

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**Tİ6AL4V SÜPERALAŞIMININ ELEKTRO EREZYON
TEZGÂHI İLE İŞLENMESİNDE BOYUTSAL
TOLERANSLARIN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN İŞLEM
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

Savaş APAK

Yüksek Lisans Tezi
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Sistemler Programı

MART-2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Tİ6AL4V SÜPERALAŞIMININ ELEKTRO EREZYON TEZGÂHI İLE
İŞLENMESİNDE BOYUTSAL TOLERANSLARIN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN
İŞLEM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Savaş APAK
(151134105)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :12.02.2019

Tezin Savunulduğu Tarih :15.03.2019

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AY

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Furkan SARSILMAZ

: Dr. Öğr. Üyesi Zülküf DEMİR

MART-2019

ÖNSÖZ

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, başlangıcından sonuna kadar, gerekli bütün yardım ve tavsiyeleri yapan, karşılaştığım problemlerin çözümünde deneyimlerinden yararlandığım sayın **Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AY**' a, Manisa Organize Sanayisinde faaliyet gösteren Ansal kalıp çalışanı ve danışmanım olan abim **Nihat APAK**' a ve yardımı olan herkese katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi (FÜBAP) yönetim birimi tarafından maddi olarak desteklenen TEKF 17.11 no'lu projemize katkıda bulunan bütün FÜBAP birimine teşekkür ederim.

Sevgili aileme gösterdikleri özveri ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Savaş APAK
ELAZIĞ- 2019

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	XII
GİRİŞ.....	1
1. ELEKTRO-EREZYON YÖNTEMİNİN İŞLEM BASAMAKLARI.....	4
1.1. Elektro-Erozyon Çeşitleri.....	9
1.1.1. Elektro-Erozyon İle İşleme Yöntemi (EEİ).....	9
1.1.2. Tel Erozyon İle İşleme Yöntemi (TEİ).....	11
1.1.3. Freze Erozyon İle İşleme (FEİ).....	12
1.1.4. Taşlama Erozyon Yöntemiyle İşleme (TEYİ).....	12
1.1.5. Ultrasonik Destekli Erozyon İle İşleme (UDEİ).....	13
1.1.6. Mikro Elektro Erozyon İşleme.....	13
2. EEİ İŞLEM PROSESİNİ ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER.....	14
2.1. Elektriksel Değişkenler.....	14
2.1.1. Boşalım Akımı.....	14
2.1.2. Darbenin aktif olduğu zaman (T_{on}).....	14
2.1.3. Darbe boşluk süresi (T_{off}).....	15
2.1.4. Gap Voltaj.....	15
2.1.5. Polarite.....	16
2.1.6. Compr.....	16
2.1.7. Gain.....	16
2.2. Elektriksel Olmayan Değişkenler.....	16
2.2.1. Dielektirik sıvı.....	17
2.2.2. Elektrotlar (İşleme Takımları).....	17
2.2.3. Ağırlık.....	18
2.2.4. Kapak.....	18

2.2.5. İç Yıkama.....	18
2.2.6. Prizma.....	19
3. ELEKTRO EREZYON İŞLEME YÖNTEMİNİN KULLANIM ALANLARI VE ÖNEMİ	20
3.1. Kalıp ve Kalıp Parçaları.....	20
3.2. Kesici Takımlar	21
3.3. Uçak Sanayisinde.....	21
3.4. Otomobil Parça Üretimi.....	21
4. ELEKTRO EREZYON İŞLEME YÖNTEMİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI.....	22
4.1. Elektro Erezyon İşleme Yönteminin Avantajları	22
4.2. Elektro Erezyon İşleme Yönteminin Dezavantajları	23
5. METARYAL VE METOD	24
5.1. Deneysel Malzeme ve Numune Hazırlanması.....	24
5.2. Elektro Erezyon İşleme ile Delik İşleme Deneyleri	25
5.3. Malzeme Kaldırma Oranı Analizi	28
5.4. Takım Aşınma Oranı Analizi.....	28
5.5. Elektrot Ve Deliklerin Çaplarında Koniklik Oranı.....	29
5.6. Elektrotlara Uygulanan Kriyojenik Isıl İşlem Çevrimi.....	30
5.7. Elektriksel İletkenliğin ve Mikro Sertlik Değerlerinin Analizi	31
5.8. Metalografik İncelemeler.....	33
5.9. Yeniden Katılaştan Tabaka Kalınlığı Analizi	33
6. DENEY SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	34
6.1. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	34
6.2. Elektro Erezyon İşleme İle Delme Deney Sonuçları.....	47
6.2.1. Mikro sertlik Ölçüm sonuçları.....	47
6.2.2. Yeniden Katılaştan Tabaka Kalınlığı (YKTK) Ölçüm Sonuçları.....	49
6.2.3. Malzeme Kaldırma Oranı (MKO)	58
6.2.4. Takım Aşınma Oranı (TAO)	62
6.2.5. Elektrotların Sıcaklık Değerlerinin Ölçülmesi	67
6.2.6. Koniklik Miktarı Oranı (KMO).....	69

7.	DENEY PARAMETRELERİNİN TOPSİS YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU	85
7.1.	Topsis Yöntemi.....	85
7.2.	EEİ İşleme Deneylerinin TOPSİS Analizi	87
8.	GENEL SONUÇLAR	95
8.1.	Genel Sonuçlar.....	95
	KAYNAKLAR	99
	ÖZGEÇMİŞ	102



ÖZET

Titanyum alaşımları, özellikle yüksek korozyon direnci, yorulma direnci ve yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyeti gibi özellikleri nedeniyle havacılık, uzay ve denizcilik endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle türbin motorlarının farklı bileşenlerinde geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip olan Ti6Al4V alaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak düşük ısı iletkenliği, düşük elastikiyet ve yüksek sıcaklıkta kimyasal anfinitesi nedeniyle Ti6Al4V alaşımın geleneksel üretim yöntemleriyle işlenmesi zordur. Elektro Erezyon İşleme teknolojisi, Zirkonyum, Nimonik, Titanyum, Nikel, vs. gibi geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor malzemelerin işlenmesi için etkili çözümler sunan gelişmiş üretim yöntemlerinden biridir. Bununla birlikte, delik delme işlemlerinde, işlenmiş yüzeylerin yüzey kaliteleri, mikro yapı değişimleri, yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı, koniklik oranı, takım aşınma hızı, talaş kaldırma oranı, gibi karakteristik özellikler işlem performansının belirtilmesinde büyük önem arz etmektedir. Bu gerekçelerden yola çıkarak çalışmamızda, EEİ yöntemi ile delik delme işleminde işlem parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkisi ve optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi araştırılmıştır. Ayrıca maliyetin düşürülmesi ve işlem performansının artırılması için kullanılan elektrot takımlarına kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Çalışmada işlenmiş yüzeylerin mikroyapısı elektron tarama mikroskopu (SEM) ile incelenmiş, ısıtma etkiye maruz kalan bölgedeki mikroyapıdaki değişiklikler enerji dağılımı spektrometre (EDS) ve X-Işını kırınım (XRD) yöntemi ile incelenmiştir. İşlem sırasında elektrotların maruz kaldıkları sıcaklık değerleri uzaktan ölçüm yapan temassız lazer pirometre ölçüm cihazıyla yapılmıştır. İşlenmiş yüzeylerin yüzey kaliteleri, mikro yapıdaki değişimler, yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı, takım aşınma oranları, malzeme kaldırma oranı, koniklik oranı gibi karakteristik özellikler araştırıldı ve bu karakteristiklerin işlem parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiği incelendi. Elektrotlara uygulanan kriyojenik ısıtma işlemi sonucunda, elektrot aşınma ve malzeme kaldırma oranında pozitif iyileşmeler elde edildi. Elektro Erezyon ile işlemede elektriksel parametrelerin bir bütünlük teşkil ettiği sonucuna varıldı. Yeniden Katılaştıran Tabaka Kalınlığı, Malzeme Kaldırma Oranı, Takım Aşınma Oranı ve Koniklik Miktarı Oranlarını elektriksel parametreler olan Boşalım akımı, Gap voltaj ve Darbe aktif süresi pozitif yönde etki ettiği görülürken Darbe boşlu süresinin ise negatif yönde ettiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektro Erozyon, Kriyojenik ısıtma işlemi, Çoklu performans analizi.

SUMMARY

Optimization of Operating Parameters for Improvement of Dimensional Tolerances with the Electro Discharge Machine of the Ti6Al4V Superalloys

Titanium alloys are frequently used in the aerospace and marine industry due to their high corrosion resistance, fatigue resistance and ability to work at high temperatures. Ti6Al4V alloy with improved mechanical properties is widely used especially in different components of turbine engines. Due to its low thermal conductivity, low elasticity and high temperature chemical affinity, Ti6Al4V alloy is difficult to process with traditional production methods. Electro Erosion Processing technology, Zirconium, Nimonic, Titanium, Nickel, etc. It is one of the advanced production methods that provide effective solutions for the processing of materials that are difficult to process by conventional methods. However, in hole drilling operations, characteristics such as surface qualities of machined surfaces, microstructure changes, re-solidifying layer thickness, taper ratio, tool wear rate, stock removal rate, etc. are of great importance in determining process performance. Based on these reasons, in our study, the effect of the process parameters on the hole quality and the optimum process parameters were investigated. In addition, cryogenic heat treatment was applied to the electrode tools used to reduce the cost and improve the process performance.

In this study, the microstructure of the treated surfaces was examined by electron scanning microscope (SEM) and the changes in the microstructure in the region exposed to thermal effect were examined by energy distribution spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD) method. The temperature values of the electrodes during the process were measured with a non-contact laser pyrometer measuring device. The surface qualities of the treated surfaces, changes in the microstructure, re-solidifying layer thickness, tool wear rates, material removal rate, taper ratio were investigated and how these characteristics changed depending on the process parameters were investigated. Cryogenic heat treatment applied to the electrodes resulted in positive improvements in electrode wear and material removal rate. It was concluded that the electrical parameters constitute an integrity in the process of Electro-Erosion. The re-gelling layer thickness, material removal rate, tool wear rate and taper quantity ratios were found to have positive effect on electrical parameters such as discharge current, gap voltage and pulse duration, whereas it was found that the pulse gap time was negative.

Key Words: Electro Discharge Machining, Cryogenic heat treatment, Multiplex performance analysis.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. EEİ sürecinde 1. aşama	4
Şekil 1.2. EEİ sürecinde 2. aşama	5
Şekil 1.3. EEİ sürecinde 3. aşama	5
Şekil 1.4. EEİ sürecinde 4. aşama	6
Şekil 1.5. EEİ sürecinde 5. aşama	6
Şekil 1.6. EEİ sürecinde 6. aşama	7
Şekil 1.7. EEİ sürecinde 7. aşama	7
Şekil 1.8. EEİ sürecinde 8. aşama	8
Şekil 1.9. EEİ sürecinde 9. aşama	8
Şekil 1.10. EEİ' de voltaj ve akımın zamanla değişimi	9
Şekil 1.11. EEİ ile işleme yöntemi	10
Şekil 1.12. Elektro erozyon tezgâhının şematik gösterimi	10
Şekil 1.13. Tel erezyon tezgâhının şematik gösterimi	11
Şekil 1.14. TEİ işleminin şematik görünüşü	12
Şekil 1.15. Ultrasonik destekli erozyon ile işleme (UDEİ).....	13
Şekil 5.1. EEİ ile işlenen numunelerin tasarımı ve işlem sonrası görüntüsü	25
Şekil 5.2. Dielektrik sıvının deneylerde uygulanış biçimi	26
Şekil 5.3. EEİ tezgahı ve güç ünitesi.....	26
Şekil 5.4. Deneylerde kullanılan işlem parametrelerinden tezgâh panelinin görüntüsü	26
Şekil 5.5. Elektrotlarda oluşan sıcaklık değeri ölçüm yöntemi.....	28
Şekil 5.6. Elektrotun işleme zamanına bağlı oluşan aşınma. a) parçaya yaklaşma b)kısmi konikleşme c) komple konikleşme d) elektrotun malzemeden çıkışı	29
Şekil 5.7. Delinmiş delikler için $C_{giriş}$, $C_{çıkış}$ ve $C_{elektrot}$ şematik gösterimi.....	30
Şekil 5.8. Elektrotlara uygulanan kriyojenik çevrim.....	31
Şekil 5.9. Elektriksel iletkenli ölçüm ve analiz cihazı	32
Şekil 6.1. EEİ' de bakır elektrot ile işlenmiş bir yüzeyin SEM görüntüsü	35
Şekil 6.2. EEİ' de pirinç elektrot ile işlenmiş bir yüzeyin SEM görüntüsü	35
Şekil 6.3. Farklı elektrotlarla işlenmiş yüzeylerin SEM görüntüleri a) Kriyojenik Bakır Elektrot b) bakır elektrot c) kriyojenik pirinç elektrot d) pirinç elektrot).....	36
Şekil 6.4. Bakır elektrot ile işlem sonrası oluşan mikro çatlak yoğunluğu a) 4 nolu deney b) 5 nolu deney c) 6 nolu deney).....	37

Şekil 6.5. Kriyojenik bakır elektrot ile işlem sonrası oluşan mikro çatlak yoğunluğu a) 10 nolu deney b) 11 nolu deney c) 12 nolu deney	38
Şekil 6.6. Pirinç elektrot ile işlem sonrası oluşan mikro çatlak yoğunluğu (a 13 nolu deney b) 14 nolu deney c) 15 nolu deney)	39
Şekil 6.7. Kriyojenik pirinç elektrot ile işlem sonrası oluşan mikro çatlak yoğunluğu a) 7 nolu deney b) 8 nolu deney c) 9 nolu deney).....	40
Şekil 6.8. Bakır elektrot ile işlenmiş Ti6Al4V malzemesinin esas bölgeden bölgeden alınan a) SEM b) EDS analiz sonuçları	42
Şekil 6.9. Bakır elektrot ile işlenmiş Ti6Al4 malzemesinin YKTK a) SEM b) EDS analiz sonuçları.....	43
Şekil 6.10. Pirinç elektrot ile işlenmiş Ti6Al4V malzemesinin esas bölgeden alınan a)SEM b) EDS analiz sonuçları	44
Şekil 6.11. Pirinç elektrot ile işlenmiş Ti6Al4V malzemesinin YKTK a) SEM b) EDS analiz sonuçları görüntüsü	45
Şekil 6.12 Titanyum alaşımının işlem öncesi yüzeyinden alınan XRD analizi	46
Şekil 6.13. Titanyum alaşımının işlem sonrası yüzeyinden alınan XRD analizi	47
Şekil 6.14. Sertlik ölçme deneyinin SEM görüntüsü	48
Şekil 6.15. Farklı işlem parametrelerinin YKTK'ye olan etki grafikleri a) bakır ve kriyojenik bakır elektrot b) pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot	51
Şekil 6.16. YKTK görüntüleri a-h) bakır elektrot 1-ö) kriyojenik bakır elektrot	55
Şekil 6.17. YKTK görüntüleri a-h) pirinç elektrot 1-ö) kriyojenik pirinç elektrot	58
Şekil 6.18 Farklı işlem parametrelerinin MKO olan etki grafikleri a) bakır ve kriyojenik bakır elektrot b) pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot	60
Şekil 6.19. Farklı işlem parametrelerinin TAO olan etki grafikleri a)bakır ve kriyojenik bakır elektrot b) pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot	65
Şekil 6.20. Bakır elektrotlarda a)en düşük TAO b) en yüksek TAO	66
Şekil 6.21. Kriyojenik bakır elektrotlarda a)en düşük TAO b) en yüksek TAO.....	66
Şekil 6.22. Pirinç elektrotlarda a)en düşük TAO b) en yüksek TAO.....	66
Şekil 6.23. Kriyojenik pirinç elektrotlarda a)en düşük TAO b) en yüksek TAO.....	67
Şekil 6.24. Farklı işlem parametrelerinin ESD'ye olan etki grafikleri a)bakır ve kriyojenik bakır elektrot b)pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot	68
Şekil 6.25. Farklı işlem parametrelerinin KMO olan etki grafikleri a)bakır ve kriyojenik bakır elektrot b)pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot	72
Şekil 6.26. Delik çaplarının paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri (bakır elektrot) a-ğ) üst çap görüntüleri h-n) alt çap görüntüleri	75

- Şekil 6.27.** Delik çaplarının paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri
(kriyojenik bakır elektrot) a-ğ) üst çap görüntüleri h-n) alt çap görüntüleri 78
- Şekil 6.28.** Delik çaplarının paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri
(pirinç elektrot) a-ğ) üst çap görüntüleri h-n) alt çap görüntüleri 81
- Şekil 6.29.** Delik çaplarının paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri
(kriyojenik pirinç elektrot) a-ğ) üst çap görüntüleri h-n) alt çap görüntüleri 84
- Şekil 7.1.** Deney sonuçlarına göre Topsis ilişkisel derecenin değişimi 94



TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1. Ti6Al4V (GR5) titanyumun kimyasal yapısı (%).....	24
Tablo 5.2. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot için değişen işlem parametreler.....	27
Tablo 5.3. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot için değişen işlem parametreler.....	27
Tablo 5.4. Deneysel iş parçaları için hazırlanmış elektrotların iletkenlik ve sertlik değerleri.....	33
Tablo 6.1. Mikro sertlik ölçüm sonuçları	48
Tablo 6.2. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot ile işlem sonrası oluşan YKTK bölgesi	50
Tablo 6.3. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot işlem sonrası oluşan YKTK bölgesi	51
Tablo 6.4. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot işleme ile MKO değerleri.....	59
Tablo 6.5. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot işleme ile MKO değerleri ...	59
Tablo 6.6. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot işleme ile TAO değerleri	62
Tablo 6.7. Kriyojenik pirinç elektrot ve pirinç elektrot işleme ile TAO değerleri....	63
Tablo 6.8. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot sıcaklık değerleri	68
Tablo 6.9. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot sıcaklık değerleri.....	69
Tablo 6.10. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot ile oluşan KMO değerleri ...	70
Tablo 6.11. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot ile oluşan KMO değerleri .	71
Tablo 7.1. EEİ ile işleme parametreleri ve seviyeleri	88
Tablo 7.2. EEİ ile işlemede deney dizisi ve deney sonuçları	88
Tablo 7.3. EEİ ile işleme için karar matris (A) oluşumunda kullanılan deney sonuçları	89
Tablo 7.4. Standart karar matris (A).....	90
Tablo 7.5. Ağırlıklandırılmış standart karar matris (V)	91
Tablo 7.6. İdeal ve negatif ideal çözüm değerleri	92
Tablo 7.7. İdeal çözüme göreli yakınlık değerleri.....	93

KISALTMALAR VE SİMGELER

BA	: Boşalım Akımı
BE	: Bakır Elektrot
C_{çıkış}	: Delik Alt Çapı
C_{giriş}	: Delik Üst Çapı
C_i⁺	: İdeal Çözüme Göreli Yakınlık Değeri
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
C_{par}	: Kapasite
D	: Elektrot Çapı
EAM	: Elektrot Aşınma Miktarı
EC	: Elektrot Cinsi
EDS	: Enerji Dağılım spektrometresi
EEİ	: Elektro Erozyon İşleme
ESD	: Elektrot Sıcaklık Değeri
FEİ	: Freze Erezyon İşleme
GV	: Gap Voltaj
H	: Delinen Deliklerin Delik Boyları
İKMM	: İş parçasından Kaldırılan Malzeme Miktarı
İÖEA	: İşlem Öncesi Elektrot Ağırlığı
İSEA	: İşlem Sonrası Elektrot Ağırlığı
KBE	: Kriyojenik Bakır Elektrot
KMO	: Koniklik Miktarı Oranı
KPE	: Kriyojenik Pirinç Elektrot
MEEİ	: Mikro Elektro Erozyon İşleme
MKO	: Malzeme Kaldırma Oranı
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
R	: Elektrot Direnci
RC	: Direnç Kondansatör Devresi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopyu
S_i⁻	: Negatif İdeal Çözüm Değeri
S_i⁺	: İdeal Çözüm Değeri

t	: İşlem Süresi
TA	: Taper Angel
TAO	: Takım Aşınma Oranı
TEİ	: Taşlama Erezyon İşleme
TEİ	: Tel Erozyon İşleme
TEYİ	: Taşlama Erezyon Yöntemiyle İşleme
Ti6Al4V	: Deneyleerde Kullanılan İş Parçası
Toff	: Darbenin boşluk süresi
Ton	: Darbenin aktif olduğu zaman
UDEİ	: Ultrasonik Destekli Erozyon İşleme
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
YKTK	: Yeniden Katılaşan Tabaka Kalınlığı

GİRİŞ

Seramik malzemelerin, metal matrisli kompozitlerin ve süper alaşımlı malzemelerin klasik imalat yöntemleriyle işlenmesi oldukça maliyetli ve zordur. Çünkü geleneksel imalat yöntemiyle işlemede kesici takım ve iş parçası arasındaki mekanik etkileşimler, beklenmeyen tolerans ve geometrik boyutların oluşmasına neden olmaktadır. Bu gibi istenmeyen etkilerin azaltılmasında Elektro Erezyon ile işleme ideal bir yöntem olup belirtilen bu zorlukların üstesinden gelen bir malzeme işleme yöntemi olması nedeniyle tercih edilmektedir. Elektro Erezyon ile işleme özellikle elektriksel iletkenliği olan ve daha çok havacılık sektöründe kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımları gibi sert ve talaşlı işlenmesi zor olan malzemelerin kolaylıkla işlenmesinde kullanılır. Yoğunlaştırılmış ısı enerjisi yardımıyla iş parçası üzerinden malzeme kaldırmak için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bunların başında tel yardımı ile gerçekleştirilen Tel Erezyon yöntemi, lazer ile işleme, elektron ışınımı gibi yöntemler gelmektedir. Isı enerjisi kullanılarak yapılan tüm işleme yöntemlerinde iş parçası üzerinde oluşan bölgesel sıcaklık değerleri, günümüzde mevcut olan malzemelerin ergime ve buharlaşma sıcaklık değerlerinin çok çok üstündedir. Buradan yola çıkarak ısı enerjisi yardımıyla günümüzde mevcut olan bütün malzemelerin işlenebilirliği mevcuttur.

Pandey ve Singh [1], Kumar ve arkadaşları [2] ve Beri ve arkadaşları [3] deneysel olarak çeşitli seramik malzemeleri araştırmışlar. Bu malzemelerin yüksek bir sertliğe sahip olması, geleneksel bir işleme sürecini kullanarak işlenmesini maliyetli kılmaktadır. Farklı geometrilerin işlenmesi, yüzey üzerinde çatlaklara neden olabilir. Zayıf işlenebilirliğe neden olan bu faktörlerin yüzeyde bir kenar oluşumuna, zaman kaybına, kesici takım aşınmalarına bu da yüksek işleme maliyetlerine neden olabilmektedir. Elektro Erezyon işlemi Seramik kompozitler malzemelerin işlenmesi için ideal bir yöntem olarak kabul edilir. Bu tip malzemeler için geleneksel olmayan bir konvansiyonel işleme en iyisidir. Elektro Erezyon ile işleme geleneksel olmayan yaygın olarak kullanılan bir işleme sürecidir. Elektrik iletken malzemelerde işleme daha ucuz olup ideal geometri ve ölçü tamlığı elde etmek mümkündür. Şekillerine bakılmaksızın elektrik iletken, yüksek aşınma direnci, korozyon direnci ve tokluğa sahip olan metalleri işlemek için Elektro Erezyon İşleme ideal bir yöntemdir.

Liu ve Huang [4], elektriksel iletkenliği olan seramik kompozit malzemeleri Elektro Erezyon yöntemiyle nasıl işlendiğini araştırmışlar ve bu malzemeleri Elektro Erezyon yöntemiyle işlemenin en uygun bir yöntem olduğunu kabul etmişler.

Ahmad ve Sueyoshi [5] toz metalürjisi yöntemiyle, sıcak presleme ve sinterleme işlemleriyle kompozit seramik malzemeler üretmişler. Ayrıca Ahmed ve Sueyoshi [6,7] ürettikleri $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ kompozitlerin elektriksel ve mekanik özelliklerini incelemişler. Çalışmalarında sıcak presleme için 1250°C ve 1350°C sıcaklık aralığında çalışmışlar. Günümüzde Erimiş metaller, seviye sensörleri, profiller için ekstrüzyon takımları, karmaşık metal şekillendirme kalıplarında ve hassas endüstriyel aşınma parçalarında seramik esaslı iletken kompozit malzemeler kullanılmaktadır. İletkenlik özelliğine sahip olan seramik malzemeleri Elektro Erezyon yöntemiyle işlemek için uygun bir elektrot bulmaya çalışmışlar. Elektro Erezyon işleminde elektrot olarak Alüminyum, bakır ve pirinç gibi düşük erime özelliğine sahip malzemeleri tercih etmişler. Yüksek frekanslar gerektiren Elektro Erezyon işleminde elektrot olarak bakır önermişler. Bakırın deşarj sargısının grafitten farklı olmasından dolayı daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlar.

Liu ve ark. [8] Seramik kompozitlerin Elektro Erezyon ile işlemek için bakır elektrotu tercih etmişlerdir.

Sanchez ve diğ. [9] $\text{TiN-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, B_4C ve SiC malzemesini bakır elektrot kullanarak işlediler. Malzeme Kaldırma Oranını iyileştirmek, kesme hatalarını azaltmak, aşınma ve yüzey pürüzlülüğü iyileştirmek için akım, darbe aktif zaman ve gap voltaj etkisini kullanarak incelediler.

Mitra ve ark. [10], aynı doğrultuda $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ seramik kompozit olan talaşlı imalat kalıbını Elektro Erezyon ile İşleme yöntemini kullanılarak üretmişlerdir.

Birçok araştırmacı Elektro Erezyon ile İşlemede Malzeme Kaldırma Oranını iyileştirmek ve Takım Aşınma Oranını azaltmak için çeşitli yöntemler kullanarak iyileştirme çalışmaları yapmışlar. Araştırmalarında çeşitli etkileri optimize etmeye, bunlarla etkileşime girmeye ve malzeme parametreleri ile işleme parametreleri arasındaki Malzeme Kaldırma Oranı, Takım Aşınma Oranı ve yüzey bitirme gibi fonksiyonları üzerine yoğunlaştılar. Singh [11], seramik kompozitlerin Elektro Erezyon yöntemiyle işlenmesinde elektrot ile elektriksel parametreleri ilişkilendirerek iyi bir Malzeme Kaldırma Oranını elde etmeye çalışmış.

Patel ve ark. [12] Taguchi ortogonal metodunu kullanarak $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiC} / \text{TiN}$ kompozit malzemelerde akımın, görev döngüsünün ve kıvılcım aralığı ayarlanmış voltajın Malzeme Kaldırma Oranına ve Takım Aşıma Oranına etkisini incelemişler.

Rajmohan ve Palanikumar [13] deneysel denemelerin sayısını azaltmak için deneysel bir yöntem olan Taguchi tekniği kullanmışlar. İşleme parametrelerinde ortogonal dizi, en uygun şekle sokma teknikleri ile en iyi birleşim parametreleri oluşturmaya çalışmışlar. Analizlerinde ANOVA yüzdesi analizinden yöntemini kullanmış.

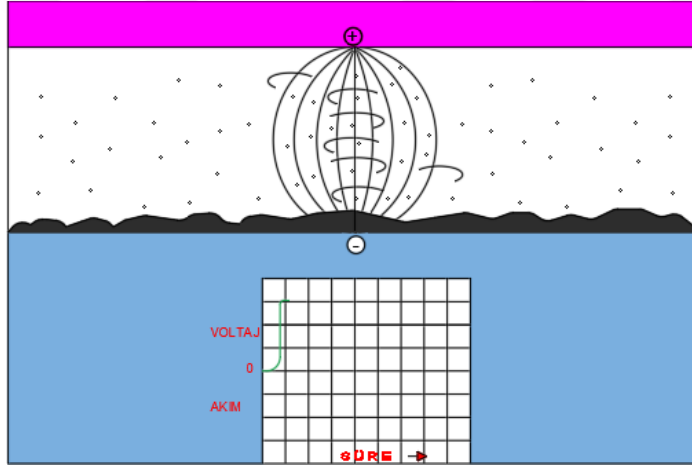
Humienny ve Berta [14]mevcut veri kullanarak geometrik tolerans teorileri ve algoritmaları analizini incelediler.

Bhaduri ve diğerleri Akım, voltaj, darbe zamanı gibi parametreler, görev döngüsünün malzeme üzerinden Malzeme Kaldırma oranı, Takım Aşınma Oranı, aşırı kesim, delinmiş delik üst çap, delinmiş deliğin taban çapını ve delik açısı gibi çeşitli proseslerin etkisini bakır elektrot kullanılarak incelemişler [15].

Çalışmamızda Ti6Al4V titanyum süper alaşımının Elektro Erezyon yöntemiyle işlenişi aşamasındaki elektriksel parametrelerinin(boşalım akım, darbe aktif süresi, darbe boşluk süresi ve gap voltaj) kesme ve ürün kalitesine olan etkileri incelenmektedir. Deneyler sonucunda iş parçalarında oluşan yüzeyler ve ısıdan etkilenen bölgeleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiş, elektrotların işleme sırasındaki sıcaklık değerleri uzaktan ölçüm yapan lazer ölçüm cihazıyla ölçüldü, enerji dağılımı spektrometre ve X-Işını kırınım yöntemleri ile element ve bileşik analizleri yapılmıştır. İşlenmiş yüzeylerin yüzey kaliteleri, mikro yapı değişimleri, Yeniden Katılaşan Tabaka kalınlığı, Takım Aşınma Oranları, Malzeme Kaldırma Oranı, Elektrotların Sıcaklık Değerleri, Koniklik Miktarı gibi karakteristik özellikler incelenerek bu karakteristiklerin işlem parametrelerine bağlı etkileri araştırılmıştır. Yapılan literatür çalışmalarından farklı olarak; elektrotlarda oluşan sıcaklık değerleri, Kriyojenik ısı işlem gören elektrotların işlem sırasındaki etkiler ve malzeme yapılarında oluşturduğu kalıcı etkiler incelenmiştir. Elde edilen tüm verilerde kriyojenik ısı işlem gören elektrotlarda istenen yönde Takım Aşınma Oranları elde edildi.

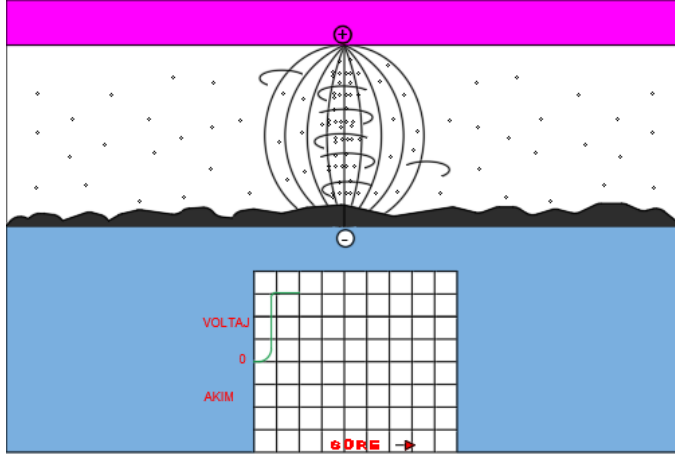
1. ELEKTRO-EREZYON YÖNTEMİNİN İŞLEM BASAMAKLARI

Elektro Erezyon yöntemiyle işlemede, elektrik akımı verilen elektrot, tablaya bağlı bulunan iş parçası üzerinde istenilen noktada konumlandırılır. Elektrot ve iş parçası arasında yalıtkanlık görevi yapan dielektrik sıvı mevcuttur. Dielektrik sıvı ark oluşumunu engeller. Yalıtkanlık özelliğine sahip olan sıvı, çok yüksek potansiyel enerjiye maruz bırakılarak, yalıtkanlık özelliğini kaybeder ve iyon yüklü olur. İyon yükler elektrik akımının iletilmesini sağlarlar [17]. Elektro erazyon ile işleme yöntemiyle iş parçasından kaldırılan talaş kaldırma aşamaları açıklanmıştır.



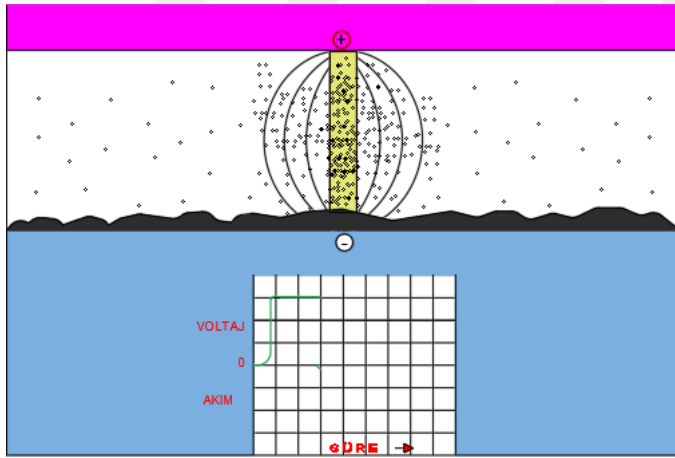
Şekil 1.1. EEİ sürecinde 1. aşama.[16]

Şekil 1.1’de manyetik alan kuvvet çizgilerinin oluşumu istenilen düzeye ulaşmıştır. Manyetik alanın oluşmasıyla beraber voltaj değeri artma eğilimindedir. Akım oluşmamış ve sıfır değerindedir [17].



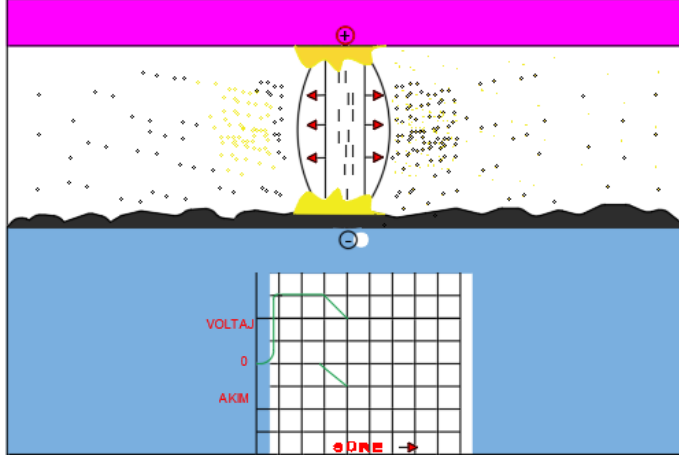
Şekil 1.2. EEİ sürecinde 2. aşama.[16]

Manyetik alandaki kuvvet çizgilerinin yoğunluğu artmaktadır. Bu artışa paralel olarak manyetik alanın kuvvet çizgileri bir hat boyunca kullanılan dielektrik sıvının sahip olduğu yalıtkanlık özelliğini yavaş yavaş kaybetmesine neden olur[17]. Şekil 1.2' de görüldüğü gibi voltaj maksimum seviyeye çıkmış fakat akım oluşmamıştır [18].



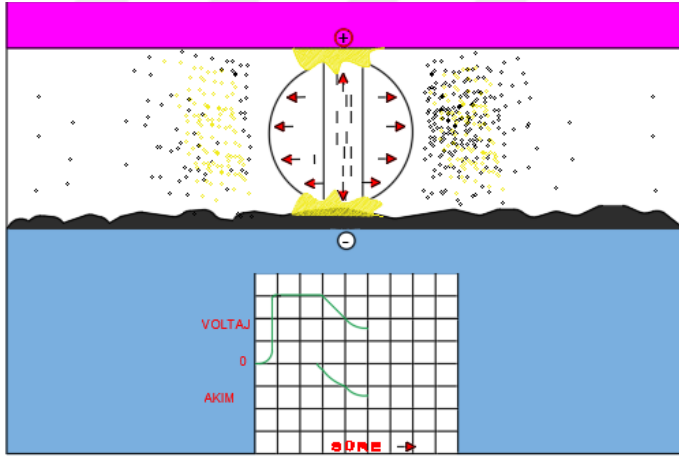
Şekil 1.3. EEİ sürecinde 3. aşama.[16]

Şekil 1.3.' te Dielektrik sıvının yalıtkanlık değeri minimum seviyeye düşer, akım oluşmaya başlar ve voltaj düşmeye başlar [17].



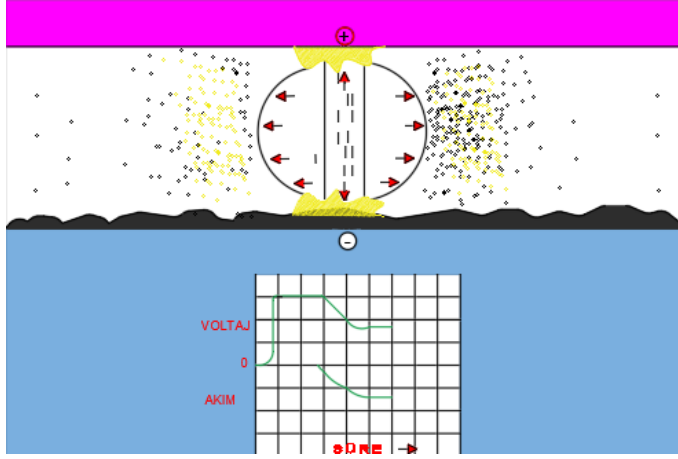
Şekil 1.4. EEİ sürecinde 4. aşama.[16]

Şekil 1.4' te oluşan akım artmış fakat voltaj değeri azalmıştır. Artan akım ortamın sıcaklık enerjisinde de artışa sebep olur. Sıcaklık değerinin maksimuma ulaştığı bu noktada kullanılan sıvının, elektrotun ve malzemenin çok az miktarı buharlaşır [17]. Elektrot ve işlenen malzemenin arasında kanal şeklinde bir yapı oluşur. Bu yapıya boşalım kanalı adı verilir.



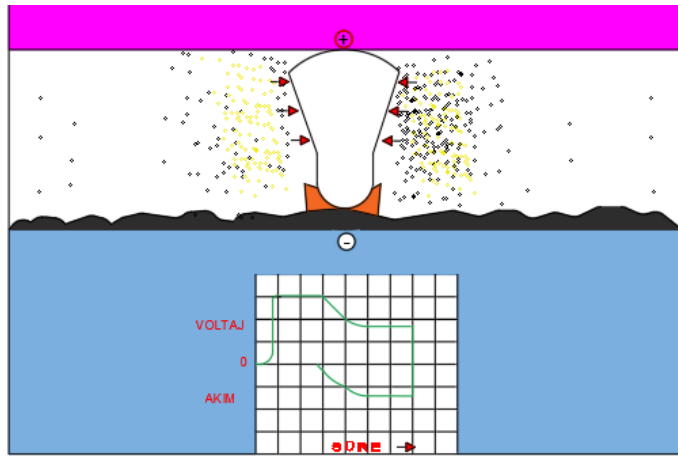
Şekil 1.5. EEİ sürecinde 5. aşama.[16]

Şekil 1.5' de meydana gelen sıcaklık etkisi ile boşalım kanalını enine genişlemeye başlar. Bu genişleme eğilimi, boşalım kanalında sayıları artan iyon yükleri nedeniyle sınırlı kalmaktadır[17]. Bu iyon yükler manyetik alan kuvvet çizgileri yoğunluğundan etkilenmektedir. Boşalım akım artmakta olup, voltaj değeri ise düşmektedir [18].



