



**SEMENTE KARBÜRÜN ELEKTRO EROZYON
İLE İŞLENMESİNDE İŞLEME
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

Ahmet Tolunay IŞIK

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**SEMENTE KARBÜRÜN ELEKTRO EREZYON İLE İŞLENMESİNDE
İŞLEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

Ahmet Tolunay IŞIK

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**KARABÜK
Haziran 2022**

Ahmet Tolunay IŞIK tarafından hazırlanan “SEMENTE KARBÜRÜN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU
Tez 2. Danışmanı, Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 10/06/2022

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Mustafa GÜNAY (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Yakup TURGUT (GÜ)
Üye : Doç. Dr. Nafiz YAŐAR (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ahmet Tolunay IŞIK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SEMENTE KARBÜRÜN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Ahmet Tolunay IŞIK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Haziran 2022, 100 sayfa

Semente karbür yüksek sertliği, mukavemeti ve geniş sıcaklık aralığında yüksek aşınma direnci nedeniyle takım ve kalıp endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Yüksek mukavemete sahip olması nedeniyle geleneksel işleme teknikleriyle işlenmesi zor malzeme olarak bilinmektedir. Bu bağlamda, geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden birisi olan elektro erozyon ile işleme (EEİ), söz konusu malzemelerin işlenmesinde uygulanan alternatif bir teknolojidir.

Bu çalışmada, elektro erozyon yöntemiyle işlenen kama yuvası üzerinde işleme parametrelerinin etkisine odaklanılmıştır. İşleme parametreleri olarak üç farklı seviyede boşalım akımı (6-12,5-25 A), vurum süresi (25-50-100 μ s) ve vurum aralığı (15-30-60 μ s) kullanılmıştır. Deneysel çalışma Taguchi metodolojisinin L_{27} deney tasarımına göre elektrolitik bakır takımlar ile semente karbür malzeme üzerinde gerçekleştirilmiştir. Boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı parametrelerinin

talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM), ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), yüzey yapısı ve boyut tamlığı üzerine etkileri incelenmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda, en etkili parametre olan boşalım akımının artması ile TKM, TAM ve Ra'nın arttığı belirlenmiştir. Vurum süresinin artmasıyla Ra belirli bir oranda artarken, TAM azalmıştır. Vurum aralığı artırıldığında, TKM, TAM ve Ra'nın azaldığı görülmüş olup, vurum aralığı en fazla Ra üzerinde değişime sebep olmuştur. Mikroskopla incelenen işlenmiş yüzeylerde, mikro çatlaklar, kraterler, döküntü kürecikleri ve düşük kalınlıkta beyaz katmana rastlanmıştır. Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile yapılan çoklu optimizasyon sonucunda, 6A boşalım akımı, 25 µs vurum süresi ve 100 µs vurum aralığı optimum parametreler olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile yapılan doğrulama deneyleri sonucunda TKM, TAM ve Ra değerleri sırasıyla 0,004185 g/dk, 0,000619 g/dk ve 2,2942 µm olarak elde edilmiştir. Ayrıca, EEİ ile oluşturulan kama yuvası boyutları ölçülmüş ve boyutların ilgili standartta belirtilen toleranslar içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Semente karbür, Elektro erozyonla işleme, Yüzey pürüzlülüğü, Ölçü tamlığı, Optimizasyon

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

OPTIMIZATION OF PROCESSING PARAMETERS IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF CEMENTED CARBIDE

Ahmet Tolunay IŞIK

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

June 2022, 100 pages

Cemented carbide has an important place in the tool and mold industry due to its high hardness, strength and high wear resistance in a wide temperature range. Due to its high strength, it is known as a material that is difficult to process with traditional machining techniques. In this context, electrical discharge machining (EDM), which is one of the non-traditional manufacturing methods, is an alternative technology applied in the machining of these materials.

