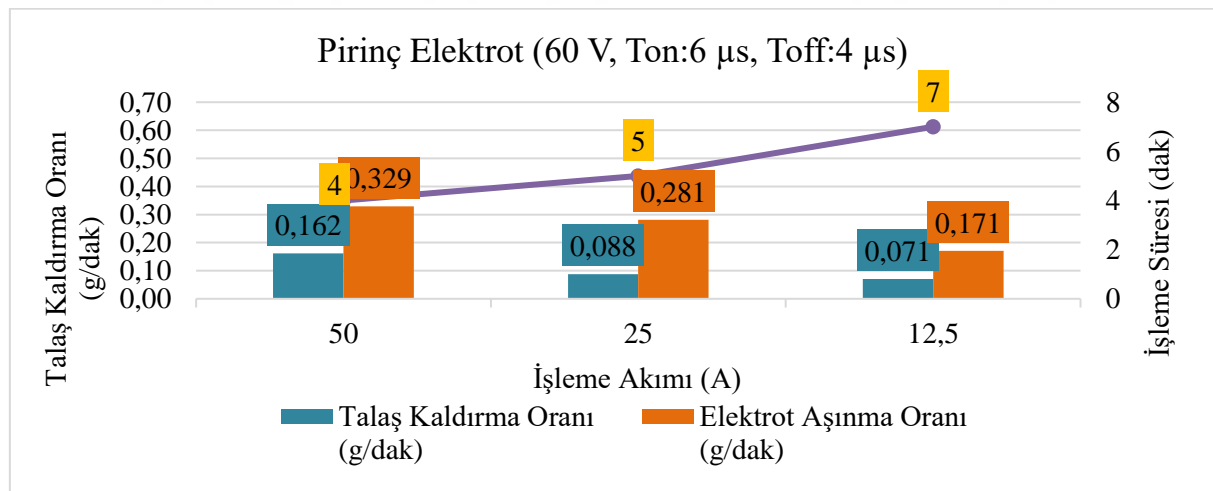
Deney No	İşleme Akımı (A)	Servo Voltajı (V)	Ark Süresi (μ s)	Bekleme Süresi (μ s)	İşleme Süresi (dak)	Talaş Kaldırma Oranı (g/dak)	Elektrot Aşınma Oranı (g/dak)
1	50	60	6	4	4	0,162	0,329
2	25	60	6	4	5	0,088	0,281
3	12,5	60	6	4	7	0,071	0,171
4	25	60	9	8	12	0,080	0,071
5	25	60	9	6	15	0,056	0,072
6	25	60	9	4	17	0,045	0,067
7	25	60	9	6	13	0,074	0,084
8	25	60	6	6	4	0,106	0,368
9	25	60	3	6	14	0,042	0,082

EEI, elektriksel bir ısıl işlem sürecidir, Burada elektrik enerjisi bir elektrik kıvılcımı (ark) oluşturmak için kullanılır ve böylece termal enerji ile uzaklaştırılır (Abhishek ve diğerleri,

2017). Farklı işleme parametreleri ve özellikle yüksek akım kullanımı altında, işlenen yüzeyde farklı boyutlarda noktasal erime ve buharlaşma olabilir. Bu ergime ve buharlaşma için gerekli olan enerji iletimi kullanılan elektrotlar yardımı ile sağlanır.



(a)



(b)

Şekil 5.1. Artan işleme akımına bağlı talaş kaldırma oranı ve işleme süreleri (a) Bakır, (b) Pirinç

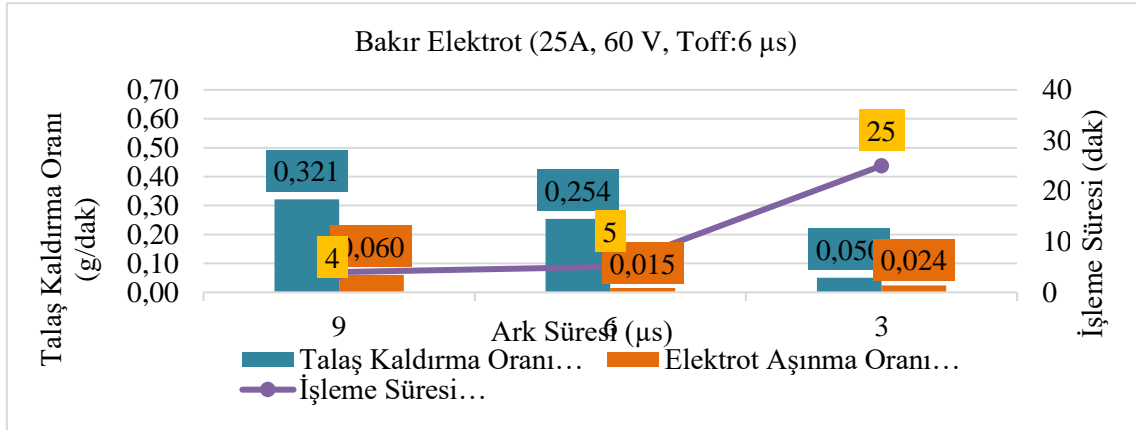
Sabit voltaj, ark ve bekleme sürelerinde hem bakır hemde pirinç elektrot kullanımında işleme akımı arttıkça elektrot ve iş parçası arasında yükselen kıvılcım atlamasına bağlı olarak talaş kaldırma oranı ve elektrot aşınma oranı artmış, işleme süresi azalmıştır. İşleme akımı işleme süresine, talaş kaldırma ve elektrot aşınma oranına etki bakımından diğer

parametrelere göre en etkili parametre olarak tespit edilmiştir, Şekil 5.1 (a) ve (b)'de elde edilen oranların bakır ve pirinç elektrotlarda doğrusal olduğu görülmektedir.

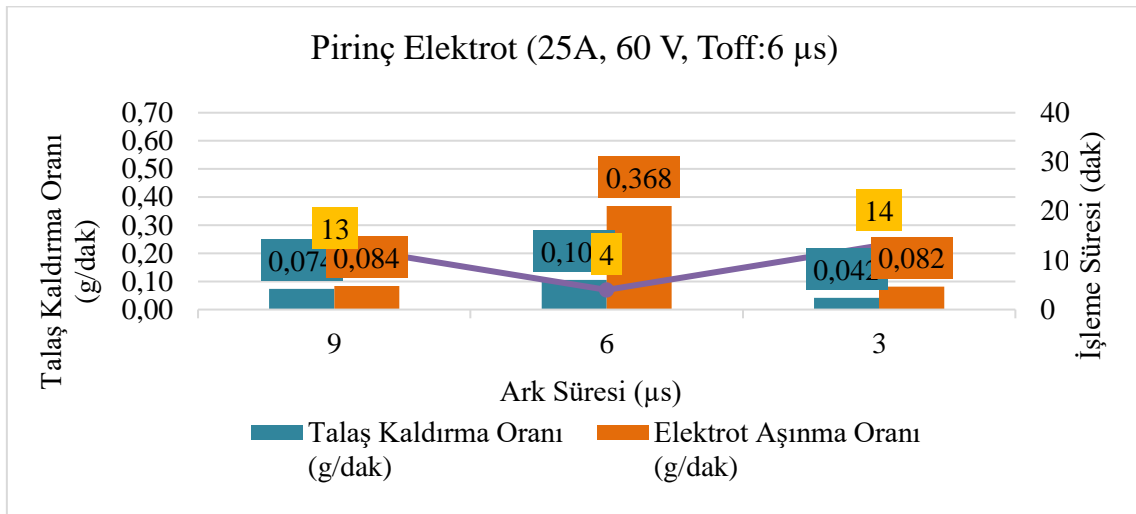
Haddad ve diğerleri; kaba işleme, yarı kaba işleme ve ince talaş işleme işlemlerinde elektrot yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla elektrot aşınmasının arttığını bildirmişlerdir, Ayrıca. EEI sonrası iş parçasının yüzey pürüzlülüğünün elektrot yüzey pürüzlülüğü ile değiştiğini ve bunun da IEE parametrelerinden etkilendiğini bildirmişlerdir, (Haddad ve arkadaşları 2017). Ceritbinmez ve Kanca, ark süresindeki azalmanın işlem süresini arttırdığı ve elektrot malzemesinin birim zamanda daha fazla çalışmasına neden olarak elektrot aşınma oranını ve kerf açısını arttırdığı bildirilmiştir, Ayrıca ark süresinin artmasıyla elektrot aşınma hızının azaldığını bildirmişlerdir (Ceritbinmez ve Kanca 2021), Elektrot aşınmasındaki azalma, iş parçasından salınan dielektrik sıvı ve karbon parçacıklarının elektrot yüzeyine yapışması ile oluşan koruyucu tabakaya bağlanarak elektrotun mukavemetini artırır, (Çakıroğlu ve Günay 2020).

Şekil 6' da bulunan grafikler incelendiğinde ark süresinin düşmesinin hem bakır hemde pirinç elektrot kullanımında işleme süresini arttırdığı görülmektedir. Şekil 5.2. (a)'da bakır elektrot kullanımında yüksek ark sürelerinde elektrodun yüksek termal iletkenliği ve ısı iletkenliği talaş kaldırma oranın artmasını sağlamıştır. Şekil 5.2. (b)'de pirinç elektrodun mekanik ve fiziksel özelliklerinin bakıra göre daha düşük olması sebebiyle elektrot aşınma oranı artmış ve talaş kaldırma oranı azalmıştır.