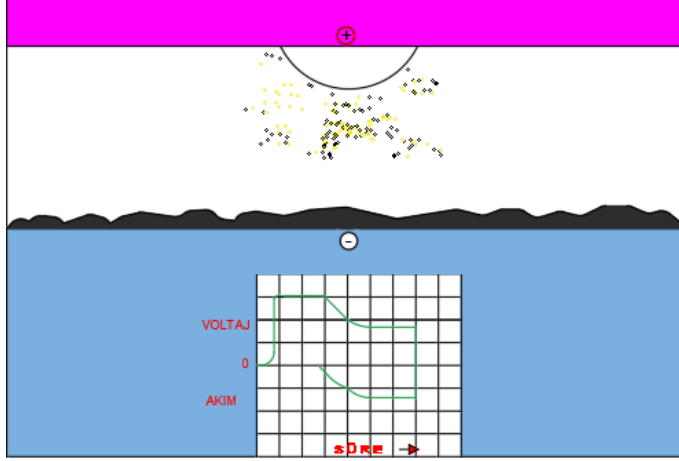
Şekil 1.6. EEİ sürecinde 6. aşama.[16]

Şekil 1.6’ da, görüldüğü gibi akım da voltaj da lineer hale gelmiştir. Boşalım kanalının maksimum seviyede sıcaklık oluşumuna paralel maksimum basınç oluşur. Sıcaklık ve basıncın etkisiyle iş parçası üzerinden küçük partiküller kaldırılır. Boşalım kanalında ergimiş halde bulunan partiküller kanalda oluşan maksimum buhar nedeniyle buldukları konumdan ayrılamamaktadırlar. Boşalım kanalında, çok yüksek akım ile oluşan gaz halde bulunan, yalıtkan sıvı ve ergimiş halde bulunan metal partiküllerden oluşur [17].



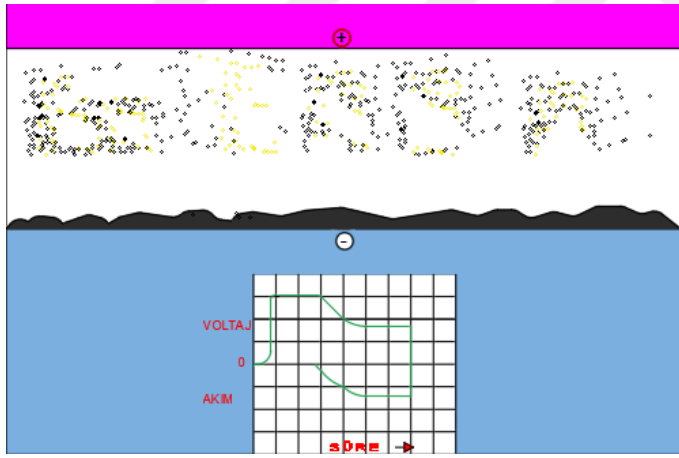
Şekil 1.7. EEİ sürecinde 7. aşama.[16]

Şekil 1.7 ‘de görüldüğü gibi, ergimiş halde bulunan metal partiküller akım ve voltaj değerlerinin azalması nedeniyle sıcaklıkta meydana gelen düşüşle beraber buhar balonu yavaş yavaş sönmeleriyle iş parçasından uzaklaştırılır [17].



Şekil 1.8. EEİ sürecinde 8. aşama.[16]

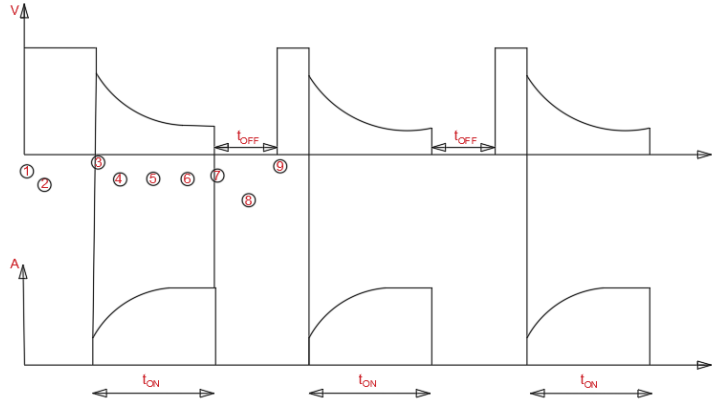
Bu aşamada dielektrik sıvısı iş parçası ve elektrottan kopan partikülleri soğutarak ortamdan uzaklaştırmaya çalışır. Metal tanecikler sıvı içinde dağılmaya başlayarak işlem bölgesinden uzaklaşmaya Şekil 1.8 'de görüldüğü gibi başlar. Bu aşamada bir miktar gaz dışarı atılır[17].



Şekil 1.9. EEİ sürecinde 9. aşama.[16]

Elektrot ile iş parçası arasında ark oluşumuna neden olan partiküllerin işlem bölgesinden uzaklaştırılması için darbe boşluk süresi uygun ayarlanmalıdır. Darbe boşluk süresinin uygun olmaması halinde partiküller karasız kıvılcımlara sebep olur. Böylece alternatif akım arkının doğru akım arkına dönüşmesine neden olur. Şekil 1.9.'da oluşan doğru akım arkı hem elektrotta hem de iş parçasında istenmeye geometrik hatalara neden olur.

Yukarıda sunulan çevrimin aşamaları tek bir şekil üzerinde sunulacak olursa çevrim boyunca akım ve voltajın süreyle değişimi Şekil 1.10 ' deki gibi olur.



Şekil 1.10. EEİ' de voltaj ve akımın zamanla değişimi.[18]

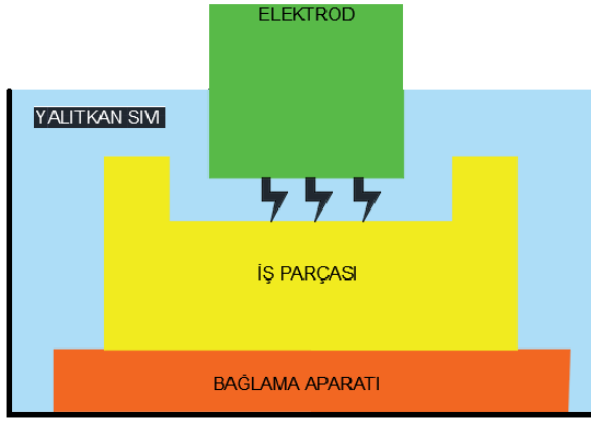
1.1. Elektro-Erozyon Çeşitleri

Günümüz imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan elektro erozyon yöntemleri:

1. Elektro Erezyon İle İşleme Yöntemi (EEİ)
2. Tel Erezyon İle İşleme Yöntemi (TEİ)
3. Freze Erezyon İle İşleme Yöntemi(FEİ)
4. Taşlama Erezyon İle İşleme Yöntemi(TEYİ)
5. Ultrasonik Destekli Erezyon İle İşleme Yöntemi (UDEİ)
6. Mikro Elektro-Erezyon İle İşleme Yöntemi (MEEİ)

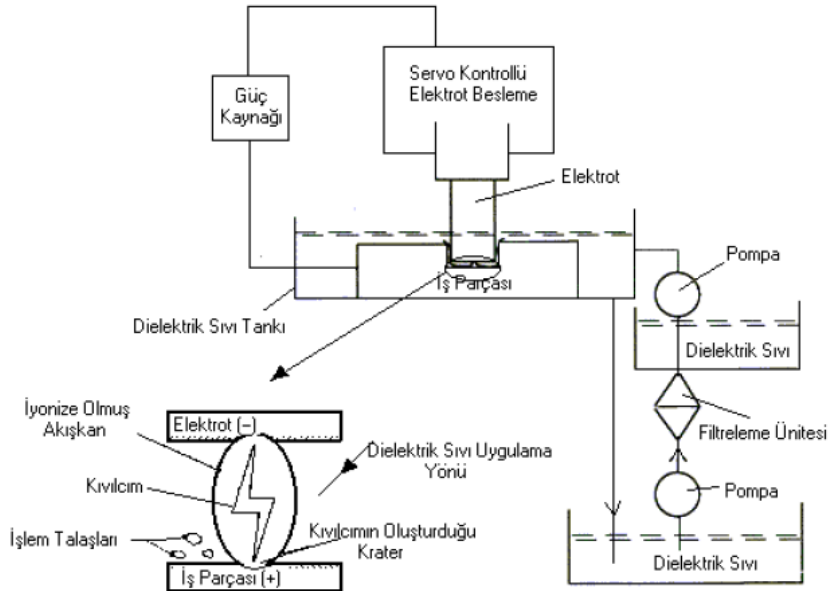
1.1.1. Elektro Erozyon İle İşleme Yöntemi (EEİ)

Elektro Erezyon ile İşlemede, elektriği iletmeyen bir sıvı içerisinde bulunan elektriği ileten bir elektrot ile iş parçası arasında oluşan elektriksel kıvılcımların etkisiyle iş parçası üzerinden talaş kaldıran elektro termal yöntemdir [17]. (Şekil 1.11 ve Şekil 1.12)



Şekil 1.11. EEİ ile işleme yöntemi

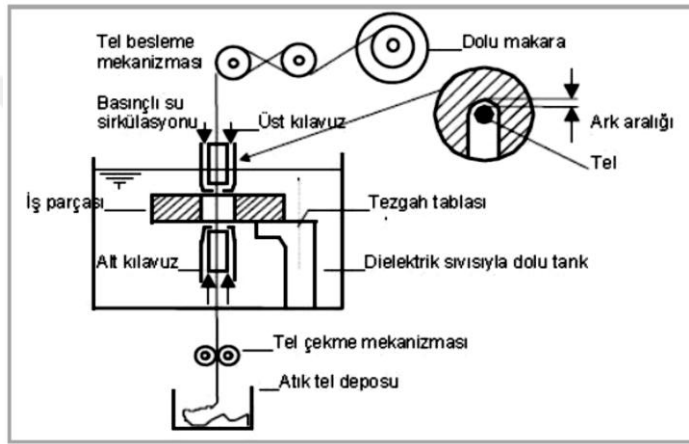
Elektro Erozyon ile İşlemede uygulanan elektriksel potansiyel enerji iş parçası ve elektrot arasında elektriksel boşalmalar ile ısı enerjisi oluşumuna neden olur. Isı enerjisi, elektrot ve iş parçası aralığında bir boşalım kanalı oluşturur. Boşalım kanalında oluşan sıcaklık etkisiyle iş parçası ısınmaya ve ergimeye maruz kalır. Boşalım akımı sıfır olunca boşalım kanalı kaybolur. Sıcaklık değeri aniden düşerek dielektrik sıvının işlem bölgesindeki ergimiş partiküllerin uzaklaştırılmasını sağlar. Bu aşamada ısınan iş parçası yüzeyi ve elektrot soğutma işlemine uğrar.



Şekil 1.12. Elektro erozyon tezgâhının şematik gösterimi [19]

1.1.2. Tel Erozyon İle İşleme Yöntemi (TEİ)

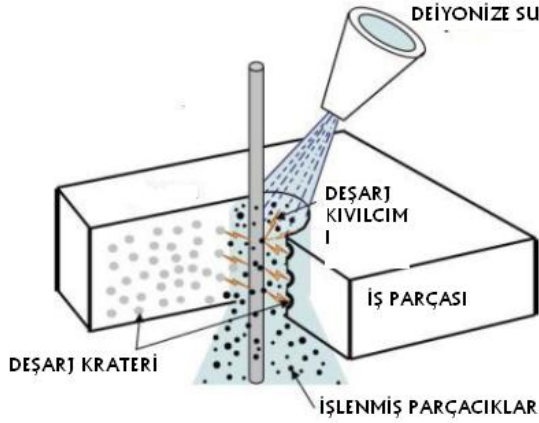
Tornalama, frezeleme gibi geleneksel imalat yöntemlerinden ayrı olan bu yöntemde 0,03-0,3 mm çapında tel üzerinden geçirilen çok yüksek elektriksel enerji yardımıyla delme ve kesme işlemidir. Bu yöntem ile elektriksel iletkenliği az olan seramik gibi sert malzemeleri çok hassas olarak işlemek mümkündür. Bu hassasiyet milimetrenin bin de biri (mikron) düzeyinde elde edilebilir. Tel bir kez kullanılır. Tabla hareketi CNC programlama yardımıyla gerçekleştirilir ve kesme yolu belirlenir. (Şekil 1.13)



Şekil 1.13. Tel erezyon tezgâhının şematik gösterimi[20]

Tel erezyon ile işleme, elektriği ileten malzemelerin işlenmesinde hızla yaygınlaşan bir yöntemdir. Tel erezyon yönteminde kompleks parçaların hassas, doğru bir şekilde ve kesme kuvveti olmaksızın işlendiğinden dolayı avantajlı bir işlem olarak kabul edilmektedir.

Dielektrik suyun veya diğer dielektrik akışkanın düzenli akışı, iş parçası ve elektrot telini soğutmada kullanılır ve kesme bölgesine püskürtülür. (Şekil 1.14) Dielektrik akışkan erimiş metale doğru püskürtülerek metallerin hızlı bir şekilde uzaklaşmasına yardımcı olur. Dielektrik sıvı erimiş metallerin kesme alanından tam olarak uzaklaştırılmamaktadır. Bazı küçük parçacıklar kesme alanında kalarak art arda deşarj işleminin tekrar etmesine yardımcı olurlar.



Şekil 1.14. TEİ işleminin şematik görünüşü [21]

Tel Erezyon ile İşleme 'nin ana kısımları; tel, iş parçası, kontrol ünitesi, güç kaynağı ve dielektrik kaynağıdır [22].

Bilgisayar kontrolüyle tel elektrotu yönlendiren üst kılavuzu çeşitli açılarda konum verilerek konik yüzey işlemek mümkün olmaktadır. Bu metotla işlemede genellikle 0,0025 mm tolerans tekrarı sağlanabilmektedir.

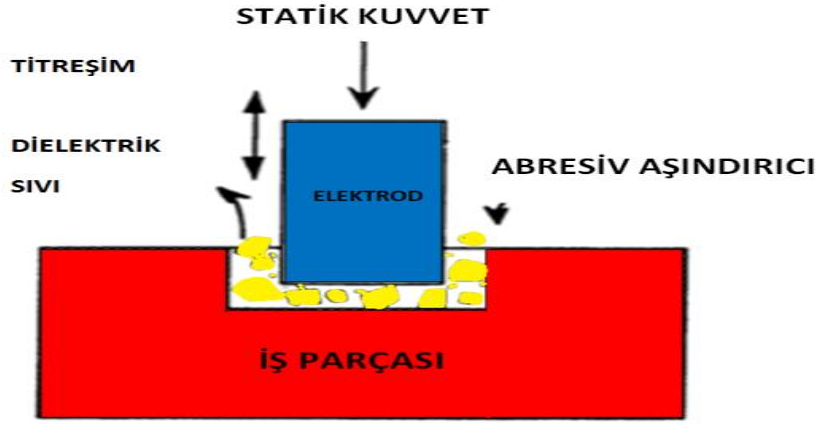
1.1.3. Freze Erozyon İle İşleme (FEİ)

Kendi eksenini etrafında dönen silindirik bir elektrot yardımıyla elektrik ark oluşturularak parça yüzeyinden talaş kaldırma işlemidir. Talaş kaldırma işlemi Dalma erozyon yöntemiyle aynıdır. Kalıpcılık sektöründe dişi kalıp çevresi ve derinliği fazla olan kısımların işlenmesinde kullanılır.

1.1.4. Taşlama Erozyon Yöntemiyle İşleme (TEYİ)

Elektro erozyonla taşlama işlemi, Elektro erozyon işleme ile aynı olmakla beraber kullanılan elektrotun dönen grafit bir taş olmasıdır. Tezgâh tablasına bağlanan iş parçası servomotor yardımıyla dönen taş altında ilerler. Anot kutbuna bağlanan iş parçası katot kutbuna bağlanan taş arasında oluşan kıvılcımlar yardımıyla iş parçası yüzeyinden talaş kaldırılır. İş parçası yüzeyinde malzeme ergitilir veya buharlaşır. Oluşan krater yapı dielektrik sıvı sayesinde parçadan uzaklaştırılır. Karpit veya elmas yapıları kesicilerin bileme işleminde kullanımı yaygındır.

1.1.5. Ultrasonik Destekli Erozyon İle İşleme (UDEİ)



Şekil 1.15. Ultrasonik destekli erozyon ile işleme [23]

Bu yöntemde genellikle elektriği iletmeyen çok sert, bal peteği gibi aşırı kırılgen yapıya sahip malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Su içerisinde elektrot çok yüksek miktarda titreşime maruz bırakılarak iş parçası üzerinde 0.025-0,001 mm hassasiyetinde yüzey kalitesi elde edilebilen bir yöntemdir. (Şekil 1.15) Maliyeti çok yüksek olması ve işleme zamanının çok uzun sürmesinden dolayı tercih edilmemektedir. Basmakalıpları, Ekstrüzyon tel çekme kalıpları ve parçalarının işlenmesinde; gözlük ve cam sanayisinde, kuartz malzemelerin şekillendirilmesinde; germanyum esaslı ile silikon esaslı malzemeleri Ultrasonik Destekli Erezyon ile işlenebilmektedir.

1.1.6. Mikro Elektro Erozyon İşleme

Mikro-EEİ ile mikro yapıdaki iş parçaları elektriksel boşalmalar yardımıyla malzeme üzerinden talaş kaldırılarak yapılan bir yöntemdir. Mikro EEİ sistemindeki nano saniyeye kadar akım oluşunu sağlayan bir besleme birimi bulunmaktadır. Buda elektriksel iletkenliğe sahip olan bütün malzemelerin mikron cinsinden işlenmesini sağlamaktadır. Özellikle işlenmesi zor olan ve çok hassasiyet gerektiren malzemelerin işlenmesinde tercih edilir. Normal EEİ ile elektrot büyüklüğü, mikro ve nano seviyede boşalım akımı oluşumu sağlayan besleme birimi ve eksenel hareket sağlayan servo sistemsel farklılıkları bulunmaktadır. İşlem sonrası oluşan yapıların çok küçük olmalarından dolayı mikroskop yardımıyla gözlem yapılması gerekmektedir.

2. EEİ İŞLEM PROSESİNİ ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER

Elektro Erezyon ile işlem prosesini etkileyen değişkenler iki ayrı başlık altında toplanabilir.

- 1.Elektriksel değişkenler
- 2.Elektriksel olmayan değişkenler

2.1. Elektriksel Değişkenler

2.1.1. Boşalım akımı

Tepe Akımı: Tepe akımı, Elektro Erezyon ile işleme esnasında oluşan maksimum akımın en uç değeridir. Yüzey kalitesi, Malzeme Kaldırma Oranı, Takım Aşınma Oranı ve Yeniden Katılan Tabaka Kalınlığı' nı etkileyen en önemli faktördür. Tepe akımı attıkça Malzeme Kaldırma Oranı, Takım Aşınma Oranı ve Yeniden Katılan Tabaka Kalınlığı ve yüzey pürüzlüğü değerleri artmaktadır.

Ortalama çalışma Akımı: İşleme esnasında oluşan akım değerlerinin aritmetik ortalaması olarak kabul edilir. Darbe aktif süresi atmasıyla beraber sıvı içerisindeki iyon yükleri artmasıyla bu değerdeki artış tezgâhın kontrol ünitesindeki ampermetre göstergesinden izlenebilmektedir. Çalışma akımı değeri tezgâhın ampermetre göstergesinden bakılabilir. Aralık miktarı artıkça iyonizasyon süre artacağından, ortalama çalışma akımı azalır.

Akım Yoğunluğu: İşleme esnasında iş parçası birim alanında oluşan değere denir. Akım yoğunluğu [A/cm^2] birimiyle ifade edilir. Akım yoğunluk değerinin artması elektrot üzerindeki sıcaklık değerinin artmasına yol açar. Buda takımın aşırı şekilde aşınmasına neden olmaktadır.

2.1.2. Darbenin aktif olduğu zaman (T_{on})

Elektrotun işleme esnasında ve iş parçasına temas edip ayrılması arasında geçen süre olarak tanımlanabilir. Elektriksel manyetik alanın etkisiyle oluşan akım yoğunluğunun miktarını, akım ve gap voltaj değerleri belirler. Darbe aktif süresi, Malzeme Kaldırma Oranı, Takım Aşınma Oranı, Yeniden Katılan Tabaka Kalınlığı ve yüzey pürüzlülük değerlerini etkiler. İşlem süresinin kısa olması maliyet bakımından önemlilik arz etmektedir. Darbe

boşluk süresi ve akım değerleri aynı kalmak şartıyla Darbe aktif süresi değerinin artış miktarı Malzeme Kaldırma Oranı, Takım Aşınma Oranı, Yeniden Katılaştıran Tabaka Kalınlığı ve Elektrot Sıcaklık Değerlerinde artış görülmektedir. Darbe aktif süresi değerindeki artış optimum bir seviyeden sonra doyuma ulaşır. Bu optimum değerde iş parçası ve kullanılan dielektrik sıvı aşırı bir şekilde ısınır. Buda iş parçası üzerinden talaş kaldırma işleminin olumsuz yönde etkiler.

2.1.3. Darbe boşluk süresi (T_{off})

Darbe boşluk süresi değerindeki artış miktarı Malzeme Kaldırma Oranı değerinde düşüşe neden olur. Ayrıca bu sürenin artmasıyla beraber toplam işlem süresinde artışa neden olduğu görülmektedir. Darbe boşluk süresi, işleme esnasında yalıtımın tekrar oluşması için gerekli olan süre olarak tanımlanabilir. Darbe boşluk süresinin en az olması istenmesine rağmen, bu durum yüksek elektriksel boşalım istenen işlemler için uygun değildir. Kısa olan Darbe boşluk süresi değerleri özellikle talaş partiküllerinin çok fazla olduğu işlemlerde kaldırılan talaşların ortamdan tam olarak uzaklaştırılamamasından dolayı uygun değildir.

Darbe boşluk süresi çok kısa olduğunda elektrot ve iş parçası arasında meydana gelen talaşın ortamdan uzaklaştırılması için yeterli zaman kalmaz. Ayrıca dielektrik deiyonize olması için de yeterli zamanı olmaz. Sonuç olarak, aşınma oranı artar ve işlem yapılan yüzey kaba ve pürüzlü hale gelir [17].

2.1.4. Gap Voltaj

Gap voltaj değerindeki artış işleme bölgesinde oluşan elektriksel enerjinin artmasına neden olur. İşlem bölgesindeki enerji artışı, Malzeme Kaldırma Oranı ve Yeniden Katılaştıran Tabaka Kalınlığının artmasına sebep olur. İşleme alanında enerji miktarındaki yükseliş aslında o bölgedeki ark oluşum sayısının artışına neden olur. İşlem bölgesinde artan talaş taneciklerinin işlem bölgesinden uzaklaştırılması voltaj değerleri ile sağlanır. Buda kesme işleminin tekrar oluşması için önemli bir değişkendir.

2.1.5. Polarite

Elektrotun aşınma direncini etkileyen parametrelerden olan polarite mikro erezyon yönteminde genelde katot (-) olarak tercih edilmektedir. Katotta meydana gelen boşalım kıvılcımları anot'a oranla daha azdır. Anottaki elektriksel boşalım sayısı elektronların plazma kanalı içerisinde daha hızlı olarak hareket etmelerinden kaynaklanmaktadır. Polarite iş parçası ve elektrottaki aşınmanın nerede istendiğine göre seçilmektedir. Elektrot kutup olarak negatif olarak seçilmektedir. Pozitif polarite, elektrotlarda çok miktarda aşınmalar neden olmaktadır.

2.1.6. Compr

Tablaya bağlı bulunan iş parçasının elektrotla göre konumunu ve uzaklığının ayarlandığı parametredir. Bu değerin yüksek olması elektrotla ile iş parçası arasındaki uzaklığın az olduğu bir durumdur. Bu uzaklık değerinin küçük olması kararsız ark oluşumuna neden olmaktadır. Düşük Compr değeri ise; elektrot ile iş parçası arasında büyük bir mesafe bırakır ve yanal ark alanını da hafifçe genişlemesine neden olabilmektedir [17].

2.1.7. Gain

Gain Servo motorun kontrol ünitesindeki sistematik hızının kontrolünü sağlar. Değerin fazla olduğu durumlarda tezgâh doğrultusunda titreşimle beraber sapmalara sebep olur. Buda elektrotların işleme esnasında istenilen noktalarda işlenmesinde sapmalara neden olabilmektedir. Bu sapmalar bozuk şekilli yüzeylerin oluşmasına neden olabilmektedir. Servo motorun düşük ilerlemelerinde ise elektrot iş parçasına doğru ilerlemesi yavaşlar. Bu ilerlemenin yavaş olması kararsız ark oluşumlarına sebep olarak malzeme yüzeyinde yanmalar neden olabilmektedir.

2.2. Elektriksel Olmayan Değişkenler

Elektro erozyon tezgâhında kullanıcı tarafından ayarlanamayan tüm parametreler elektriksel olmayan parametreler grubuna girebilir. Bu parametreler detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır:

2.2.1. Dielektrik sıvı

Elektro Erezyon ile işleme yönteminde önemli değişkenlerden bir tanesi de olan soğutma sıvısıdır. Soğutma sıvısı elektrot ya da iş parçasından kopan talaş partiküllerinin ortamdaki uzaklaştırarak ark oluşumunun önüne geçer ve kesme işleminin verimliliğini artırır. Kopan taneciklerin elektrot ve iş parçasına yapışmasının önler. Gerekli voltaj değeri sağlanana kadar yalıtkan durumdadır. Sıvının viskozitesi iyi olmalı, maliyeti düşük ve oksidasyon direnci yüksek olmalıdır. Elektro Erezyon ile işleme yönteminde saf su, parafinol, gazyağı, deiyonize su gibi farklı dielektrik sıvılar kullanılmaktadır.

2.2.2. Elektrotlar (İşleme Takımları)

Elektro Erezyon ile işleme yönteminde, yapılacak olan iş parçasının istenilen ölçü ve şekillerine uygun olarak genellikle elektriksel iletkenliği iyi olan bakır veya grafit gibi malzemeler torna veya freze gibi tezgâhlarda işlenir. Elektrotları, Elektro Erezyon ile işleme yönteminde kesici takım olarak adlandırılabilir. Tezgâhın besleme ünitesinden aldığı gerilim ve akım değerlerini iş parçasına aktarma görevi yapar. Elektrot aşınması az olması ideal olarak istenen bir parametredir. Ergime sıcaklığı yüksek, elektriksel iletkenliği iyi olan, maliyeti düşük ve işlenmesi kolay, aşınmaya karşı dayanımı fazla olan elektrotlar tercih edilmelidir. Bazı elektrot çeşitleri Şekil 2.1’de görülmektedir. Elektro Erezyon ile işleme yönteminde üretimi gerçekleştirilen parçanın yaklaşık %50-55 arasında maliyetini elektrot masrafları oluşturmaktadır. İmalatta en çok kullanılan elektrot malzemeleri, grafit, bakır ve bakır alaşımları, tungsten karbür, pirinç ve pirinç alaşımlar, alüminyum, çinko, çelik ve çelik alaşımlarıdır.



Şekil 2.1. Elektrot çeşitleri

2.2.3. Ağırlık

Ağırlık bağlanan elektrotun kapağa baskı uygulayarak elektrotun yuvasında kalmasını sağlayan tezgâh elemanıdır. Ağırlığın az olması elektrotun aşırı titreşimiyle kapağın tutucudan ayrılmasına sebep olur. Buda elektrotun istenilen doğrultuda gitmesini engelleyerek istenmeyen figür oluşumlarına neden olur. Ağırlığın fazla olması durumunda ise kapak tutucuya sıkı bir şekilde yapışır ve elektrotun hareketi yavaşlatarak kısıtlanmasına neden olmaktadır. Böylece elektrotun iş parçası üzerinde birim iş süresinin uzamasına neden olmaktadır.

2.2.4. Kapak

Elektro Erezyon tezgâhlarında elektrotun iş parçası üzerinde işlem gördüğü koordinat eksenlerinde hareketinde prizma ile berber yol gösteren, genellikle seramik malzemeden yapılmış tezgâh elemanıdır. İşlem esnasında oluşan partiküllerin aşırı şekilde üzerine çeken bu kısım sıklıkla temizlenmelidir.

2.2.5. İç Yıkama

Elektro Erezyon ile işlem esnasında oluşan elektrotun iş parçası ve kendisinden kopan metallerin işlem bölgesinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Artık olarak adlandırılan bu

metal partiküllerin çok olması, tezgâh üzerinde ayarlanmış olan en ideal elektriksel değişkenlerle işleme beklenen sonuçları vermediği görülmektedir. Çünkü kesme anındaki partiküller delik eksenine doğru yaklaşarak ark oluşumuyla beraber voltaj ve akım değerlerinde düşüşe neden olmaktadır. Oluşan arklar işleme bölgesinde kesme yerine yanmalara ve buda ortamdaki karbon miktarını artmasına neden olabilmektedir. Akım ve gerilim düşmeleri malzeme üzerinden talaş kaldırma oranına direk etki ederek malzeme kaldırma oranı değerinde düşüşe neden olur. İşleme esnasında oluşan partiküllerin tane boyutuna uygun yüksek veya düşük dereceli basınç ile yıkamadan uygun olanı seçilmelidir. Tane boyutu büyüdükçe kısa devre oluşma ihtimali arttığı için yıkama derecesi de arttırılmalıdır.

Yüksek basınçlı yıkama zararlı olabilir. Bu, ark çevresinde pürüzlülüğe neden olabilir ve kesme esnasında elektrot sapmasına neden olabilir. Yıkama, işin durumuna göre dengelenmelidir [24].

2.2.6. Prizma

Elektrot kapak üzerinde yer alan prizma olarak adlandırılan tezgâh elemanına iç bağlantılı olarak bir kanal boyunca temas eder. Prizmadaki aşınmanın delik geometrisine etkisi çok büyük değildir fakat toplam süreyi artırıcı bir etki yapar [17].

3. ELEKTRO EREZYON İŞLEME YÖNTEMİNİN KULLANIM ALANLARI VE ÖNEMİ

Elektro Erezyon ile İşleme, ısıl işlem uğramış ve sertleştirilmiş çelikler, karpitler, yüksek dayanımlı alaşımlar, seramik gibi sert ve kırılğan iletken ve yarı iletken malzemelerin işlenmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Elektro Erezyon ile İşleme, yöntemi çok küçük, kompleks ve hassasiyet gerektiren deliklerin işlenmesinde özellikle tercih edilmektedir. Uçak motorları ve palet sistemleri, plastik enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıpları, saç ve metal kalıpları, Otomobil parçaları işlenmesinde kullanılmakla beraber delme işlemleri, onarım ve tadilat işlemlerinde sıkça kullanılan bir yöntemdir.

Otomotiv, elektronik, uzay sistemleri, uçak sanayisi gibi farklı sektörlerde performansın artırılmasına katkı sağlamak için Metal Matrisli Kompozit malzemelerin geliştirilmesi için, çeşitli çalışmaların sürdürüldüğü bilinmektedir.

3.1. Kalıp ve Kalıp Parçaları

Değişen ve gelişen teknolojiye öncülük eden kalıpcılık sektörü sanayide üretimde oldukça önemli bir yere sahiptir. Kalıpcılık özel bilgi ve tecrübe isteyen bir meslek gurubudur. Kalıpcılık sektöründe maça, pim, soğutma kanalı, zımba gibi kalıp parçalarının üretiminde genellikle CNC freze veya torna yardımıyla istenilen toleranslarda üretim yapmakta bazı sıkıntılar yaşanmaktadır. Özellikle sertlik değeri çok yüksek olan bu kalıp elemanlarının kesici takımlarla işlemek zor ve maliyetlidir. İşlem sonrasında kesici takımda meydana gelen aşınmalar yüzünden istenilen hassasiyette parça üretimi çok düşük bir ihtimaldir. Bu olumsuz şartların ortadan kaldırılmasında Elektro Erezyon ile İşleme ve Tel Erezyon ile işleme tezgâhları kullanılmaktadır. Kalıpların işlenen yüzeylerinin yüzey kalitesi çok iyi olması gerekmektedir. Özellikle plastik enjeksiyon kalıplarında çapak oluşumunun önüne geçilmesi için istenen yüze pürüzlülüğü Elektro Erezyon ile İşleme yöntemiyle işlem sonrası elde edilebilmektedir.

3.2. Kesici Takımlar

Günümüzde kullanılan bazı kesici takımların yapılarında karbür katkısı bulunmaktadır. Bu nedenden dolayı istenilen şekil ve ölçü hassasiyetin işlemek zordur. Sert yapıya sahip olan elmas taşlarla şekillendirildikten sonra bir çelik gövde üzerine monte edilerek kullanıma hazır hale getirilir. Kesici takımlar Elektro Erezyon ile İşleme ve Tel Erezyon ile işleme tezgâhlarıyla işlemek daha kolaydır. Elektro Erezyon ile İşleme veya Tel Erezyon ile işlemede içerisindeki özel programlar yardımıyla elips kesiminde bile kolaylık sağlar [25].

3.3. Uçak Sanayisinde

Elektro Erezyon yöntemi nikel, titanyum alaşımları gibi yapılara sahip olan metal matrisli kompozit malzemelerden yapılan türbin, kanatçık, palelerin işlenmesi ve imalatında kullanılır. Uçakların jet motorlarında mevcut olan deliklerin istenilen tolerans ve şekillerde işlenmesinde kolaylık sağlamaktadır.

3.4. Otomobil Parça Üretimi

Otomobil sektöründe dizel araçlarda karbon salınım oranının azaltılma çalışmalarına büyük oranda katkı sağlayan yüksek basınçta çalışan akıtma sistemlerinde var olan püskürtme deliklerinin çok kısa sürede işlenmesinde Elektro Erezyon yöntemi önemli bir yere sahiptir. Günümüzde az yer kaplayan, küçük hacimli ve yüksek torklu motor ihtiyacı artmaktadır. Buda araba motorlarının üretiminde kullanılan kalıp ve kalıp elemanlarının üretiminde Elektro Erezyon ile işleme sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

4. ELEKTRO EREZYON İŞLEME YÖNTEMİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

4.1. Elektro Erezyon İşleme Yönteminin Avantajları

- İletken ve yarı iletken çok sert bir yapıya sahip olan metal matrisli kompozit bütün malzemelerin işlenmesine olanak sağlar.
- Klasik tezgâhlarla işleme sonrası oluşan malzeme yapısındaki yapısal farklılıklar (ısıdan etkilenme sonrası oluşan yeniden katılaşılan tabaka ve esas bölgede oluşan sertlik değerleri) Elektro Erezyon ile işlenmesi sonrası minimum seviyelerdedir.
- Klasik tezgâhlarla işlem sonrası oluşan boyutsal hatalara neden olan gözle görülebilen çapaklanma Elektro Erezyon yönteminde mikroskop yardımıyla görülebilecek seviyededir.
- Elektrot ve iş parçası arasında oluşan elektriksel boşalmalar sayesinde iş parçasında gerilmeler oluşmamaktadır.
- İstenilen boyut ve toleranslarda üretim yapmak daha ucuz ve daha hızlıdır.
- Mikro ve hatta nano seviyelerde işleme yapmak mümkündür.
- Kalıpcılık sektöründe düşük maliyetli kalıp üretimine yardımcı olmaktadır.
- Klasik imalat yöntemleriyle üretimi imkânsız olan karışık formları işlemek çok daha kolaydır.
- İşlem sonrası kullanılan elektrotlar tekrar kullanılabilir.
- Otomobil ve uçak jet motorlarının püskürtme delikleri çok kısa bir sürede işlemek mümkündür.
- Çoğu zaman işlem sonrası taşlama ve parlatma gibi işlemlere gerek kalmamaktadır.
- Tezgâh kullanımını oldukça kolaydır.
- Sistem servo motorlar yardımıyla, iş parçası üzerinde ölçmeye gerek kalmadan istenilen koordinatların işlenmesinde çok büyük bir kolaylık sağlar.

4.2. Elektro Erezyon İşleme Yönteminin Dezavantajları

- Hem kullanılan elektrot hem de iş parçası elektriksel iletkenliğe sahip olmalıdır.
- Özellikle delik delme işleminde deliğin üst ve alt çaplarında ölçü farkları oluşmaktadır. Buda deliklerin konikleşmelerine neden olmaktadır.
- Parça kalınlığı değeri artıkça deliklerin koniklik oranlarında artışa neden olmaktadır.
- Bazı kompozit malzemelerin işlenmesi zaman alabilmektedir. Ayrıca bu malzemelerin işlenmesinde elektrot aşınma miktarı arttığından dolayı elektrotun formunu korumak zordur.
- Yüksek akımlarda işlem sonrası yüzey sertleşmeleri meydana gelir.
- Malzemeden kaldırılan talaşın tane boyutu küçük olduğundan dolayı talaş kaldırma oranı klasik tezgâhlara oranla çok çok azdır.
- Elektro Erezyon ile işleme etkileyen değişken sayısının çok olması bu işlemin kontrolünü zor ve karmaşık bir hal almasına neden olmaktadır.
- Geleneksel yöntemle işlemeye oranla hızları çok düşük, elektriksel enerji harcama oranı çok çok yüksek olup maliyetlidir.
- Kullanımı kolay olmasına rağmen kullanıcı operatörü sayısı azdır.