In this study, the effect of machining parameters on the keyway machined by the electrical discharge method is focused. Three different levels of discharge current (6-12,5-25 A), pulse duration (25-50-100 μ s) and pulse interval (15-30-60 μ s) were used as machining parameters. The experimental study was carried out on cemented carbide material with electrolytic copper tools according to L27 experimental design of Taguchi methodology. The effects of discharge current, pulse duration and pulse

interval parameters on metal removal rate (MRR), tool wear rate (TWR), average surface roughness (Ra), surface structure and dimensional accuracy were investigated. As a result of the statistical analysis, it was determined that MRR, TWR and Ra increased with the increase of the discharge current, which is the most effective parameter. With the increase of the pulse duration, Ra increased at a certain rate, while TWR decreased. It was observed that TKM, TAM and Ra decreased when the pulse interval was increased, and the pulse interval caused the change on Ra the most. Micro-cracks, craters, debris globules and a low-thickness white layer were found on the machined surfaces examined under the microscope. As a result of multiple optimization with Taguchi-based gray relational analysis method, 6A discharge current, 25 μ s pulse duration and 100 μ s pulse interval were determined as optimum parameters. As a result of validation experiments with these parameters MRR, TWR and Ra values were obtained as 0,004185 g/min, 0,000619 g/min and 2,2942 μ m, respectively. In addition, the keyway dimensions created with EDM were measured and it was determined that the dimensions were within the tolerances specified in the relevant standard.

Key Word : Cemented carbide, Electrical discharge machining, Surface roughness, Dimensional accuracy, Optimization

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa GÜNAY'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deneylerin ve analizlerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen, Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu öğretim üyesi Dr. Ramazan AKIROğLU'na teşekkür ederim.

KBÜBAP-21-YL-038 kodlu proje ile maddi destek sağlayan KBÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne ve Bilim İnsanı Destekleme Programları (BİDEP) kapsamında 2210-D “Yurt İçi Sanayiye Yönelik Yüksek Lisans Bursu” ile maddi destekleri için TÜBİTAK'a teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
LİTERATÜR TARAMASI.....	4
BÖLÜM 3	10
SERAMİKLER VE SEMENTE KARBÜR.....	10
3.1. GELENEKSEL SERAMİKLER.....	11
3.2. İLERİ SERAMİKLER	12
3.3. SEMENTE KARBÜR.....	13
BÖLÜM 4	16
TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ	16
4.1. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME	18
4.2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME MEKANİZMASI.....	21
4.2.1 Vurum Hazırlığı Aşaması	21
4.2.2. Vurum Aşaması	22
4.2.3. Vurum Aralığı Aşaması.....	23

	<u>Sayfa</u>
4.3. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME PARAMETRELERİ.....	26
4.3.1. Elektriksel Parametreler.....	27
4.3.2. Elektriksel Olmayan Parametreler	31
4.3.2.1. Dielektrik Sıvı.....	31
4.3.2.2. Takım (Elektrot) Seçimi ve Aşınması.....	34
4.3.3. Yüzey Karakteristiği.....	37
4.3.4. Performans Ölçütleri.....	41
4.4. ELEKTRO EROZYON ÇEŞİTLERİ VE UYGULAMA YÖNTEMLERİ ...	42
4.5. KALİTE KONTROL YÖNTEMİ VE OPTİMİZASYON TEKNİĞİ	46
4.5.1. Üç Boyutlu Koordinat Ölçüm (CMM)	46
4.5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü ve Değerlendirmesi	47
4.5.3. Taguchi ile Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ve Çoklu Optimizasyon	52
BÖLÜM 5	55
MATERYAL VE YÖNTEM	55
5.1 MALZEME VE EKİPMANLAR.....	55
5.1.1 Elektro Erozyon Tezgahı	55
5.1.2. İş Parçası	56
5.1.3. Takım Elektrotu	57
5.1.4. Dielektrik	58
5.1.5. Talaş Kaldırma ve Takım Aşınma Oranlarının Belirlenmesi	59
5.1.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	59
5.1.7. Topografik Ölçümler	60
5.1.8. SEM ve EDS Analizleri.....	60
5.1.9. Geometrik Ölçü Tamlığı.....	61
5.2. DENEY DÜZENEGİ TASARIMI VE PLANLAMA	62
5.3. DENEY PARAMETRELERİ TASARIMI	63
5.4. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ VE OPTİMİZASYON TEKNİĞİ... 65	65
BÖLÜM 6	67
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	67
6.1. İSTATİSTİKSEL ANALİZ	68