Kapsamlı bir literatür çalışması, proseste kullanılan dielektrik akışkan ve basıncın, elektrot malzemesinin mekanik ve kimyasal özelliklerinin ve IEE parametrelerinin de elektrot aşınmasını etkilediğini göstermektedir (Pavan vd., 2021; Gülcan vd., 2021; Yılmaz et al., 2015), Elektro erozyon bir ısıl işlem yöntemidir (Guu, 2005), Bu nedenle korozyon işlemi sırasında elektrot malzemesi ile iş parçası arasında kıvılcım ve termal etkilerden dolayı ısınma, erime ve buharlaşma meydana gelir ve bu durumda hem iş parçası hem de elektrot malzemesi aşınır, Bu işlem sırasında elektrotun erime sıcaklığı ne kadar yüksek olursa aşınması o kadar düşük olur (Kalyon, 2019), Bu nedenle, performans çıktıları olarak en düşük elektrot aşınması, en yüksek talaş kaldırma oranı ve kabul edilebilir yüzey pürüzlülüğü EEI'de istenen parametrelerdir, (Ho ve Newman, 2003).

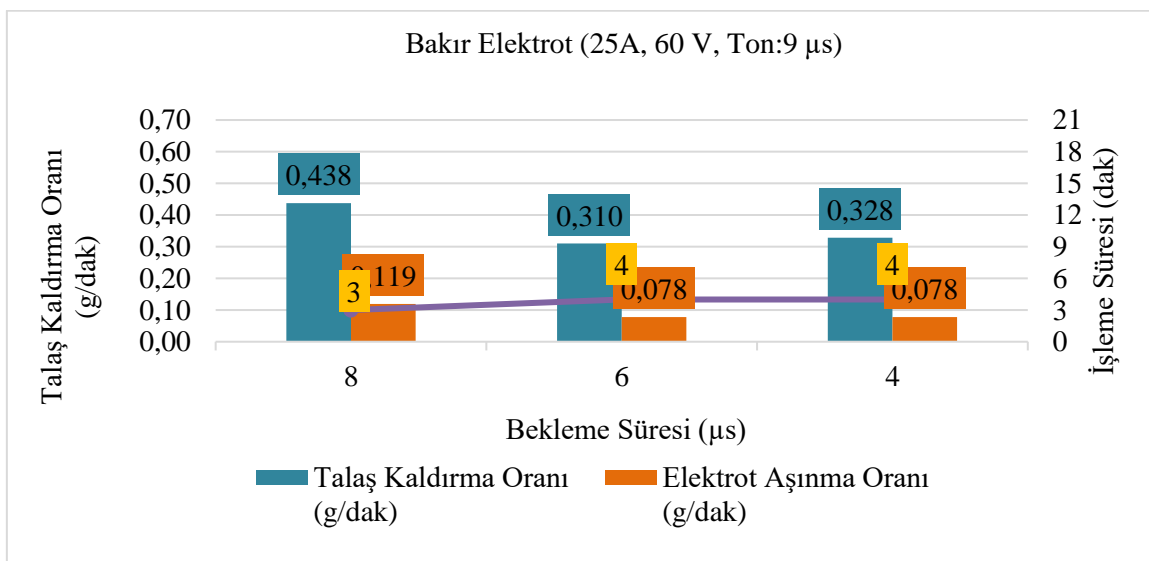


(a)

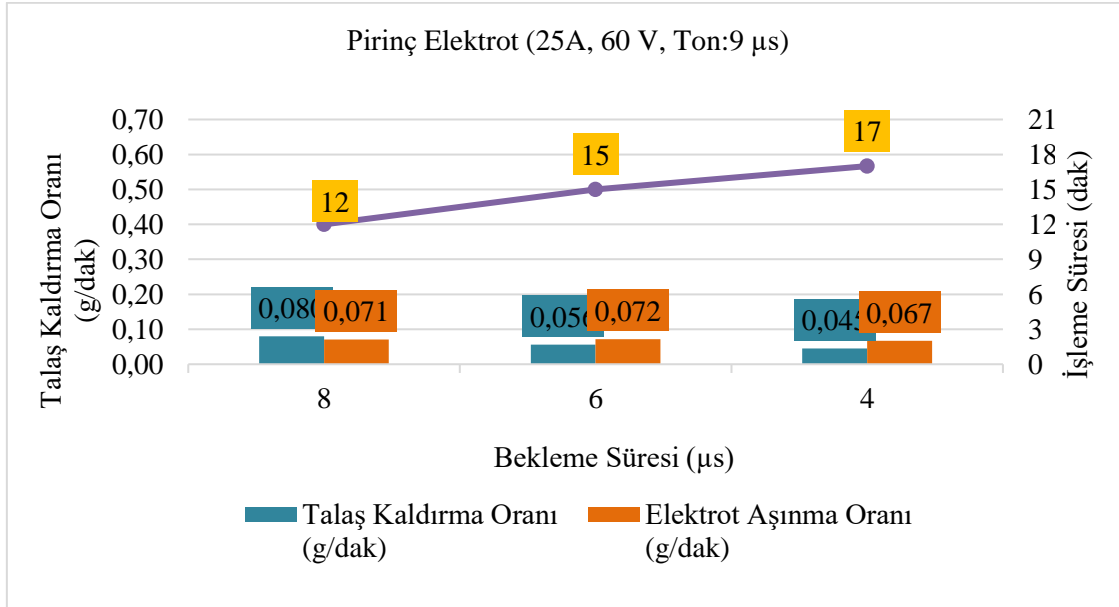


(b)

Şekil 5.2. Artan Ark süresine bağlı talaş kaldırma oranı ve işleme süreleri (a) Bakır, (b) Pirinç



(a)



(b)

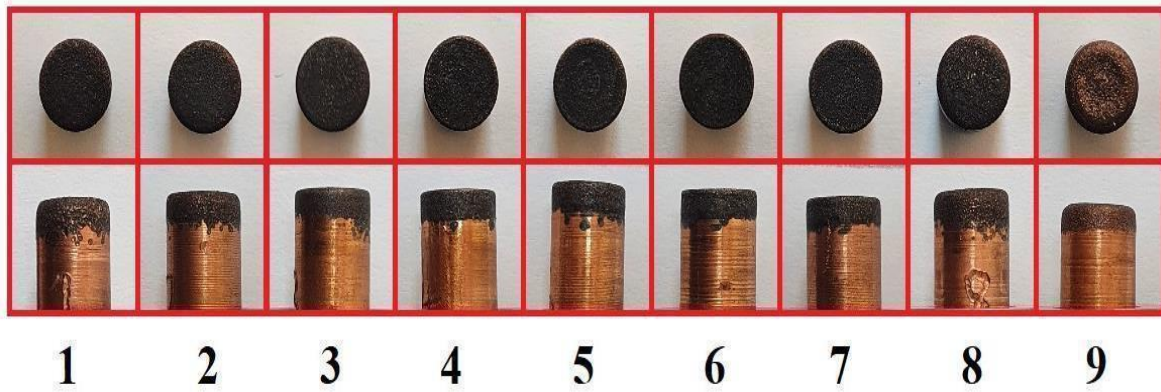
Şekil 5.3. Bekleme Süresine bağlı talaş kaldırma oranı ve işleme süreleri (a) Bakır, (b) Pirinç

Şekil 5.3.'te sabit 25A akım, 60V voltaj ve 9 μ s ark süresinde değişen bekleme sürelerinin etkileri gösterilmiştir, Bekleme süresi iki ark süresi arasında ark işleminin olmadığı süredir, Genel olarak bekleme süresinin artması işlem süresini arttırsada bu çalışmada bekleme süresinin artmasıyla talaş kaldırma oranı artmış genel olarak işleme süresi azalmıştır, Bekleme süresinin uzun olması ark esnasında ortama yayılan debris ve elektrot kalıntılarının püskürtülen elektro erezyon sıvısı ile ark bölgesinde başarılı şekilde tahliye edilmesi hem talaş kaldırma oranını arttırmış hemde işlem süresini kısaltmıştır, EEI'de elektrot ile iş parçası arasında mekanik temas yoktur, dielektrikte tekrarlayan bir deşarj vardır, Yaklaşık 20,000 °C'ye ulaşan ısı nedeniyle iş parçasında erime ve buharlaşım meydana gelir, Bu işlem sırasında hiçbir mekanik stres oluşmaz (Torres ve diğerleri, 2016; Sengottuvel ve diğerleri, 2013). EEI sırasında elektrot köşelerinin deformasyonu esas olarak elektrot ucundaki aşırı elektrik yoğunluğundan kaynaklanmaktadır (Yıldız, 2017), Bu, elektrot açısının aşırı aşınmasına neden olabilir (Sundaram ve Rajurkar, 2008), Aşınma başlangıcında elektrot malzemesinin şekli ve boyutu, EEI'den sonrakilerden farklıdır, Bu nedenle iş parçası üzerindeki tablanın başlangıç ve bitiş ölçüleri farklıdır, Bu, bir kerf açısı ile sonuçlanır, Çizelge 5.3. ve Çizelge 5.4'te sırasıyla bakır ve pirinç elektrotlarla delinen iş parçasının ölçüleri, iş parçası ve elektrot üzerinde tespit edilen kerf açıları verilmiştir, Bu çalışmada EEİ tezgâhı ile 3 mm kalınlığındaki iş parçası yüzeyinden itibaren 5 mm derinlik mesafede talaş kaldırılacak şekilde işlem uygulanmıştır, Bakır elektrotlarla yapılan delme işlemlerinde

iş parçası üzerinde boydan boya 3 mm derinliğinde delik elde edilirken pirinç elektrot kullanımında elektrot aşınmasından dolayı 1,01 – 2,30 mm derinliklerinde kör delikler elde edilmiştir,