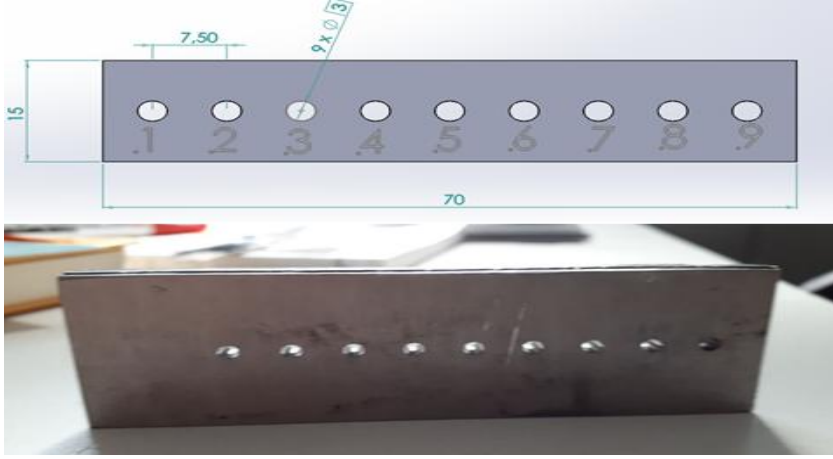
5. METARYAL VE METOD

5.1. Deneysel Malzeme ve Numune Hazırlanması

Bu tez çalışmasında kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de verilmiş olan ticari GR5 Ti6Al4V titanyum alaşımlı levhalar, bakır ve pirinç elektrotlar kullanılarak işlenmiştir. Bakır elektrot çapı 6 mm boyu 70 mm olan 18 adet kesilmiştir. Uç profilleri 3 mm çapta olacak şekilde CNC torna tezgâhında işlenmiştir. Pirinç elektrot çapı 3 mm boyu 70 mm olan 18 adet kesilerek işleme hazır hale getirilmiştir. 9 adet bakır elektrot ve 9 adet pirinç elektrot kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Numune olarak seçilen Ti6Al4V alaşımı levhalar 6x15x70 mm olacak şekilde şerit testere yardımıyla 4 adet kesilmiştir. Kesilen parçalar işlem süresini kısaltmak için CNC freze tezgahında Şekil 5.1’de verilen delik merkezlerinde 2,5 mm çapında ön delme işlemi yapılmıştır. Ti6Al4V alaşımı levhalar dalma erezyon tezgâhında, değişken olarak seçilen akım, gap voltaj, Ton, Toff, bakır elektrot, pirinç elektrot, kriyojenik bakır elektrot, kriyojenik pirinç elektrot) parametreler altında 36 adet delme işlemine tabii tutulmuşlardır.

Tablo 5.1. Ti6Al4V (GR5) titanyumun kimyasal yapısı (%)

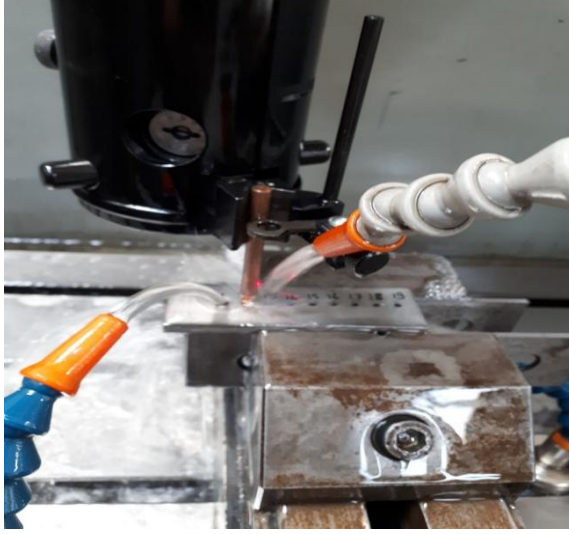
Ti	Al	V	H	O	N	C	Fe	DİĞER
Kalan	6,25	4,25	0,0029	0.110	0,003	0,011	0,026	diğer≤0,1 total≤0,4



Şekil 5.1. EEİ ile işlenen numunelerin tasarımı ve işlem sonrası görüntüsü

5.2. Elektro Erezyon İşleme ile Delik İşleme Deneyleri

Çalışmalarda OSCARMAX marka Elektro Erezyon tezgâhı yardımıyla (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4) 4 adet 6x15x70 mm plaka üzerinde her bir plakada 9 adet, toplamda ise 36 adet delik işlenmiştir. 2 adet plaka bakır elektrotlarla 2 adet plaka ise pirinç elektrotlarla işlenmiştir. Bakır elektrot ve pirinç elektrotlar ile farklı akım, gap voltaj, Ton, Toff değerleriyle ön deneyler yapılarak en uygun parametre değerleri tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada, akım, gap voltaj, Ton, Toff, bakır elektrot, pirinç elektrot, kriyojenik bakır elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlar değişen parametreler olarak seçilmiştir. Taguchi L₁₈ deney tasarımı kullanılmıştır. Polarite (elektrotlar +/-iş parçaları -), dielektrik sıvının cinsi ve parça kalınlığı 6 mm olarak sabit tutulmuştur. Toplamda 36 adet delik işlenmiştir. Şekil 5.2’de dielektrik sıvının deneylerde uygulanış biçimi görülmektedir.



Şekil 5.2. Dielektrik sıvının deneylerde uygulanış biçimi



Şekil 5.3. EEİ tezgâhı ve güç ünitesi



Şekil 5.4. Deneylerde kullanılan işlem parametrelerinden tezgâh panelinin görüntüsü

Deneyler sırasında bakır ve kriyojenik bakır elektrotlar için kullanılan parametreler Tablo 5.2’de pirinç ve kriyojenik pirinç elektrotlar için ise Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot için değişen işlem parametreler

İşleme Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı [A]	4-5-6
Gap Voltaj (Volt)	4-5-6
Darbenin Aktif Olduğu süre (Ton) [μ s]	160-200-240
Darbe Boşluk Süresi (Toff) [μ s]	48-60-72
Polarite	Elektrot (+), İşparçası (-)
Dielektrik Sıvı Uygulama Şekli	Merkezden püskürtme
Dielektrik Sıvının Cinsi	Parafinol 5
Deney Tekrar Sayısı	1
İşleme Derinliği	6 mm
Püskürtme Basıncı (p) [bar]	0,5
İşlem Süresi ($t_{işleme}$) [dak]	Deney şartlarına göre değişmektedir.
İş Parçası malzemesi	Ti6Al4V titanyum alaşımı
Elektrot Malzemesi	Bakır ve kriyojenik ısıtılmış bakır alaşımı

Tablo 5.3. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot için değişen işlem parametreler

İşleme Parametreleri	Değerleri
Boşalım Akımı [A]	1-1,5-2
Gap Voltaj (Volt)	2-4-6
Darbenin Aktif Olduğu süre (Ton) [μ s]	10-20-30
Darbe Boşluk Süresi (Toff) [μ s]	10-20-30
Polarite	Elektrot (+), İşparçası (-)
Dielektrik Sıvı Uygulama Şekli	Merkezden püskürtme
Dielektrik Sıvının Cinsi	Parafinol 5
Deney Tekrar Sayısı	1
İşleme Derinliği	6 mm
Püskürtme Basıncı (p) [bar]	0,5
İşlem Süresi ($t_{işleme}$) [dak]	Deney şartlarına göre değişmektedir.
İş Parçası malzemesi	Ti6Al4V titanyum alaşımı
Elektrot Malzemesi	Pirinç ve kriyojenik ısıtılmış pirinç alaşımı

Elektro Erezyon tezgâhında işlem parametrelerine etki edecek olan faktörler minimize edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra elektrotlarda oluşan sıcaklık değerleri Şekil 5.5’te

bağlantısı yapılan Extech marka piyasada VIR50 olarak bilinen infrared –video termometre ile ölçümler yapılmıştır.



Şekil 5.5. Elektrotlarda oluşan sıcaklık değeri ölçüm yöntemi

5.3. Malzeme Kaldırma Oranı Analizi

Deneyleerde kullanılan her bir iş numune; hem işlenmeden önce hem de işlendikten sonra kompresör yardımıyla temizlemiş ve saç kurutma makinası ile kurutulularak ölçmeye uygun hale getirilmiştir. Numuneler Denver Instrument (SI-203) marka 0,001 gr hassasiyete sahip dijital terazi ile 3'er kez tartılarak ortalama değerleri alınmıştır. Malzeme Kaldırma Oranı (MKO) Formül 5.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$MKO = \frac{İKMM}{t} \quad \text{gr/dak} \quad (5.1)$$

İKMM = (İşlem öncesi iş parçası ağırlığı – İşlem sonrası iş parçası ağırlığı)

İKMM iş parçasından kaldırılan malzeme miktarı (gr), t (dakika) ise işlem süresidir.

5.4. Takım Aşınma Oranın Analizi

Deneyleerde kullanılan elektrotlar; hem işlenmeden önce hem de işlendikten sonra kompresör yardımıyla temizlenip ölçmeye uygun hale getirilmiştir. Takım Aşınma Oranı(TAO) Formül 5.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

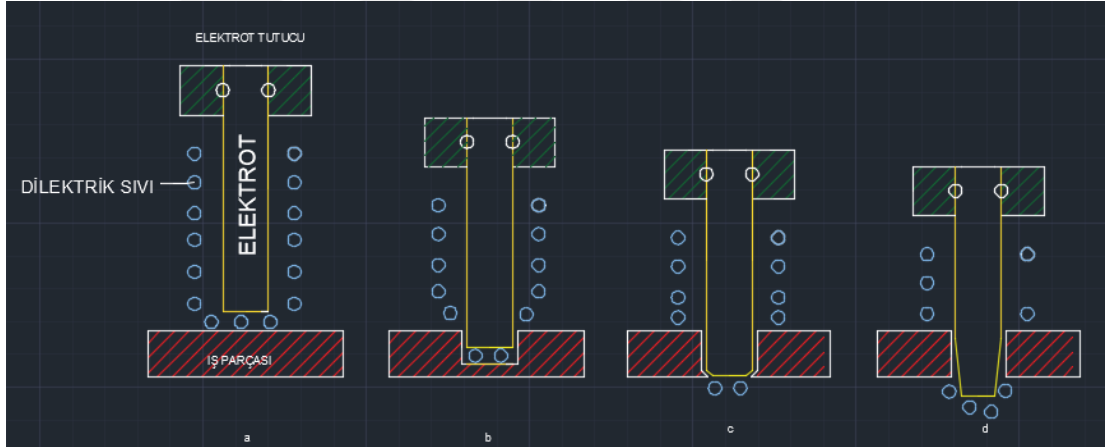
$$TAO = \frac{(EAM)}{t} \quad \text{gr/dak} \quad (5.2)$$

EAM = (İşlem öncesi elektrot ağırlığı – İşlem sonrası elektrot ağırlığı)

EAM Elektrot Aşınma Miktarı (gr), t (dakika) ise işlem süresidir.

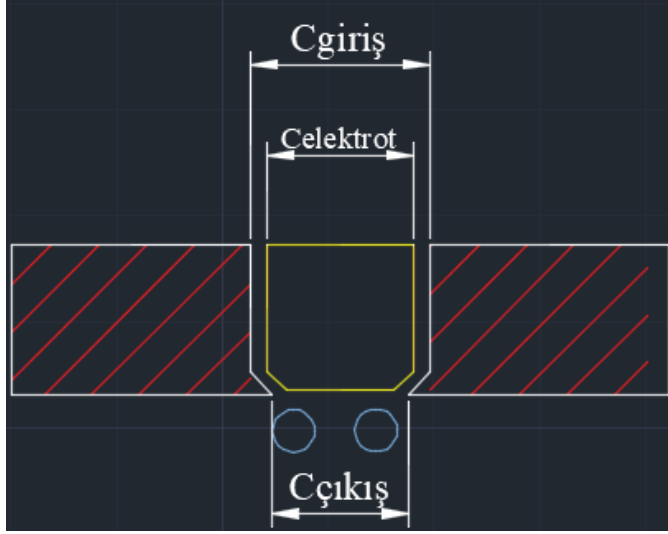
5.5. Elektrot ve Deliklerin Çaplarında Koniklik Oranı

Elektro Erezyon İşleminde, delik işleme sürecinde elektronların işleme yoğunluğu elektrotun uç kısmında gerçekleşmektedir. Buda elektrotun aşınma miktarının, uç kısımlarda diğer kısımlara oranla artmasına neden olmaktadır. Bu aşınma, başlangıçta keskin kenarlara sahip olan elektrotun uç kısımlarının konikleşmesine neden olmaktadır.(Şekil 5.6.a) İşleme sırasında aşınım olayından dolayı ilerleme yönüne paralel konikleşmeye başlar.(Şekil 5.6.b) Elektrotun konikleşmesi deliğin çıkış noktasında elektrotun daha da konikleşmesine neden olmaktadır. (Şekil 5.6.c)



Şekil 5.6. Elektrotun işleme zamanına bağlı oluşan aşınma. a) Parçaya yaklaşma b) Kısmi konikleşme c) Komple konikleşme d) Elektrotun malzemedan çıkışı

Elektrotun iş parçasından tam olarak çıktığı anda soğutma işleminin bitmesinden dolayı ortamda bulunan partiküllerin uzaklaştırılmadığından Şekil 5.6.d'deki işlem gerçekleşmemektedir. Bundan dolayı ise iş parçasının ya yüzeyi yanacak ya da elektrotun iş parçasına yapışmasına neden olacaktır.



Şekil 5.7. Delinmiş delikler için $C_{giriş}$, $C_{çıkış}$ ve $C_{elektrot}$ şematik gösterimi

Deliklerin yüzeyleri Stereo Zoom Mikroskop (Trinoküler) yardımıyla görüntülendi. Görüntüler, deliklerin giriş ve çıkış kesitlerinde oluşan minimum ve maksimum çap değerleri her bir numune için ayrı ayrı uygun ölçeklerde paket programlara aktarıldı. Paket program yardımıyla oluşan giriş çap değerleri ($C_{giriş}$) ve çıkış çap değerlerinin ($C_{çıkış}$) ölçümü yapılmıştır. (Şekil 5.7)

Farklı birçok parametre kullanılarak yapılan delme işlemlerinden oluşan ortalama giriş çap değerlerinin ($C_{giriş}$), deliğin ortalama çıkış çap değerleri ($C_{çıkış}$) ölçümüyle elde edilen veriler kullanılarak deliklerde oluşan koniklik oranı değerleri Formül 5.3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{C_{giriş} - C_{çıkış}}{2H} \right) \quad (5.3)$$

Burada θ delik koniklik açısı ve H (mm) iş parçasının kalınlığını ifade etmektedir.

5.6. Elektrotlara Uygulanan Kriyojenik Isıl İşlem Çevrimi

Hazırlanmış bakır ve pirinç elektrotlardan 9'ar adet seçilerek kriyojenik ısıl işleme tabi tutuldu. Elektrotlara uygulanan kriyojenik ısıl işlem çevrimi Şekil 5.8'de görülmektedir. Elektrotlara uygulanan kriyojenik çevrim ise, $-184 \text{ } ^\circ\text{C}$ ' ye dakikada $1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{dak}$ düşürüldükten sonra bu sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra dakikada $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ artışla oda sıcaklığına çıkarılarak kriyojenik ısıl işlem tamamlanmıştır. Bu çevrim İstanbul da faaliyet gösteren Dönüşüm Isıl İşlem San.ve Tic.Ltd.Şti'ne yaptırılmıştır. Elektrotlara uygulanan kriyojenik

işlem, aslında elektrotların üretim aşamasından sonra malzemenin yapısında kalan östenit fazın azaltılarak martenzitik faza dönüşümünü gerçekleştirmektir. Bu işlemin gerçekleştirildiği tankların kontrol üniteleri dış ortam yalıtılmış ve özel mikro işlemcilerle donatılmış kamera sistemlerinden oluşur. Boyutsal değişimin minimize edilmesi, östenit faz partiküllerinin martenzitmatris üzerinde homojen olmasının sağlanması, iç gerilme ve kalıntıların giderilmesiyle tokluk, aşınma dayanımı ve yorulma dayanımı artırılmaya çalışılmıştır. Pirinç ve bakır elektrot malzemelerinde yaklaşık iki katına yakın elektriksel iletkenlik elde edilmiş ve sertlik değerlerinde iyileşmelerin olduğu yapılan ölçümler sonucunda tespit edilmiştir.



Şekil 5.8. Elektrotlara uygulanan kriyojenik çevrim

5.7. Elektriksel İletkenliğin ve Mikro Sertlik Değerlerinin Analizi

Hazırlanmış bakır elektrotlar, kriyojenik ısı işlem görmüş bakır elektrotlar, pirinç elektrotlar ve kriyojenik ısı işlem görmüş pirinç elektrotlardan birer tane numune alınarak elektriksel iletkenliğin belirlenmesinde kullanılmıştır. Elektrotlarda oksitlenme olayı görülebilmektedir. Bu oksitlenmenin etkisini azaltmak ve ölçümlerin sağlıklı yapılması için elektrotlar zımpara ve çuha yardımıyla parlatılmıştır. Elektriksel iletkenlik katsayısı ölçümleri Şekil 5.9'da elektriksel ölçüm analiz cihazı kullanılarak, Four Probe Metodu kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, oda sıcaklığında 1Hz-1MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Numunelere AC 100 MV gerilim uygulanmıştır. Tablo 5.4'te deneysel iş parçaları için hazırlanmış elektrotların $\sigma_{iletkenlik}$ değerleri verilmiştir.



Şekil 5.9. Elektriksel iletkenli ölçüm ve analiz cihazı

$\sigma_{iletkenlik}$ kat sayısı ve elektrotların akıma karşı gösterdikleri direnç (R) değerlerinin belirlenmesinde elektrotların boyut ve şekilleri göz önüne alınmıştır. Malzemenin $\sigma_{iletkenlik}$ katsayısı ve direnci (R);

$$\sigma_{iletkenlik} = \frac{1}{R} * \frac{D}{A} \quad (5.4)$$

Formül 5.4 yardımıyla hesaplanmıştır. Burada; $\sigma_{iletkenlik}$ elektrotun elektriksel iletkenlik kat sayısı, A elektrotun yüzey alanı, D elektrotun çapını ve R elektrot direncini göstermektedir.

Elektro Erezyon ile işleme sonrasında elektrotların ve numunelerin mikro sertlik ölçümleri Tronic DHV-1000 Micro Vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Numunelere ve elektrotlara uygulanan yük 0,95 kg olup bekleme süresi 15 saniye olarak seçilmiştir. Numuneler üzerinden, yeniden katılaştıran tabaka, ısıdan etkilenen alan ve ana malzeme olmak üzere üç ayrı bölgeden her birinden yedişer adet olmak üzere toplamda 21 farklı noktadan sertlik ölçüm değerleri alınarak mikro sertlik değerleri belirlenmiştir. Kriyojenik ısı işleme tabi tutulmayan birer adet bakır ve pirinç elektrot ile kriyojenik ısı işleme tabi tutulan birer adet bakır ve pirinç elektrot numunesine üzerine 15 saniye süreyle 0,95 kg yük uygulanarak mikro sertlik değerlerindeki değişimlerin analizleri yapılmıştır.

Tablo 5.4. Deneysel iş parçaları için hazırlanmış elektrotların iletkenlik ve sertlik değerleri

Elektrot Malzemesi Cinsi	İletkenlik Değeri	Sertlik (HV)
Bakır Elektrot	226,831 Ω m	90,745 HV
Kriyojenik Bakır Elektrot	491,468 Ω m	130,141 HV
Pirinç Elektrot	37,091 Ω m	110,512 HV
Kriyojenik Pirinç Elektrot	80,422 Ω m	140,212 HV

5.8. Metalografik İncelemeler

Bakır elektrot, kriyojenik bakır elektrot, pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlarla işlenen deliklerin her birinden birer adet seçilerek, yüzeye ait görüntüleri, yüzeye ait mikro yapıları, ısıdan etkilenen bölgelerin tespiti ve delik içerisinde oluşan mikro çatlak oluşumları incelendi. İş parçaları yüzeylerindeki çizikler giderilmesi için zımparalar yardımıyla (400,600,800,1000 ve 1200) parlatma işlemine tabi tutuldu. Zımpara işleminden sonra tüm yüzeyler 3 ve 1 μ m'lik elmas pastalar kullanılarak çuha yardımıyla parlatılmıştır. Son parlatma işleminden sonra ise, alkolle yıkanarak kurutulmuştur. Dağlama işleminde, Ti6Al4V alaşımı için keller çözeltisi (%95,5 H₂O -%1,5 HCl -%0,5 HF- %2,5 HNO₃) kullanılmış ve bekleme süresi 20-30 saniyedir. Dağlama işleminden sonra, numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Numunelere ait SEM görüntüleri alınırken numunelerin kesilmiş yüzeylerinde oluşan elementlerin içeriklerinin ve fazlarının tespit için EDS (Energy Dispersive Spectrograph) ve XRD (X-Ray Diffraction) analizleri yapılmıştır. İşlemlerin tamamı Elazığ Fırat Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma merkezinde (FÜBTAM) yapılmıştır.

5.9. Yeniden Katılan Tabaka Kalınlığı Analizi

Numunelerde Elektro erezyon ile işlenmesinden sonra oluşan yeniden katılan tabaka kalınlıklarının analizleri için SEM görüntüleri alındı. Elde edilen SEM görüntüleri Solidworks 2017 paket programında uygun ölçeklendirme yapılarak çizim alanına taşındı. Bu alanda oluşan görüntüler yardımıyla üç noktadan geçen daireler çizilerek ortalama çap değerleri elde edildi. Oluşan bu çaplar arasındaki mesafeler ölçülendirilerek oluşan tabaka kalınlıkları elde edilmiştir.

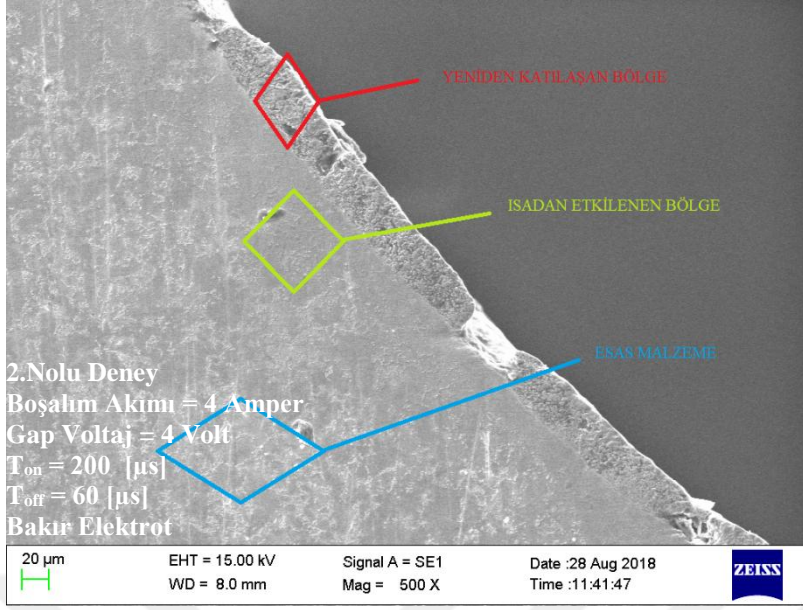
6. DENEY SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

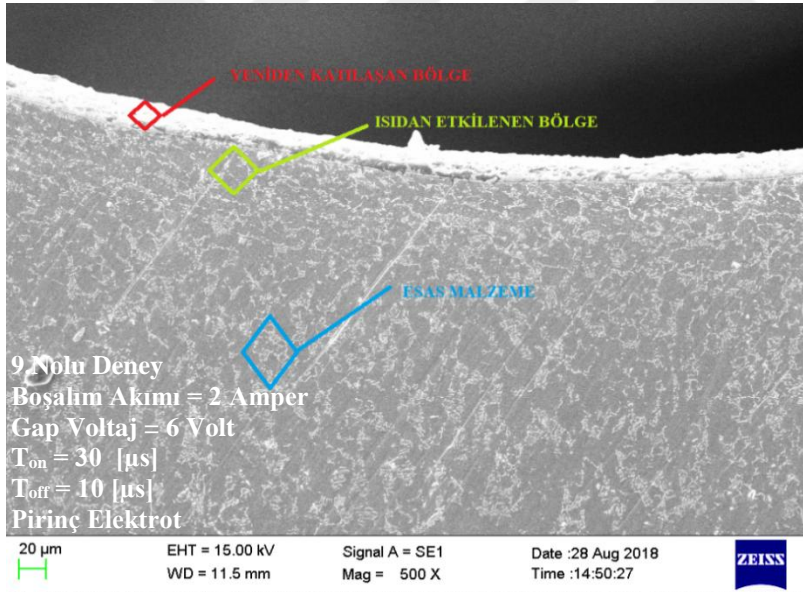
Elektro Erezyon ile işlenen levhalar delik yüzeyinde oluşan metalürjik değişimler üç temel faktöre bağlıdır. Bunlar,

- 1-Ergime sonrası yeniden katılaştıran bölge
- 2-Bu yüzeylere komşu olan ısıdan etkilenen bölge
- 3-Esas malzeme olarak adlandırılabilir.

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 'de Elektro erezyon işleme ile bakır elektrot ve pirinç elektrot ile işlenmiş yüzeylerin SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde üç farklı bölge oluşumu gözlenmektedir. En üst katman yeniden katılaştıran tabaka olarak adlandırılır. Bu tabaka elektrot ile iş parçasının işlenmesi esnasında genellikle akımın oluşturduğu enerji ile oluşan yüksek sıcaklıkta eriyik halde bulunan metalin soğutma sıvısı yardımı ile delik alanından uzaklaştırılmadan yüzeyde hızlı bir şekilde soğuyup yeniden katılaşması suretiyle oluşmaktadır. Isıdan etkilenmiş, küçük bir bölgede oluşan, yeniden katılaştıran bu tabaka, ergime sonrası sertlik değeri yüksektir. Ortada bulunan katman ise, deliğin işlenmesi esnasında ergime sıcaklığının oluşmadığı fakat meydana gelen ısının etkisiyle esas yapının mikroyapısal değişikliğe uğradığı bölgedir. En alt katman ise esas malzemenin bulunduğu bölgedir. Bu mikro yapıların oluşumunda işlem sıcaklığının yükselmesi ve hızlı bir şekilde soğutulması ana etkidir.



Şekil 6.1. EEİ’de bakır elektrot ile işlenmiş bir yüzeyin SEM görüntüsü

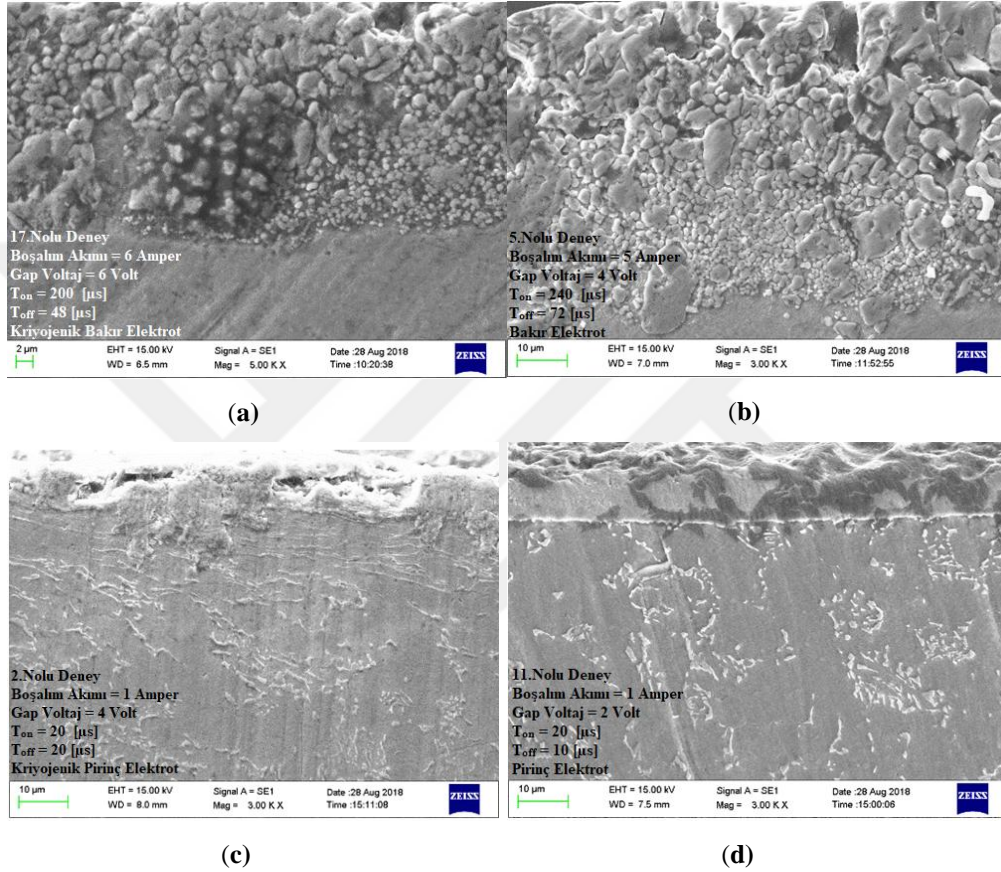


Şekil 6.2. EEİ’ de pirinç elektrot ile işlenmiş bir yüzeyin SEM görüntüsü

Elektro erezyon yöntemiyle işlemede, boşalım akımının yükselmesi, ısıl enerjinin etkisinin artmasına, iş parçası ve elektrotta ergimeyle beraber buharlaşmayı sebep olur. Ayrıca, darbenin aktif süresi artırılması da iş parçasının daha fazla ısınmasına neden olur. Elektro erezyon yöntemiyle işlemede, ergimiş halde bulunan metal tanecikler soğutma sıvısı ile iş parçası yüzeyinden tamamen uzaklaştırılmaz. İşlem sonrası oluşan yeniden katılaştıran tabaka, tezgâhta kullanıcı tarafından belirlenen işleme parametrelerinin etkisiyle kopan

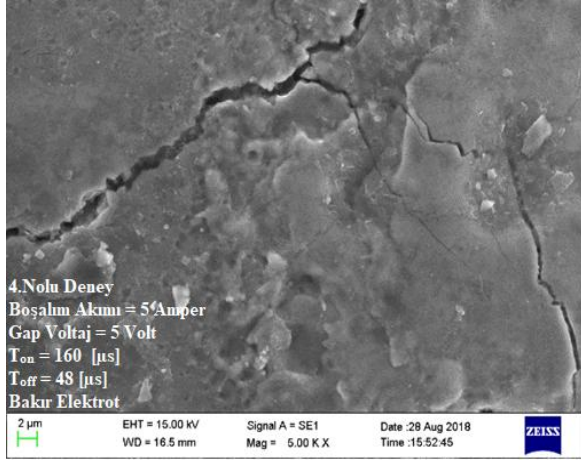
metal ergimiş haldeki partiküllerin uygun olmayan soğuma şartlarında tekrar katılaşması ile oluşmaktadır.

Yeniden katılaştıran tabaka ve ısıdan etkilenen tabakanın mikro yapıları, kimyasal bileşimi ve fiziksel yapısal özellikleri esas malzemeden farklı olmaktadır. Bu da iş parçası malzemesinin yüzey kalitesini de etkilemektedir

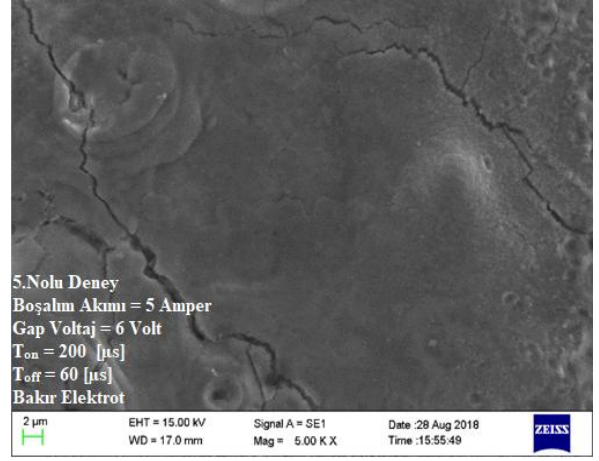


Şekil 6.3. Farklı elektrotlarla işlenmiş yüzeylerin SEM görüntüleri. **a)** kriyojenik bakır elektrot **b)** bakır elektrot **c)** kriyojenik pirinç elektrot **d)** pirinç elektrot

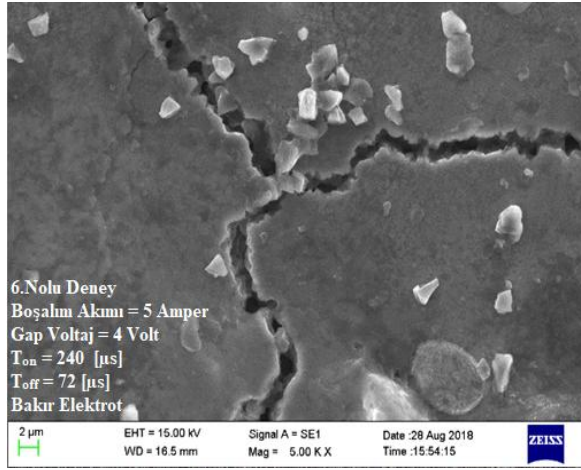
Şekil 6.3’de verilen mikro yapılar incelendiğinde dış katmanda farklı yüzey biçimleri görülmektedir. Dielektrik sıvının iş parçası yüzeyine püskürtülerek uygulanması, işlem esnasında sıcaklığın etkisiyle oluşan ergime, buharlaşma ve yeniden katılaşma döngüsünü etkileyerek mikro yapı farklılıkları görüntüler analiz edilerek elde edilmiştir.



(a)

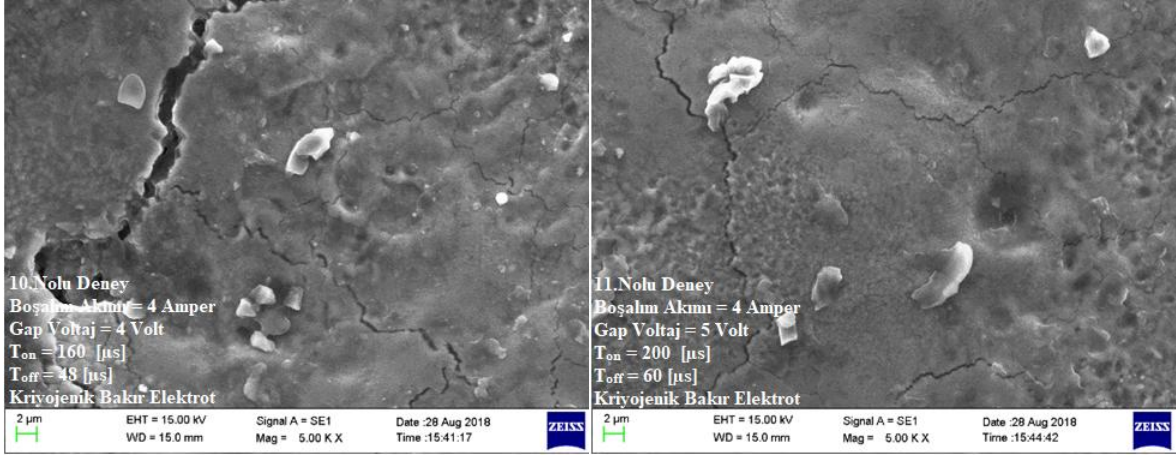


(b)



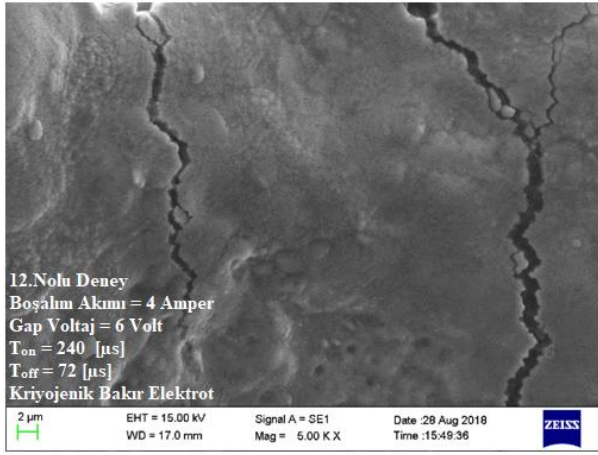
(c)

Şekil 6.4. Bakır elektrot ile işlem sonrası oluşan mikro çatlak yoğunluğu. **a)** 4 nolu deney **b)** 5 nolu deney ve **c)** 6 nolu deney



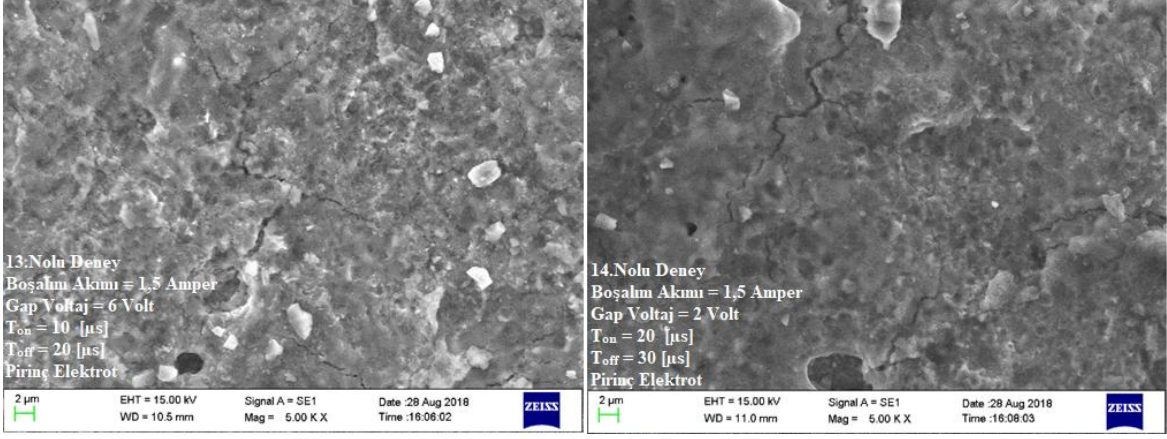
(a)

(b)



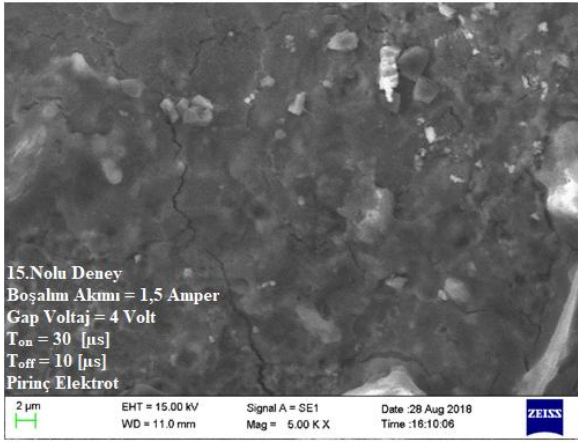
(c)

Şekil 6.5. Kriyojenik bakır elektrot ile işlem sonrası oluşan mikro çatlak yoğunluğu a) 10 nolu deney b) 11 nolu deney ve c) 12 nolu deney



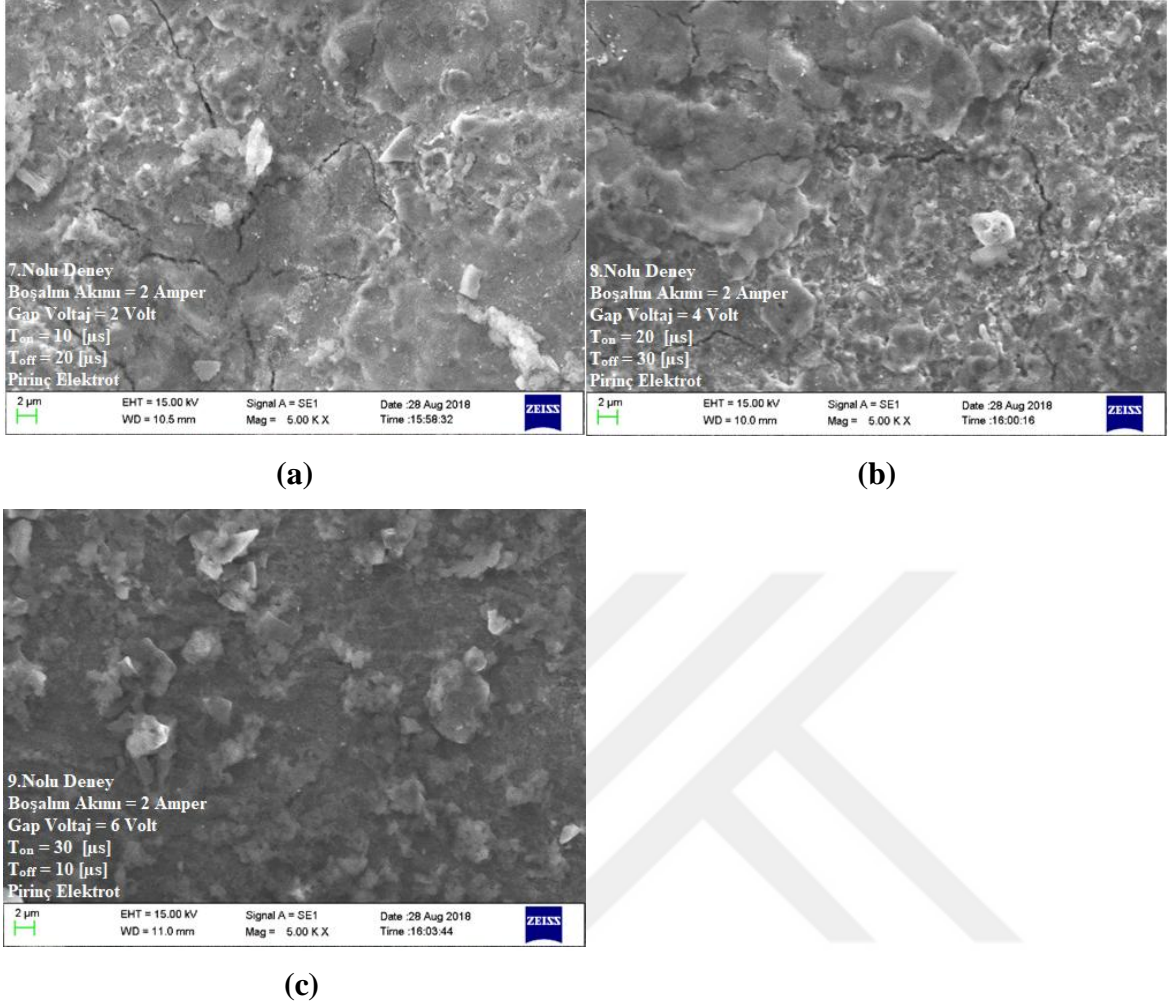
(a)

(b)



(c)

Şekil 6.6. Pirinç elektrot ile işlem sonrası oluşan mikro çatlak yoğunluğu a) 13 nolu deney b) 14 nolu deney ve c) 15 nolu deney



Şekil 6.7. Kriyojenik pirinç elektrot ile işlem sonrası oluşan mikro çatlak yoğunluğu **a)** 7 nolu deney **b)** 8 nolu deney ve **c)** 9 nolu deney

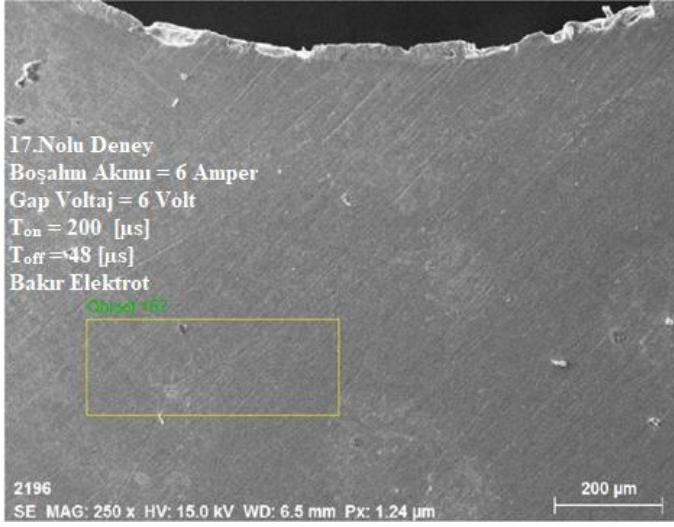
Ti6Al4V titanyum alaşımı malzemesinin tüm mikroyapı görüntülerinin (Şekil 6.4-6.7) incelenmesi sonucunda, deneylerde optimizasyon için belirlenen tezgah değişkenlerinin, iş parçasının işlem yüzeyinde, ısı etkisine maruz kalan kısımlarında mikro çatlakların oluştuğu görülmektedir. Pirinç elektrotlarla yapılan deneyler sonrasında oluşan mikro yapıların bakır elektrotla yapılan deney sonuçlarından daha iyi sonuçlar verdiği şekillerden anlaşılmaktadır. Bakır ve kriyojenik bakır elektrotla işleme sonucu oluşan mikro çatlak yoğunluğunun fazla ve derin olması, pirinç ve kriyojenik pirince uygulanan akım değerlerinden yüksek olmasına dayandırılmış. Bakır elektrotta uygulanan akım değerinin artması ile birlikte iş parçasından kaldırılan malzeme miktarı artmakta buda yüzeyde oluşan mikro gerilmelerin artmasına ve soğutma sıvısının etkisiyle de mikro çatlakların oluştuğu düşünülmektedir.