	<u>Sayfa</u>
6.2. DENEY SONUÇLARININ GRAFİKSEL ANALİZİ	69
6.2.1. Talaş Kaldırma Miktarı (TKM)	69
6.2.2. Takım Aşınma Miktarı (TAM)	72
6.2.3. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	74
6.2.4. Yüzey Topografyası	76
6.3. GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ VE PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU	77
6.4. BOYUTSAL TAMLIK	81
6.4.1. Derinlik	81
6.4.2. Genişlik	83
6.4.3. Uzunluk	84
6.5. SEM VE EDS GÖRÜNTÜLERİ	85
BÖLÜM 7	88
SONUÇLAR	88
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Geleneksel ve ileri seramiklerin imalat aşamaları.....	11
Şekil 3.2. Tungsten karbür tozunun mikro ölçekte görünümü.	14
Şekil 3.3. Çeşitli alanlarda kullanılan işleme takımları.	15
Şekil 4.1. Talaşlı imalat yöntemleri ve sınıflandırılması.....	17
Şekil 4.2. Elektro erozyon ile işleme kıvılcım mekanizması.	18
Şekil 4.3. Dalma ve Tel tipi EEİ’de aşırı kesme ve gap bölgeleri.....	19
Şekil 4.4. Elektro erozyon işleminden sonra yüzey katmanları.	20
Şekil 4.5. Elektro erozyon ile işlemede takım ve iş parçası başlangıç durumu.....	21
Şekil 4.6. Vurum hazırlığı adımları.	22
Şekil 4.7. Vurum adımları.	23
Şekil 4.8. Vurum aralığı adımları.	24
Şekil 4.9. EEİ sırasında oluşan gerilim ve akımın dalga biçimleri.	24
Şekil 4.10. Fazlara göre gerilim ve akımın işleme esnasındaki hareket eğrileri.	25
Şekil 4.11. İşleme parametrelerine göre anot ve katotta oluşan erozyon.	26
Şekil 4.12. Elektro erozyon ile işlemede en yaygın kullanılan proses parametreleri ve performans ölçütleri.	27
Şekil 4.13. Elektro erozyon ile işlemede elektriksel parametrelerin akım ve gerilim hareket eğrileri içerisinde tanımlanması.	28
Şekil 4.14. Dielektrik uygulama biçimleri.	33
Şekil 4.15. Yıkama basıncının işleme sırasındaki etkisi.	34
Şekil 4.16. Takım elektrotu aşırı kesme.	36
Şekil 4.17. Optik mikroskop altında semente karbür malzemenin işlenmiş yüzey görüntüleri.	38
Şekil 4.18. a) Beyaz tabaka çatlakları (Ip:24 A, Ton:400 µs, E:240 mJ) b) SEM fotoğrafı, yüksek boşalım akımında beyaz tabaka kalınlığının yüksek sapması (malzeme: D2; Ip:12 A, Ton:12 µs).	39
Şekil 4.19. Takım malzemesinin yüzey görüntüleri a) 2000 µm ölçeğinde b) 500 µm ölçeğinde.	40
Şekil 4.20. Takım yüzey pürüzlülüğünün işleme süresine göre değişimi (0,5 mm derinlik, Ton: 180 µs, Toff: 46 µs).	40
Şekil 4.21. Elektro erozyon ile işleme yöntemleri.	42
Şekil 4.22. Dalma EEİ yöntemleri.	42

Şekil 4.23. EEİ ile kesme yöntemleri.....	43
Şekil 4.24. EEİ ile taşlama yöntemleri.....	43
Şekil 4.25. Dalma tipi elektro erozyon tezgahı şematik gösterimi.	45
Şekil 4.26. Üç boyutlu koordinat ölçüm cihazı.....	47
Şekil 4.27. Yüzey pürüzlülük profil genişliği.....	49
Şekil 4.28. Ortalama yüzey pürüzlülüğü.....	50
Şekil 4.29. Maksimum yüzey pürüzlülük yüksekliği ve toplam yüzey pürüzlülük yüksekliği.....	51
Şekil 4.30. Ortalama yüzey pürüzlülük genişliği.....	52
Şekil 5.1. Furkan K1 Z-NC elektro erozyon makinesi.....	55
Şekil 5.2. Deney numunesi.....	57
Şekil 5.3. Elektrolitik bakır takım elektrot.....	58
Şekil 5.4. Perthometer marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	60
Şekil 5.5. Global Classic 091508 koordinat ölçüm cihazı.....	61
Şekil 5.6. Elektro erozyon ile işleme deney düzeneği.....	62
Şekil 5.7. Kama kanalı için teknik çizim.....	63
Şekil 6.1. Boşalım akımı ve vurum süresinin talaş kaldırma miktarına (TKM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 15 μ s.....	70
Şekil 6.2. Boşalım akımı ve vurum süresinin talaş kaldırma miktarına (TKM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 30 μ s.....	70
Şekil 6.3. Boşalım akımı ve vurum süresinin talaş kaldırma miktarına (TKM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 60 μ s.....	71
Şekil 6.4. Boşalım akımı ve vurum süresinin takım aşınma miktarına (TAM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 15 μ s.....	72
Şekil 6.5. Boşalım akımı ve vurum süresinin takım aşınma miktarına (TKM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 30 μ s.....	73
Şekil 6.6. Boşalım akımı ve vurum süresinin takım aşınma miktarına (TAM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 60 μ s.....	73
Şekil 6.7. Boşalım akımı ve vurum süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi, vurum aralığı (Toff): 15 μ s.....	74
Şekil 6.8. Boşalım akımı ve vurum süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi, vurum aralığı (Toff): 30 μ s.....	75
Şekil 6.9. Boşalım akımı ve vurum süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi, vurum aralığı (Toff): 60 μ s.....	75
Şekil 6.10. İşlenmiş deney numunelerinin topoğrafya grafikleri (Ip: 6 A).....	77
Şekil 6.11. İşlenmiş deney numunelerinin topoğrafya grafikleri (Ip: 25 A).....	77