Çizelge 5.3. Bakır elektrotlarla işlenen iş parçasının delik çapları ve kerf açısı

Sleipner İş Parçası				Kerf (derece)	
Deney No	Deliküst çap (mm)	Delikalt çap (mm)	Derinlik (mm)	İş parçası	Elektrot
1	8,60	8,17	3,00	4,10	0,85
2	8,40	8,11	3,00	2,77	0,46
3	8,38	8,24	3,00	1,34	0,27
4	8,60	8,40	3,00	1,91	0,57
5	8,40	8,10	3,00	2,86	0,07
6	8,60	8,38	3,00	2,10	1,58
7	8,54	8,26	3,00	2,67	0,39
8	8,50	8,22	3,00	2,67	0,48
9	8,34	8,24	3,00	1,00	0,60

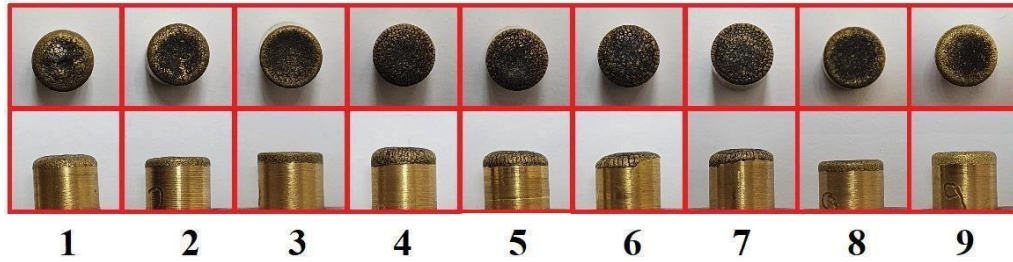


Şekil 5.4. Deneylerde kullanılan bakır elektrotlar ve aşınmış yüzeyle

Çizelge 5.4. Pirinç elektrotlarla işlenen iş parçasının delik çapları ve kerf açısı

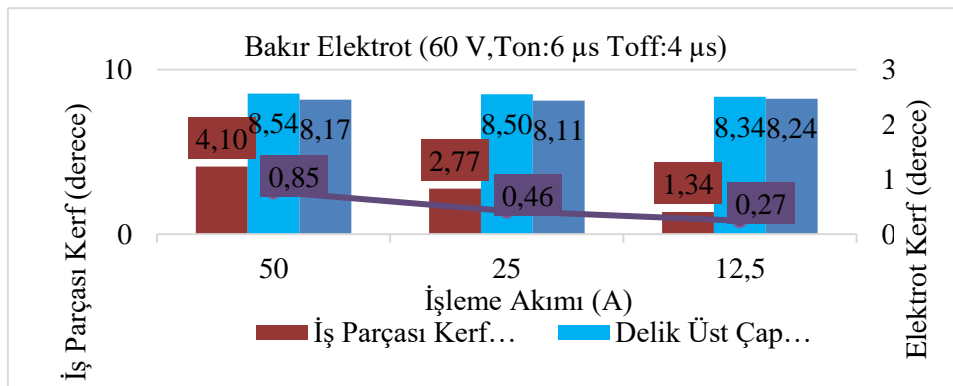
Sleipner İş Parçası				Kerf (derece)	
Deney No	Deliküst çap (mm)	Delikalt çap (mm)	Derinlik (mm)	İş parçası	Elektrot
1	8,40	8,24	1,55	2,95	0,55
2	8,37	8,26	1,05	3	2,26
3	8,30	8,27	1,20	0,72	0,41
4	8,40	8,30	2,30	1,25	0,31
5	8,40	8,26	2,00	2	0,24
6	8,23	8,10	1,92	1,94	0,15

7	8,60	8,26	2,24	4,34	0,84
8	8,40	8,30	1,01	2,83	0,31
9	8,30	8,20	1,45	1,97	0,40

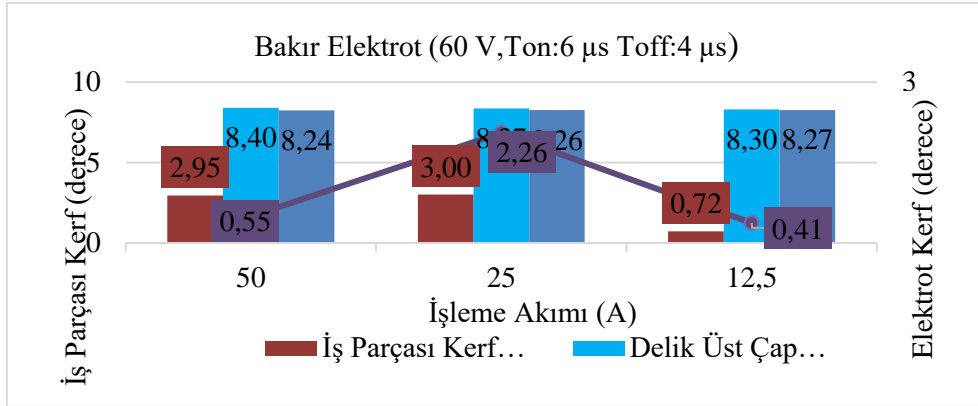


Şekil 5.5. Deneysel olarak kullanılan pirinç elektrotlar ve aşınmış yüzeyleri

Genel olarak deşarj akımı arttıkça artan deşarj enerjisi nedeniyle malzeme buharlaşma miktarı artar ve dolayısıyla işlem süresi azalır (Şekil 5.5.). Bu koşullar elektrot aşınmasına neden olduğundan, ortalama kerf açısı artmıştır. Yapılan tüm delme işlemlerinde iş parçası üzerinde bulunan delik giriş çaplarının delik çıkış çaplarından büyük olduğu tespit edilmiştir, Şekil 5.5'te (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde sırası ile bakır ve pirinç elektrot üzerlerindeki kerf'in iş parçası üzerindeki kerf ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu durum elektrot aşınmasından kaynaklanan kerf oluşumunun iş parçası üzerindeki etkilerini doğrular niteliktedir.



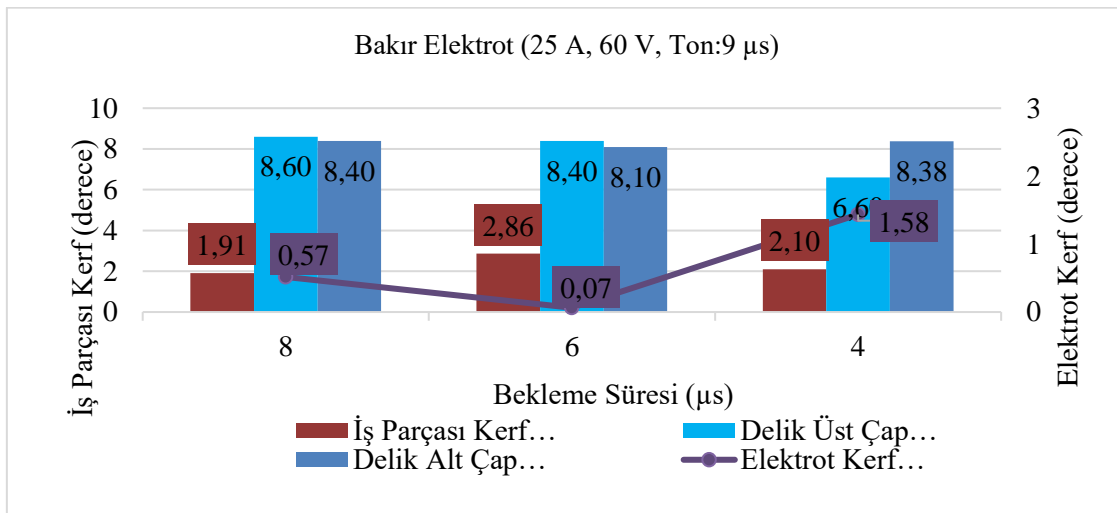
(a)



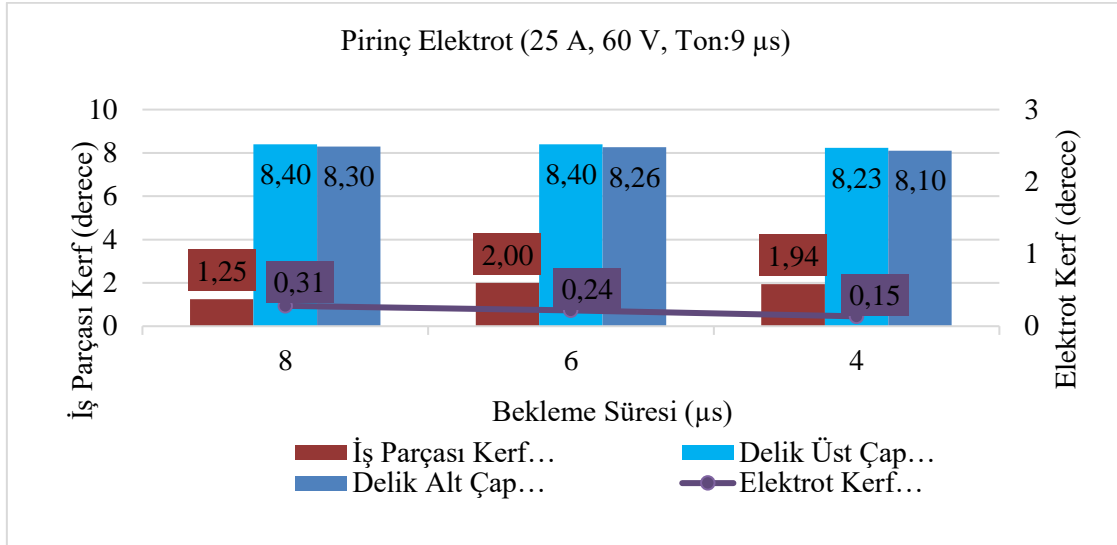
(b)