Elektro erezyon işleme ile Ti6Al4V alaşımının işlenmiş element kompozisyonunu (bileşeni) tespit etmede, SEM analizi ile birlikte Enerji Dağılım Spektrometresi

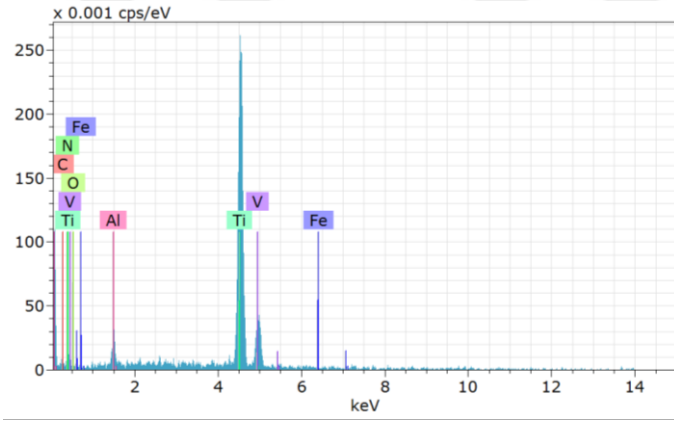
kullanılmıştır. SEM ve EDS analizlerin uygulanmasında numunelerin belirlenen kısımlarında testler yapılmıştır. EDS ile yapılan incelemelerde, deneysel çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımında (2 adet) uygulama numunesi üzerinde analizler yapılmıştır.

Şekil 6.8 – 6.9 ' da bakır ve pirinç elektrotlarla işlenmiş yüzeylerden alınan EDS analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, işlenen yüzeylerde, esas malzeme(Ti6Al4V) içerisinde yer alan başka elementlerin var olduğu ve bir miktar da elektrot elementlerinden (Cu,Zn,Pb) oluştuğu görülmektedir. Elektrot malzemelerinin ergime sıcaklıkları dikkate alındığında, elektrot malzemesinden iş parçası yüzeyine elektrota ait element geçişleri tespit edilmiş. Bu geçiş miktarı bakırın elektrotta az iken pirinç elektrotta daha fazla olduğu görülmüş. Netice olarak bakır ve pirinç elektrotlarda Takım Aşınma Oranının artmasına, yüzey pürüzlülüğünün nispeten iyileşmesini sağlamıştır.

Elektrotlar arasında akım geçimi tamamlandıktan sonra, plazma kanalı ve buhar balonu söner. Buhar balonu içindeki iş parçası ve bir miktar elektrot malzemesi ergiyiği ve dielektrik sıvıdan buharlaşan bir miktar gaz ortam içerisinde (işleme bölgesi) dağılırlar. Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen bu karmaşık patlama, bir miktar elektrot malzemesinin de iş parçası yüzeyine yapışmasına neden olur [26].



(a)

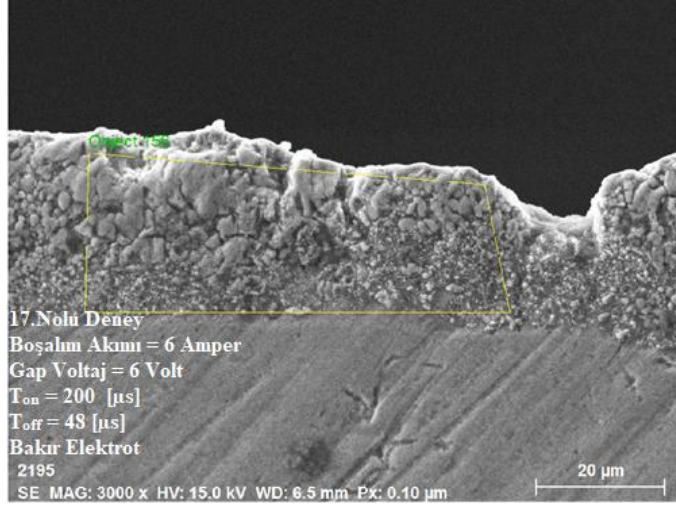


Spectrum: Object 157

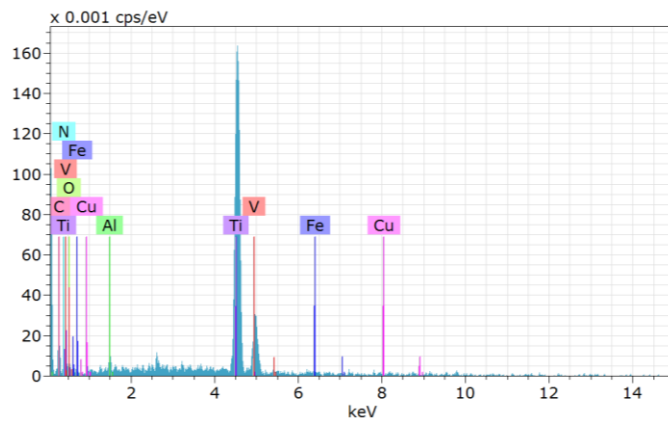
El	AN	Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)	
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]	
Ti	22	K-series	2042	82.85	89.47	82.09	3.22
V	23	K-series	104	4.69	5.06	4.36	0.53
Al	13	K-series	108	2.24	2.42	3.93	0.30
O	8	K-series	6	1.59	1.72	4.72	2.75
C	6	K-series	13	1.24	1.34	4.89	1.55
N	7	K-series	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	26	K-series	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Total:				92.61	100.00	100.00	

(b)

Şekil 6.8. Bakır elektrot ile işlenmiş Ti6Al4V malzemesinin esas bölgeden alınan a) SEM b) EDS analiz sonuçları



(a)



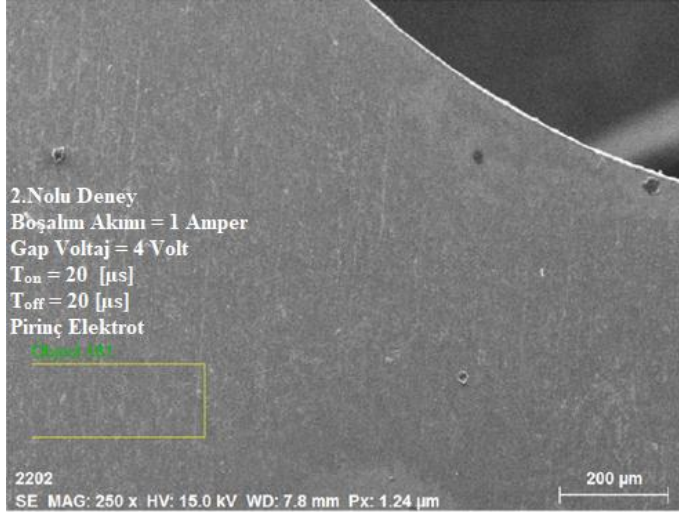
Spectrum: Object 156

El	AN	Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Ti	22	K-series	1965	71.08	79.58	2.79
C	6	K-series	77	6.23	6.97	3.48
O	8	K-series	26	5.54	6.20	4.96
V	23	K-series	131	5.28	5.91	0.54
Al	13	K-series	47	0.83	0.93	0.17
Fe	26	K-series	5	0.37	0.41	0.20
N	7	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Cu	29	K-series	0	0.00	0.00	0.00

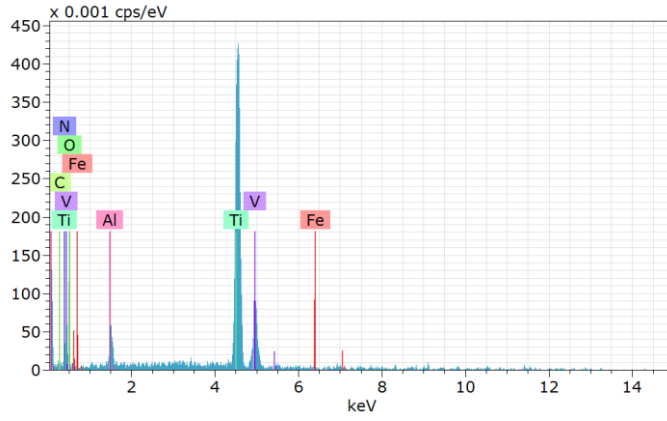
Total: 89.32 100.00 100.00

(b)

Şekil 6.9. Bakır elektrot ile işlenmiş Ti6Al4 malzemesinin YKTK a) SEM b) EDS analiz sonuçları



(a)

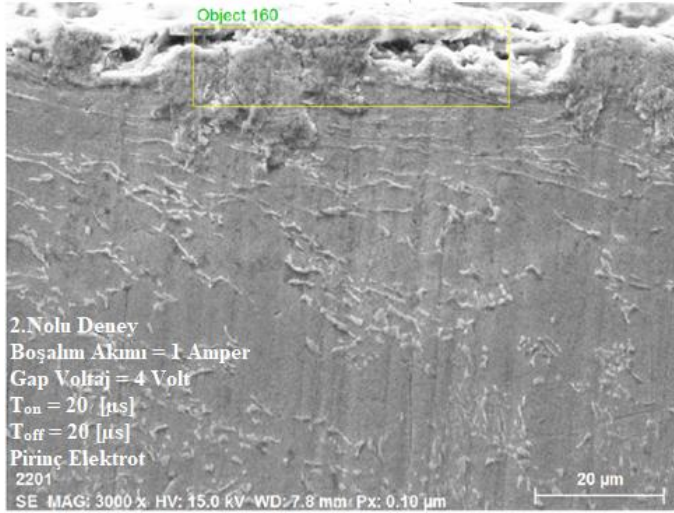


(b)

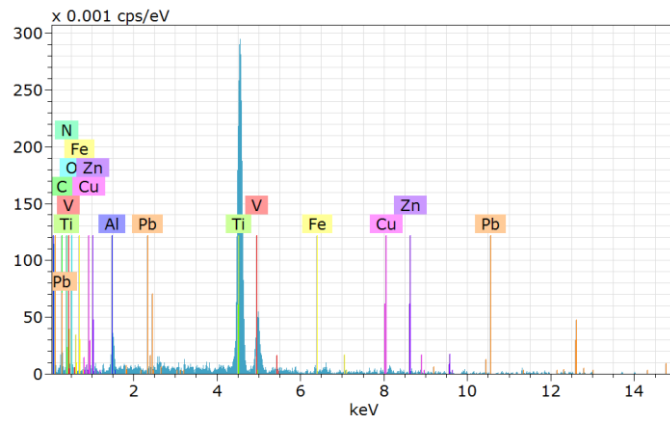
Spectrum: Object 161

El	AN	Series	Net un.	C norm.	Atom. C	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Ti	22	K-series	1922	92.34	91.80	3.63
V	23	K-series	86	4.60	4.57	0.57
Al	13	K-series	119	2.96	2.94	0.38
C	6	K-series	3	0.36	0.35	0.89
Fe	26	K-series	3	0.34	0.34	0.21
O	8	K-series	0	0.00	0.00	0.00
N	7	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Total:			100.59	100.00	100.00	

Şekil 6.10. Pirinç elektrot ile işlenmiş Ti6Al4V malzemesinin esas bölgeden alınan a) SEM b) EDS analiz sonuçları



(a)



Spectrum: Object 160

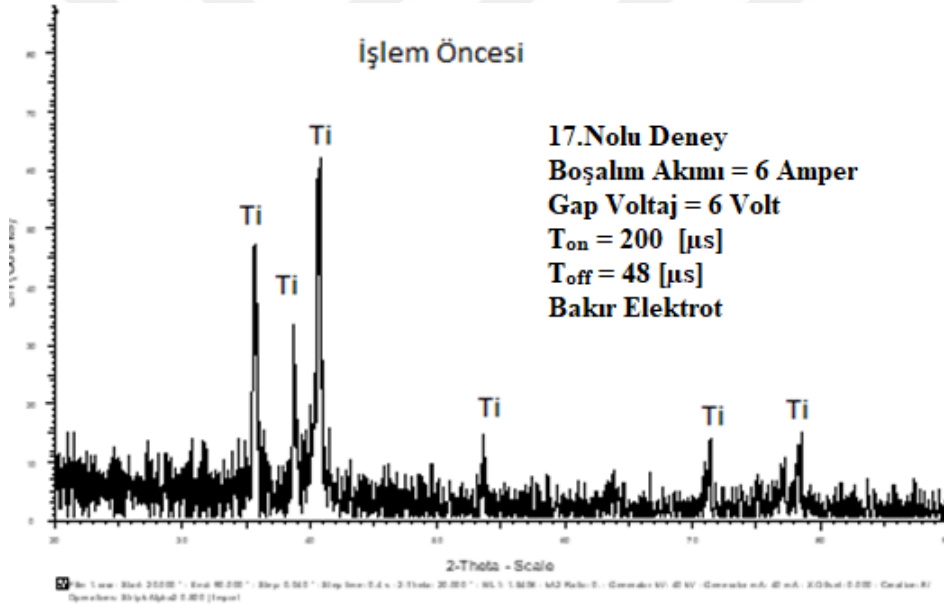
El	AN	Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)	
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]	
Ti	22	K-series	1764	77.41	83.41	66.36	3.11
C	6	K-series	58	5.97	6.43	20.40	3.76
V	23	K-series	89	4.34	4.67	3.49	0.53
Al	13	K-series	102	2.20	2.37	3.35	0.30
O	8	K-series	8	2.17	2.34	5.57	3.30
Fe	26	K-series	6	0.58	0.62	0.42	0.26
N	7	K-series	1	0.14	0.15	0.41	0.52
Total:			92.80	100.00	100.00		

(b)

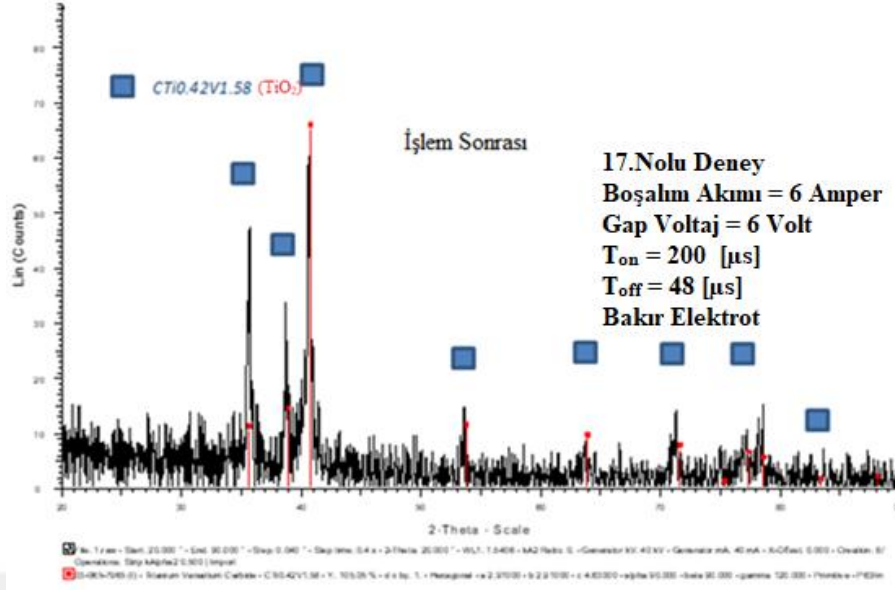
Şekil 6.11. Pirinç elektrot ile işlenmiş Ti6Al4V malzemesinin YKTK a) SEM b) EDS analiz sonuçları görüntüsü

Deneysel Ti6Al4V numunelerinin işlem sonrasında yüzeylerinde oluşan fazları belirlemek amacıyla, ayrıca XRD analizleri alınmıştır. Şekil 6.8 – 6.11 ' de sırasıyla numunelerin bakır ve pirinç elektrotlarla işlenmesi sonrası esas malzeme ve yeniden

katılaşan bölgelerin yüzeylerinden alınan XRD analizleri verilmiştir. Şekil 6.12 'de XRD analizi neticesinde piklerin tamamı Ti pikleridir. Analizler sonuçlandırıldığında yeniden katılaşan bölgelerde EDS ve XRD yardımıyla yer yer tespit edilen Cu, Zn, Pb, O ve C elementlerinde artışlar gözlenmektedir. Örneğin bakır elektrotla işlem sonrası C miktarı % 1,34'ten % 6,97; O miktarı ise %1,72'den % 6,97 yükseldiği ve yer yer Cu elementi gözlenmiştir. Ayrıca Pirinç elektrotla işlem sonrası C miktarı % 0,35'ten % 6,43; O miktarı ise % 0'den % 2,34 yükseldiği ve yer yer Pb ve Zn elementi gözlenmiştir. XRD sonuçlarıyla ortaya elektro erezyon işleme ile yeniden katılaşan tabaka bölgesinde oluşan termal sıcaklık yükselmesi ve düşüşlerin etkisiyle yapıda bulunan fazların ve karbürlerin kısmen çözüldüğu varsayılabilir. Çoğu numunede havadaki oksijenle etkileşime giren titanyumun Şekil 6.13'te görölen (TiO₂) intermetalik bileşiği oluşturma eğiliminde olduğu görölmüştür.



Şekil 6.12. Titanyum alaşımının işlem öncesi yüzeyinden alınan XRD analizi

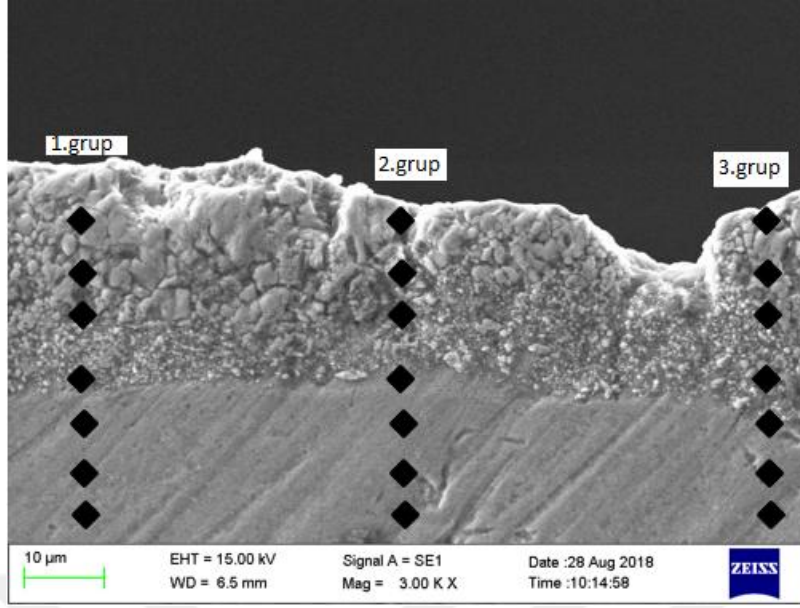


Şekil 6.13. Titanyum alaşımının işlem sonrası yüzeyinden alınan XRD analizi

6.2. Elektro Erezyon İşleme İle Delme Deneý Sonuçları

6.2.1. Mikro sertlik Ölçüm sonuçları

Elektro Erezyon İşleme neticesinde, delme bölgesinde işlem esnasında oluşan yüksek sıcaklık ve dielektrik sıvının da yardımıyla yapılan soğutma işleminde malzemede meydana gelen değişikliklerden önemli olan bir tanesi ise mikro sertlik değişimidir. Elektro Erezyon İşleminde sonra numune üzerine uygulanan 3 farklı bölgenin mikro sertlik değerlerinde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6.14'de görüldüğü gibi kriyojenik bakır elektrotla işlenmiş numune üzerine 0,98 kg sabit yük ile 3 ayrı bölgede belli aralıklarla yedişerli gruplar halinde toplamda 21 farklı noktadan sertlik ölçümleri alınarak bu üç bölgenin mikro sertlik değerleri Tablo 6.14'deki gibi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6.14. Sertlik ölçme deneyinin SEM görüntüsü

Tablo 6.1. Mikro sertlik ölçüm sonuçları

1.GRUP		2.GRUP		3.GRUP	
Dış katmandan içe doğru mesafe (µm)	Sertlik (HV)	Dış katmandan içe doğru mesafe (µm)	Sertlik (HV)	Dış katmandan içe doğru mesafe (µm)	Sertlik (HV)
15	372	15	383	15	366
50	363	50	374	50	343
85	309	85	368	85	339
110	345	110	328	110	350
130	354	130	389	130	337
150	348	150	322	150	318
200	330	200	341	200	323

Tablo 6.1 ile Şekil 6.14’de elde edilen bilgiler ışığında, ısıdan etkilen bölgenin sertlik değeri ile esas bölgenin sertlik değerleri benzerlik gösterirken, yeniden katılaştıran tabakanın kalınlığının sertlik değeri esas malzemeye göre daha yüksektir. Malzemede bölgeler arasındaki farklılıklar yeniden katılaştıran tabakanın kalınlığı bölgesindeki malzemenin işlem bölgesindeki aşırı ergime ve hızlı soğutma sonucundaki mikro yapıdaki α ve β fazları sıcaklık yükselmesi ve ani soğutma etkisiyle yapı içerisinde çözünerek homojen bir yapıya dönüşür. Buda malzemenin sertlik değerine artışına nispeten etki etmektedir. Ayrıca XRD analizlerinde görülen oksit tabakasının varlığı C, Cu ve O gibi elementlerin artması düzensiz

bir mikroyapı çıkmasına neden olduğu varsayılabilir. Tablo 6.1 'de bazı bölgelerde sertlik değerlerin işlenmiş yüzeyin altında 85 µm ila 110 µm aralığında sertlik düşmektedir. Bu aralıkların oluşumunda iş parçasının yüzeysel yüksek sıcaklık değeri, yumuşaması ve ısıl iletkenlik değerinin küçük olmasından dolayı ısı bu alanda sıkışarak hapis olmasına ve alaşımın aşırı yaşlanması olarak değerlendirilebilir.

6.2.2. Yeniden Katılan Tabaka Kalınlığı (YKTK) Ölçüm Sonuçları

Yeniden katılan tabaka kalınlığının küçük olması daha çok istenir. Çünkü Yeniden katılan tabaka bölgesinde oluşan termal sıcaklık yükselmesi ve düşüşlerin etkisiyle yapıda bulunan fazların ve karbürlerin kısmen çözülmesinden dolayı esas malzemedен farklı bir yapı elde edilmektedir. Buda malzemenin bu tabakada kimyasal değişime uğrayıp farklılaşmasına neden olmaktadır. Bu oluşum istenmeyen bir faktör olarak ele alınmaktadır.

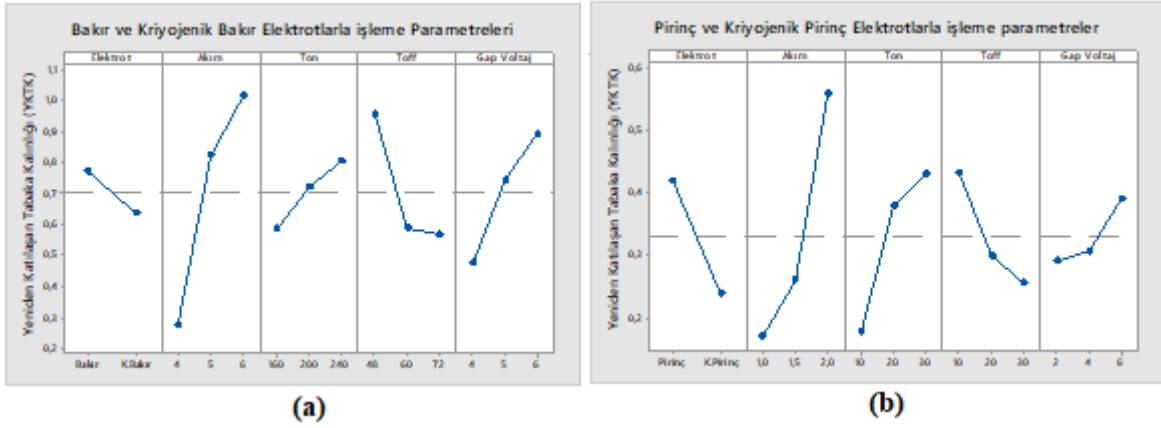
Tablo 6.2 ve Tablo 6.3 'de bakır elektrot, kriyojenik bakır elektrot, pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlarla işlenen 36 adet Ti6Al4V malzemesinin yeniden katılan tabaka kalınlığı değerleri toplu olarak iki ayrı tablo olarak verilmiştir.

Tablo 6.2. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot ile işlem sonrası oluşan YKTK bölgesi

Deney No	EC	BA (A)	Ton (μ s)	Toff (μ s)	GV (V)	YKTK (mm)
1	BE	4	160	48	4	0,362
2	BE	4	200	60	5	0,049
3	BE	4	240	72	6	0,256
4	BE	5	160	48	5	0,989
5	BE	5	200	60	6	1,124
6	BE	5	240	72	4	0,667
7	BE	6	160	60	4	0,649
8	BE	6	200	72	5	1,058
9	BE	6	240	48	6	1,783
10	KBE	4	160	72	6	0,184
11	KBE	4	200	48	4	0,184
12	KBE	4	240	60	5	0,622
13	KBE	5	160	60	6	0,603
14	KBE	5	200	72	4	0,521
15	KBE	5	240	48	5	1,018
16	KBE	6	160	72	5	0,717
17	KBE	6	200	48	6	1,389
18	KBE	6	240	60	4	0,476

Tablo 6.3. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot işlem sonrası oluşan YKTK bölgesi

Deney No	EC	BA (A)	Ton (μ s)	Toff (μ s)	GV (V)	YKTK (mm)
1	PE	1,0	10	10	2	0,074
2	PE	1,0	20	20	4	0,039
3	PE	1,0	30	30	6	0,049
4	PE	1,5	10	10	4	0,123
5	PE	1,5	20	20	6	0,420
6	PE	1,5	30	30	2	0,069
7	PE	2,0	10	20	2	0,741
8	PE	2,0	20	30	4	0,712
9	PE	2,0	30	10	6	1,548
10	KPE	1,0	10	30	6	0,045
11	KPE	1,0	20	10	2	0,253
12	KPE	1,0	30	20	4	0,560
13	KPE	1,5	10	20	6	0,024
14	KPE	1,5	20	30	2	0,595
15	KPE	1,5	30	10	4	0,334
16	KPE	2,0	10	30	4	0,068
17	KPE	2,0	20	10	6	0,253
18	KPE	2,0	30	20	2	0,017



Şekil 6.15. Farklı işlem parametrelerinin YKTK'ye olan etki grafikleri **a)** bakır ve kriyojenik bakır elektrot **b)** pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot

Tablo 6.2 ve 6.3'te numuneler üzerinden ölçülen ortalama yeniden katılacak tabaka kalınlık değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 6.15'te görülmektedir. Tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi, yeniden katılacak tabaka kalınlıkları

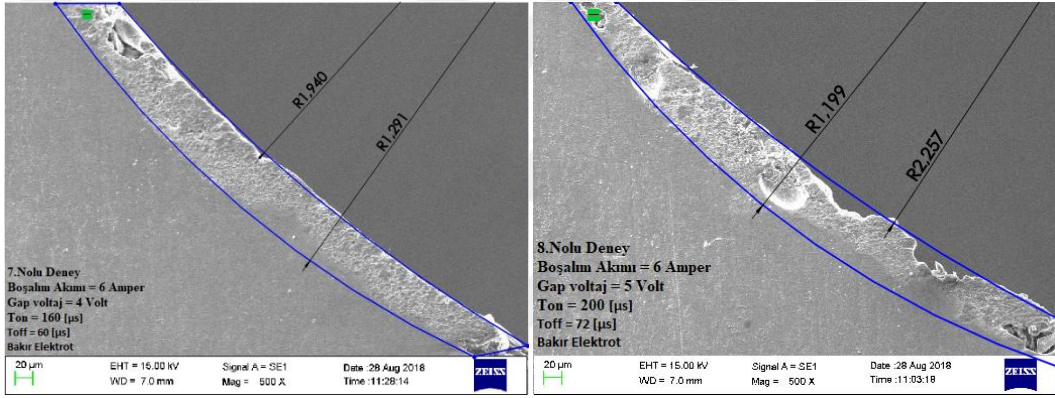
artıkça akım değeri ve darbenin aktif olduğu süreler yükselmektedir. Bakır ve pirinç elektrotlar kendi aralarında değerlendirildiğinde ise yeniden katılan tabaka kalınlığının bakır elektrotlarda 1 mm kalınlığa 6 Ampere karşılık gelirken, pirinç elektrotlarda 0,65 mm kalınlıkta 2 amper değeri sergilediği görülmüştür. Bu durumda Bakır ve kriyojenik bakır elektrotlarda yaklaşık 4-5 amper arasında keskin bir artış söz konusudur. Boşalım akımının artmasıyla, yüzey sıcaklığı malzemenin erime sıcaklığına daha düzenli bir şekilde ulaşmakta ve daha fazla malzeme eritilmektedir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak yeniden katılan tabaka kalınlıkları da artmaktadır. Yeniden katılan tabaka kalınlıkları bakır elektrotlar ile işleme neticesinde 0,049 ila 1,783 mm arasındayken, kriyojenik bakır elektrotlarla işleme neticesinde 0,180 ile 1,389 mm arasında, pirinç elektrotlarla işlenmiş yüzeylerde bu aralık 0,039 – 1,548 mm ve kriyojenik pirinç elektrotlarla işlenmiş yüzeylerde bu aralık 0,017 – 0,595 mm olan değerler elde edilmiştir. Benzer sonuçlar, Ramasawmy ve diğ. [27]' tarafından da belirtilmiştir. Ortalama akımın yeniden katılan tabaka kalınlığına etkisi açısından bakıldığında kriyojenik bakır elektrot, bakır elektrotla oranla daha iyi sonuçlar verirken kriyojenik pirinç elektrot ve pirinç elektrot oranla daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Darbe aktif süresinin akıma oranla etkisinin az olduğu (bakır ve kriyojenik bakır elektrot 0,6-0,8 mm olarak pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot 0,2-0,5 mm) Şekil 6.15 'te görülmektedir. Darbe aktif süresinin artması ara bölgede daha fazla ısı oluşumuyla bağlantılıdır. Ara bölgede oluşan yüksek ısı miktarı ile yüzeyden eritilen malzeme miktarı da artmaktadır. Lee ve diğ. Darbe aktif süresinin, malzemenin izotermal eğrileri malzeme alt tabakalarına doğru daha fazla yayılmakta ve yüzey altında yayılan ısı miktarı malzeme içine doğru daha fazla bir bölgeyi kapsamaktadır [28]. Bu da, daha geniş bir bölgenin ısı tesiri altında kalmasına ve ortalama yeniden katılan tabaka kalınlıklarının artmasına yol açmaktadır.

Gap voltajın yeniden katılan tabaka kalınlığına etkisinde bakır ve kriyojenik bakırla yapılan deneylerde keskin bir artış mevcut iken pirinç ve kriyojenik pirinçle yapılan deneylerde grafikteki keskinlik nispeten azalma eğilimindedir. Buda işlenen malzeme üzerinde ısı, sıcaklık artışına sebep olmakla beraber akım ve darbe aktif süresine kıyasla etkisinin az olduğu sonucuna ulaşılabilir. Gap voltaj değerindeki artış nispeten yeniden katılan tabaka kalınlığını artırdığı söylenebilir. Şekil 6.15'ten anlaşıldığı gibi bakır ve kriyojenik bakır elektrot 0,4-0,9 mm olarak pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot 0,2-0,5 mm yeniden katılan tabaka kalınlıklarının elde edilmiştir.

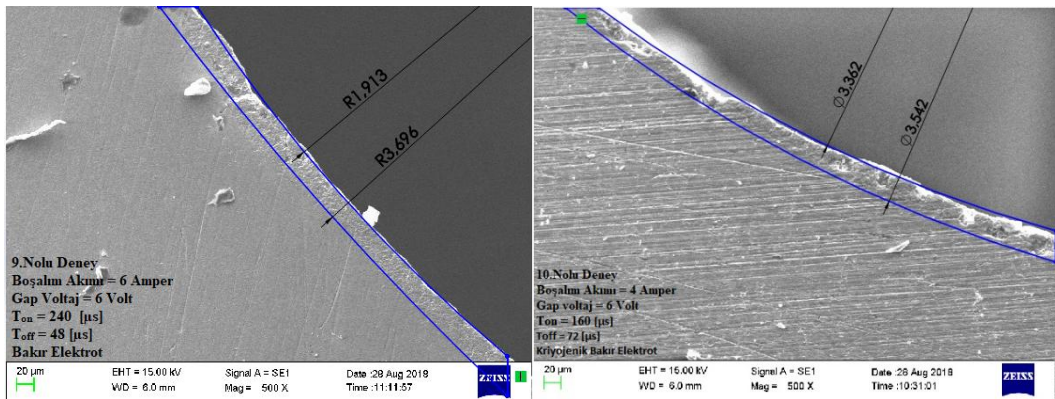
Darbe boşluk süresinin artmasıyla elektrotların ısı, sıcaklık değerlerinde dielektrik sıvının etkisiyle çok hızlı düşüşler görülmekte. Buda yeniden katılan tabakanın istenilen yönde malzemede daha dar bir bölgede ısı etkisinde kalmasına ve yeniden katılan tabaka kalınlığında nispeten azalmasına yol açmaktadır. Şekil 6.15'ten anlaşıldığı gibi bakır ve kriyojenik bakır elektrot 0,5-0,9 mm olarak pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot 0,2-0,6 mm yeniden katılan tabaka kalınlıklarının elde edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda delik kesitlerinin SEM görüntüleri paket program yardımıyla elde edilen şekil ve ölçüm sonuçları Şekil 6.16 ve 6.17'de ayrıntılı olarak verilmiştir.