Sayfa

Şekil 6.12. Boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı etki dereceleri.	80
Şekil 6.13. Deney sıralamasına göre kama yuvası derinlik grafiği.	82
Şekil 6.14. Deney sıralamasına göre kama yuvası genişlik grafiği.	83
Şekil 6.15. Deney sıralamasına göre kama yuvası uzunluk grafiği.	84
Şekil 6.16. İşlenmiş yüzey SEM görüntüleri.	85
Şekil 6.17. İşlenmiş yüzey kesitinin SEM görüntüleri.	86
Şekil 6.18. İşlenmiş yüzey enerji dağılım spektrometresi (EDS).	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Elektro erozyon tezgahlarında dielektrik olarak kullanılan bazı yağların özellikleri.....	32
Çizelge 5.1. K1 Z-NC EDM elektro erozyon tezgahı teknik özellikleri.....	56
Çizelge 5.2. WC-Co teknik özellikleri.....	57
Çizelge 5.3. Elektrolitik bakır teknik özellikleri.....	58
Çizelge 5.4. Belone EDM F elektro erozyon sıvısı teknik özellikleri.	59
Çizelge 5.5. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler ve çalışma koşulları.	64
Çizelge 5.6. Değişken parametrelerin değerleri ve seviyeleri.....	64
Çizelge 5.7. Deney tasarımı.	65
Çizelge 6.1. Parametreler ve performans ölçüm sonuçları.	67
Çizelge 6.2. İşleme parametrelerinin deney sonuçlarına (TKM, TAM, Ra) istatistiksel etkisi.	68
Çizelge 6.3. Gri ilişkisel analiz sonuçları ve sıralama.	78
Çizelge 6.4. İşleme parametreleri için GRG ortalama verileri.....	79
Çizelge 6.5. Gri ilişkisel derece varyans analizi.	80
Çizelge 6.6. Tahmini ve deneysel sonuçların karşılaştırması.	81

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Cu	: bakır
Ton	: vurum süresi
Toff	: vurum aralığı
Ip	: boşalım akımı
Ca	: kalsiyum
Co	: kobalt
Mg	: magnezyum
Na	: sodyum
K	: potasyum
WC	: tungsten karbür
TiC	: titanyum karbür
TaC	: tantalyum karbür
Cr ₃ C ₂	: krom karbür
Mo ₂ C	: molibden karbür
Ω	: ohm
V	: voltaj
I	: akım
σ	: standart sapma