Şekil 5.6. Artan işleme akımına bağlı Kerf açıları ve delik çapları (a) Bakır, (b) Bakır

Sabit 25A akım, 60V voltaj ve 9 μ s ark süresinde artan bekleme süresinin kerf ve delik çapına etkileri Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Her bir deney sürecinde iki ark arasındaki ergimiş malzemelerin ortamdaki uzaklaştırılması için geçen süre bekleme süresidir. Bu süreçte ortamda bulunan debris ve aşınmış elektrot kalıntılarının ark bölgesinden elektro erozyon sıvısı yardımıyla uzaklaştırılması gerekir. Eğer yeterli tahliye sağlanamazsa ergimiş partiküller elektrot yüzeyine yapışır bu durum iş parçası ve elektrot malzemenin aşınmasına etki eder. Tüm deneylerde yüksek bekleme sürelerinde aşınan partiküllerin ortamdaki tahliye edilebilmesiyle yüzeylerde ark artarak delik giriş çapları artmıştır.



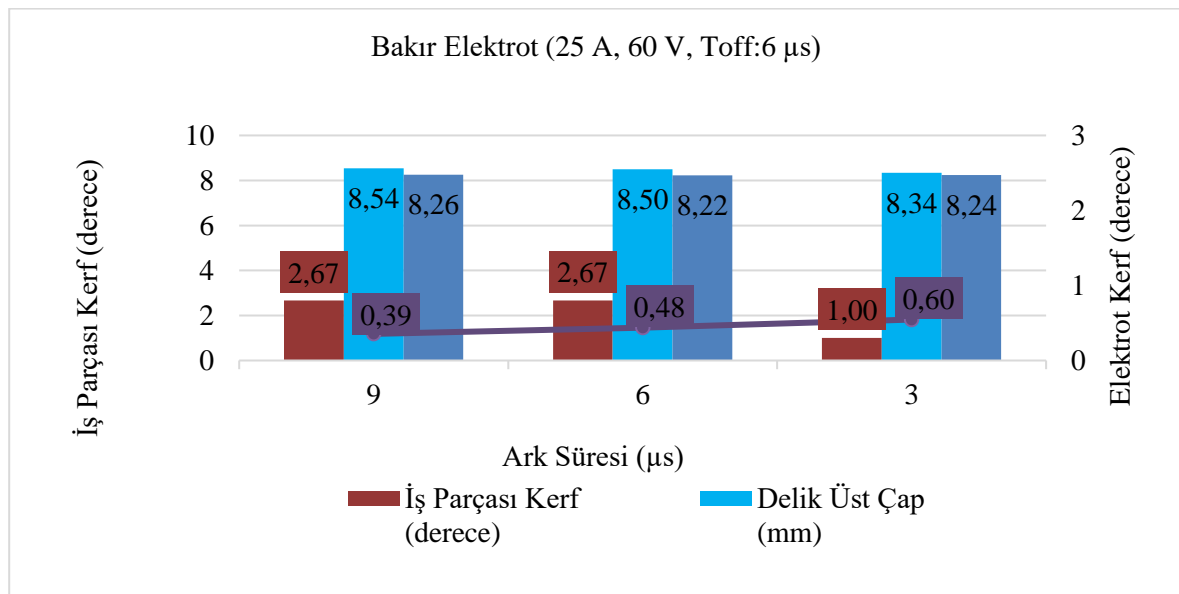
(a)



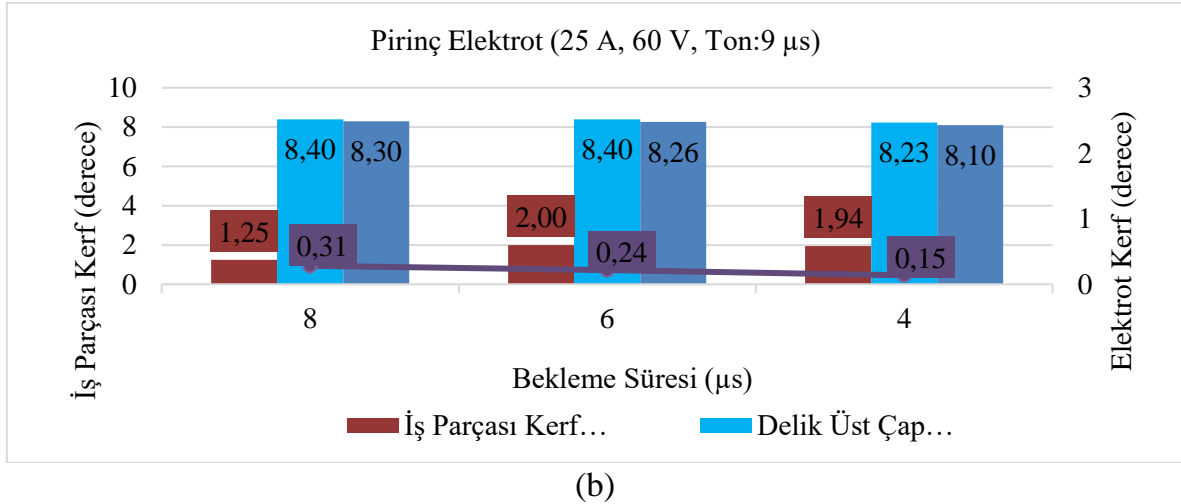
(b)

Şekil 5.7. Artan bekleme süresine bağlı Kerf açıları ve delik çapları (a) Bakır, (b) Pirinç

Ark süresi elektrot ve iş parçası arasındaki kıvılcımlanmanın olduğu süredir, Şekil 5.7 (a) ve (b) incelendiğinde ark süresinin artması ile ergime ve buharlaşma artmış bu sebeple delik giriş çapları artmıştır. Bu durum iş parçası üzerindeki kerf artışına benzer etkiyi sağlasada elektrot üzerindeki kerf oluşumunda düzensizliğe sebep olmuştur. Bu durum aşınan partiküllerin elektrot yüzeyine yapışmasıyla ve koruyucu tabaka görevi sağlayarak elektrot aşınmasına etki etmiştir.

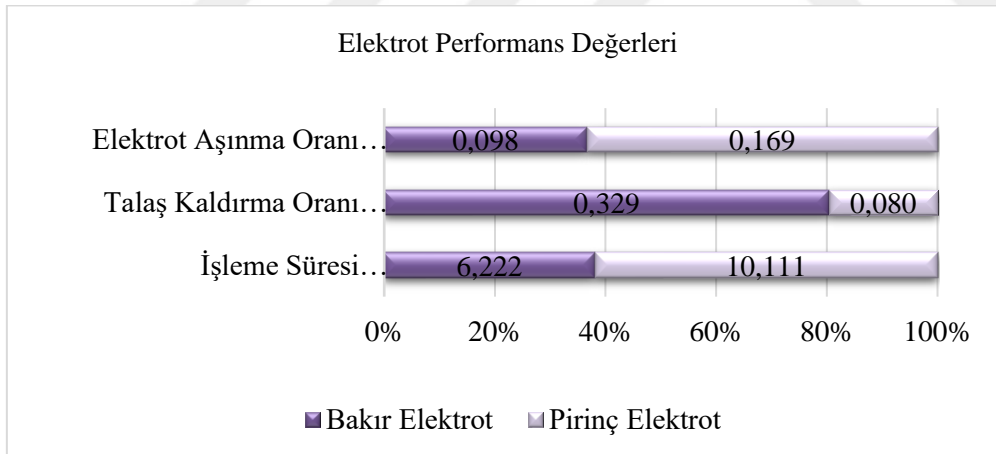


(a)



Şekil 5.8. Artan Ark süresine bağlı Kerf açıları ve delik çapları (a) Bakır, (b) Pirinç