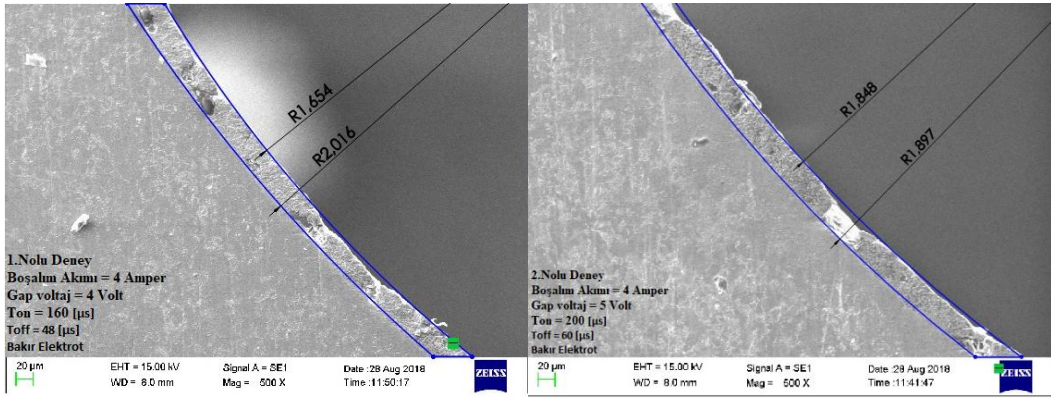
(g)

(ğ)



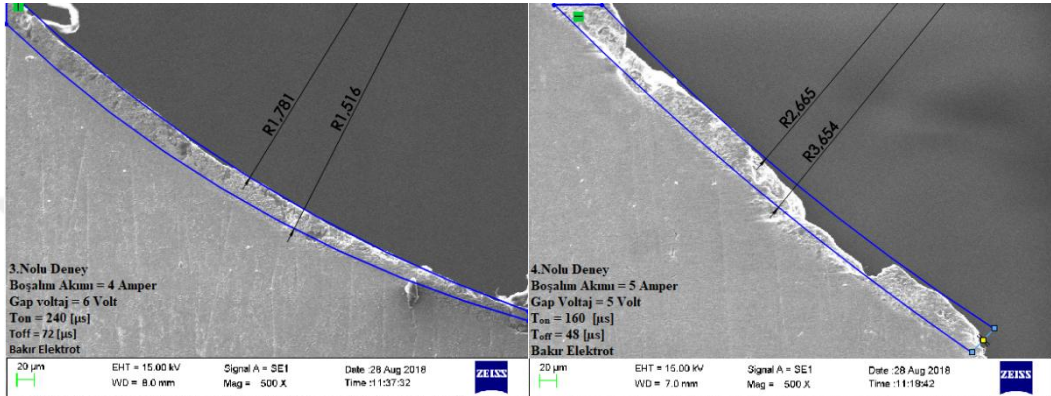
(h)

(i)



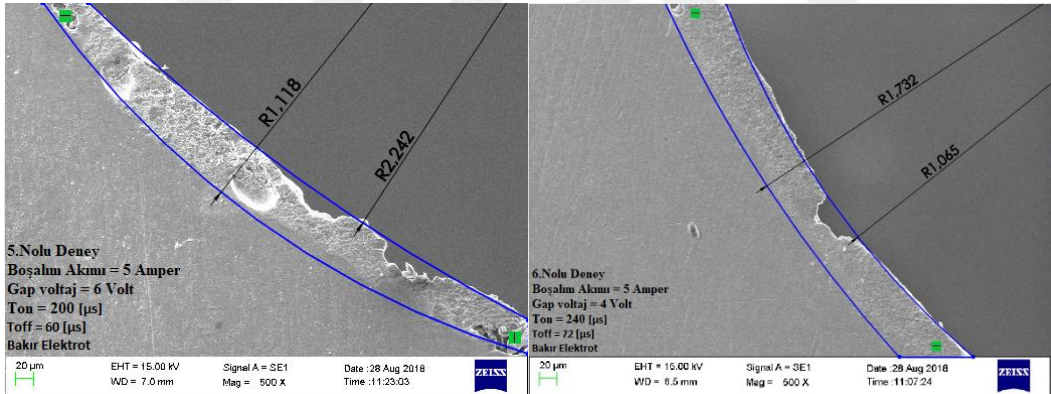
(a)

(b)



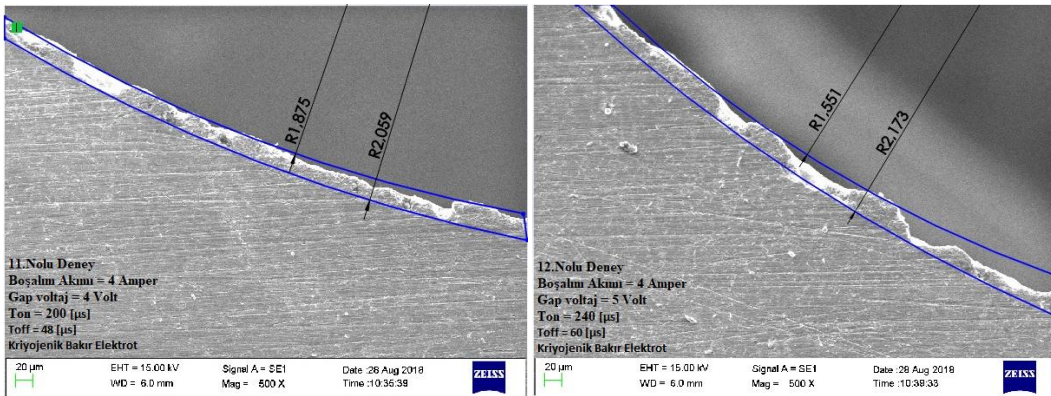
(c)

(d)



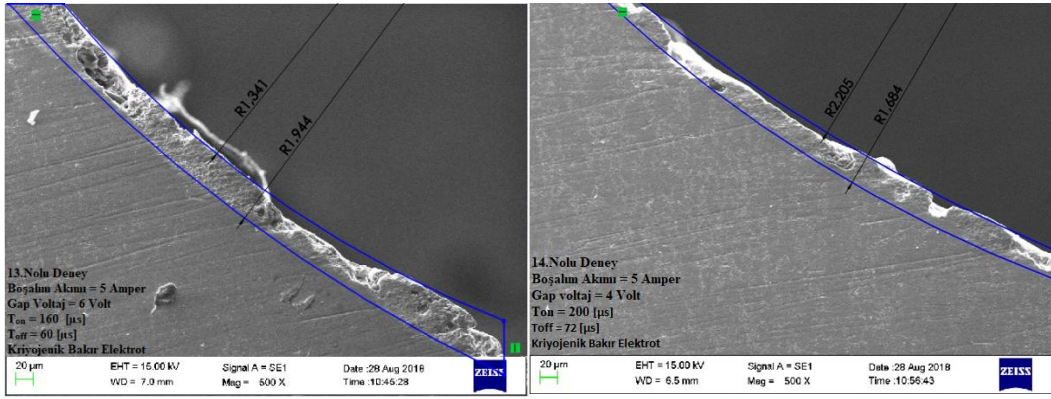
(e)

(f)



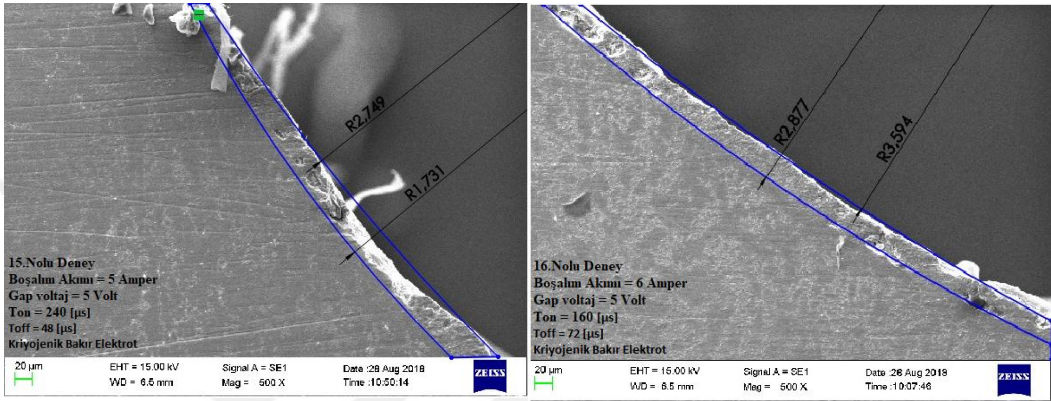
(i)

(j)



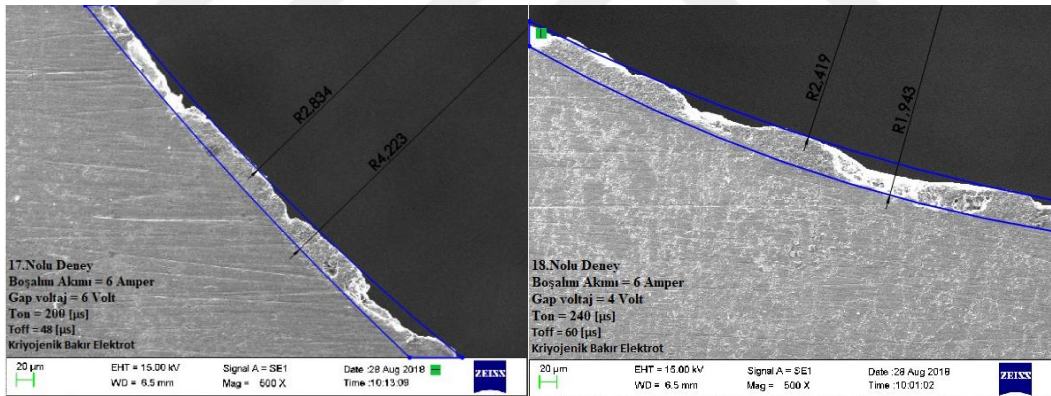
(k)

(l)



(m)

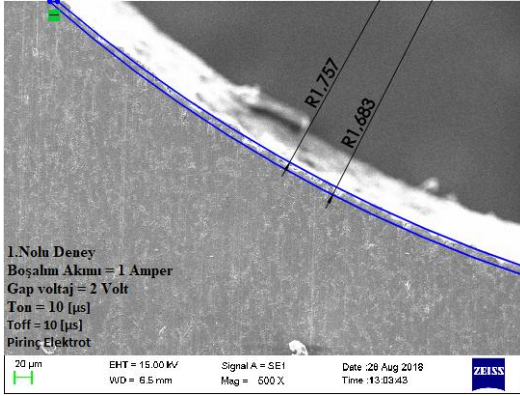
(n)



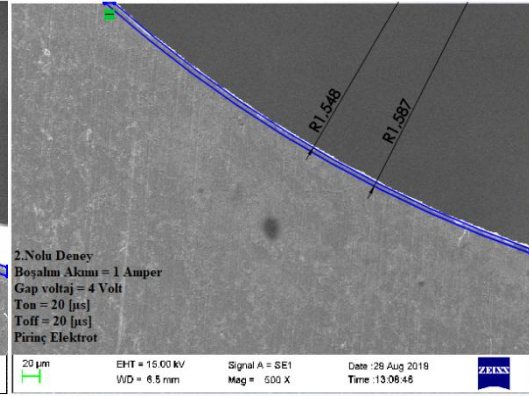
(o)

(ö)

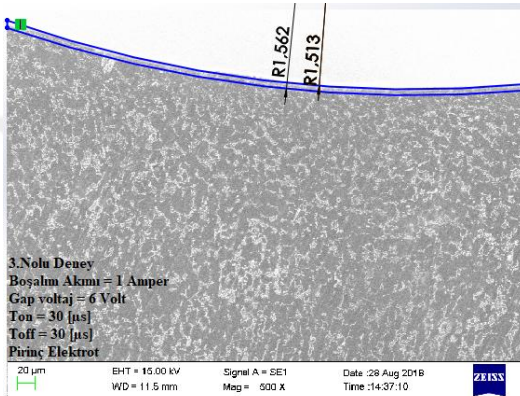
Şekil 6.16 YKTK görüntüleri a-h) bakır elektrot ve ı-ö) kriyojenik bakır elektrot



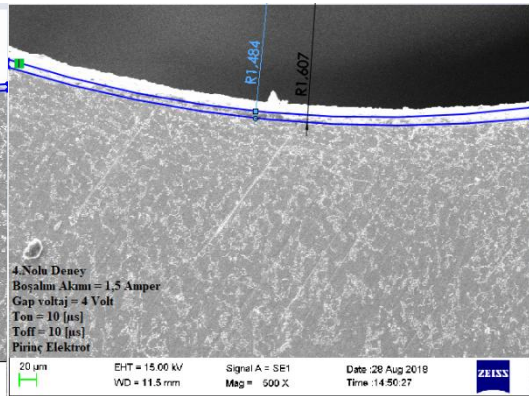
(a)



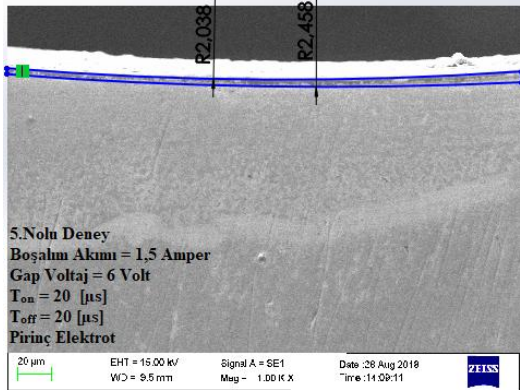
(b)



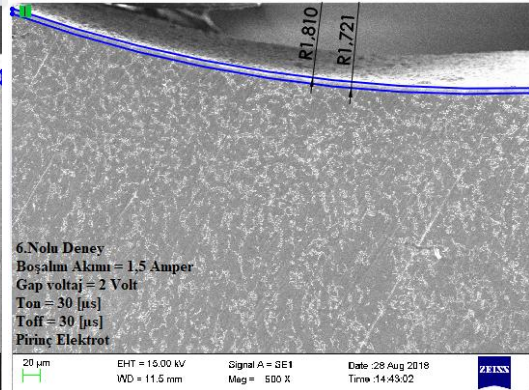
(c)



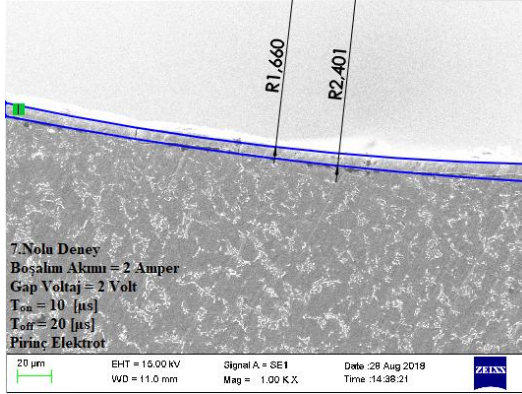
(d)



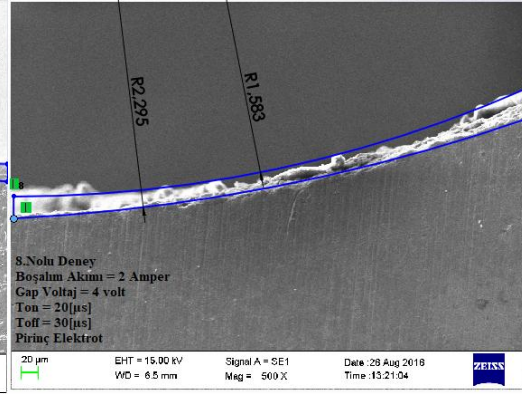
(e)



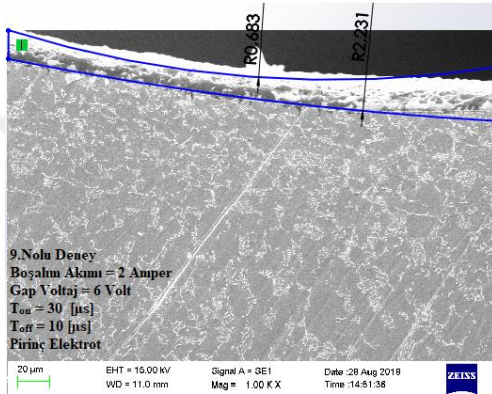
(f)



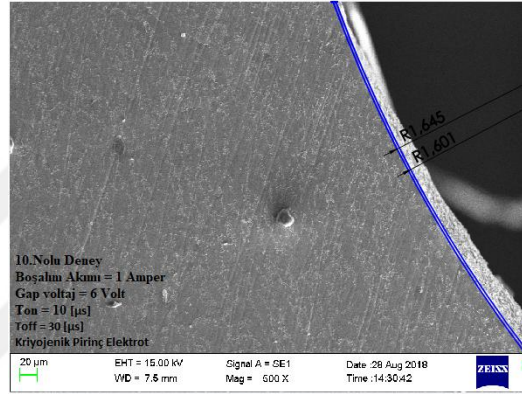
(g)



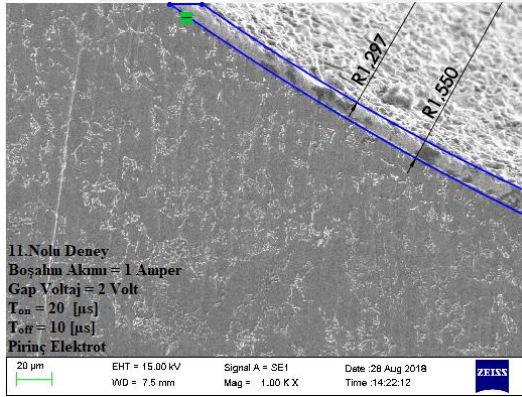
(g)



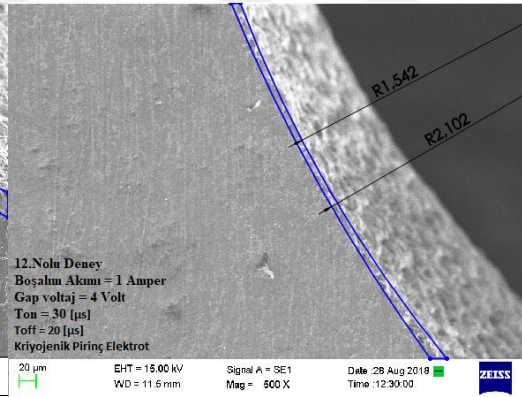
(h)



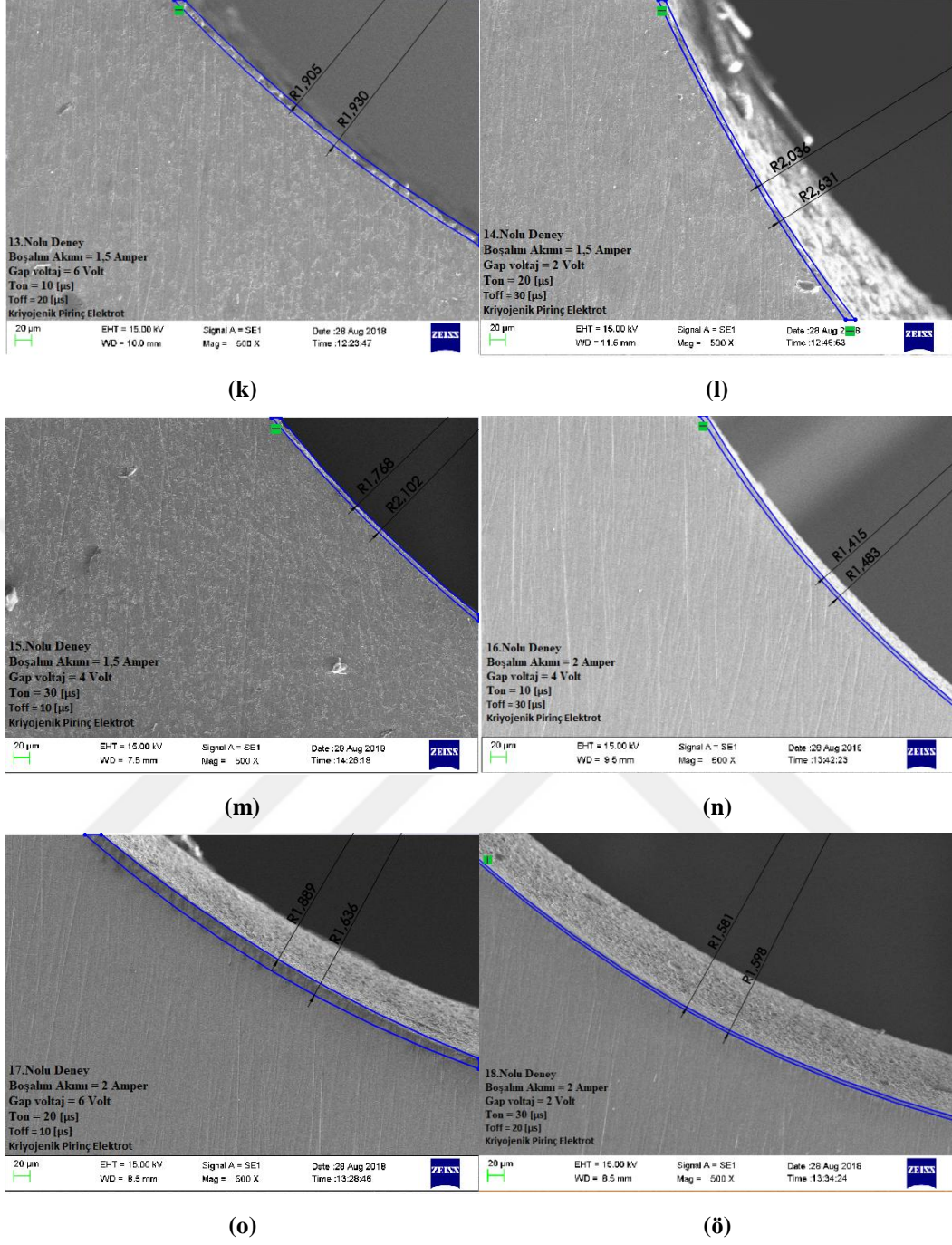
(i)



(i)



(j)



Şekil 6.17. YKTK görüntüleri a-h) pirinç elektrot ve i-ö) kriyojenik pirinç elektrot

6.2.3. Malzeme Kaldırma Oranı (MKO)

Tablo 6.4 'te bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrotlarla yapılan deneyler sonrasında elde edilen malzeme kaldırma oranı değerleri verilmiştir.

Tablo 6.4. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot işleme ile MKO değerleri

Deney No	EC	BA (A)	Ton (μ s)	Toff (μ s)	GV (V)	İKMM (gr)	t (dk)	MKO
1	BE	4	160	48	4	0,050	28,250	1,411
2	BE	4	200	60	5	0,030	46,866	1,421
3	BE	4	240	72	6	0,041	37,250	1,512
4	BE	5	160	48	5	0,060	38,416	2,312
5	BE	5	200	60	6	0,077	31,750	2,451
6	BE	5	240	72	4	0,037	35,333	1,315
7	BE	6	160	60	4	0,040	33,333	1,325
8	BE	6	200	72	5	0,057	34,583	1,98
9	BE	6	240	48	6	0,046	46,083	2,125
10	KBE	4	160	72	6	0,074	40,583	3,006
11	KBE	4	200	48	4	0,042	55,333	2,312
12	KBE	4	240	60	5	0,045	47,466	2,121
13	KBE	5	160	60	6	0,046	41,800	1,905
14	KBE	5	200	72	4	0,045	39,533	1,779
15	KBE	5	240	48	5	0,100	32,166	3,201
16	KBE	6	160	72	5	0,077	31,750	2,456
17	KBE	6	200	48	6	0,086	37,383	3,201
18	KBE	6	240	60	4	0,088	39,250	3,456

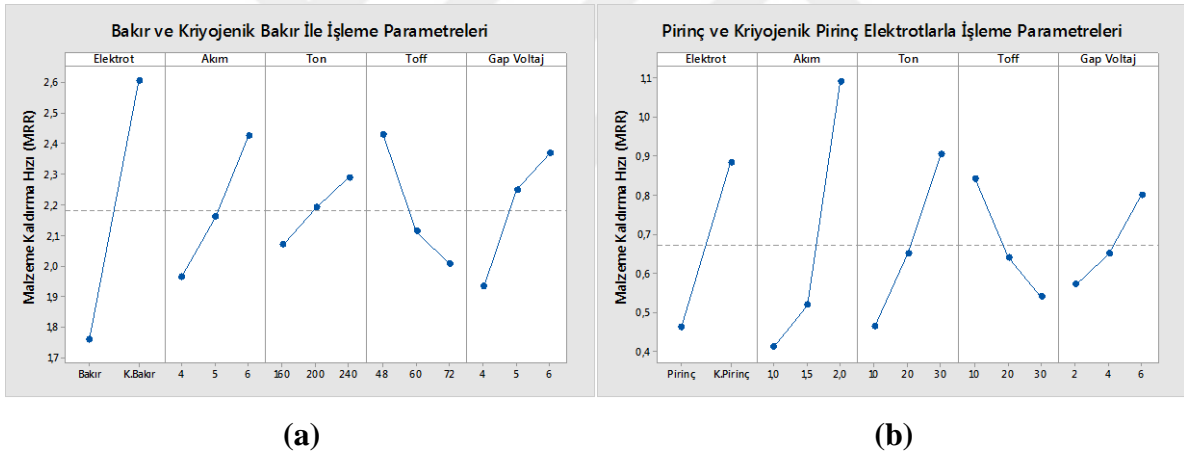
Tablo 6.5'te Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlarla yapılan deneyler sonrasında elde edilen malzeme kaldırma oranı değerleri verilmiştir.

Tablo 6.5. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot işleme ile MKO değerleri

Deney No	EC	BA (A)	Ton (μ s)	Toff (μ s)	GV (V)	İKMM (gr)	t (dk)	MKO
1	PE	1,0	10	10	2	0,007	24,066	0,173
2	PE	1,0	20	20	4	0,031	9,5680	0,292
3	PE	1,0	30	30	6	0,036	15,100	0,546
4	PE	1,5	10	10	4	0,038	10,400	0,390
5	PE	1,5	20	20	6	0,035	11,316	0,400
6	PE	1,5	30	30	2	0,072	12,900	0,925
7	PE	2,0	10	20	2	0,023	6,4660	0,146
8	PE	2,0	20	30	4	0,032	14,633	0,467
9	PE	2,0	30	10	6	0,112	21,333	2,398
10	KPE	1,0	10	30	6	0,014	20,083	0,284
11	KPE	1,0	20	10	2	0,029	17,150	0,496
12	KPE	1,0	30	20	4	0,036	18,750	0,680
13	KPE	1,5	10	20	6	0,022	24,916	0,540
14	KPE	1,5	20	30	2	0,022	30,416	0,679
15	KPE	1,5	30	10	4	0,029	28,033	0,805
16	KPE	2,0	10	30	4	0,080	14,000	1,115
17	KPE	2,0	20	10	6	0,096	16,400	1,578
18	KPE	2,0	30	20	2	0,137	13,000	1,786

Tablo 6.4 ve Tablo 6.5’de görüldüğü üzere bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrotla ile işlenen numunelerin malzeme kaldırma oranı değerleri çok açık bir şekilde pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlarla ile delinen parçaların malzeme kaldırma oranı değerlerinden yüksektir. Buradan, pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlar Elektro Ereyyon İşleme prosesinde malzeme kaldırma oranının bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrota oranla etkisinin az olduğu sonucuna varılabilir.

Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotların, bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrotlara göre elektrik iletkenlik değerinin düşük olması, malzeme kaldırma oranının da az olmasına neden olmaktadır. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotların elektrik iletkenliğinin düşük olması işlem süresinin uzamasına ve iş parçasından kaldırılan malzeme miktarının az olmasına neden olur. Formül 6.1’ deki denklemde görülebileceği gibi işlem süresini artışı iş parçasından kaldırılan malzeme miktarının az olmasına direkt olarak malzeme kaldırma oranı değerinin azalmasına sebep olur.



Şekil 6.18 Farklı işlem parametrelerinin MKO olan etki grafikleri **a)** bakır ve kriyojenik bakır elektrot **b)** pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot

Şekil 6.18’de Ti6Al4V alaşımının boşalım akımı, darbe aktif süresi, darbe boşluk süresi ve Gap Voltaj değerlerinin 4 farklı elektrotlarla işlenmesi sonucunda elde edilen malzeme kaldırma oranı değerleri gözükmemektedir. Farklı elektrotla yapılan deney numunelerinde boşalım akımının artmasıyla malzeme kaldırma oranı değeri belirli noktaya kadar artmakta, ideal akım değerinde doyuma ulaşmakta ve malzemede yüksek sıcaklık oluşumuyla birlikte nispeten malzeme kaldırma oranı değerindeki artış eğiliminde keskinlik azalmaya başlamaktadır. Bakır elektrot ile 5A boşalım akımında en yüksek 2,451 gr/dak ve en düşük 1,315 gr/dak Malzeme Kaldırma Oranı değerleri elde edilmiştir. Malzeme kaldırma

oranı değerini iyileştirmek için kriyojenik ısıl işleme tabi tutulan bakır elektrotlarla yapılan deneylerde ise 6A boşalım akımında en yüksek 3,456 gr/dak ve 5A en düşük 1,779 gr/dak malzeme kaldırma oranı değerleri elde edilmiştir. Pirinç elektrot ile 2A boşalım akımı, sonucunda en yüksek 2,398 gr/dak olarak 1A boşalım akımında ise en düşük 0,173 gr/dak malzeme kaldırma oranı değerleri elde edilmiştir. Malzeme kaldırma oranı değerini iyileştirmek için kriyojenik ısıl işleme tabi tutulan pirinç elektrotlarla yapılan deneylerde ise 2A boşalım akımında en yüksek 1,786 gr/dak ve en düşük değer ise 1A boşalım akımında 0,284 gr/dak malzeme kaldırma oranı değerleri elde edilmiştir. Deneyler sonucunda akım parametresi ise malzeme kaldırma oranı arasında doğru bir orantılı bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

Bakır ve kriyojenik bakır elektrotlarla 160 μ s, 200 μ s ve 240 μ s' lik darbe aktif olma srelerin de boşalım akımına paralel malzeme kaldırma oranı değerinin artığı görülmektedir. Malzeme kaldırma oranı değerlerinin keskinliğinin azaldığı, 200 μ s vuruş süresi için farklılık göstermesi, TiC parçacıklarının işlem bölgesinden kolay uzaklaştırılmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Grafikler incelendiğinde darbe boşluk süresi değerinde artış malzeme kaldırma oranı değerinde düşüşe neden olmuştur. Tablo 6.4 ve 6.5 'deki işlem sürelerinin darbe boşluk süresi değerinin artmasıyla paralellik göstermektedir. Darbe boşluk süresi, işlem anında iletkenlik özelliği kazanan sıvının yalıtkanlık özelliğini kazanması için geçen uygun süre olarak tanımlanabilir. Darbe boşluk süresi, değerinin uygun olması işleme sürecini stabil hale getirmeye olanak sağlar. Darbe boşluk süresi değerlerinin az olması istenmesine rağmen, elektriksel boşalmalarının çok olduğu durumlarda uygun değildir. Elektriksel boşalımların çok olduğu işlem anında kaldırılan talaş taneciklerinin çok olmakta ve çalışma alanından tam olarak uzaklaştırılmamaktadır. Ortamdan uzaklaştırılmayan TiC, işlem bölgesinde kararsız arklara neden olduğu düşünülmektedir.

Elektriksel boşalmanın artmasını aynı kapasitedeki voltaj değeri ile artışıyla sağlanmaktadır. Elektriksel boşalmanın artması aynı zamanda metalin üzerinden kaldırılan talaş miktarının artmasına sebep olur. Çünkü voltaj değerinin artmasıyla meydana gelen işleme alanındaki enerji miktarı artması paralelinde ark oluşumunu da arttırır. Oluşan kararlı arklar sayesinde çok fazla metalin kaldırılmasına, bunların işlem bölgesinden uzaklaştırılmasıyla işlem anında oluşan yeni talaşlar için yer açılmış olacaktır. İşleme voltajının artmasıyla, akım yoğunluğu da artmaktadır [29]. Faraday yasasına göre, malzeme kaldırma oranı akım yoğunluğu ile doğru orantılıdır.

6.2.4. Takım Aşınma Oranı (TAO)

Elektro Erezyon İşlemede, işlem esnasında çok yüksek sıcaklık değerine sahip olan kararlı arklar hem iş parçası hem de elektrottan talaş taneciklerinin koparak ayrılmasına neden olmaktadır. Elektro Erezyon İşlemede, işleme değişkenleri ve kullanılan elektrot malzemesinin cinsine oluşan bu olaya takım aşınması (elektrot aşınması) denir. Elektro Erezyon İşlemede amaç düşük elektrot aşınması, yüksek işleme performansı sağlamaktır.

Tablo 6.6 ' da bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrotlarla yapılan deneyler sonrasında elde edilen takım aşınma oranı değerleri verilmiştir.

Tablo 6.6. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot işleme ile TAO değerleri

Deney No	EC	BA (A)	Ton (μ s)	Toff (μ s)	GV (V)	EAM (gr)	t (dk)	TAO
1	BE	4	160	48	4	0,010	28,250	0,351
2	BE	4	200	60	5	0,020	46,866	0,425
3	BE	4	240	72	6	0,018	37,250	0,480
4	BE	5	160	48	5	0,015	38,416	0,394
5	BE	5	200	60	6	0,013	31,750	0,416
6	BE	5	240	72	4	0,014	35,333	0,392
7	BE	6	160	60	4	0,018	33,333	0,526
8	BE	6	200	72	5	0,017	34,583	0,506
9	BE	6	240	48	6	0,033	46,083	0,715
10	KBE	4	160	72	6	0,008	40,583	0,198
11	KBE	4	200	48	4	0,015	55,333	0,268
12	KBE	4	240	60	5	0,014	47,466	0,286
13	KBE	5	160	60	6	0,012	41,800	0,296
14	KBE	5	200	72	4	0,010	39,533	0,246
15	KBE	5	240	48	5	0,016	32,166	0,492
16	KBE	6	160	72	5	0,004	31,750	0,142
17	KBE	6	200	48	6	0,016	37,383	0,428
18	KBE	6	240	60	4	0,017	39,250	0,435

Tablo 6.7'de pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlarla yapılan deneyler sonrasında elde edilen takım aşınma oranı değerleri verilmiştir.

Tablo 6.7. Kriyojenik pirinç elektrot ve pirinç elektrot işleme ile TAO değerleri

Deney No	EC	BA (A)	Ton (μ s)	Toff (μ s)	GV (V)	EAM (gr)	t (dk)	TAO
1	KPE	1,0	10	10	2	0,138	24,066	5,741
2	KPE	1,0	20	20	4	0,042	9,568	4,388
3	KPE	1,0	30	30	6	0,104	15,100	6,897
4	KPE	1,5	10	10	4	0,057	10,400	5,457
5	KPE	1,5	20	20	6	0,073	11,316	6,453
6	KPE	1,5	30	30	2	0,080	12,900	6,200
7	KPE	2,0	10	20	2	0,027	6,466	4,124
8	KPE	2,0	20	30	4	0,116	14,633	7,947
9	KPE	2,0	30	10	6	0,173	21,333	8,124
10	PE	1,0	10	30	6	0,065	20,083	3,245
11	PE	1,0	20	10	2	0,152	17,150	8,846
12	PE	1,0	30	20	4	0,128	18,750	6,829
13	PE	1,5	10	20	6	0,236	24,916	9,458
14	PE	1,5	20	30	2	0,149	30,416	4,901
15	PE	1,5	30	10	4	0,228	28,033	8,147
16	PE	2,0	10	30	4	0,120	14,000	8,547
17	PE	2,0	20	10	6	0,168	16,400	10,241
18	PE	2,0	30	20	2	0,145	13,000	11,121

Tablo 6.6 ve 6.7’ de görüldüğü üzere bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrotla ile delinen parçaların takım aşınma oranı değerleri bariz bir şekilde pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlarla ile delinen parçaların takım aşınma oranı değerlerinden düşüktür. Buradan, pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlar Elektro Erezyon İşleme prosesinde istenilen sonuçları veremediği gözlemlenmiştir. Bakır elektrotun pirinç elektrota oranla yüksek olan ergime sıcaklığı(titanyum malzemesi için 1730 °C, bakır için 1083°C iken pirinç için 900 °C)gösterilebilir. Çünkü artan güç seviyesi yeni akım değerleriyle iş parçası-takım aralığında oluşan yüksek sıcaklıklar ergime sıcaklığı daha yüksek olan malzemede daha düşük aşınma meydana gelmesine sebep olduğu sonucuna varılabilir.

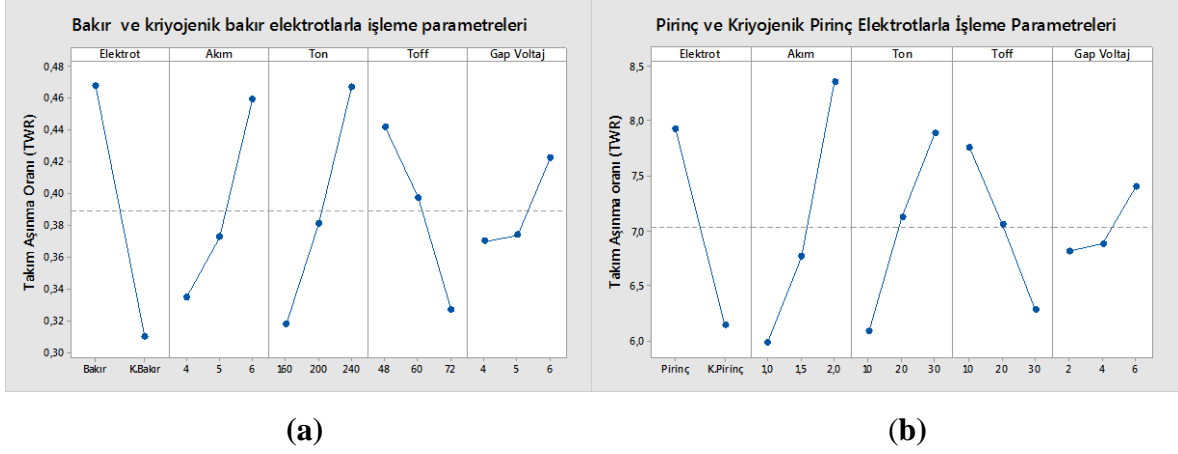
Tablo 6.6 ve 6.7 ’de elektrot aşınması ölçüm sonuçları toplu şekilde verilmiştir.Şekiller değerlendirildiğinde, akım parametresi ile elektrot aşınma miktarı arasında doğru bir orantının olduğu görülmektedir. Elektrot malzemelerin istenilen en önemli özellik iyi elektrik iletkenliği ve az aşınma gösterebilmesidir [30]. Elektrot aşınması, kullanılan elektrot malzemesinin cinsi ve uygulanan boşalımın enerji miktarına bağlıdır. Dolayısıyla, elektrot malzemesinin erime sıcaklığı ne kadar yüksek ise aşınma o oranda da azaltılmış olur. [31]

En fazla aşınmanın pirinç elektrotta, en az aşınmanın ise kriyojenik bakır elektrotta gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, işlenen Ti6Al4V yüzey karakteristiğinin de elektrot aşınmasına bir etkisi mevcuttur. Malzeme yüzeyinde oluşan TiC karbürleri, talaş kaldırma oranını ve elektrot aşınmasını önemli derecede azaltmaktadır. TiC karbürlerinin erime noktaları yaklaşık 3000 °C' ile 3150 °C' dir. Bu değer titanyumun erime noktasının yaklaşık iki katıdır. Dolayısıyla, talaş kaldırmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır [32].