KISALTMALAR

ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ANSI	: American National Standards Institute (Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü)
BA	: Bağlı Aşınma
CMM	: Coordinate Measuring Machine (Koordinat ölçüm cihazı)
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Dağılım Spektrometresi)
EEİ	: Elektro Erozyon ile İşleme
GA	: Genetik Algoritma
GRG	: Grey Relational Grade (Gri İlişkisel Derece)
HAZ	: Heat Affected Zone (Isıdan Etkilenen Bölge)
ISO	:International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TAM	: Takım Aşınma Miktarı
TGRA	: Taguchi-Grey Relation Analysis (Taguchi-Gri İlişkisel Analiz)
TKM	: Talaş Kaldırma Miktarı
TS	: Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknik seramikler içerisinde birçok sektör (kesici takım, kalıp sanayi vb.) içinde yaygın olarak kullanılan sement karbür; yüksek erime sıcaklığı, sertliği, korozyon direnci, elektrik ve termal iletkenliği, düşük darbe dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri sayesinde sürekli büyüyen bir potansiyele sahiptir [1,2]. Ancak teknik seramikler ve kompozitlerinin çeşitli kullanım alanları sunan ileri özellikleri işlenmesinde de kısılan takım ömrü, ince işçilik, aşırı artı malzeme, çatlak oluşumu, artan maliyet gibi zorlukları beraberinde sunmuştur. Teknik seramikler yüksek sertlik ve kırılgenliklarından dolayı yük altında çatlak oluşumuna daha elverişlidir. Seramik parçaya yüksek gerilimli yükler uygulanmaması gerekir, aksi takdirde kırılabilir ve oluşan çatlaklar malzemenin mukavemetini azaltır [3,4]. Bu yüzden geleneksel işleme yöntemlerine göre ileri imalat yöntemleriyle bu tip malzemelerin işlenmesi, takım aşınması, malzeme israfı ve çatlak oluşumunu en aza indiren yöntemdir [5,6]. İleri imalat yöntemlerinden elektro erozyon ile işleme (EEİ) ise sement karbür gibi iletken, sert ve kırılgen malzemelerin işlenebilmesi için uygun bir çözüm olarak kabul edilmektedir [7].

Elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemi, elektriksel olarak iletken iki elektrot (iş parçası ve takım) arası hızlı aralıklarda darbeli elektrik kıvılcımlarının kontrollü olarak uygulanması ile termo-elektriksel olarak talaş kaldıran alışılmamış işleme yöntemidir. Bu yöntem ile işlenmesi zor malzemelerin sertliğine bakılmaksızın temassız ve yüksek hassasiyetle imalatı gerçekleştirilebilmektedir. Talaş kaldırma işlemi sırasında işleme bölgesinde çok yüksek ısı meydana gelerek elektrot malzemesini bir miktar eritir veya buharlaştırır. Döküntü adı verilen artı materyalleri uzaklaştırma amacıyla işleme, sürekli devir daim edilen bir dielektrik sıvı içerisinde gerçekleşir [8,9]

İşlenebilirliği etkileyen parametreler çoğunlukla boşalım akımı, vurum süresi, vurum aralığı, dielektrik basıncı, referans voltajı ve polarite olarak; sonuç değerleri ise TKM, TAM ve Ra olarak belirtilmektedir. Endüstriyel katkı açısından karmaşık şekillerin, fonksiyonel parçaların ve oranlı mikro deliklerin işlenmesinin gerekliliği belirtilmiştir [10]. Bakır takım elektrotlu EEİ ile tungsten karbür işlemede düşük Ra için düşük boşalım akım ve vurum süresi, düşük TAM için yüksek boşalım akımı düşük referans voltajı ve vurum süresi, yüksek TKM için yüksek boşalım akımı, referans voltajı, tasarım faktörü ve düşük vurum süresi önerilmiştir [11]. Vurum enerjisini TAM ve Ra'yi artırırken TKM'yi iyileştirmektedir [12,13].

İşleme sırasında sık yapılan kısa arklar yüzey yapısını kötü etkilemekte, ayrıca düşük boşalım akımı değerinde erime ve buharlaşma az olduğundan artık materyal işlenmiş yüzeyde görülmektedir [14]. Vurum aralığı olmadan kıvılcım mekanizmasının sürekliliği döner takım elektrotu yardımıyla mümkün olabilir. Fakat sürekli kıvılcımlarından oluşan yüksek sıcaklık ve hidrodinamik kuvvet birikintinin yıkanması için bir sorun teşkil etmekte bu durum yüzey yapısını olumsuz yönde etkilemektedir [15]. Elektro erozyon ile işlenen yüzeylerde yüksek vurum enerjisi ile ani sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan homojen olamayan rasgele mikro çatlaklar, düzensiz kraterler, beyaz tabaka oluşumu gibi yüzey hatalarına rastlanır [16]. Yüzey kalitesine etki eden bir başka etmen olan beyaz bölge kalınlığının ve elektrotun malzemeye nüfusunun ise vurum enerjisinin artışına göre arttığı söylenmektedir [17].

Araştırmalarda bakır takımın grafit takıma göre iş parçası yüzeyine daha az karbon nüfusu ve düşük takım aşınması sağladığı belirtilmektedir [18]. Artan boşalım akımı ile iş parçası yüzeyinde ısı enerjisinin yükselmesi elektrotun hızlı erimesine ve buharlaşmasına neden olur [19]. Dielektrik ortamda kalan tozların malzeme yapısına aktarıldığını gösterilen çalışmalar vardır [20]. İşlemede aşırı kesme ve boyutsal doğruluk için krater derinliği ve genişliğinin daha az olması sebebiyle karbon bazlı dielektrik tercihi biyodizel yağlara göre daha uygundur [21].