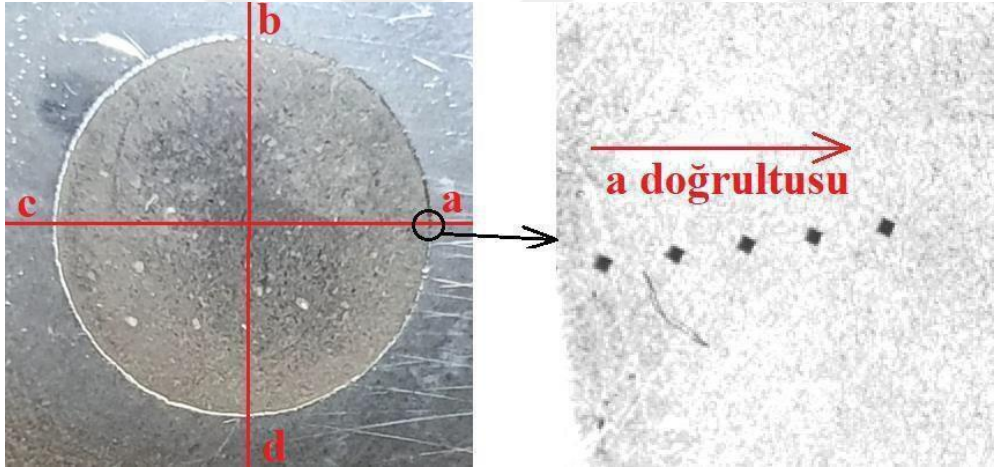
Bakır ve pirinç elektrot kullanımına bağlı olarak elde edilen ortalama talaş kaldırma oranı, elektrot aşınma oranı ve işleme sürelerinin tek bir grafikte karşılaştırılması Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Bu değerler tüm deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.9. Bakır ve Pirinç elektrotların performans değerleri

Bakır elektrot kullanımında talaş kaldırma oranı pirinç elektrot kullanımına göre sırasıyla ortalama %311,25 artarken, elektrot aşınma oranı ve işleme süresi sırasıyla %42,01 ve %38,46 oranında azalmıştır. Bu durum bakır elektrodun termal iletkenliği ve elektrik iletkenliğinin pirinç elektrotta göre daha yüksek olması ile açıklanabilir, İş parçası ile elektrot arasındaki kıvılcım atlamalarının ve termal etkilerin artması talaş kaldırma oranının artması ve işleme süresinin azalmasını sağlamıştır.

Şekil 5.10.'da mikro sertlik ölçümünde kullanılan yön doğrultularının isimlendirmesi görülmektedir, Çizelge 5.5'te pirinç ve bakır elektrot kullanarak değişik parametrelere göre yapılan delme işlemi sonrası, delme yüzeylerinden iç kısımlara doğru her bir 50µm de yapılan mikro sertlik ölçümleri verilmiştir, Pirinç tel numuneleri P1-P9 adlandırılırken bakır numuneler ise B1-B9 olarak adlandırılmaktadır, İş parçası malzemesinin mikro yapısı içerisinde rastgele dağılımı olan karbür yapılarına denk gelen sertlik ölçümlerinde, verilerin genel verilere göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir, Bu durumun EEI delme işlem sonrası yüzey sertlik değişimini incelerken yanılığa sebebiyet vermemesi bağlamında farklı dört bölgeden veriler alınarak ortalamaları kırmızı renkle tabloda verilmiştir, Veriler genel olarak incelendiğinde, pirinç elektrotlarla yapılan delme işlemlerinden sonra delme kenarlarında sertlik düşümleri buna karşın bakır elektrotlarla yapılan delme işlemlerinde ise bir miktar sertlik yükselmeleri gözlemlenmiştir.



Şekil 5.10. Mikro sertlik ölçümünde kullanılan yön doğrultuları

Çizelge 5.5. Pirinç ve Bakır elektrotla delme sonrası iş parçasında yüzeyden iç kısımlara doğru sertlik değişimi

N o		15	50	100	150	200	250	N o		15	50	100	150	200	250
		µm	µm	µm	µm	µm	µm			µm	µm	µm	µm	µm	µm
	a	639, 4	805, 3	761, 5	854, 1	822, 5	757, 6		a	502,5	720, 0	714, 5	742, 8	704, 9	679, 9
	b	554, 3	757, 6	727, 6	718, 1	648, 9	732, 1		b	603,1	656, 6	582, 3	706, 6	649, 3	680, 3
P1	c	598, 3	714, 5	692, 0	736, 8	808, 5	781, 4	B 1	c	664,5	562, 6	666, 9	719, 0	748, 5	758, 6
	d	755, 2	730, 8	805, 9	760, 5	728, 0	861, 1		d	632,7	715, 4	723, 9	662, 5	642, 0	621, 4

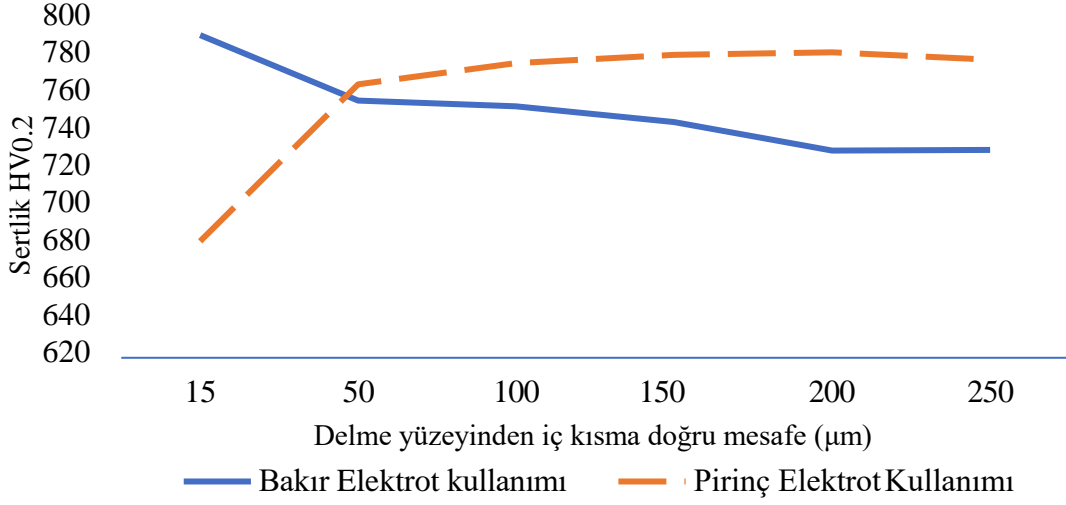
		636,8	752,1	746,8	767,4	752,0	783,1			600,7	663,7	671,9	707,7	686,2	685,1
	a	760,0	734,0	897,4	761,1	766,9	822,5		a	926,2	702,7	660,6	725,7	738,2	710,5
	b	682,8	752,8	817,6	822,0	824,2	785,0		b	649,3	700,1	760,5	731,5	693,7	715,8
P2	c	652,7	758,1	530,6	802,5	759,9	759,6	B 2	c	1111,8	865,2	819,3	802,1	734,9	698,0
	d	694,5	701,4	757,1	764,4	806,4	753,8		d	1127,4	975,9	724,4	752,3	679,1	693,3
		697,5	736,6	750,7	787,5	789,4	780,2			953,7	811,0	741,2	752,9	711,5	704,4
	a	764,4	878,4	813,3	837,5	794,8	744,2		a	756,0	812,3	868,0	737,2	617,2	640,7
	b	641,3	775,9	831,4	785,5	805,8	762,5		b	759,6	732,1	805,3	697,1	631,2	744,7
P3	c	757,1	758,6	800,5	820,3	943,4	855,8	B 3	c	1331,8	942,7	877,1	719,9	587,6	655,2
	d	687,4	744,6	803,7	814,4	688,3	823,6		d	1360,0	904,9	787,0	687,0	679,1	708,8
		712,6	789,4	812,2	814,4	808,1	796,5			1051,9	848,0	834,4	710,3	628,8	687,4
	a	694,5	730,3	721,2	879,6	792,7	758,6		a	813,8	779,4	796,3	687,8	694,1	741,3
	b	670,5	897,4	820,3	827,4	878,9	819,3		b	696,0	686,2	681,0	698,0	639,0	653,9
P4	c	659,0	741,9	808,3	706,2	727,1	736,3	B 4	c	963,9	750,2	700,0	704,9	727,2	640,2
	d	599,0	679,5	814,4	695,0	811,1	751,8		d	842,0	769,4	696,7	701,0	678,7	723,9
		655,8	762,3	791,1	777,1	802,5	766,5			828,9	746,3	718,5	697,9	684,8	689,8
	a	636,8	728,5	748,5	759,1	731,2	767,9		a	961,9	711,0	755,8	717,2	709,5	650,6
	b	672,6	808,5	855,2	807,9	817,8	867,6		b	780,4	727,1	792,7	698,4	668,1	698,0
P5	c	757,6	760,0	862,3	831,9	732,7	802,0	B 5	c	764,3	780,4	749,9	669,3	694,2	765,9
	d	608,6	802,5	719,0	788,7	869,4	788,1		d	742,8	800,3	683,6	682,4	795,3	685,3
		668,9	774,9	796,3	796,9	787,8	806,4			812,4	754,7	745,5	691,8	716,8	700,0
	a	624,3	884,3	845,5	805,3	814,9	811,1		a	883,2	768,4	754,2	776,6	722,1	777,9
	b	758,1	845,5	715,8	827,3	767,9	872,3		b	719,0	720,3	695,8	786,5	690,3	668,5
P6	c	787,0	603,8	816,5	809,2	894,9	847,7	B 6	c	859,9	648,9	722,1	726,6	881,4	775,9