Şekil 6.19' da darbe aktif sürenin, elektrot aşınma miktarına olan etkisi incelendiğinde bakır ve pirinç elektrot aşınma miktarı akımın etkisine benzer şekilde darbe aktif süresi ile artma eğilimindedir. Fakat pirinç elektrottaki aşınma miktarının çok fazla olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum elektrotların ergime sıcaklıkları ile ilişkilendirilebilir. Netice itibariyle kriyojenik bakır elektrotun talaş kaldırma oranının en yüksek olarak tespit edilmiş fakat mikro çatlak yoğunluğunda maksimum olduğu görülmektedir. Bu yüzden bu elektrotların sadece kaba işlemlerde kullanılması önerilebilir. Pirinç elektrotun yüzey kalitesi bakıra oranla daha iyi olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu elektrot finish işlemlerinde kullanılması tavsiye edilebilir.

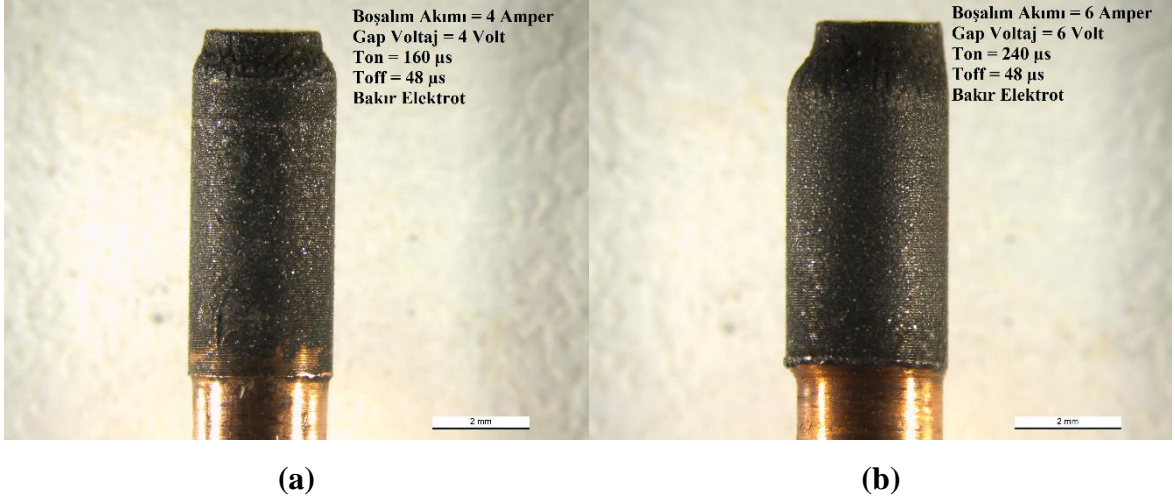
Grafikler incelendiğinde darbe boşluk süresi arttığı zaman takım aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Tablo 6.6 ve 6.7' deki işleme sürelerinin darbe boşluk süresi uzadığı zaman uzadığı görülmektedir. Buda 5.2 Formülünden yola çıkılarak takım aşınma oranını düşürdüğü tespit edilebilir.

Elektriksel boşalmanın artmasını, aynı kapasitedeki voltaj değerinin artışıyla sağlanmaktadır. Elektriksel boşalmanın artması aynı zamanda metalin üzerinden kaldırılan talaş miktarının artmasına sebep olur. Çünkü voltaj değerinin artmasıyla meydana gelen işleme alanındaki enerji miktarı artması paralelinde ark oluşumunu da artırır. Akım yoğunluğunu artışıyla oluşan kararlı arklar sayesinde çok fazla metalin kaldırılmasını, buda elektrot aşınma oranının artışına neden olduğu düşünülmektedir.

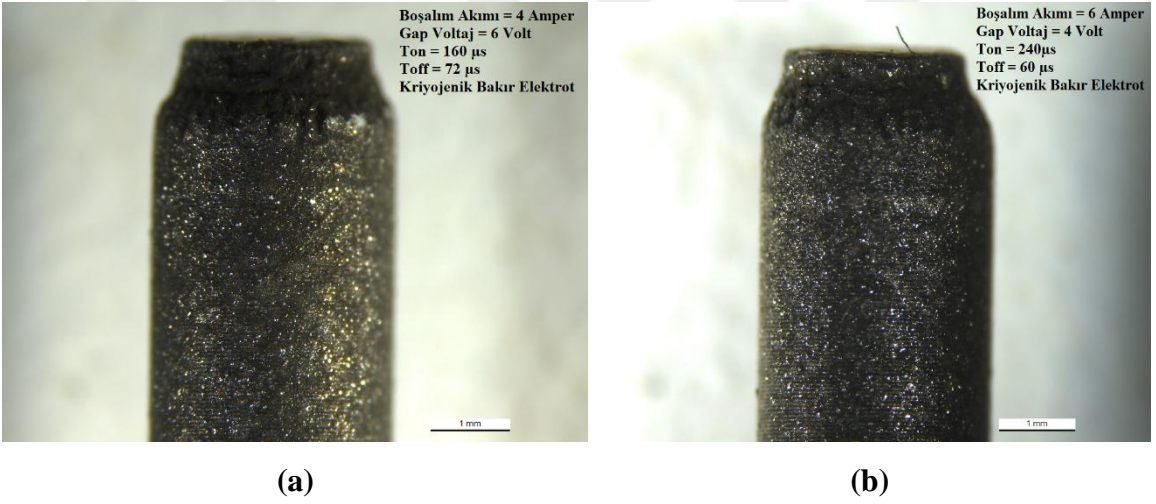


Şekil 6.19. Farklı işlem parametrelerinin TAO olan etki grafikleri **a)** bakır ve kriyojenik bakır elektrot **b)** pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot

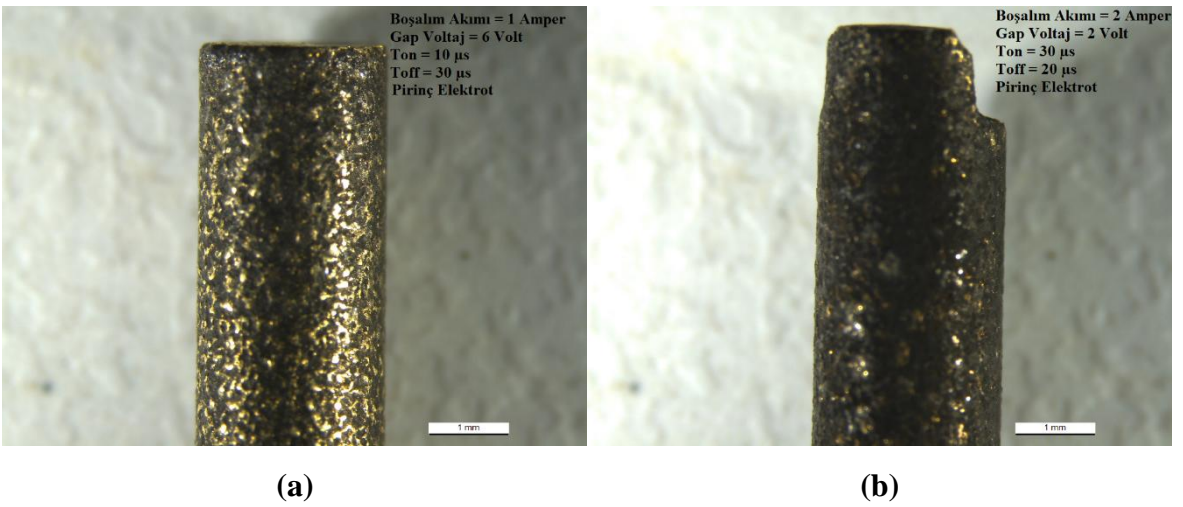
Deneyler neticesinde bakır elektrot ile 6A boşalım akımında en yüksek 0,715 gr/dak olarak 4A boşalım akımında ise en düşük 0,351 gr/dak takım aşınma oranı değerleri elde edilmiştir. (Şekil 6.20) Takım aşınma oranı değerini iyileştirmek için kriyojenik ısı işleme tabi tutulan bakır elektrotlarla yapılan deneyler sonucunda 5A boşalım akımında en yüksek 0,492 gr/dak olarak 4A boşalım akımında ise en düşük 0,198 gr/dak takım aşınma oranı değerleri elde edilmiştir. (Şekil 6.21) Pirinç elektrot ile 2A boşalım akımı, sonucunda en yüksek 11,121 gr/dak olarak, 1A boşalım akımında ise en düşük 3,245 gr/dak takım aşınma oranı değerleri elde edilmiştir. (Şekil 6.22) Takım aşınma oranı değerini iyileştirmek için kriyojenik ısı işleme tabi tutulan pirinç elektrotlarla yapılan deneyler sonucunda 2A boşalım akımı, sonucunda en yüksek 8,124 gr/dak olarak en düşük ise 1A boşalım akımında ise 4,124 gr/dak takım aşınma oranı değerleri elde edilmiştir. (Şekil 6.23)



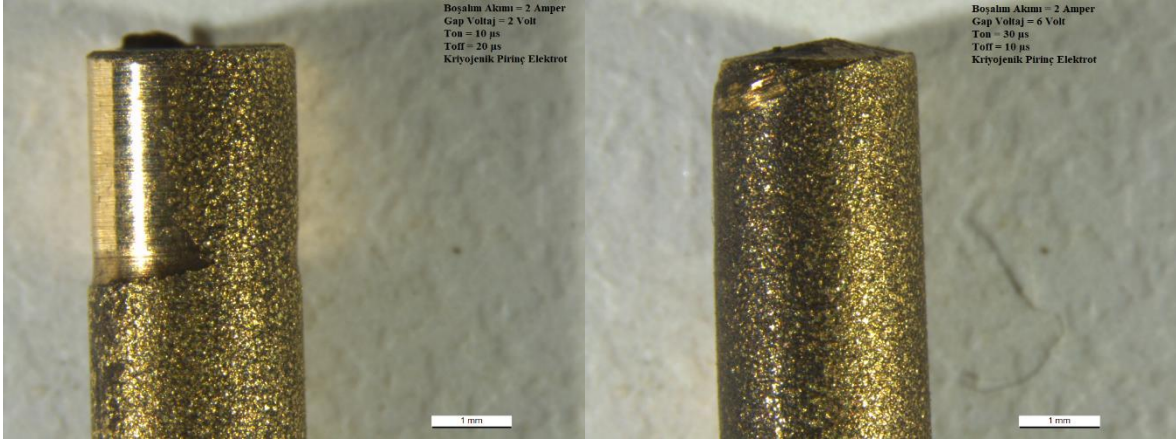
Şekil 6.20. Bakır elektrotlarda a)en düşük TAO b)en yüksek TAO



Şekil 6.21. Kriyojenik bakır elektrotlarda a)en düşük TAO b)en yüksek TAO



Şekil 6.22. Pirinç elektrotlarda a)en düşük TAO b)en yüksek TAO



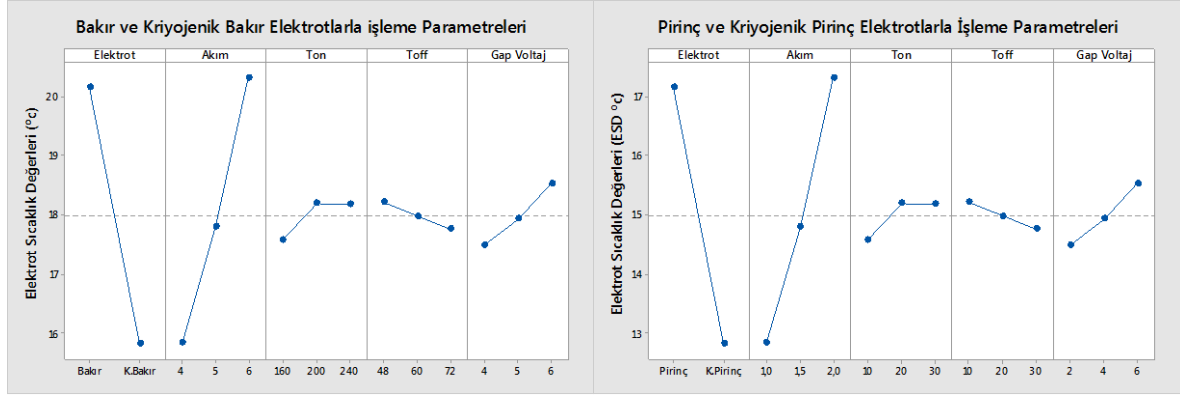
(a)

(b)

Şekil 6.23. Kriyojenik pirinç elektrotlarda a)en düşük TAO b)en yüksek TAO

6.2.5. Elektrotların Sıcaklık Değerlerinin Ölçülmesi

Tablo 6.8 ve 6.9 ' da görüldüğü üzere bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrotla ile delinen parçaların sıcaklık değerleri pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotlarla delinen parçaların sıcaklık değerlerinden nispeten yüksek olduğu görülmektedir. Bu değerlerin dielektrik sıvı olan Parafinol 5'in alevlenme sıcaklık değerinin altında olduğundan dolayı sıvının özelliğinin kaybetmediği ve dielektrik sıvının soğutma görevini yaptığı sonucuna varılabilir. Şekil 6.24 'te 4 farklı elektrotla yapılan deneyler sonucunda işleme parametrelerinden boşalım akımı, darbe aktif süresi ve gap voltajın değerlerindeki artışa paralel elektrot sıcaklık değerlerinin arttığı ve darbe boşluk süresinin uzamasıyla da elektrot sıcaklık değerlerinde düşüş görülmektedir. Elektrot sıcaklık değerlerinin artışında boşalım akım değerinin etkisinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Buda işleme esnasında akımın artmasıyla malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yeniden katılan tabaka kalınlığı değerlerindeki artışa paralellik göstermektedir. Boşalım akımına kıyasla diğer parametreler olan Ton, Toff ve gap voltaj değerlerinin etkisinin az olduğu sonucuna varılabilir.



(a)

(b)

Şekil 6.24. Farklı işlem parametrelerinin ESD'ye olan etki grafikleri **a)** bakır ve kriyojenik bakır elektrot **b)** pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot

Deneylet neticesinde bakır elektrot ile işleme parametreleri 6 Amper boşalım akımında en yüksek elektrot sıcaklık değeri 25,8 °C iken 4 Amper boşalım akımında ise en düşük 16,2 °C elektrot sıcaklık değeri elde edilmiştir. Kriyojenik ısıl işleme tabi tutulan bakır elektrotlarla yapılan deneylet sonucunda 6 Amper boşalım akımında en yüksek Elektrot Sıcaklık Değeri 17,1 °C iken 4 Amper boşalım akımında ise en düşük 14,3 °C elektrot sıcaklık değeri elde edilmiştir.

Tablo 6.8. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot sıcaklık değeri

Deney No	EC	BA (A)	Ton (µs)	Toff (µs)	GV (V)	ESD (°C)
1	BE	4	160	48	4	16,2
2	BE	4	200	60	5	17,6
3	BE	4	240	72	6	17,2
4	BE	5	160	48	5	19,3
5	BE	5	200	60	6	19,6
6	BE	5	240	72	4	18,4
7	BE	6	160	60	4	23,2
8	BE	6	200	72	5	24,1
9	BE	6	240	48	6	25,8
10	KBE	4	160	72	6	15,1
11	KBE	4	200	48	4	14,3
12	KBE	4	240	60	5	14,7
13	KBE	5	160	60	6	16,4
14	KBE	5	200	72	4	16,5
15	KBE	5	240	48	5	16,6
16	KBE	6	160	72	5	15,3
17	KBE	6	200	48	6	17,1
18	KBE	6	240	60	4	16,4

Tablo 6.9. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot sıcaklık değerleri

Deney No	EC	BA (A)	Ton (μ s)	Toff (μ s)	GV (V)	ESD ($^{\circ}$ C)
1	PE	1,0	10	10	2	13,2
2	PE	1,0	20	20	4	14,6
3	PE	1,0	30	30	6	14,2
4	PE	1,5	10	10	4	16,3
5	PE	1,5	20	20	6	16,6
6	PE	1,5	30	30	2	15,4
7	PE	2,0	10	20	2	20,2
8	PE	2,0	20	30	4	21,1
9	PE	2,0	30	10	6	22,8
10	KPE	1,0	10	30	6	12,1
11	KPE	1,0	20	10	2	11,3
12	KPE	1,0	30	20	4	11,7
13	KPE	1,5	10	20	6	13,4
14	KPE	1,5	20	30	2	13,5
15	KPE	1,5	30	10	4	13,6
16	KPE	2,0	10	30	4	12,3
17	KPE	2,0	20	10	6	14,1
18	KPE	2,0	30	20	2	13,4

Pirinç elektrot ile işleme parametreleri 2 Amper boşalım akımında en yüksek elektrot sıcaklık değeri 22,8 $^{\circ}$ C iken 1 Amper boşalım akımında ise en düşük 13,2 $^{\circ}$ C elektrot sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Kriyojenik pirinç elektrotlarla yapılan deneylerde ise 2 Amper boşalım akımı, sonucunda en yüksek elektrot sıcaklık değeri 14,1 $^{\circ}$ C iken en düşük ise 1 Amper boşalım akımında ise 11,3 $^{\circ}$ C elektrot sıcaklık değeri değerleri elde edilmiştir

6.2.6. Koniklik Miktarı Oranı (KMO)

Elektro Erezyon işlemede deliklerde oluşan konikleşme ile elektrot aşınma miktarı arasında doğru orantılı bir ilişki mevcut olup elektrot aşınmasına etki eden parametrelerin, aynı zamanda deliklerin konikleşme miktarına etki ettiği sonucuna varılmıştır.. Artan takım aşınma oranıyla elektrotlarda meydana gelen aşınma miktarlarına paralel olarak deliklerde oluşan koniklik değerleri de etkilenmektedir.

Ti6Al4V iş parçasına açılan deliklerin koniklik değerlerinin tespitinde ölçümleri yapılan ve delikler üzerinden alınan birkaç ölçüm sonucunda elde edilen ortalama en büyük delik çapı ile en küçük delik çapı arasındaki farkın delik boyunun iki katına bölünmesi ile elde edilen değer olarak hesaplanmıştır. Bu değer delik yüzeylerinin paralellik durumunu, yani deliklerin giriş ve çıkış arasında oluşan koniklik durumu hakkında bilgi sahibi olmamıza yardımcı olacaktır. Elektro Erezyon ile delik işlemede istenen ölçü ve yüzey

kalitesinin oluşması için delik işleme prosesinden elde edilen koniklik değeri, deliğinin ölçü tamlığının göstergesidir. Ti6Al4V iş parçasına açılan deliklerin geometrileri bilgisayar ortamında paket program yardımıyla aktarıldıktan sonra büyütülerek incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda genel olarak delik profillerinin düzgün yapıda olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda küçükten büyüğe doğru koniklik değerleri sırasıyla kriyojenik bakır elektrotlar, bakır elektrot, kriyojenik pirinç elektrot ve pirinç elektrot değerleri elde edilmiştir. Bu durum bakır elektrotun iletkenlik değerinin pirinç elektrotun elektriksel iletkenliğinden daha iyi olmasına dayandırılabilir.

Tablo 6.10. Bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrot ile oluşan KMO değerleri

Deney No	EC	C _{giriş} (mm)	C _{çıkış} (mm)	KMO
1	BE	3,172	3,094	0,3717
2	BE	3,054	2,962	0,4380
3	BE	3,145	3,005	0,6641
4	BE	3,227	3,101	0,5985
5	BE	3,285	3,130	0,7342
6	BE	3,236	3,100	0,6454
7	BE	3,226	3,111	0,5867
8	BE	3,235	3,043	0,9057
9	BE	3,247	3,052	0,9195
10	KBE	3,098	3,002	0,4570
11	KBE	3,222	3,112	0,5231
12	KBE	3,226	3,111	0,5467
13	KBE	3,205	3,088	0,5585
14	KBE	3,094	3,001	0,4404
15	KBE	3,256	3,066	0,8942
16	KBE	3,244	3,111	0,6313
17	KBE	3,261	3,090	0,8063
18	KBE	3,275	3,087	0,8896

Tablo 6.10’da elde edilen veriler ışığında bakır elektrotlar ile yapılan deneyler sonucunda en küçük ve en büyük koniklik miktarı oranı 1 no’lu deney (4 A boşalım akımı, 160 μ s Ton, 48 μ s Toff ve 4 V gap voltaj değerlerinde) 0,3717 ve en büyük 0,9195 koniklik miktarı oranı ise 9 no’lu deneyde (6 A boşalım akımı, 240 μ s Ton , 48 μ s Toff ve 6 V gap voltaj değerlerinde) elde edilmiştir. Kriyojenik bakır elektrotlar ile yapılan deneyler sonucunda en küçük ve en büyük koniklik miktarı oranı 10 no’lu deney (4 A boşalım akımı,

160 μ s Ton, 72 μ s Toff ve 6 V gap voltaj değerlerinde) 0,4570 ve en büyük 0,8896 koniklik miktarı oranı ise 18 no'lu deneyde (6 A boşalım akımı, 240 μ s Ton , 60 μ s Toff ve 4 V gap voltaj değerlerinde) elde edilmiştir.

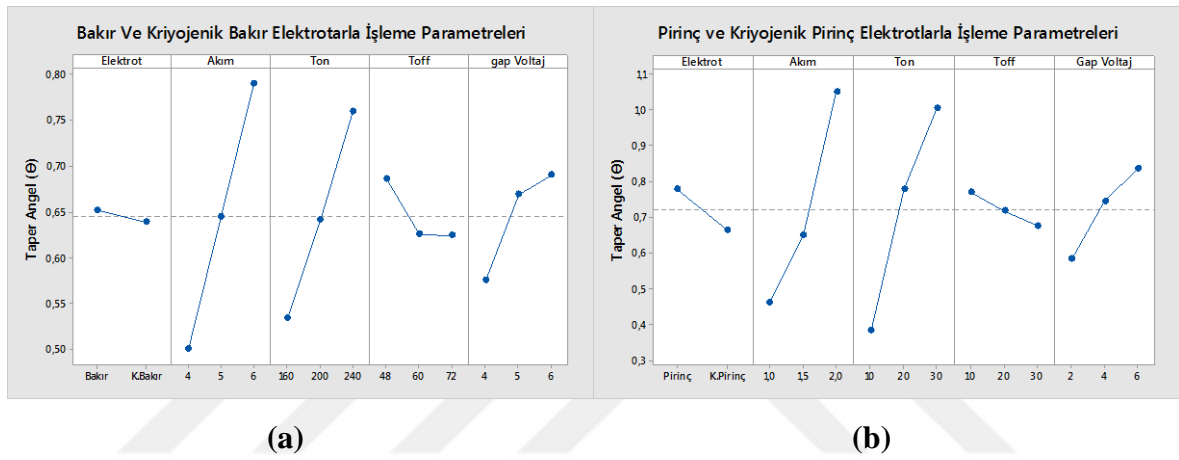
Tablo 6.11. Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrot ile oluşan KMO değerleri

Deney No	EC	C _{giriş} (mm)	C _{çıkış} (mm)	KMO
1	PE	2,823	2,732	0,4333
2	PE	2,862	2,728	0,6360
3	PE	2,893	2,747	0,6922
4	PE	2,794	2,754	0,1933
5	PE	2,938	2,708	1,0794
6	PE	2,917	2,748	0,7994
7	PE	2,817	2,750	0,3194
8	PE	3,018	2,732	1,3300
9	PE	3,060	2,734	1,5047
10	KPE	2,796	2,741	0,2647
11	KPE	2,804	2,747	0,2719
12	KPE	2,777	2,678	0,4712
13	KPE	2,824	2,740	0,4001
14	KPE	2,764	2,705	0,2814
15	KPE	2,941	2,696	1,1472
16	KPE	2,931	2,787	0,6852
17	KPE	2,965	2,739	1,0612
18	KPE	3,078	2,777	1,3960

Tablo 6.11'de elde edilen veriler ışığında pirinç elektrotlar ile yapılan deneyler sonucunda en küçük ve en büyük koniklik miktarı oranı 1 no'lu deney (1 A boşalım akımı, 10 μ s Ton, 10 μ s Toff ve 2 V gap voltaj değerlerinde) 0,4333 ve en büyük 1,5047 koniklik miktarı oranı ise 9 no'lu deneyde (2 A boşalım akımı, 30 μ s Ton, 18 μ s Toff ve 6 V gap voltaj değerlerinde) elde edilmiştir. Kriyojenik pirinç elektrotlar ile yapılan deneyler sonucunda en küçük ve en büyük koniklik miktarı oranı 10 no'lu deneyde (1 A boşalım akımı, 10 μ s Ton, 30 μ s Toff ve 6 V gap voltaj değerlerinde) 0,2647 ve en büyük 1,3960 koniklik miktarı oranı ise 18 no'lu deneyde (2 A boşalım akımı, 30 μ s Ton, 20 μ s Toff ve 2 V gap voltaj değerlerinde) elde edilmiştir.

Koniklik miktarı oranı küçük olması endüstriyel alanda elektro erozyon ile işlenmesi bakımından son derece önemlidir. Şekil 6.25'deki grafikler incelendiğinde farklı elektriksel

işleme parametreleri altında Ti6Al4V malzemesine bakır elektrotla açılan deliklerin koniklik miktarı oranı kriyojenik bakır elektrotla açılan deliklere göre biraz yüksek çıkmıştır. Bu durum, kriyojenik bakır elektrotla işleme hızına yani birim zamanda işlenen malzeme miktarına en fazla etki eden parametre olan işleme akımının, delik içinde derine inildikçe yanal duvarlardan daha fazla malzeme kopardığını göstergesi olarak kabul edilebilir. Dolayısı ile kriyojenik bakır elektrotun ısıl ve elektriksel iletkenliğinin bakır elektrot göre daha yüksek olması, koniklik miktarı oranının daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Aynı sonuçların pirinç ve kriyojenik pirinç elektrotlarla yapılan deneylerde elde edilmiştir.

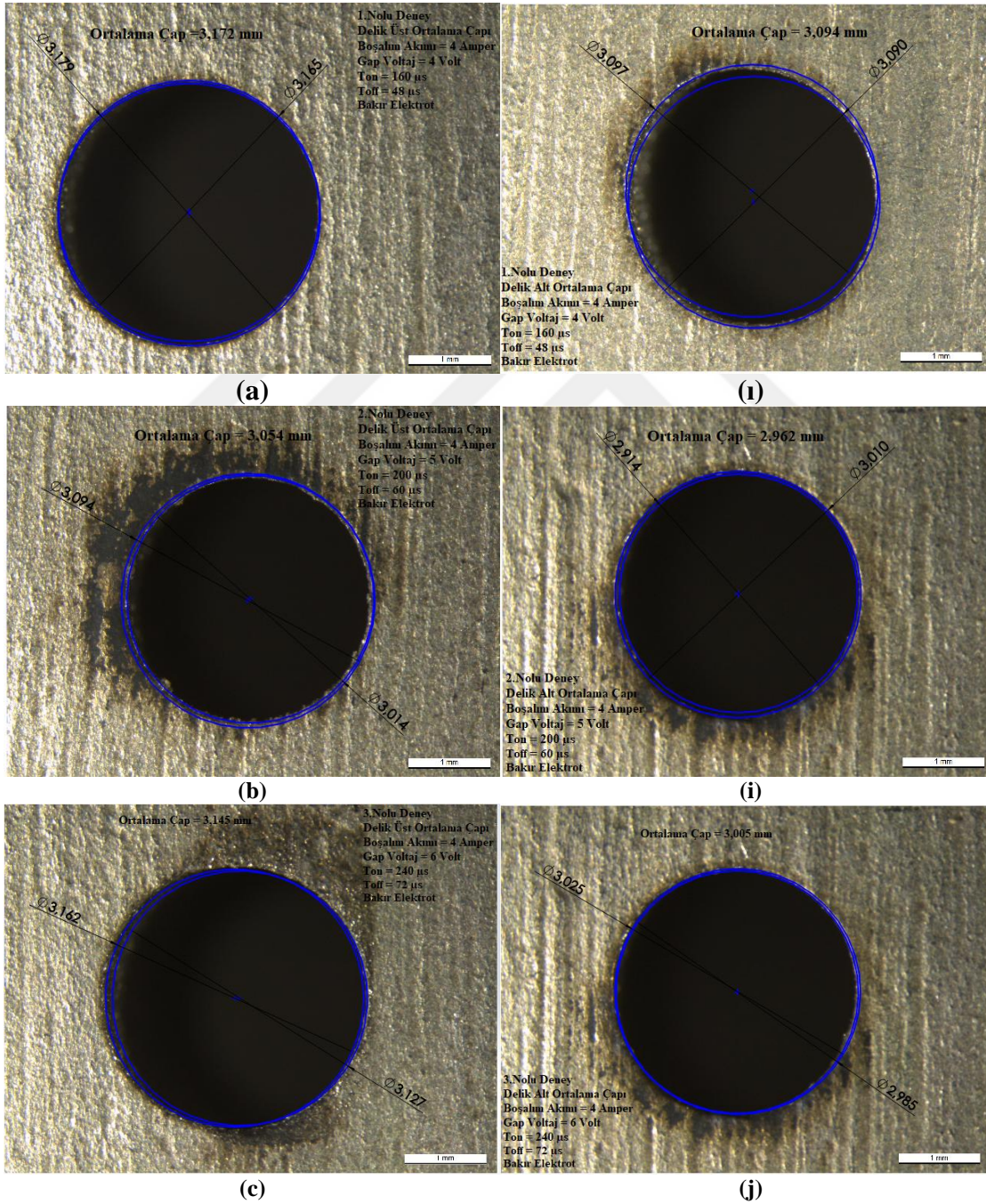


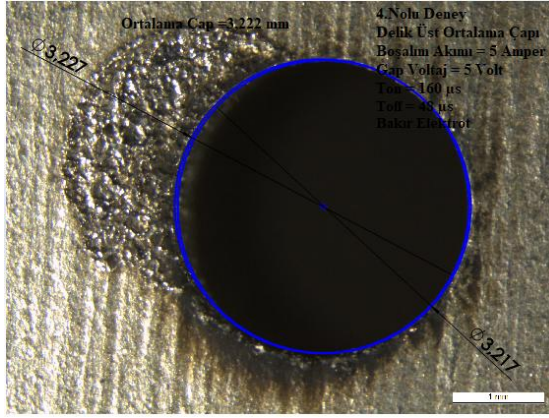
Şekil 6.25. Farklı işlem parametrelerinin KMO olan etki grafikleri **a)** bakır ve kriyojenik bakır elektrot **b)** pirinç ve kriyojenik pirinç elektrot

Şekil 6.25'deki grafikler incelendiğinde koniklik miktarı oranı, akım ve darbe aktif süresi değerlerine paralel artış gösterdiği görülmektedir. Uzun darbe aktif sürelerindeki kıvılcımın, boşalım ve ergitme etkisi daha yüksek olmaktadır ve dolayısı ile koniklik miktarı oranı da artmaktadır.

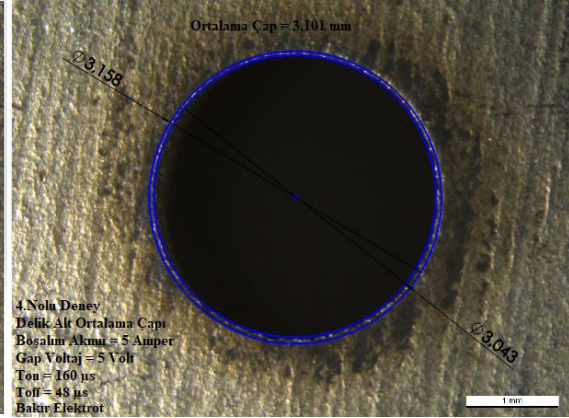
Boşalım akımının artması, elektrotun delik içerisinde birim zamanda oluşan kıvılcım sayısının artışına buda işlenecek olan malzeme miktarında artışla beraber delik çapının artmasına neden olmaktadır. Malzeme kaldırma oranı değerlerindeki artış ile koniklik değerlerindeki artışlar paralellik göstermiştir. Bu durum birim zamanda ne kadar çok malzeme kaldırıldığına da bir göstergesidir. Boşalım akımının artışı ile delik çapı genişlemiş fakat darbe aktif süresi, darbe boşluk süresi ve gap voltajın değişmesiyle fazla bir belirginlik göstermediği gözlemlenmiştir. Koniklik değerleri darbe aktif süresinin artması ile artış göstermiştir. Darbe aktif süresi, kıvılcımın iş parçasına temasıyla başlayıp parçadan ayrılması arasındaki süredir. Çok uzun aynı boşalım enerjisinin iş parçasına daha

uzun süre akması demektir. Bu da birim zamanda delik yanal yüzeylerine aynı akım değerinde daha uzun sürede kıvılcım çarpması ve işparçası yüzeyinden daha fazla malzeme kopartılması anlamına gelmektedir. Bu durumun sebebi; işleme bölgesinde darbe aktif süresinin artışı ile akım yoğunluğunun artması olarak düşünülmektedir. Şekil 6.26 ile 6.29'da gerçekleştirilen 36 adet deney sonucu oluşan delik çaplarının üst ve alt görünüşlerinin paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

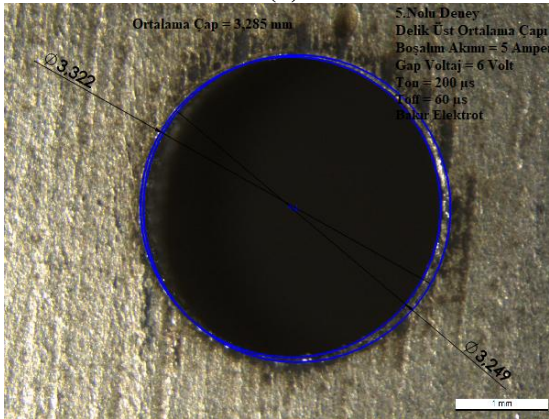




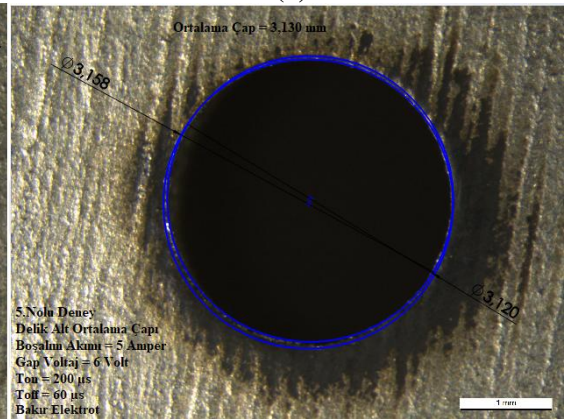
(d)



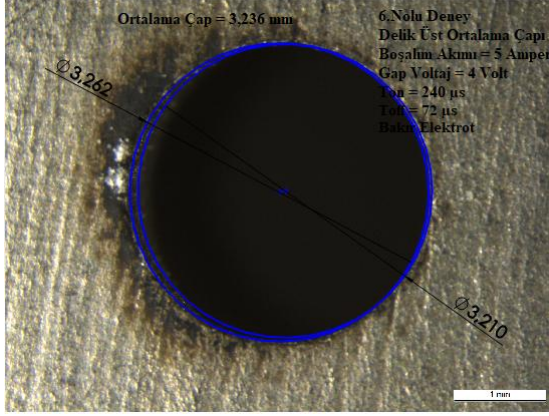
(k)



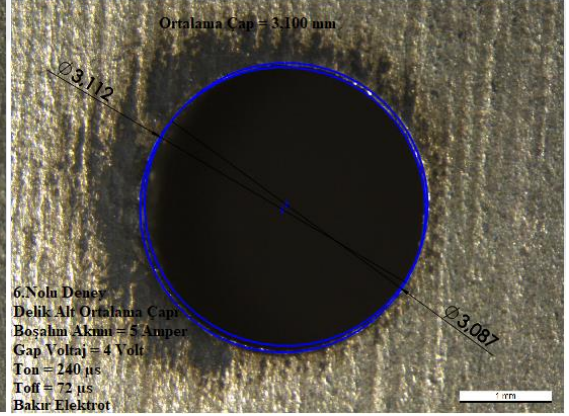
(e)



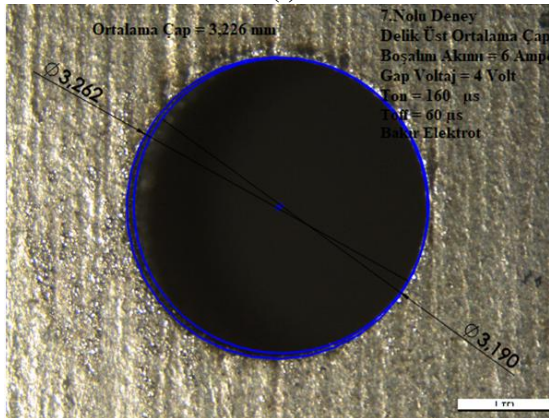
(l)



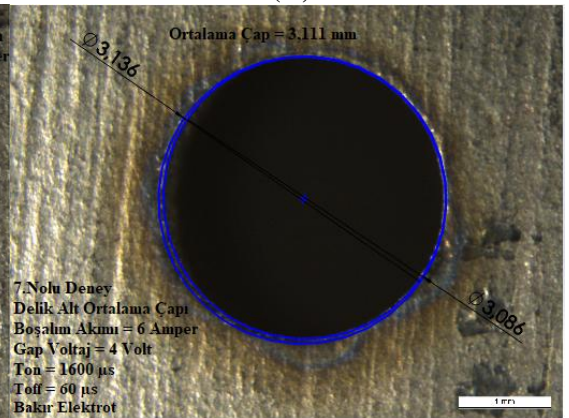
(f)