Bu çalışmada EEİ ile yüksek sertlik, mukavemet ve geniş sıcaklık aralıkları sebebiyle takım ve kalıp sanayinde kullanılan sement karbür üzerine DIN 6885 standartında kama yuvası açması amaçlanmıştır. Çalışmada belirlenen seramik malzeme üzerine

spesifik olarak parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir. Boşalım akımı, vuruu sũresi ve vuruu aralığı parametrelerinin talaş kaldırma miktarı, takım aşınma miktarı, yũzey pũrũzlũlũęũ (Ra), yũzey yapısı ve geometrik boyut tamlığı üzerine etkileri araştırılmıştır. Literatũrde geometrik boyut tamlığı ile ilgili seramikler üzerine çalışma çok azdır. İşleme sonrasında oluşan geometrinin uygunluğu yũksek hassasiyet ve netlik sonuçları için kullanılan karbũr takımları ve kalıp malzemeleri için önemli bir etkendir. Bu kapsamda boyutsal tamlığın uygulana bilirliği araştırılmış ve endũstriyel katkı açısından kullanılabilir veriler elde edilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Lee ve Li (2003) tungsten karbürün elektro erozyon ile bakır-tungsten takım elektrotlu işlenmesinde boşalım akımı (16-64A) ve vuruş süresinin (1,6-2,5 μ s) iş parçasının yüzey morfolojisi ve yüzey bütünlüğü üzerine etkilerini incelemiştir. İşleme sonrasında iş parçasında çatlakların, içi boş kürelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Boşalım akımı arttıkça yüzeye dik veya paralel mikro çatlak ve daha gevşek bir mikro yapı görülmüştür. Vuruş enerjisinin artışı ile işlenmiş yüzey haricinde 15 μ m derinliğe kadar mikro yapıda gevşeklik görülmüştür. Vuruş enerjisinin artışı yüzeyde daha derin kraterlere, küresel uzantılara ve malzemenin işleme sırasında hızla soğutulması ile yüksek sıcaklık farklarından kaynaklı yüksek termal gerilmelerin bir sonucu olarak pürüzlülüğe neden olan çatlaklar görülmüştür. Tungsten karbürün sertliğinde önemli sayılabilecek bir değişim görmeyen yazarlar malzemenin önemli miktarda kobaltın buhar fazına dönüştüğünü ve dielektrikten veya karbürden gelmiş olması muhtemel karbon oranında bir artış gözlemlemiştir [22].

Lin vd. (2008), K10 ve P10 kalitesinde sementite karbürün elektro erozyon ile bakır takım elektrotlu işlenmesinde vuruş enerjisi için boşalım akımı (1-9A) ve vuruş süresinin (3-500 μ s) değişiminden TKM, TAM, yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına ulaşmayı hedeflemiştir. Yapılan deneyde 60 V referans voltajı, 0,55 görev döngüsü, 20 dk çalışma süresi, negatif polarite, gazyağlı dielektrik parametrelerini sabit tutmuşlardır. Yazarlar görev döngüsüne bağlı vuruş süresi azaldıkça ve boşalım akımı arttıkça TKM'nin arttığını, ayrıca karbür malzemenin erime sıcaklığının (+3000 °C) çok yüksek olması sebebiyle düşük boşalım akımı seviyelerinde vuruş enerjisinin ergime ve buharlaşma gibi malzeme kaldırma mekanizması için yeterli olmadığını söylemişlerdir. Yazarların bildirdiğine göre Gadalla ve Bozkurt (1992) "*Vuruş süresinin artmasıyla genişleyen plazma kanalı, birim alanda enerji yoğunluğunu azaltır.*" bulgusundan enerji yoğunluğunun malzeme kaldırma mekanizması için