	d	598, 7	785, 5	785, 5	856, 4	835, 3	843, 2		d	772,3	757, 1	752, 3	738, 2	732, 1	715, 0
		692, 0	779, 8	790, 8	824, 6	828, 3	843, 6			808,6	723, 7	731, 1	757, 0	756, 5	734, 3
	a	705, 7	818, 0	829, 7	816, 0	805, 3	813, 8		a	500,7	769, 9	804, 2	786, 5	828, 0	580, 4
	b	669, 3	801, 4	770, 4	826, 4	817, 0	830, 0		b	735,4	720, 4	785, 0	752, 3	748, 5	817, 6
P7	c	640, 9	767, 4	723, 0	702, 0	775, 0	764, 0	B 7	c	646,6	737, 7	777, 9	819, 3	872, 3	844, 9
	d	688, 0	656, 0	756, 6	790, 1	776, 0	749, 0		d	642,0	750, 0	822, 5	829, 1	712, 2	819, 3
		676, 0	760, 7	769, 9	783, 6	793, 3	789, 2			631,2	744, 5	797, 4	796, 8	790, 3	765, 6
	a	705, 7	808, 0	789, 7	796, 0	801, 3	802, 9		a	798,4	806, 9	792, 2	776, 4	828, 6	827, 5
	b	648, 6	782, 3	729, 6	782, 3	799, 4	788, 8		b	734,9	743, 3	759, 6	756, 7	779, 9	784, 5
P8	c	722, 1	695, 0	784, 0	668, 4	680, 2	611, 0	B 8	c	757,6	753, 8	800, 2	812, 2	794, 2	803, 2
	d	659, 9	839, 4	748, 2	705, 4	658, 4	642, 4		d	672,6	747, 1	740, 0	766, 9	743, 3	748, 5
		684, 1	781, 2	762, 9	738, 0	734, 8	711, 3			740,9	762, 8	773, 0	778, 1	786, 5	790, 9
	a	721, 4	770, 9	750, 0	790, 6	820, 1	776, 7		a	671,3	819, 3	772, 9	830, 8	778, 4	829, 1
	b	679, 1	829, 2	746, 8	715, 1	688, 6	649, 7		b	709,6	800, 5	805, 8	833, 6	888, 7	868, 3
P9	c	712, 1	699, 0	774, 0	698, 4	684, 2	671, 0	B 9	c	719,4	708, 5	752, 9	771, 7	820, 9	822, 5
	d	739, 4	707, 5	802, 6	754, 7	790, 2	822, 5		d	684,0	692, 0	744, 7	826, 4	751, 4	745, 7
		713, 0	751, 7	768, 4	739, 7	745, 8	730, 0			696,1	755, 1	769, 1	815, 6	809, 9	816, 4

Şekil 5.11’de Çizelge 5.5’deki sertlik verilerinin sadece pirinç ve bakır elektrot kullanımını irdelemek için alınan ortalamalarından elde edilen grafik verilmiştir. Özellikle elektrot farkının ilk 50 µm lik kısımda sertlik verilerinde zıt yönlere farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Bakır elektrorla yapılan delme işlemi sonrasında işparçası yüzeyinde sertlik verilerinin arttığı buna karşın pirinç elektrotla yapılan işlem sonrası sertlik verilerinin düşüş gösterdiği gözlemlenmektedir, Her iki elektrotla delme işlemi yapılırken uygulanan EEI delme parametrelerinin (Akım, Volt, Ton ve Toff eşit olduğundan benzer güç “W” uygulanmaktadır) aynı olmasına karşın elektrotların malzeme yapılarındaki elektrik iletkenlik katsayı farklılıkları, bakır elektrotun aynı koşullarda pirinç elektrotta göre ısı yoğunluğunun (W/mm^2) daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu durum genel olarak, bakır

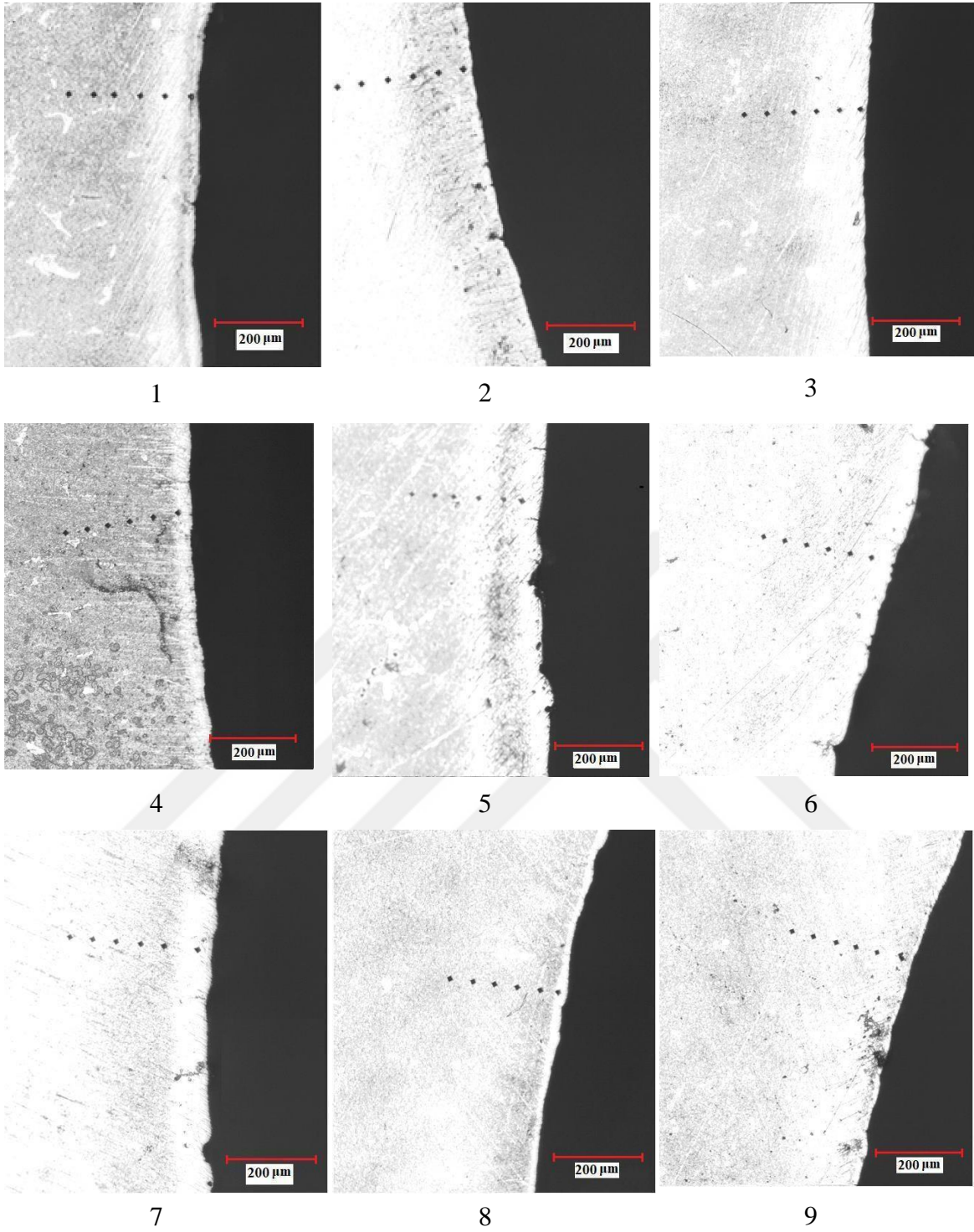
elektrotla yapılan delme uygulamalarında iş parçasının delme yüzeylerinde sıcaklıkları pirinç elektrot uygulandığı işleme göre daha yüksek sıcaklıklara çıkarttığı ve dielektrik sıvı uygulamasıyla yüzeyde fazladan sertleştirme yaptığı öngörülmektedir. Ayrıca pirinç elektrotla delme işlemi yaparken delme hızının bakır elektrotta göre daha az olması, delme sürecinde iş parçasının delme kenarına uygulanan ısı girdisini artırmaktadır. Bu durum, pirinç elektrot kullanıldığında ısıdan etkilenen bölgenin bakır elektrotta göre daha uzun süre ama daha düşük sıcaklığa maruz kalmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla ısıdan etkilenen bölge, iş parçasının normal sertliğinin altına düşmesine sebep olmuştur.