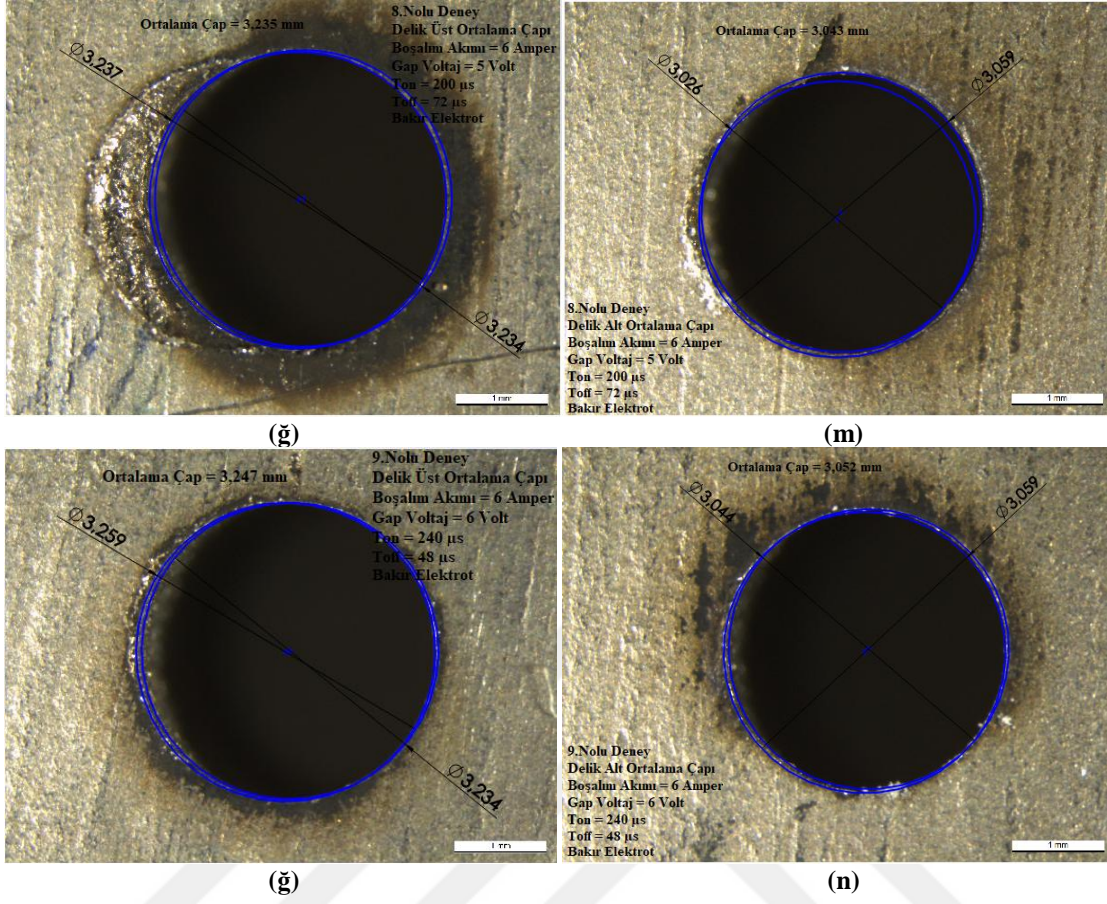
(m)



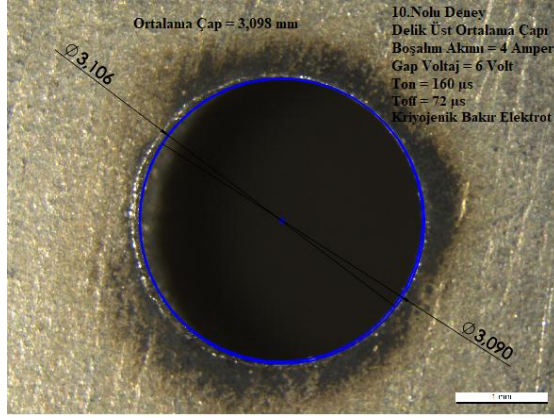
(g)



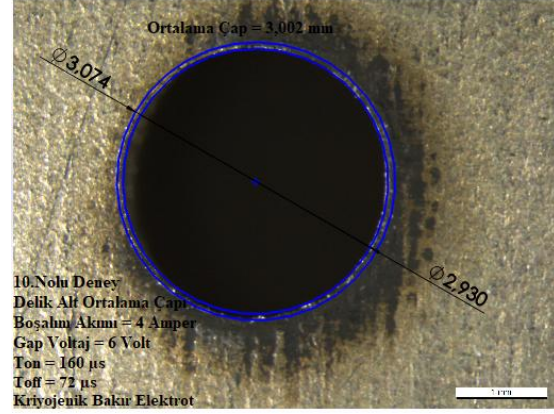
(i)



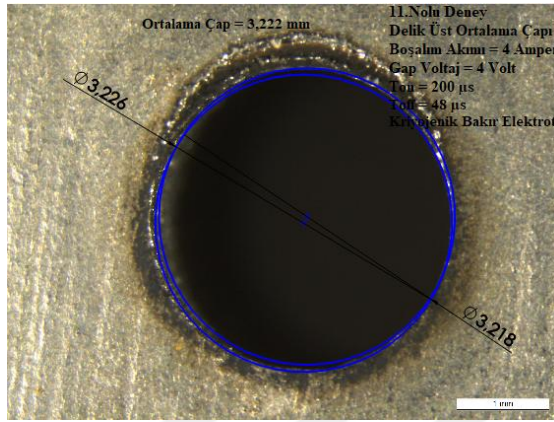
Şekil 6.26. Delik çaplarının paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri (bakır elektrot)
a-g) üst çap görüntüleri **h-n)** alt çap görüntüleri



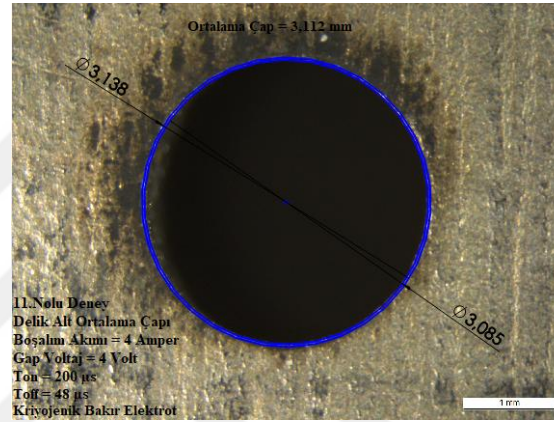
(a)



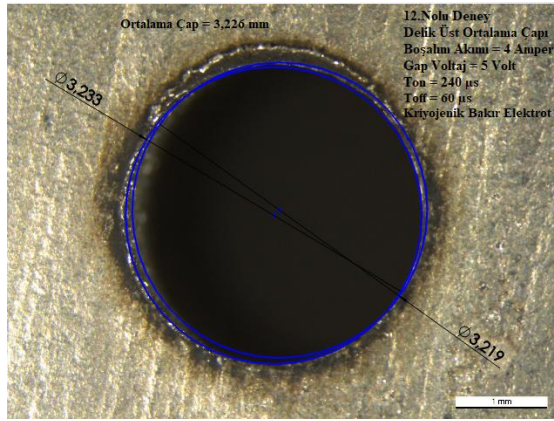
(i)



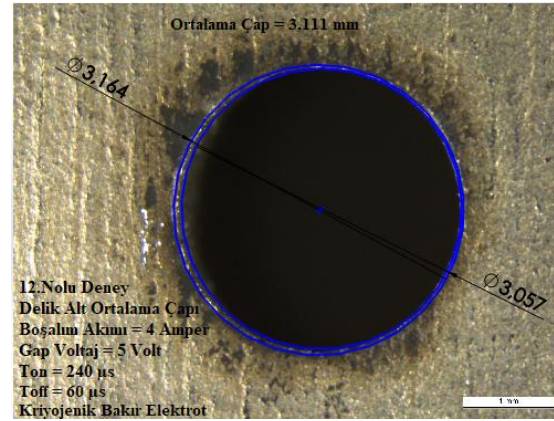
(b)



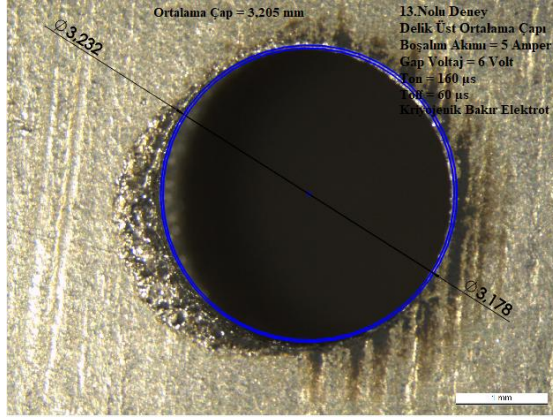
(i)



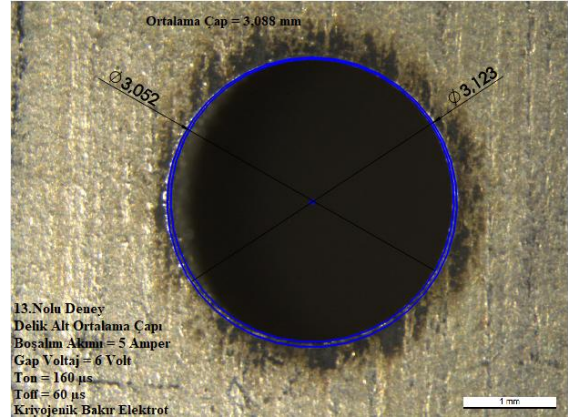
(c)



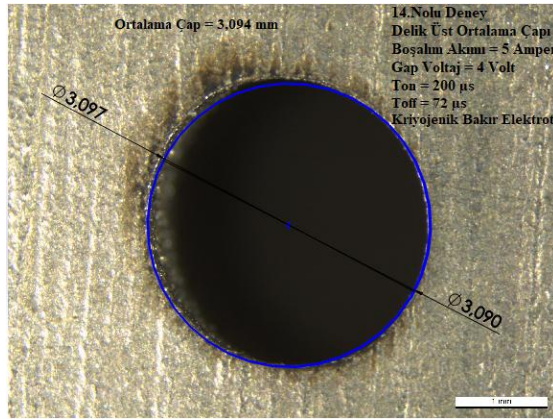
(j)



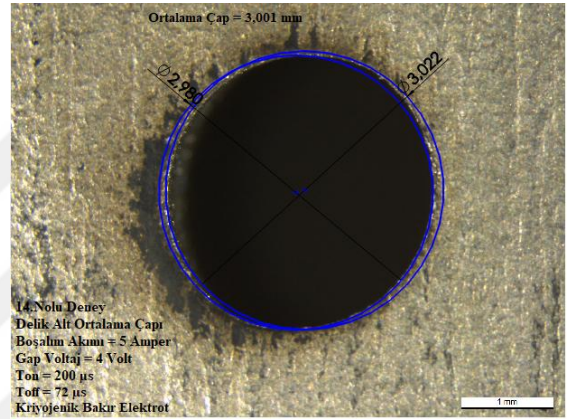
(d)



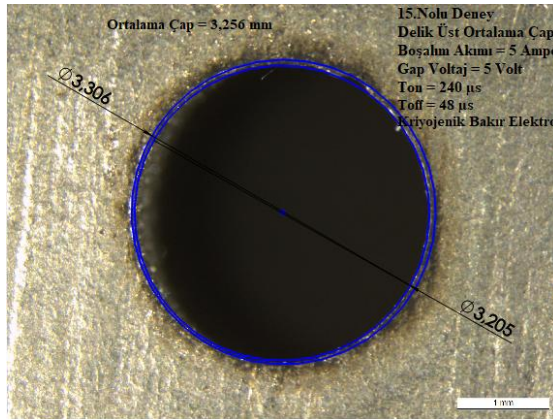
(k)



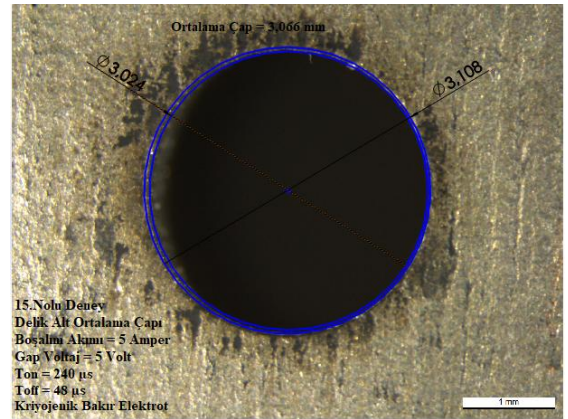
(e)



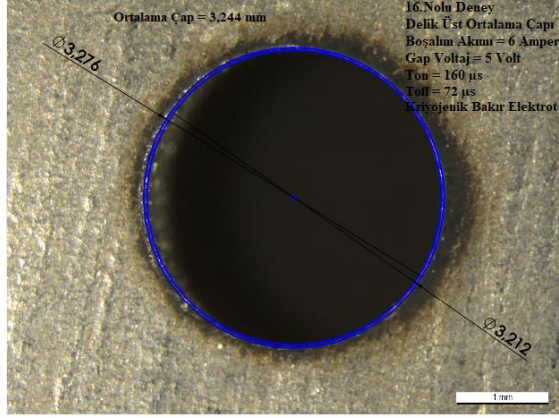
(l)



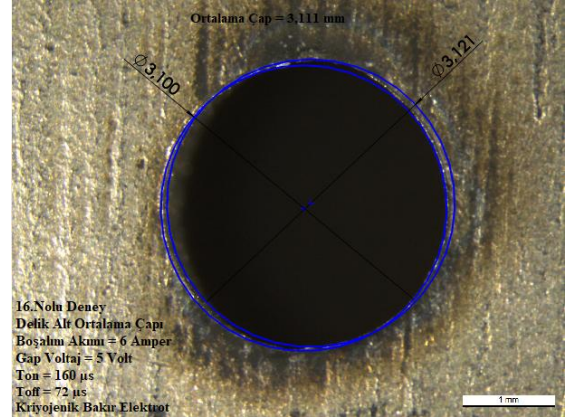
(f)



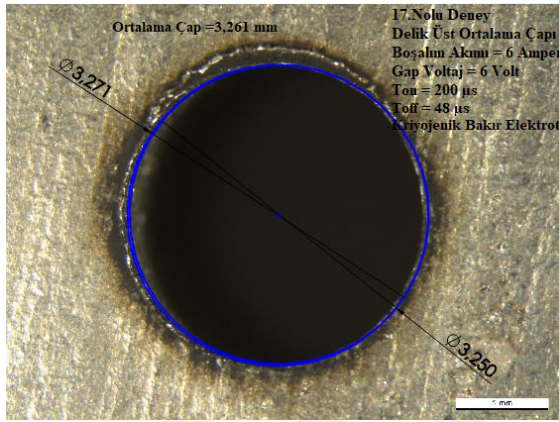
(m)



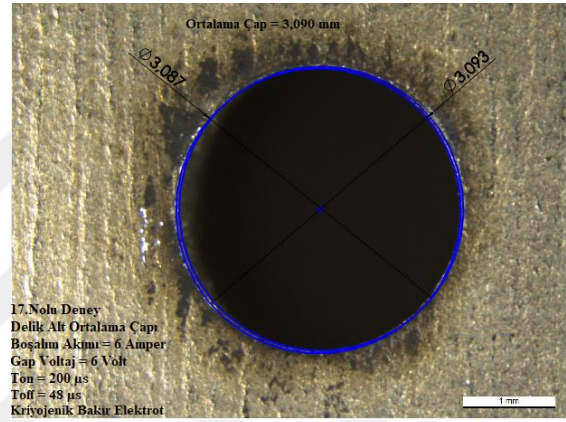
(g)



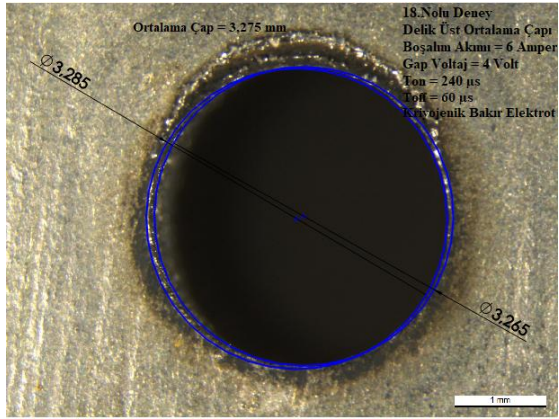
(n)



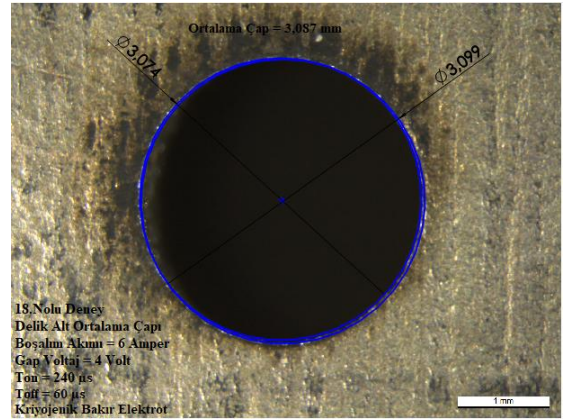
(ğ)



(o)

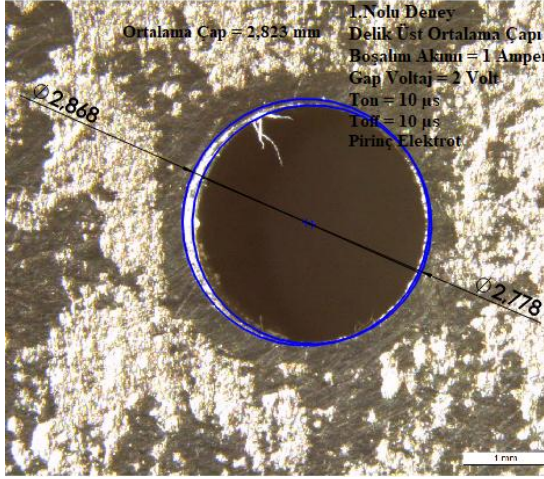


(h)

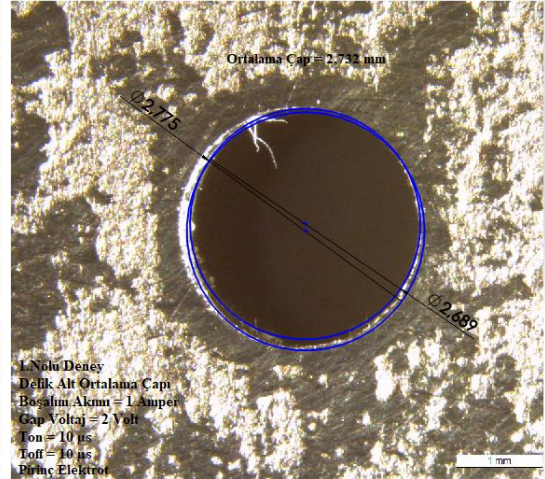


(ö)

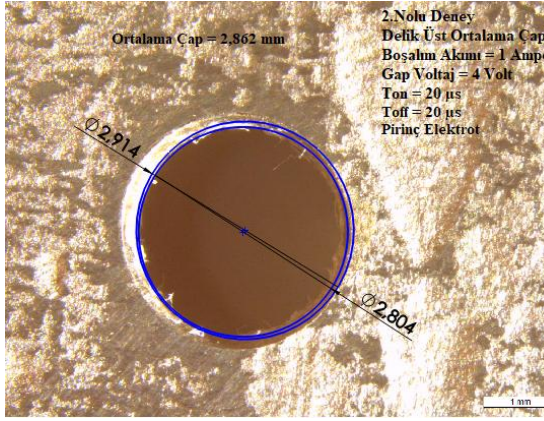
Şekil 6.27. Delik çaplarının paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri (kriyojenik bakır elektrot)
a-ğ üst çap görüntüleri h-n alt çap görüntüleri



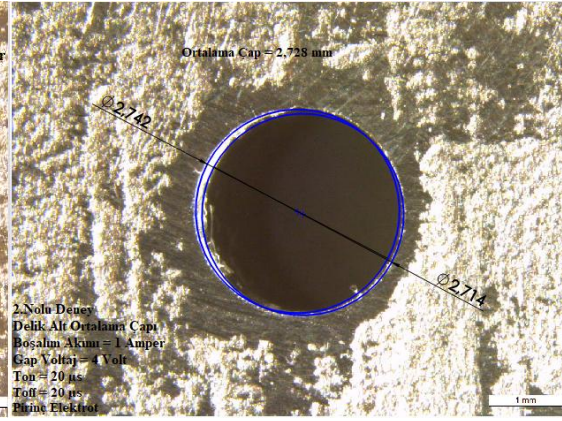
(a)



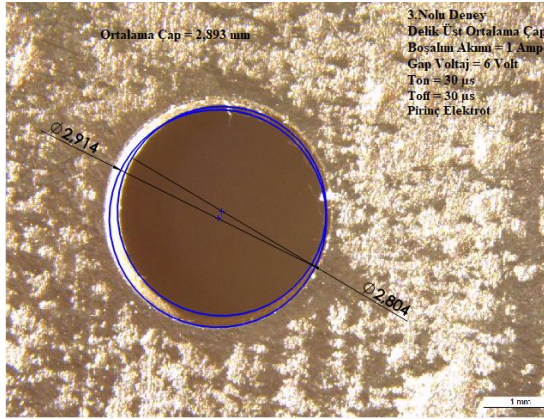
(i)



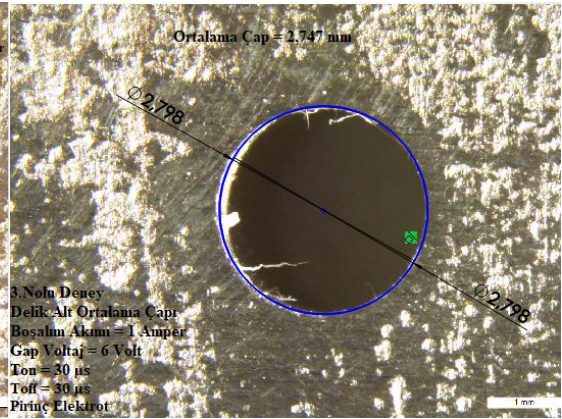
(b)



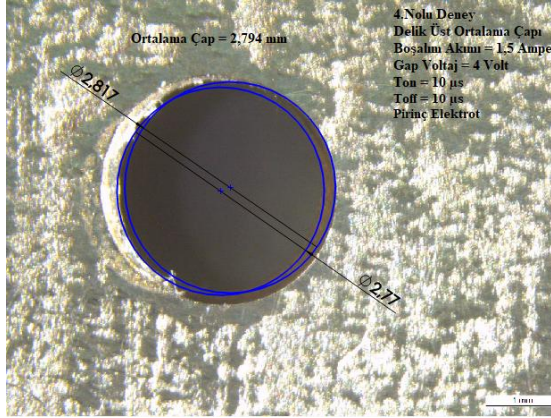
(i)



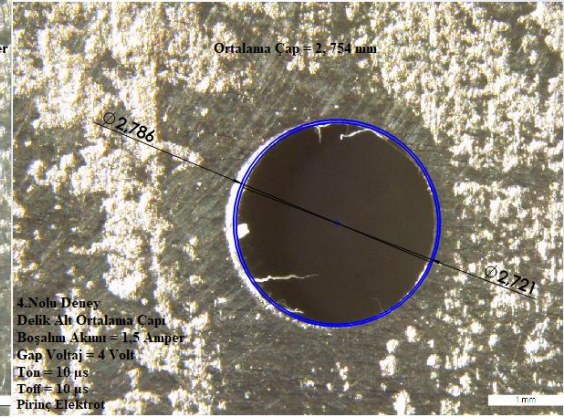
(c)



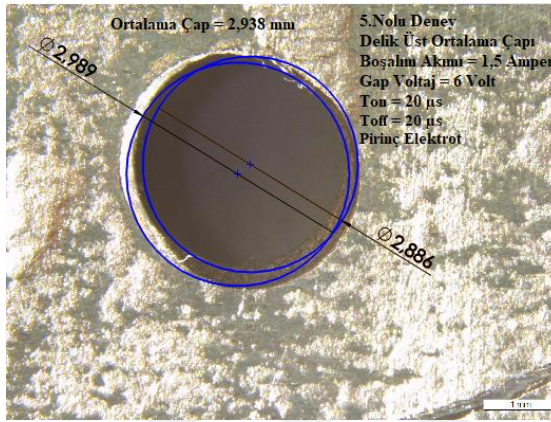
(j)



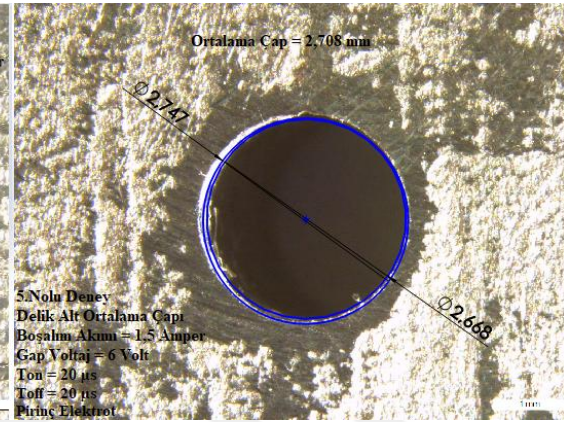
(d)



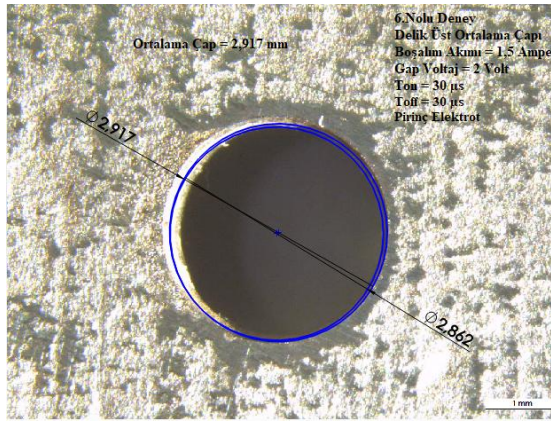
(k)



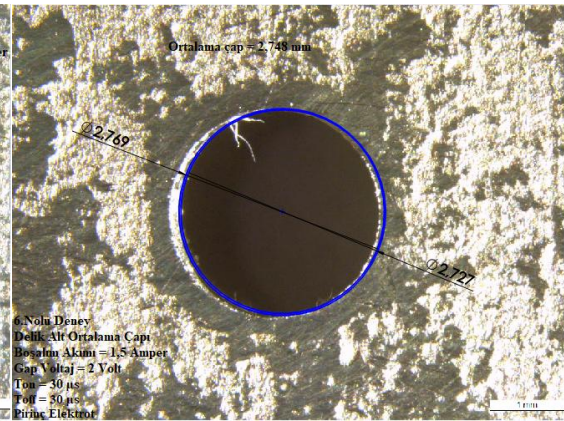
(e)



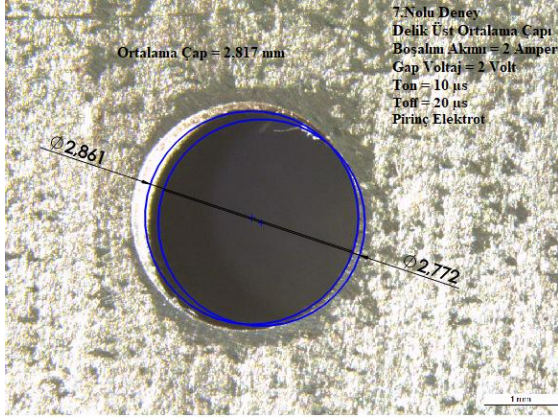
(l)



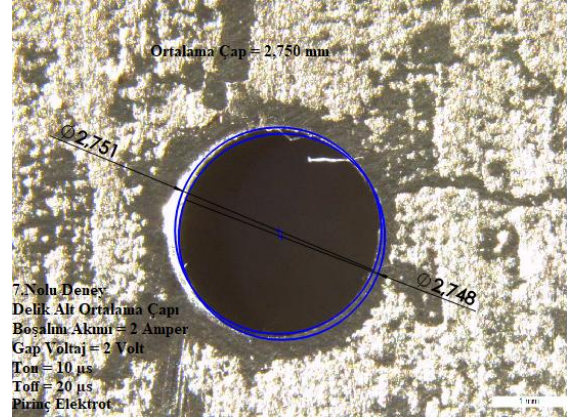
(f)



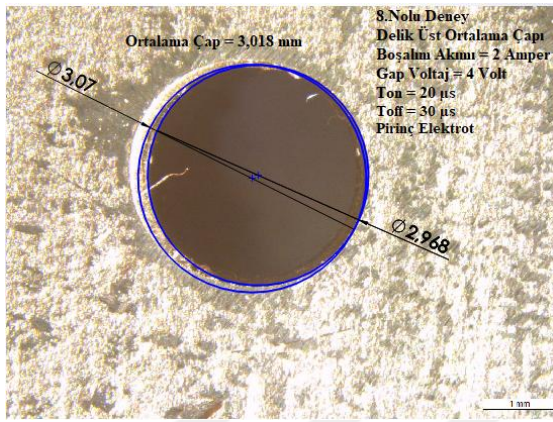
(m)



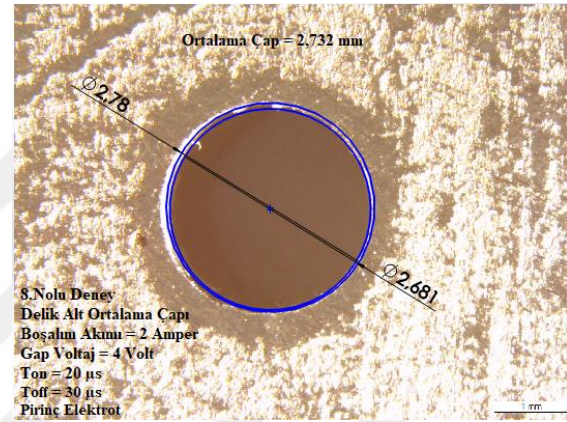
(g)



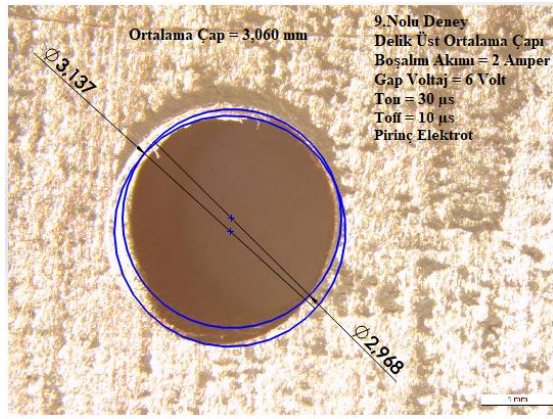
(n)



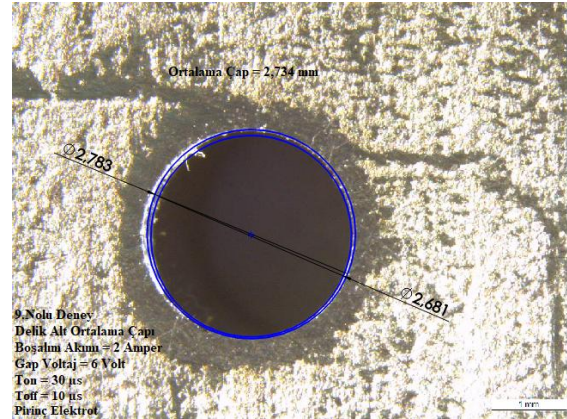
(ğ)



(o)

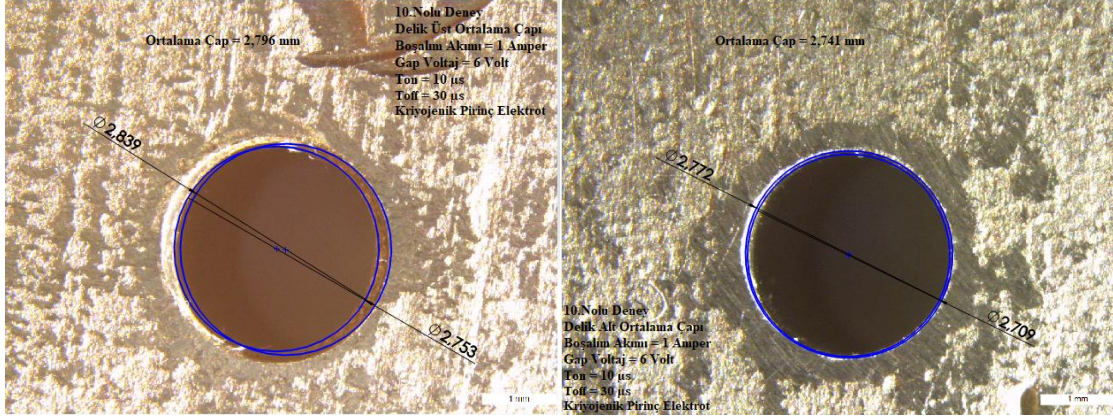


(h)



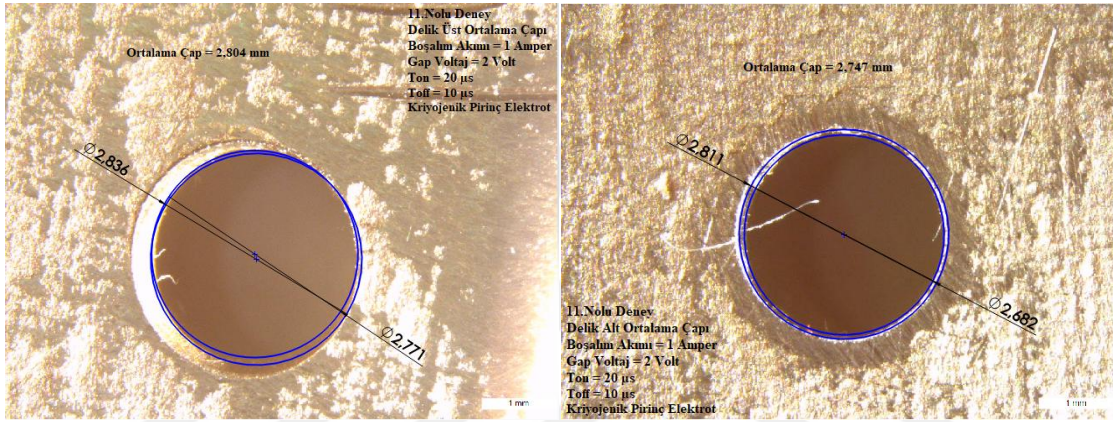
(ö)

Şekil 6.28. Delik çaplarının paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri (pirinç elektrot) **a-ğ** üst çap görüntüleri **h-n** alt çap görüntüleri



(a)

(i)



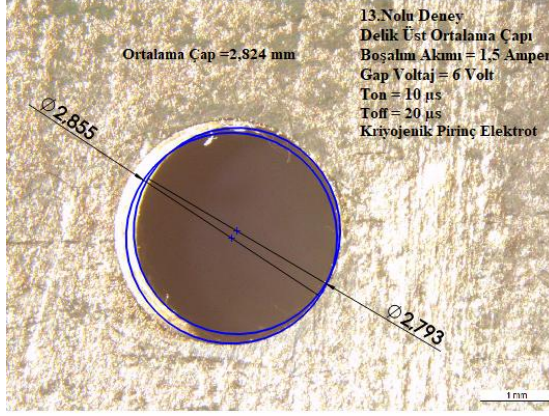
(b)

(i)

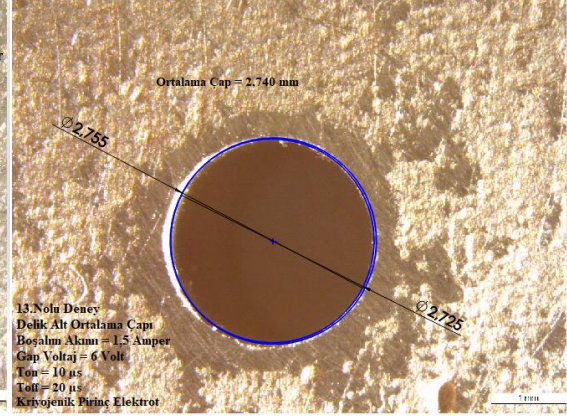


(c)

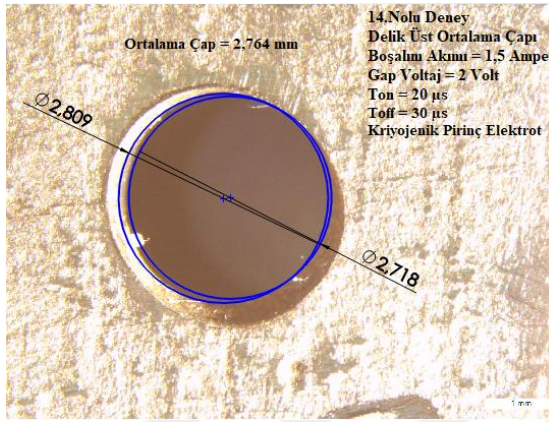
(j)



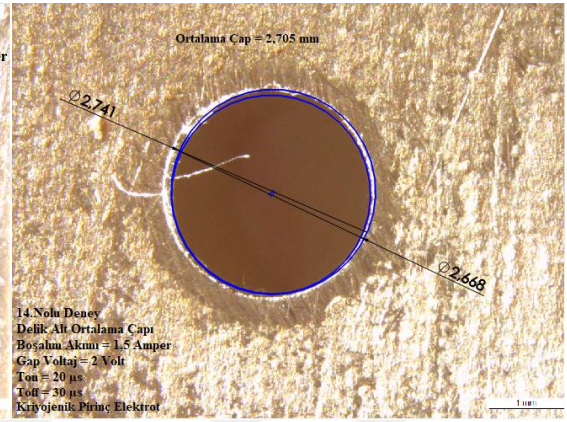
(d)



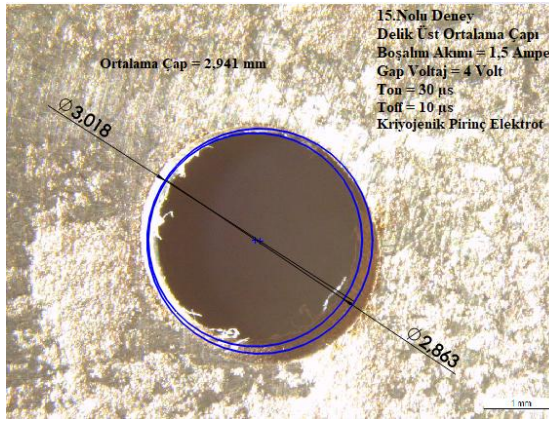
(k)



(e)



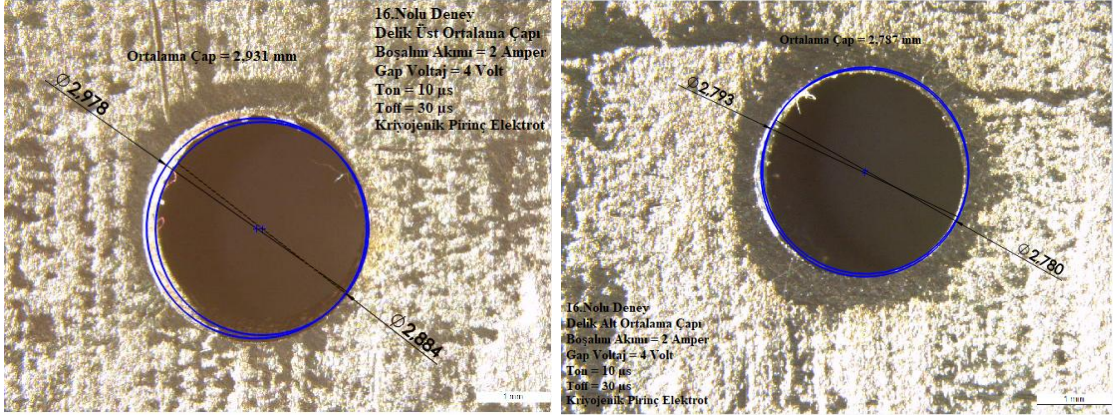
(l)



(f)

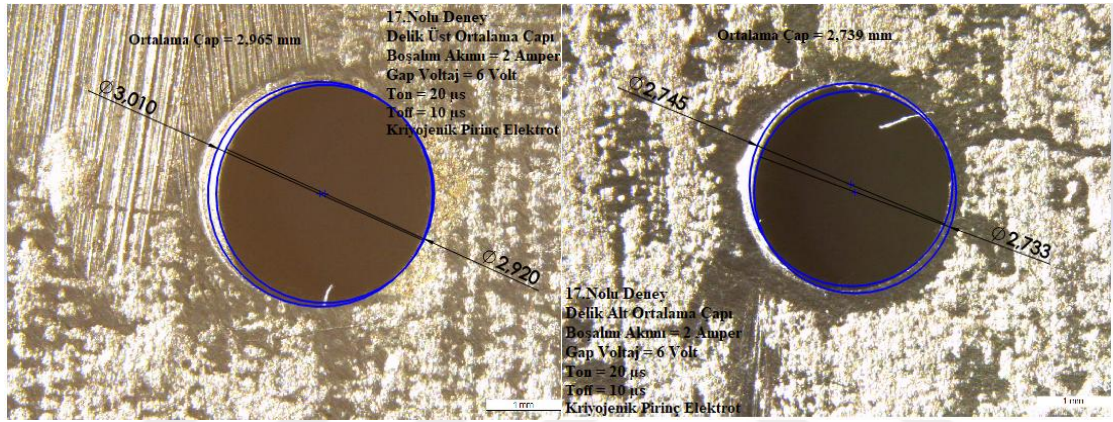


(m)



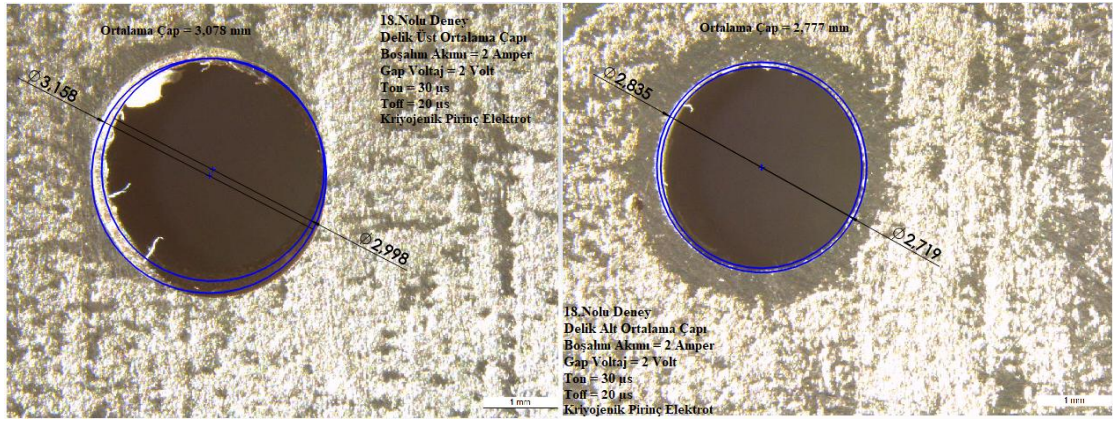
(g)

(n)



(ğ)

(o)



(h)

(ö)

Şekil 6.29. Delik çaplarının paket program yardımıyla ölçülen ortalama çap değerleri (kriyojenik pirinç elektrot) a-ğ üst çap görüntüleri h-n) alt çap görüntüleri

7. DENEY PARAMETRELERİNİN TOPSİS YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

7.1. Topsis Yöntemi

Yoon ve Hwang tarafından 1980 yılında ELECTRE yöntemi temel alınarak geliştirilmiş bir yöntemdir. ELECTRE analiz yöntemine göre daha kısa ve basit bir yöntemdir. TOPSİS analiz yöntemi istenilen ideal değerlere en yakın çözüm değerlerini temel alarak analiz ilkesine göre çalışır. TOPSİS analiz yöntemi ilk iki basamağı ELECTRE yöntemiyle aynı olan 6 basamaktan oluşan bir çözümleme sürecidir. Aşağıda TOPSİS analiz yönteminde kullanılan işlem basamakları sırayla anlatılmıştır.