yetersiz kaldığını belirtmiştir [23]. Aynı şekilde düşük vuruş süresi toplam enerji yoğunluğunu düşürmekte ve işlenen yüzeye enerji iletimi düşük olmaktadır. Yüksek ergime noktasına sahip olan karbür malzemenin TKM'nı arttırmak enerji yoğunluğunu arttırmakla mümkün olabilir. Yapılan çalışmada takım aşınmalarını inceleyen yazarlar vuruş enerjisi ile üretilen ısı ve itici kuvvet iş parçasını aşındırdığı gibi TKM ile aynı nedenlerden takım elektrotunu da aşındırdığını belirtmişlerdir. Yüzey yapısına bakıldığında 1A boşalım akımının üstünde yüzey çatlakları görmüşlerdir. Dielektrikten gelen pirometrik karbonun işlenen bölgede sertleşmiş bir tabaka oluşturması ve tungsten karbürün tanecik yapı olarak mayasını güçlendiren ve sertleştiren poligonal şeklindeki parçacıkların yüksek sıcaklıkta ergimesi sonucunda vuruş enerjisi işleme bölgesinde 200-300 µm kalınlığında yumuşatılmış bir katmana sebep olmuştur. Artan vuruş enerjisi pürüzlülüğü, çatlak derinliğini, döküntü çapını da arttırmaktadır [24].

Basha vd. (2020) yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direnci gibi özellikler barındıran silisyum karbürün (SiC) işlenmesinde alternatif yöntemlere göre daha iyi performansa sahip EEİ'de yapılan araştırmaları incelemiştir. Tel-EEİ, döner elektrotlu EEİ, mikro EEİ ve yardımcı elektrot EEİ'nin farklılıklarına değinmişlerdir. Araştırmacılar EEİ yöntemleri ile SiC'yi işlemenin kimyasal işleme, plazma ışıma işleme ve lazer işleme gibi yöntemlere göre (düşük maliyeti, karmaşık geometrileri işleme avantajı, malzeme sertliğinden bağımsız işleme yapabilmesi) avantaj sağlayabileceğine değinmiştir [25].

Agarwal vd, (2020) AISI D2 takım çeliğinin EEİ'si üzerine çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar 30 mm çapında takım elektrotu ve EEİ yağı kullanılarak boşalım akımı (4, 7, 70 A), vuruş süresi (100, 200, 300 µs), görev döngüsü (80, 85, 90 %) ve referans voltajı (40, 50, 60 V) faktörlerinin TKM, TAM ve radyal kesme üzerine etkilerini incelemiş, Jaya algoritması kullanarak çıkış parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar tarafından yapılan optimizasyon sonucunda (10 A, 100 µs, %90, 40V) en yüksek TKM 33.3650 mm³/dk; (6,7840 A, 300 µs, %90, 40V) en düşük TAM uyum eksikliği ve hatalardan dolayı -0,0135 mm³/dk yani sıfır; (4 A, 100 µs, %90, 49,7520 V) en düşük radyal kesme 0,0013 µm olarak bulunmuştur. [26].

Hadad vd. AISI 1050 çelik malzemenin EEİ'sinde bakır takım yüzey pürüzlülüğünün deneysel çalışmaya etkisini araştırmışlardır. Yazarlar işleme öncesi pürüzlülüğe sahip takımın daha az tepe alanı ile daha düşük kıvılcım sayısına sahip olmasından TKM'yi ve TAM'ı olumsuz etkileyeceğinden bahsetmişlerdir. Malzemenin yüzey yapısında, kaba işlemede az sayıda tepe ve kraterler, ince işlemede ise daha çok sayıda tepe ve kraterler görmüşlerdir. Kaba işlemede vurum enerjisinden kaynaklı kraterlerin alanının artacağını vurgulamışlardır. İşleme mekanizmasının takım üzerinde daha fazla kıvılcım alanı ve tepe noktası oluşturmak için büyük tepe noktaları sürekli eriteceğinden bahsetmişlerdir. Ayrıca yazarlar yüzey pürüzlülüğü için işleme süresi arttıkça takım yüzey pürüzlülüğünün etkisinin azaldığını belirtmişlerdir [27].