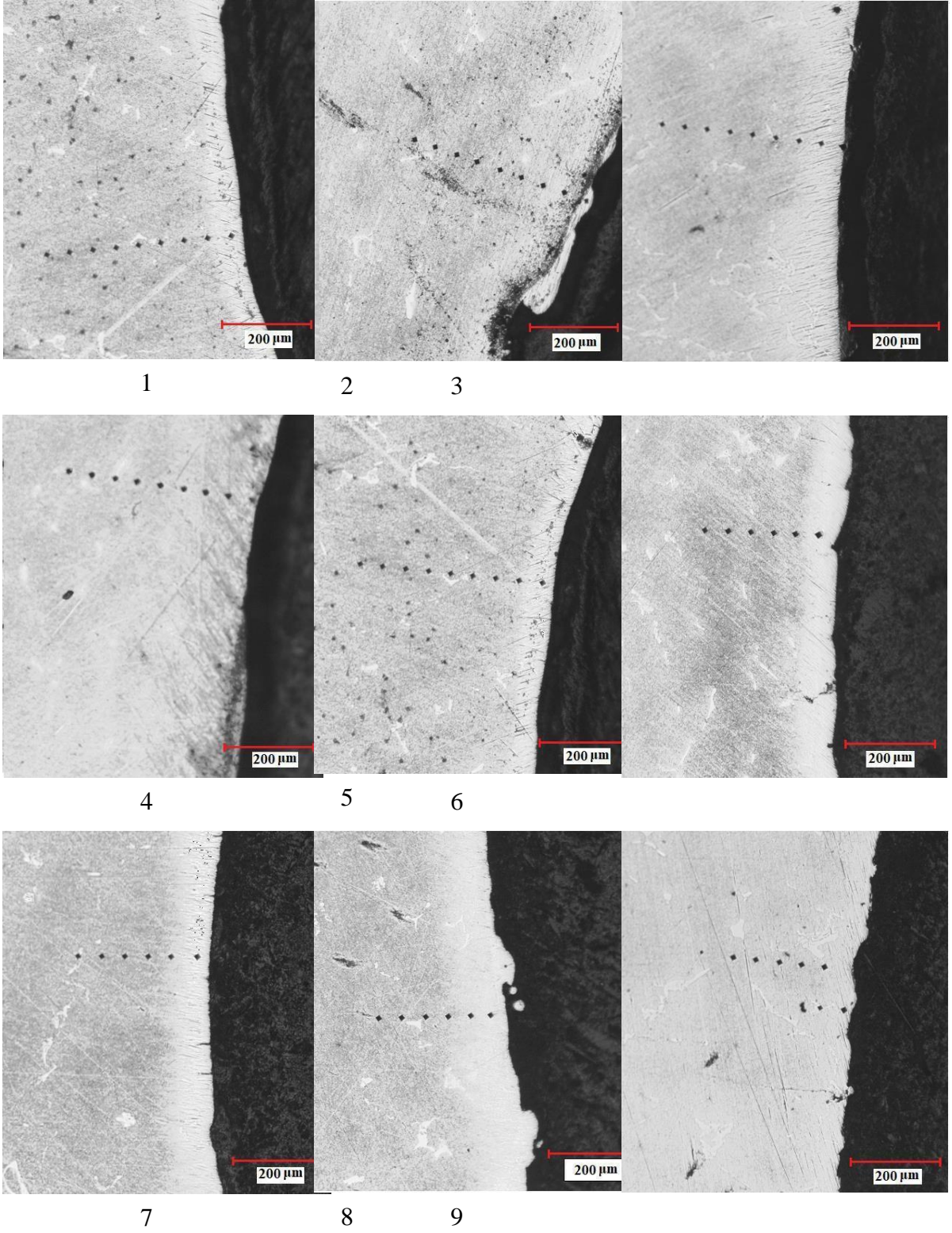


Şekil 5.11. Bakır ve Pirinç elektrot kullanılarak yapılan delme işlem sonrası delik kenarlarından iç kısımlara doğru sertlik değişimler

Şekil 5.12.'de pirinç ve Şekil 5.13'te bakır elektrot kullanılarak delinen iş parçalarının delik yüzeyinden iç kısımlara doğru 50 µm aralıklarla yapılan sertlik ölçümleri sonrası ölçüm izleri görülmektedir. Şekiller optik mikroskop görüntüleri olup delme sonrası yüzey düzgünlükleri ve yüzeyde oluşan ısıdan etkilenen kısımlarda görülmektedir.



Şekil 5.12. Piriç elektrot kullanılarak yapılan delme işlem sonrası delik kenarından iç kısımlara doğru sertlik iz görüntüleri



Şekil 5.13. Bakır elektrot kullanılarak yapılan delme işlem sonrası delik kenarlarından iç kısımlara doğru sertlik iz görüntüleri

Şekil 5.9’de pirinç elektrotla yapılan delme işleminde ısı girdisinin en az olduğu 3 numaral işlemde yüzey düzgünlüğünün diğer parametrelere göre en iyi olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu parametrelerle yapılan delme işleminde yüzey mikro sertlik değerinin ana malzeme sertlik değerine yakın olduğu görülmektedir. Isı girdisinin yükselmesi kimi yüzeylerde çatlak kimi yüzeylerde dalgalı bir profil oluştururken kimilerinde de hem dalgalı yüzey hem de çatlak oluşumu göstermektedir. Kesme hızını çok yavaş olmasının (8 ve 9, numuneler) yüzeylerin iyi olmasını sağlamadığı görülmektedir, Benzer şekilde Şekil 5.9 bakır elektrotla yapılan delme işleminde ısı girdisi en az olan 3 ve 4 numaralı numunelerin yüzeylerinin diğerlerine göre oldukça iyi görülmektedir, Özellikle ısı girdisinin diğer numunelere göre çok yüksek olduğu 9 numaralı numunede yüzeyde oldukça fazla dalgalanma gözlemlenmiştir, Kesme hızı bakımından 9, numune bakır serisinin en yavaş olmasına karşın yüzeyin bu denli kötü olması yavaş delmenin yüzey kalitesi bakımından da avantajlı olmadığını göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Bu çalışmada, elektro erozyon işleme yönteminde bakır ve pirinç elektrotlar kullanılarak ısı işleme sertleştirilmiş Sleiþner soğuk iş takım çeliğine delikler delinmiştir, Yapılan deneylerde işleme akımı (A), servo voltajı (V), ark süresi (μ s), bekleme süresi (μ s) girdi parametreleri olarak; işleme süresi (dak), talaş kaldırma oranı (g/dak), elektrot aşınma oranı (g/dak), kerf (derece), mikro sertlik değişimleri performans çıktıları olarak değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıda belirtilen önemli sonuçlardan bahsetmek mümkündür;

Bakır elektrotla yapılan delme işlemi sonrasında iş parçası yüzeyinde sertlik verilerini arttığı buna karşın pirinç elektrotla yapılan işlem sonrası sertlik verilerinin düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir, Kullanılan elektrotların elektrik iletkenlik katsayı farklılıkları, bakır elektrotun aynı koşullarda pirinç elektrotta göre ısı yoğunluğunun (W/mm^2) daha yüksek olmasını sağlamıştır. Bu durum genel olarak, bakır elektrotla yapılan delme uygulamalarında iş parçasının delme yüzeylerinde sıcaklıkları pirinç elektrot uygulandığı işleme göre daha yüksek sıcaklıklara çıkarttığı ve dielektrik sıvı uygulamasıyla yüzeyde fazladan sertleştirme yaptığı öngörülmüştür.

Yapılan deneyler neticesinde EEİ yönteminde elektrot malzeme olarak bakır kullanımının pirinç malzemeye göre daha kısa işleme zamanı ve daha fazla talaş kaldırma oranı sağladığı tespit edilmiştir. Bu durumun bakır elektrotların elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliklerinin pirinç elektrotlara göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İşleme akımı, ark süresi, bekleme süresi, elektrot malzeme cinsi gibi işleme parametrelerinin işlem süresine ve talaş kaldırma miktarına etki ettiği, işleme akımının azalmasıyla azalan kıvılcımlanmaya bağlı olarak işleme süresinin arttığı ve delik giriş çaplarının azaldığı tespit edilmiştir. Bekleme ve ark süresinin genel olarak işleme süresine, delik giriş çapına, işlenmek istenen derinliğe etki ettiği fakat bu etkinin ortamda bulunan debris ve aşınan elektrot kalıntılarının işlem bölgesinden tahliyesi gibi durumlardan

etkilendiği görülmüştür. Yapılan analizler neticesinde, bakır elektrot kullanımında talaş kaldırma oranı pirinç elektrot kullanımına göre ortalama %311,25 artarken, elektrot aşınma oranı ve işleme süresi sırasıyla %42,01 ve %38,46 oranında azalmıştır. Bu durumlara bakır elektrodun termal ve elektrik iletkenliğinin pirinç elektrota göre daha yüksek olması sebep olmuştur. İş parçası ile elektrot arasındaki kıvılcımlanmanın ve termal etkilerin artması talaş kaldırma oranının artmasını ve işleme süresinin azalmasını sağlamıştır. Farklı işleme parametreleriyle bakır ve pirinç elektrot kullanımında delinen deliklerin giriş çaplarının çıkış çaplarından büyük olduğu görülmüş, aşınan elektrotlar sebebiyle debris tahliyesine bağlı olarak düzensiz bir kerf oluşumuna rastlanmıştır.

62. Öneriler

Yapılan çalışmaya ek olarak;

Farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip iş parçası ve elektrot malzemeler seçilerek işlenebilirlik çalışmaları tekrarlanabilir.

EEİ yöntemi için farklı çalışma parametreleri tercih edilebilir ve etkileri incelenebilir.

EEİ tezgâhında kullanılan farklı viskoziteli dalma erozyon sıvıları ve sirkülasyon basınçları kullanılabilir.