1.Basamak: Karar Matrisinin (A) hazırlanması

Karar matrisi satırlarında üstünlüklerini dizilemeye karar verilen karar noktaları bulunurken, sütunlarda karar vermede kullanılan değerlendirme faktörleri vardır. Matris A, ilk olarak kullanıcı tarafından karar verilen birinci matristir. Karar matrisi aşağıdaki gibi gösterilir (Eşitlik 1).

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Burada m, karar sayısıdır ve n matriste değerlendirme faktörünün sayısıdır.

2.Basamak: Standart Karar Matrisinin (R) Oluşturulması

Standart Karar Matrisi, A matrisinin elemanlarından yararlanarak ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır. (Eşitlik 2)

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (7.2)$$

R matrisi aşağıdaki gibi elde edilir: (Eşitlik 3)

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

3.Basamak: Ağırlıklı Standart Karar Matrisinin (V) Oluşturulması

İlk olarak ağırlık değerleri W_i belirlenir ($\sum_{i=1}^n w_i=1$). (Eşitlik 4)

Daha sonra R matrisinin her bir sütunundaki elemanlar ilgili W_i değeri ile çarpılarak V matrisi oluşturulur. V matrisi aşağıda gösterilmiştir: (Eşitlik 5)

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

4.Basamak: İdeal pozitif (A^+) ve ideal negatif (A^-) Çözümlerin Oluşturulması

TOPSIS yöntemi, her bir değerlendirme çarpanının tekdüze artan veya azalan bir yatkinlık ilkesine dayandığı varsayılmaktadır. İdeal çözümlerin oluşması için V matrisindeki ağırlıklandırılmış değerlendirme faktörlerinin kullanıcı tarafından en büyükleri seçilir. İdeal set çözümle de aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır. (Eşitlik 6)

$$A^+ = \left\{ \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J \right) \right\} \quad (7.6)$$

eşitliğinden hesaplanacak pozitif değerler set $A^+ = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\}$ şeklinde gösterilebilir.

Negatif ideal set değerler ise, T matrisindeki ağırlıklandırılmış değerlendirme faktörlerinin en küçükleri seçilerek oluşturulur. Negatif ideal set çözümle aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir. (Eşitlik 7)

$$A^- = \left\{ \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\} \quad (7.7)$$

Eşitliğinden hesaplanacak negatif değerler set $A^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\}$ şeklinde gösterilebilir. Eşitliklerdeki J fayda (maksimum), J' ise kayıp (minimum) değerini göstermektedir.

Gerek ideal pozitif gerekse negatif ideal çözümlerinde, değerlendirme faktörü sayısı yani m elemandan oluşmaktadır.

5.Basamak: Ayırım Ölçülerinin Hesaplanması

TOPSIS analizinin her bir karar noktasına ilişkin değerlendirme faktör değerinin İdeal ve negatif ideal çözüm setinden sapmalarının bulunabilmesi için Euclidian Uzaklık Yaklaşımından yararlanılmaktadır. Buradan elde edilen karar noktalarına ilişkin sapma değerleri ise İdeal Ayırım (S_i^+) ve Negatif İdeal Ayırım (S_i^-) Ölçüsü olarak adlandırılmaktadır. İdeal ayırım (S_i^+) ölçüsünün hesaplanması (Eşitlik 7.8), negatif ideal ayırım (S_i^-) ölçüsünün hesaplanması ise (7.9) eşitliğinde ifade edilmektedir.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (7.8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (7.9)$$

Burada hesaplanacak (S_i^+) ve (S_i^-) sayısı doğal olarak karar noktası sayısı kadar olacaktır.

6.Basamak: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması

Her bir karar noktasının ideal çözüme göreli yakınlığının (C_i^+) hesaplanmasında ideal ve negatif ideal ayırım ölçülerinden yararlanılır. Burada kullanılan ölçüt, negatif ideal ayırım ölçüsünün toplam ayırım ölçüsü içindeki payıdır. İdeal çözüme göreli yakınlık değerinin hesaplanması aşağıdaki eşitlikte ifade edilmiştir.(Eşitlik 7.10)

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (7.10)$$

Burada C_i^+ değeri $0 \leq C_i^+ \leq 1$ aralığında değer alır ve $C_i^+ = 1$ ilgili karar noktasının ideal çözüme, $C_i^+ = 0$ ilgili karar noktasının negatif ideal çözüme mutlak yakınlığını gösterir.

7.2. EEİ İşleme Deneylerinin TOPSIS Analizi

EEİ ile işleme deneylerinde Tablo 7.1'de verilen işleme parametreleri ve seviye değerleri kullanılmıştır. Deneyler neticesinde, elde edilen ölçümlerden elde edilen, yeniden

katılaşan tabaka kalınlığı, malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve koniklik miktarı oranı Tablo 7.2’de de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 7.1. EEİ ile işleme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	İşlem parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Boşalım Akımı(A)	4	5	6
B	Darbenin Aktif Olduğu süre (Ton) [μ s]	160	200	240
C	Darbe Boşluk Süresi (Toff) [μ s]	48	60	72
D	Gap Voltaj (Volt)	4	5	6

Tablo 7.2. EEİ ile işlemede deney dizisi ve deney sonuçları

Deney No	A	B	C	D	YKTK	MKO	TAO	KMO
1	4	160	48	4	0,362	1,411	0,351	0,3717
2	4	200	60	5	0,049	1,421	0,425	0,4380
3	4	240	72	6	0,256	1,512	0,480	0,6641
4	5	160	48	5	0,989	2,312	0,394	0,5985
5	5	200	60	6	1,124	2,451	0,416	0,7342
6	5	240	72	4	0,667	1,315	0,392	0,6454
7	6	160	60	4	0,649	1,325	0,526	0,5867
8	6	200	72	5	1,058	1,98	0,506	0,9057
9	6	240	48	6	1,783	2,125	0,715	0,9195
10	4	160	72	6	0,184	3,006	0,198	0,4570
11	4	200	48	4	0,184	2,312	0,268	0,5231
12	4	240	60	5	0,622	2,121	0,286	0,5467
13	5	160	60	6	0,603	1,905	0,296	0,5585
14	5	200	72	4	0,521	1,779	0,246	0,4404
15	5	240	48	5	1,018	3,201	0,492	0,8942
16	6	160	72	5	0,717	2,456	0,142	0,6313
17	6	200	48	6	1,389	3,201	0,428	0,8063
18	6	240	60	4	0,476	3,456	0,435	0,8896

EEİ ile işleme deneyleri sonrasında işleme kalitesinin belirlenmesinde göz önünde tutulan, yeniden katılaşan tabaka kalınlığı, takım aşınma oranı ve koniklik miktarı oranı minimum olması ve malzeme kaldırma oranının ise maksimum olması işleme kalitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Böylece TOPSİS yöntemine göre referans serisi oluşturulurken hem maksimum hem de minimum değerler göz önüne alınır. Yeniden katılaşan tabaka kalınlığı, takım aşınma oranı ve koniklik miktarı oranı için normalizasyon

işlemi için “daha düşük daha iyi” şeklinde değerlendirilirken malzeme kaldırma oranı işlemi için ise “daha yüksek daha iyi” değerlendirmesi yapılmıştır. İlk olarak ELECTRE yöntemiyle aynı olan ilk iki basamağın karar matrisinin (A) Oluşturulmasında kullanılan değerler Tablo 7.3’te verilmiştir.

Tablo 7.3. EEİ ile işleme için karar matris (A) oluşumunda kullanılan deney sonuçları

Deney No	YKTK	MKO	TAO	KMO
1	0,362	1,411	0,351	0,3717
2	0,049	1,421	0,425	0,4380
3	0,256	1,512	0,480	0,6641
4	0,989	2,312	0,394	0,5985
5	1,124	2,451	0,416	0,7342
6	0,667	1,315	0,392	0,6454
7	0,649	1,325	0,526	0,5867
8	1,058	1,98	0,506	0,9057
9	1,783	2,125	0,715	0,9195
10	0,184	3,006	0,198	0,4570
11	0,184	2,312	0,268	0,5231
12	0,622	2,121	0,286	0,5467
13	0,603	1,905	0,296	0,5585
14	0,521	1,779	0,246	0,4404
15	1,018	3,201	0,492	0,8942
16	0,717	2,456	0,142	0,6313
17	1,389	3,201	0,428	0,8063
18	0,476	3,456	0,435	0,8896

Tablo 7.3’ te veriler kullanılarak standart karar matrisi, A matrisinin elemanlarından yararlanarak ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla Tablo 7.4’teki veriler hesaplandı. (Eşitlik 2)

Tablo 7.4. Standart karar matrisi (A)

Deney No	YKTK	MKO	TAO	KMO
1	0,102742	0,145757	0,201454	0,131238
2	0,013907	0,146790	0,243926	0,154647
3	0,072657	0,156190	0,275493	0,234477
4	0,280695	0,238830	0,226134	0,211315
5	0,319010	0,253189	0,238761	0,259228
6	0,189306	0,135840	0,224986	0,227875
7	0,184197	0,136873	0,301895	0,207149
8	0,300278	0,204534	0,290416	0,319780
9	0,506045	0,219513	0,410370	0,324652
10	0,052222	0,310520	0,113641	0,161355
11	0,052222	0,238830	0,153817	0,184694
12	0,176534	0,219100	0,164148	0,193026
13	0,17123	0,196787	0,169888	0,197192
14	0,147868	0,183771	0,141190	0,155494
15	0,288925	0,330664	0,282381	0,315720
16	0,203496	0,253705	0,081500	0,222896
17	0,394221	0,330664	0,245648	0,284684
18	0,135097	0,357006	0,249666	0,314095

Standart karar matrisi oluşturulduktan sonra ağırlıklandırılmış standart karar matris hesaplanması için ağırlık değerleri (W_i) 4 değişken içinde eşit kabul edilip $W_i = 0.25$ alındı. Standart karar matrisinde yer alan (Tablo 7.4) veriler $W_i = 0.25$ ile çarpılmış ve ağırlıklandırılmış standart karar matrisi elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.5' te verilmiştir.

Tablo 7.5. Ağırlıklandırılmış standart karar matrisi (V)

Deney No	YKTK	MKO	TAO	KMO
1	0,025685	0,036439	0,050364	0,032809
2	0,003477	0,036697	0,060982	0,038662
3	0,018164	0,039047	0,068873	0,058619
4	0,070174	0,059708	0,056534	0,052829
5	0,079752	0,063297	0,059690	0,064807
6	0,047326	0,033960	0,056247	0,056969
7	0,046049	0,034218	0,075474	0,051787
8	0,075069	0,051134	0,072604	0,079945
9	0,126511	0,054878	0,102593	0,081163
10	0,013056	0,077630	0,028410	0,040339
11	0,013056	0,059708	0,038454	0,046173
12	0,044133	0,054775	0,041037	0,048257
13	0,042810	0,049197	0,042472	0,049298
14	0,036967	0,045943	0,035298	0,038874
15	0,072231	0,082666	0,070595	0,078930
16	0,050874	0,063426	0,020375	0,055724
17	0,098555	0,082666	0,061412	0,071171
18	0,033774	0,089251	0,062416	0,078524

Ağırlıklandırılmış standart karar matrisinin hesaplanmasının ardından ideal ve negatif ideal ayırım ölçülerinin hesaplanmasına geçilmiştir. İdeal çözüm setinin (6) ve (7)'ci eşitlikler kullanılarak ideal ve negatif ideal çözüm değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin ışığında (S_i^+) ve (S_i^-) değerleri eşitlik (8) ve (9) kullanılarak ideal ve negatif ideal ayırım ölçü değerleri Tablo 7.6' da verilmiştir.

Tablo 7.6. İdeal ve Negatif İdeal Çözüm değerleri

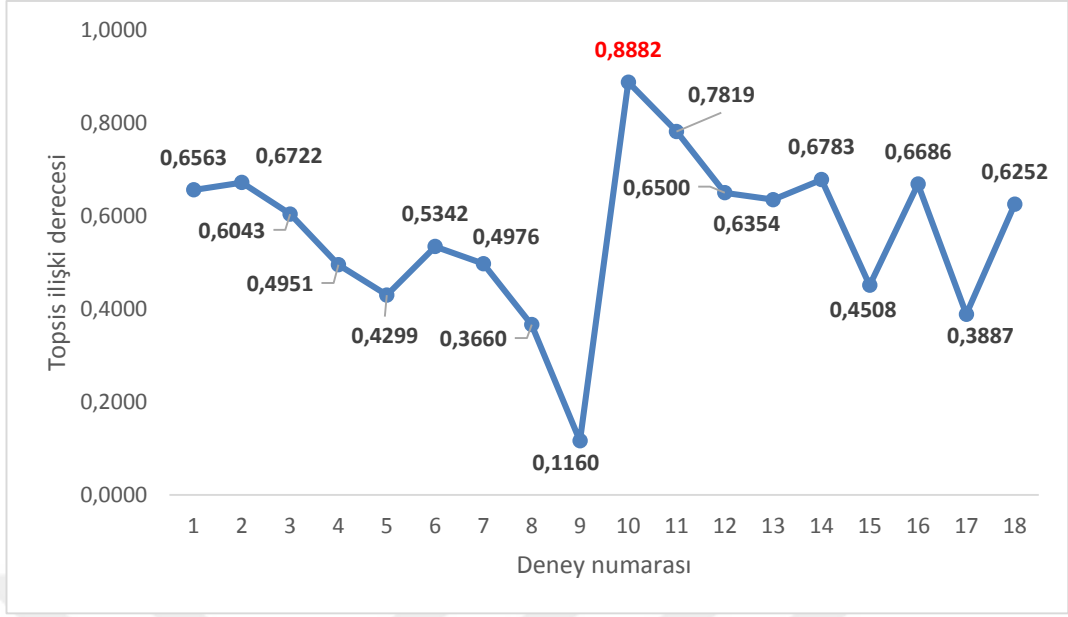
(S _r ⁺)	(S _r ⁻)
0,0647	0,1235
0,0667	0,1367
0,0759	0,1159
0,0839	0,0822
0,0952	0,0718
0,0828	0,0949
0,0908	0,0899
0,1074	0,0620
0,1595	0,0209
0,0187	0,1482
0,0383	0,1374
0,0592	0,1100
0,0625	0,1090
0,0571	0,1204
0,0971	0,0797
0,0587	0,1183
0,1107	0,0704
0,0691	0,1153

İdeal ve negatif ayırım ölçüleri belirlendikten sonra ideal çözüme göreli yakınlık değerleri (C_i⁺) eşitlik (10) yardımıyla Tablo 7.6 veriler kullanılarak hesaplanmıştır. TOPSİS yönteminde de alternatiflerin sıralanması (C_i⁺) Tablo 7.7’de verilmiştir.

Tablo 7.7. İdeal Çözüme Göreli Yakınlık değerleri

Deney No	(Ci ⁺)	İdeal Sıralama
T1	0,6563	6
T2	0,6722	4
T3	0,6043	10
T4	0,4951	13
T5	0,4299	15
T6	0,5342	11
T7	0,4976	12
T8	0,3660	17
T9	0,1160	18
T10	0,8882	1
T11	0,7819	2
T12	0,6500	7
T13	0,6354	8
T14	0,6783	3
T15	0,4508	14
T16	0,6686	5
T17	0,3887	16
T18	0,6252	9

Yapılan işlemlerin sonuçlarına göre Tablo 7.7’de ve Şekil 7.1 de açıkça görüldüğü gibi TOPSİS analiz yönteminde en yüksek (optimum) değer T10 nolu deneyden elde edilmiştir. Çıkan sonuçlara göre en yüksek değer en ideal değer olarak tanımlanır. Böylece minimum yeniden katılan tabaka kalınlığı, takım aşınma oranı, koniklik miktarı oranı ve maksimum malzeme kaldırma oranı için en ideal kesme parametreleri T10 nolu deneyde kullanılan Elektro erezyon işleme parametre kombinasyonu olan Kriyojenik bakır elektrot, Boşalım Akımı 4 (Amper), Darbenin Aktif Olduğu süre (Ton) 160 (µs), Darbe Boşluk Süresi (Toff) 72 (µs) ve Gap Voltaj 6 (Volt) parametre değerlerinde elde edilebileceği saptanmıştır.



Şekil 7.1. Deney sonuçlarına göre Topsis ilişkisel derecenin değişimi

8. GENEL SONUÇLAR

8.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı, elektro erozyon yöntemi ile işlenmiştir, Yapılan araştırma ve incelemelerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir,

- Elektro Erozyon yöntemiyle işlenen Ti6Al4V alaşımının metalografik yüzey incelemeleri sonucunda; esas bölge, ısıdan etkilenen bölge ve yeniden katılaşan bölge şeklinde 3 farklı bölgenin oluştuğu ve özellikle yeniden katılaşan tabakada yüzeyden kaldırılan partikül ve kopan elektrot parçacıklarının tekrar katılaşarak ara yüzeye yapışması ile kalıntı eriyik, mikro çatlak ve çukurlardan oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Yeniden katılaşan tabaka içerisinde Ti6Al4V alaşımı malzemesinden farklı olarak elektrot malzemesine ait (Cu,Zn,Pb,) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir.
- Yüzeylerden alınan XRD analizleri neticesinde, Ti ve CTi_{0,42}V_{1,58} (TiO₂) karbürleri belirlenmiştir. XRD sonuçlarıyla yeniden katılaşan tabaka kalınlığı bölgesinde oluşan termal sıcaklık yükselmesi ve düşüşlerin etkisiyle yapıda bulunan intermetalik faz ve karbür miktarı artmıştır. Çoğu numunede ise Oksijen elementinin varlığı ile TiO₂ fazlarının oluşumuna yol açmaktadır.
- Yeniden katılaşan tabakanın mikro yapısı ve yüzeylerde oluşan karbon etkileşimleri tabakanın sertlik değerini önemli derecede artırırken, ısıdan etkilenen bölgenin sertlik değeri ile esas bölgenin sertlik değerleri benzerlik göstermiştir.
- XRD analizlerinde görülen oksit tabakasının varlığı ve C, Cu ve O gibi elementlerin artması düzensiz bir mikroyapı oluşturmaktadır. Bazı bölgelerde noktasal sertlik değerlerinde düşüşler gözlemlenmiş olup iş parçasının yüzeysel yüksek sıcaklık değeri, yumuşaması ve ısıl iletkenlik değerinin küçük olmasından dolayı ısının bu alanda sıkışarak hapis olmasına ve alaşımın aşırı yaşlanması olarak değerlendirilebilir.
- Boşalım akımının artmasıyla, yüzey sıcaklık değeri malzemenin erime sıcaklık değerine düzenli bir şekilde ulaşmakta ve daha fazla malzeme eritilmektedir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak yeniden katılaşan tabaka kalınlıkları da

artmaktadır. Akımın yeniden katılaşılan tabakanın kalınlığına etkisi açısından bakıldığında kriyojenik bakır elektrot, bakır elektrot, kriyojenik pirinç elektrot ve pirinç elektrot sıralaması elde edilmiştir.

- Darbe aktif süresinin artması ara bölgede daha fazla ısı oluşumuyla bağlantılıdır. Ara bölgede oluşan yüksek ısı miktarı ile yüzeyden ergitilen malzeme miktarı da artmaktadır. Bu da, daha geniş bir bölgenin ısı tesiri altında kalmasına ve ortalama yeniden katılaşılan tabaka kalınlıklarının artmasına yol açmaktadır.
- Darbe boşluk süresinin artmasıyla elektrotların sıcaklık değerlerinde dielektrik sıvının etkisiyle çok hızlı düşüşler görülmektedir. Buda yeniden katılaşılan tabakanın istenilen yönde malzemede daha dar bir bölgede ısı etkisinde kaldığı görüldü.
- Gap voltajın yeniden katılaşılan tabakanın kalınlığına etkisinde bakır ve kriyojenik bakırla yapılan deneylerde etkisi daha fazla görülürken pirinç ve kriyojenik pirinçle yapılan deneylerde nispeten azalma eğilimindedir. Gap voltaj değerinin artması işlenen malzeme üzerinde sıcaklık artışına sebep olmakta fakat boşalım akımı ve darbe aktif süresine kıyasla etkisinin az olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gap voltaj değerindeki artışın nispeten yeniden katılaşılan tabaka kalınlığını artırdığı söylenebilir.
- Pirinç elektrot ve kriyojenik pirinç elektrotların, bakır elektrot ve kriyojenik bakır elektrotlara göre elektrik iletkenlik değerinin düşük olması, işlem süresinin uzamasına malzeme kaldırma oranının az olmasına neden olmaktadır.
- Boşalım akımının artmasıyla malzeme kaldırma oranı da belirli noktaya kadar artmakta, ideal akım değerinde doyuma ulaşmakta ve malzemede yüksek sıcaklık oluşumuyla birlikte nispeten malzeme kaldırma oranı değerindeki artış eğiliminde keskinlik azalmaya başlamaktadır. Deneyler sonucunda akım parametresi ise malzeme kaldırma oranı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.
- Bakır ve kriyojenik bakır elektrotlarla 160 μ s, 200 μ s ve 240 μ s darbe aktif sürelerinde boşalım akımı ile malzeme kaldırma oranı değeri paralel olarak artmakta fakat malzeme kaldırma oranının, 200 μ s vuruş süresi için farklılık gösterme nedeni olarak TiC parçacıklarının işlem bölgesinden kolay uzaklaştırılmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Elektriksel boşalmanın artması gap voltaj değerinin artışı metalin üzerinden kaldırılan talaş miktarının artmasına sebep olur. Çünkü voltaj değerinin artmasıyla

meydana gelen işleme alanındaki enerji miktarı artması paralelinde ark oluşumunu da artırır. Oluşan kararlı arklar sayesinde çok fazla metalin kaldırılmasına, bunların işlem bölgesinden uzaklaştırılmasıyla işlem anında oluşan yeni talaşlar için yer açılmış olacaktır. İşleme gap voltajının artmasıyla, akım yoğunluğu da artmaktadır.

- Elektro Erezyon yönteminde takım aşınma oranları boşalım akımı, darbe aktif süresi ve gap voltaj değerlerine bağlı olarak artmaktadır. Darbe boşluk süresi arttığı zaman takım aşınma oranı da azalmaktadır. Darbe boşluk süresi artması işleme sürelerinin artmasına etki eder. Buda Takım Aşınma Oranının düşmesine neden olmaktadır. En az aşınma kriyojenik bakır elektrotta görülürken, bunu bakır elektrot, kriyojenik pirinç elektrot ve pirinç elektrot takip etmektedir. Takım aşınma oranı kullanılan malzemenin elektriksel iletkenliğine, erime sıcaklığına, fiziksel özelliğine bağlı olarak değişmektedir,
- Boşalım akımı, darbe aktif süresi ve gap voltajın değerlerindeki artışa paralel elektrot sıcaklık değerlerinin arttığı ve darbe boşluk süresinin uzamasıyla da elektrot sıcaklık değerlerinin düşüş görülmektedir. Elektrot sıcaklık değerlerinin artışında boşalım akım değerinin etkisinin çok yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Buda işleme esnasında akımın artmasıyla malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yeniden katılacak tabaka kalınlığı değerlerdeki artışa paralellik göstermiştir. Boşalım akımına kıyasla diğer parametreler olan darbe aktif süresi, darbe boşluk süresi ve gap voltaj değerlerinin etkisinin az olduğu gözlemlenmiştir.
- Ti6Al4V malzemesine bakır elektrotla açılan deliklerin koniklik miktarı oranı kriyojenik bakır elektrotla açılan deliklere göre biraz yüksek çıkmıştır. Bu durum, kriyojenik bakır elektrotla işleme hızına yani birim zamanda işlenen malzeme miktarına en fazla etki eden parametre olan işleme akımının, delik içinde derine inildikçe yanal duvarlardan daha fazla malzeme kopardığının göstergesi olarak kabul edilebilir. Dolayısı ile kriyojenik bakır elektrotun ısıl ve elektriksel iletkenliğinin bakır elektrot göre daha yüksek olması, koniklik miktarı oranının daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Aynı sonuçların pirinç ve kriyojenik pirinç elektrotlarla yapılan deneylerde elde edilmiştir.
- Ti6Al4V malzemesinin koniklik miktarları oranı, boşalım akımla ve darbe aktif süresine artışlara paralellik göstermektedir. Darbe aktif süresinin artması işleme süresini arttırmakta buna mukabilde koniklik miktarı oranının artmasına neden

olmaktadır. Uzun darbe aktif sürelerindeki kıvılcımın, boşalım ve ergitme etkisi daha yüksek olmaktadır ve dolayısı ile koniklik miktarı oranı artmaktadır.

- Boşalım akımının artması, elektrotun delik içerisinde birim zamanda oluşan kıvılcım sayısının artmasına buda işlenecek olan malzeme miktarında artışla beraber delik çapının artmasına neden olmaktadır. Malzeme kaldırma oranındaki artış ile koniklik miktarı oranındaki artış paralellik göstermiştir. Bu durum birim zamanda ne kadar çok malzeme kaldırıldığıнын da bir göstergesidir. Boşalım akımının artışı ile delik çapı genişlemiş fakat Darbe aktif süresi, darbe boşluk süresi ve gap voltajın değişmesiyle fazla bir belirginlik göstermediği gözlemlenmiştir.
- Koniklik miktarı oranı, darbe aktif süresinin artması ile artış göstermiştir. Darbe aktif süresi, kıvılcımın iş parçasına temasıyla başlayıp parçadan ayrılması arasındaki süredir. Çok uzun aynı boşalım enerjisinin iş parçasına daha uzun süre akması demektir. Bu da birim zamanda delik yanal yüzeylerine aynı akım değerinde daha uzun sürede kıvılcım çarpması ve işparçası yüzeyinden daha fazla malzeme kopartılması anlamına gelmektedir. Bu durumun sebebi olarak işleme bölgesinde darbe aktif süresinin artışı ile akım yoğunluğunun artması olarak düşünülmektedir.
- Koniklik Miktarı Oranında istenilen en ideal değerler kriyojenik bakır elektrot, bakır elektrot, kriyojenik pirinç elektrot ve pirinç elektrot sıralaması elde edilmiştir.
- TOPSİS analiz yöntemi ile yapılan çoklu parametre optimizasyonu sonucunda, minimum yeniden katılaşılan tabaka kalınlığı, takım aşınma oranı ve koniklik miktarı ile maksimumu malzeme kaldırma oranı değerleri için en ideal kesme şartlarının T10 nolu deneyde elde edildiği hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] A, Pandey, S, Singh, Current research trends in variants of electrical discharge machining: a review, *Int, J, Eng, Sci, Technol*, 2 (6) (2010) 2172–2191.
- [2] A, Kumar, S, Maheshwari, C, Sharma, N, Beri, Research developments in additives mixed electrical discharge machining (AEEI): a state of art review, *Mater, Manuf, Processes* 25 (10) (2010) 1166–1180.
- [3] N, Beri, S, Maheshwari, C, Sharma, A, Kumar, Technological advancement in electrical discharge machining with powder metallurgy processed electrodes: a review, *Mater, Manuf, Processes* 25 (10) (2010) 1186–1197.
- [4] C,C, Liu, J,L, Huang, Effect of the electrical discharge machining on strength and reliability of TiN/Si₃N₄ composites, *Ceram, Int*, 29 (6) (2003) 679–687.
- [5] N, Ahmad, H, Sueyoshi, Densification and mechanical properties of electroconductive Si₃N₄-based composites prepared by spark plasma sintering, *SainsMalaysiana* 41 (8) (2012) 1005–1009.
- [6] N, Ahmad, H, Sueyoshi, Properties of Si₃N₄–TiN composites fabricated by spark plasma sintering by using a mixture of Si₃N₄ and Ti powders, *Ceram, Int*, 36 (2) (2010) 491–496.
- [7] N, Ahmad, H, Sueyoshi, Microstructure and mechanical properties of silicon nitride titanium nitride composites prepared by spark plasma sintering, *Mater, Res, Bull*, 46 (3) (2011) 460–463.
- [8] K, Liu, D, Reynaerts, B, Lauwers, Influence of the pulse shape on the EEI performance of Si₃N₄–TiN ceramic composite, *CIRP Ann,-Manuf, Technol*, 58 (1) (2009) 217–220.
- [9] J,A, Sanchez, I, Cabanes, L,L, de Lacalle, A, Lamikiz, Development of optimum electrodischarge machining technology for advanced ceramics, *Int, J, Adv, Manuf, Technol*, 18 (12) (2001) 897–905.
- [10] S, Mitra, S, Sarkar, G, Paul, D, Bhaduri, S, Biswas, Pareto optimization of electro discharge machining of titanium nitride-aluminium oxide composite material using Genetic algorithm, *Adv, Mater, Res*, 264 (2011) 985–990.

- [11] S, Singh, Optimization of machining characteristics in electric discharge machining of 6061Al/Al₂O₃p/20P composites by grey relational analysis, *Int, J,Adv, Manuf, Technol*, 63 (9–12) (2012) 1191–1202.
- [12] K,M, Patel, P,M, Pandey, P,V, Rao, Determination of an optimum parametric combination using a surface roughness prediction model for EEİ of Al₂O₃/SiCw/TiC ceramic composite, *Mater, Manuf, Processes* 24 (6) (2009) 675–682.
- [13] T, Rajmohan, K, Palanikumar, Application of the central composite design in optimization of machining parameters in drilling hybrid metal matrix composites, *Measurement* 46 (4) (2013) 1470–1481.
- [14] Z, Humienny, M, Berta, New multimedia geometrical tolerancing course, *Proc,CIRP* 10 (2013) 312–316.
- [15] D, Bhaduri, A,S, Kuar, S, Sarkar, S,K, Biswas, S, Mitra, Electro discharge machining of titanium nitride-aluminium oxide composite for optimum process criterial yield, *Mater, Manuf, Processes* 24 (12) (2009) 1312–1320.
- [16] Doç, Dr, Akgün Alsaran, Isı Enerjisi Kullanarak Şekil Verme Ders Notu.
- [17] Osman TEMİZKAN(OCAK 2012) Dizel Enjektörlerde, EEİ Yöntemi İle Farklı Koşullarda Delinen Püskürtme Deliklerinin Yüzey Özellikleri Ve İç Yapılarının İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [18] Furkan Mühendislik (2000), Furkan Elektroerozyon Tezgâhları Temel Bilgiler Kılavuzu.
- [19] Tayfun Çağlar Deniz (2009), Elektro Erozyon ile İşlemede Elektrot Aşınmasının Telafisinin Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, s, 6-7.
- [20] Özdemir, A, Türker, M, Karataş, Ç, ve Güllü, A, K, “MA 956 Süperalaşım Malzemesi için Tel Erozyonda işleme Parametrelerinin Ön Tayini”, Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, 4: 7-14 (2002).
- [21] Hsieh S,F,, Chen S,L,, Lin H,C,, Lin M,H, and Chiou S,Y,, “The machining characteristics and shape recovery ability of Ti–Ni–X ternary shape memory alloys using the wire electro-discharge machining” *Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49: 509-514 (2009).
- [22] Scott D,, Boyina S, and Rajurkar K,P,, “Analysis and optimization of parameter combination in wire electrical discharge machining”, *International Journal of Production Research*, 29 (11): 2189-2207 (1991).

- [23] Hamit ARSLAN Ders Notları www.hamitaslan.com/ultrasonik-imalat.html.
- [24] Electrical Discharge Machining (EEİ) Ve Jet Revizyon Müdürlüğündeki Uygulamaları Sv1,Müh, İbrahim Akkuş İnci Hibm, K,Lığı Jet Revizyon Müdürlüğü Şubat 2004, ESKİŞEHİR syf ,10-11.
- [25] Ulaş ÇAYDAŞ WEEİ Yönteminde işlem parametrelerinin Mikroyapı ve yüzey püzlülüğüne etkisi yüksek Lisans Tezi (Elazığ 2002 Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [26] Cenk Ertürk Elektro-Erozyonla Kalıpların işlenmesinde Yöntem Parametrelerinin Etkileri İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü(2003).
- [27] H,Ramasawmy, I, Blunt, K,P, Rajukar, “Investigation of the relationship between the white layer rthickness and 3D surface texture parameters in die sinking EEİ process”,Precision Engineering(2005), in press.
- [28] Lee, H,T,, Hsu, F,C,, Materials Science and Technology 19(9) (2003) 1261.
- [29] Bhattachary, B,, Munda, J,, “Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micromachining domain”, International Journal of Machine Tools and MAnufacture 43 (2003) 1301—1310.
- [30] Lee, S,H,, Li, X,P,, “Study of the effext of machining parameters on the machining characteristics in the electrical discharge machining of tungsten carbide” , Journal of Materials Processing Technology, 115(2001) 344-358.
- [31] Lau, W,S,, Wang, M,, Lee, W,B,, “Electrical discharge machining of carbon fibre composite materials”, International Journal of Machine Tools and Manufacture 30(1990) 297-308.
- [32] Chow, H,M,, Yan, B,H,, Huang, F,Y,, “Micro slit machining using electro discharge machining with a modified rotary disk electro(RDE)”, Journal of Materials Processing Technology, 91(1999) 161—166.

ÖZGEÇMİŞ

08 Nisan 1984 yılında Manisa’da doğdu. İlk ve orta öğretimini ardından, 2002 yılında Manisa Merkez Anadolu Teknik Lisesi Bilgisayar bölümünde lise eğitimini tamamladı. 2008 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Öğretmenliği Programından mezun oldu. 2010 yılında Milli Eğitim Bakanlığında Makine kalıp ve Makine Teknolojisi Alan Öğretmeni olarak göreve başladı. 2015 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Bölümü Mekanik Sistemler Programına Yüksek Lisans eğitimine başladı. Halen öğretmenlik görevine devam eden Savaş APAK evli ve 1 çocuk babasıdır.