EEİ yönteminde aşınan iş parçası ve elektrot malzemelerinin atıklarının farklı gözenek çaplarına sahip filtrelerle süzülerek işlem verimi analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

- Bari, P., Chauhan, S., Patil, K., Mhasde, S., & Dharmadhikari, A, (2017, January), Optimization of electric discharge machining process parameters using carbon nanotubes, In 2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE) (pp, 1-6), IEEE.
- Ceritbinmez, F, & Kanca, E, (2022), The Effects of Cutting Parameters Used in Milling X153CrMoV12 Cold Work Tool Steel by End Mills on Surface Roughness and Hardness of The Workpiece, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 10 (1), 27-38, DOI: 10,29109/gujsc,1017383
- 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, (2020), Nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin işlenebilirliğinin araştırılması, (Doktora Tezi), İskenderun Teknik Üniversitesi / Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Ceritbinmez, F, & Kanca, E, (2021), The Effects of Cutting Parameters on the Kerf and Surface Roughness on the Electrode in Electro Erosion Process, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9 (2), 335-346, DOI: 10,29109/gujsc,913417
- Dayakar, K., Raju, K, K., & Raju, C, R, B, (2019), Prediction and optimization of surface roughness and MRR in wire EDM of maraging steel 350, Materials Today: Proceedings, 18, 2123-2131.
- Dhanabalan, S., Sivakumar, K., & Narayanan, C, S, (2015), Experimental investigation on electrical discharge machining of titanium alloy using copper, brass and aluminum electrodes, Journal of Engineering Science and Technology, 10(1), 72-80.
- Engin, N., Argun, K., & Zurnacı, E, (2018), AISI 1,2738 Çeliğinin Elektro-Erozyon Tezgaahında Grafit Elektrot ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(4), 1082-1093.
- Gopalsamy, B, M., Mondal, B., Ghosh, S., Arntz, K., & Klocke, F, (2010), Experimental investigations while hard machining of DIEVAR tool steel (50 HRC), The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 51(9), 853-869.
- Gowthaman, P, S., & Jeyakumar, S, (2019), A Review on machining of High Temperature Aeronautics Super-alloys using WEDM, Materials Today: Proceedings, 18, 4782-4791.
- Guu, Y, H, (2005), AFM surface imaging of AISI D2 tool steel machined by the EDM process, Applied Surface Science, 242(3-4), 245-250.

- Gupta, R., Bibave, P., Shelke, A., Kesarkar, R., Bari, P., & Chauhan, S, (2016), Optimization of electrical discharge machining process parameters using flushing and drilled tool, *Int, Res, J, Eng, Technol.*, 3(4), 1316-1320.
- Hourmand, M., Sarhan, A, A., & Noordin, M, Y, (2017), Development of new fabrication and measurement techniques of micro-electrodes with high aspect ratio for micro EDM using typical EDM machine, *Measurement*, 97, 64-78.
- Joshi, A., Saraf, A, K., & Goyal, R, K, (2020), EDM machining of die steel EN8 and testing of surface roughness with varying parameters, *Materials Today: Proceedings*, 28, 2557-2560.
- Kabini, S, K, (2018), Optimization of Electrical Discharge Machining Process Using an Adaptive Controller Based on Fuzzy Logic (Doctoral dissertation, JKUAT-COETEC).
- Kalyon, A, (2020), AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin elektro erozyon tekniği ile işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(1), 75-86.
- Kalyon, A, (2019), Elektro Erozyon ile İşlemede Yüzey Pürüzlülüğünün ve İş Parçası İşleme Hızının Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(62), 595-605.
- Kalyon, A., & Fatatit, A, Y, (2019), The Environmental Impact of Electric Discharge Machining, *International Journal of Engineering Science and Application*, 3(3), 123-129.
- Kumar, K., Rawal, S, K., Singh, V, P., & Bala, A, (2018), Experimental study on diametric expansion and taper rate in EDM drilling for high aspect ratio micro holes in high strength materials, *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7363-7372.
- Kumar, S, R., Srinivasan, V, P., Balamurugan, S., Krishnaa, S, D., Gokul, V., & Anudeep, S, (2021), Optimization of machine machining parameters in EDM of silicon nitride- titanium nitride based on RSM, *Materials Today: Proceedings*, 45, 1312-1318.
- 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.
- Lee, H, T., Hsu, F, C., & Tai, T, Y, (2004), Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode, *Materials Science and Engineering: A*, 364(1-2), 346-356.
- Li, L., Li, Z, Y., Wei, X, T., & Cheng, X, (2015), Machining characteristics of Inconel 718 by sinking-EDM and wire-EDM, *Materials and Manufacturing Processes*, 30(8), 968- 973.
- Liang, W., Tong, H., Li, Y., Li, B., & Kong, Q, (2019), Sliding-mode controller and algorithm for improving servo control of discharge gap in precise fast hole EDM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5), 2689-2698.

- Lin, Y, C., Wang, A, C., Wang, D, A., & Chen, C, C, (2009), Machining performance and optimizing machining parameters of Al₂O₃-TiC ceramics using EDM based on the Taguchi method, *Materials and manufacturing processes*, 24(6), 667-674.
- Mahajan, R., Krishna, H., Singh, A, K., & Ghadai, R, K, (2018, June), A Review on Copper and its alloys used as electrode in EDM, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol, 377, No, 1, p, 012183), IOP Publishing.
- Matthews, F, L., Davies, G, A, O., Hitchings, D., & Soutis, C, (2000), *Finite element modelling of composite materials and structures*, Elsevier.
- Mouralová, K., Bednar, J., Benes, L., Hrabec, P., Kalivoda, M., & Fries, J, (2020), The analysis of EDM electrodes wear in corners and edges, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(4), 1-14.
- Özgül, B, (2021), Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Sleipner cold work tool steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3), 1241- 1251.
- Özdemir, M., Yilmaz, V., & Dilipak, H, Aisi 1040 çeliğinin elektro erozyon ile işleme yöntemiyle delinmesinde işleme parametrelerinin temel performans çıktıları üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Gazi üniversitesi fen bilimleri dergisi part c: tasarım ve teknoloji*, 3(1), 417-426.
- Pantazopoulos, G., Psyllaki, P., Kanakis, D., Antoniou, S., Papadimitriou, K., & Sideris, J, (2006), Tribological properties of a liquid nitrocarburised special purpose cold work tool steel, *Surface and Coatings Technology*, 200(20-21), 5889-5895.
- Pavan, C., & Sateesh, N, (2021), Taguchi analysis on machinability of Inconel 600 using Copper, Brass, and Copper tungsten electrodes in EDM, *Materials Today: Proceedings*, 46, 9281-9286.
- Payal, H, S., Choudhary, R., & Singh, S, (2008), Analysis of electro discharge machined surfaces of EN-31 tool steel.
- Raj, S., Sinha, H, R., Das, S., Guha, S., Banik, D., & Routara, B, C, (2020), Optimization of surface topography of electro-discharge machined super alloy Inconel 825: using TOPSIS integrated with Taguchi philosophy, *Materials Today: Proceedings*, 24, 218- 224.
- Rizvi, S, A, H., Agarwal, S., & Bharti, P, K, (2020), Modeling of Surface Roughness of AISI 4340 Using Copper-Tungsten Tool in Die Sinking EDM, *Materials Today: Proceedings*, 22, 2334-2340,
- Sahu, A, K., & Mahapatra, S, S, (2020), Surface characteristics of EDMed titanium alloy and AISI 1040 steel workpieces using rapid tool electrode, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(2), 699-718.
- Valentinčić, J., Bissacco, G., & Tristo, G, (2021), Uncertainty of the electrode wear on-machine measurements in micro EDM milling, *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 153-160

- Wang, X., Huang, C., Zou, B., Liu, H., Zhu, H., & Wang, J, (2014), A new method to evaluate the machinability of difficult-to-cut materials, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1), 91-96,
- Xi, X, C., Ye, L., Yu, J, H., & Zhao, W, S, (2020), Minimum-variance self-tuning regulator in EDM drilling processes for ultra-high-aspect-ratio small holes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(11), 3293-3303,
- Yıldız, Y, (2017), Biyomedikal uygulamalar için magnezyum-kalsiyum (mg-0,8 ca) alaşımının dalma elektro erozyon ile işlenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi mühendislik fakültesi fen ve mühendislik dergisi*, 20(59), 336-346,
- Ziętala, M., Durejko, T., & Łazińska, M, (2015), Wire electrical discharge machining of FeAl intermetallic sinters without and with addition of Nano-Al₂O₃ oxide ceramic, *Archives of Metallurgy and Materials*, 60



DİZİN

A

alaşım · 13
arksüresi · 47

B

bakır · iv, ix, xi, 13, 16, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 29, 30, 31,
32, 35, 36, 40, 43, 44, 46, 47, 48
Bakır · iv, ix, x, xi, 19, 20, 21, 24, 25, 27, 31, 33, 34, 35,
37, 38, 39, 40, 42, 43, 45, 47
boyutsal kararlılık · iv, 13

D

delik çıkış ölçüsü · 28
delme · iv, ix, x, xi, 16, 17, 18, 23, 35, 36, 40, 42, 43, 44,
45, 47

dijital kumpas · 28

E

Elektro erozyonla · 13
elektro erozyonla işleme · iv, 13
elektrot aşınma oranı · iv, 21, 30, 31, 32, 39, 40, 47, 48

I

ısıt işleme · iv, 13, 23

K

kalıpcılık · iv
Katkılı kompozit · 46
Kerf · iv, v, x, xi, 22, 28, 29, 35, 37, 38, 39, 49
konvansiyonel delme · iv, 17

L

lazer kesim · iv, 17

M

mikrosertlik · 47

O

orbital frezeleme · iv

P

Pirinç · iv, vii, ix, x, xi, 21, 25, 31, 33, 34, 35, 37, 38, 39,
40, 44

S

Sertlik · iv, 24, 25
servo voltajı · 47
Sleipner · iv, v, vii, ix, xi, 13, 23, 24, 35, 47, 50
Soğuk iş takım çelikleri · iv
su jeti kesim · iv, 17

T

takım aşınması · iv, 13, 17
talaş kaldırma oranı · iv, x, 21, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 39,
40, 47, 48
TKO · iv, xii, 14, 19, 21, 26
tokluk · iv

Y**Z**

yüksek aşınma dayanımı · iv

yüksek sertlik · iv, 23

zımba · iv





TEKNOVERSITE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