Singh ve Sharma, tungsten karbür alaşımının toz karışık (grafit:15g/l) EEİ sürecini karşılaştırmalı olarak GRA, grey-fuzzy ve grey-ANFIS (grey-adaptive neuro fuzzy inference) optimizasyon sistemlerini kullanarak değerlendirmişlerdir. Deneylerde boşalım akımı (3-9 A), vurum süresi (15-100 μ s), dielektrik seviyesi (40-80 mm) ve dielektrik basıncı (0,2-0,6 kg/cm^2) parametrelerinin TKM, TAM, aerosol (duman) yoğunluğu ve dielektrik tüketimi üzerine etkilerini araştırılmışlardır. Yazarlar vurum enerjisinin artmasıyla oluşan yüksek sıcaklığın, duman yoğunluğunu ve dielektrik tüketimini arttırdığından bahsetmiş. Düşük dielektrik basıncı sonucunda döküntünün düzgün temizlenememesi sebebi ile oluşan kısa devre ve arkların, duman yoğunluğunu ve dielektrik tüketimini arttırdığını söylemişlerdir. Doğrulama deneyleri ve tahmin sonuçlarından hesaplanan en düşük hata seviyesine sahip optimizasyon sırasıyla grey-ANFIS (%5,76), GRA (%12,19) ve grey-fuzzy (%15,41) olarak belirtilmiştir. Yazarlar yapılan çoklu optimizasyonların tümünde 6A, 50 μ s, 40 mm, 0,6 kg/cm^2 parametrelerinin en uygun işleme parametreleri olduğunu belirtmişlerdir [28].

Sarıkaya ve Yılmaz, AISI 304 paslanmaz çeliğinin mikro-EEİ'sinde boşalım akımı (6-24 A), dielektrik basıncı (20-80 bar) ve takım dönüş hızı (100-400 rpm) parametrelerinin işlemeye etkisini (TKM, TAM, koniklik ve ortalama aşırı kesme) incelemişler ve parametreleri optimize etmişlerdir. Deneysel çalışmanın tahmininde yapay sinir ağları ve yüzey sonuç modeli (RSM) kullanan yazarlar RSM ile çoklu optimizasyon sonucunda mikro delme işlemi için 10,18 A, 58,7879 bar ve 100 rpm değerlerinin en iyi koşullar olduğunu belirtmişlerdir [29].

Amorim vd. WC-Co malzemenin bakır-tungsten takım elektrotlu EEİ'sinde boşalım akımı (6-32 A), vurum süresi (3,2-400 μ s), görev döngüsü (0,11-0,89) ve açık devre voltajı (80-200 V) parametrelerinin TKM, TAM ve Ra üzerine etkilerini araştırmışlardır. Karbür malzeme için parametrelerin üç aşamada optimizasyonu ile kullanılabilir parametre-sonuç kılavuzları hazırlamışlardır [30].

Çakıroğlu ve Günay, L2 takım çeliğine elektro erozyon ile tornalama yöntemini kullanmışlardır. Boşalım akımı (3, 6, 12 A), vurum süresi (3, 6, 8 μ s) ve vurum aralığı (5, 6, 7 μ s) parametrelerinin TKM (0,0089-0,2473 mm³/dk), TAM (0,0001-0,0489 mm³/dk) ve Ra (2,27-7,25 μ m) sonuç değerleri üzerine etkilerini incelemiş. Taguchi (L₉) ile gri ilişkisel analiz kullanarak performans sonuçlarının çoklu optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar optimizasyon sonucunda doğrulama deneyinde elde edilen 0,7834 gri ilişkisel derece (GRG) ile başlangıç GRG değerini (0,6265) %25,04 iyileştirmişlerdir. Doğrulama deneyinde I_p:3A, Ton:8 μ s, Toff:6 μ s parametreleri için 0,0286 mm³/dk TKM, 0,00012 mm³/dk TAM ve 2,0563 μ m Ra sonuçlarını elde etmişlerdir [31].

Mausam vd. (2016) karbon fiber bazlı epoksi kompozitlerin EEİ'sinde genetik algoritma (GA) yaklaşımını kullanarak parametre incelemesi yapmışlardır. TKM (0,00043-0,002 g/dk) ve TAM (0,000031-0,000408 g/dk) sonuçlarının boşalım akımı (1, 3, 5 A), referans voltajı (20, 40, 60 V), vurum süresi (120, 150, 180 μ s) ve görev döngüsü (40, 50, 60 %) parametreleri ile değişimini incelemişlerdir. Yazarlar regresyon analizi sonucunda tahmin ve deney sonuçları arasında ortalama hata yüzdesini TKM ve TAM için sırasıyla %12,18, %25,88 olarak bulmuşlardır. Optimal TAM sonucunu yazarlar (1A, 60V, 180 μ s, %60) 0,0000125 g/dk olarak bulmuşlardır. GA yöntemi ile %70 oranında iyileştirme sağlamışlardır. [32].

Yu vd. (2004) kuru-EEİ frezeleme, EEİ frezeleme ve klasik EEİ (dalma erozyon) kullanarak sement karbür malzemesine kanal açma ve üç boyutlu delik (\emptyset 13 derinlik, 1 mm derinlik) delme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre kanal açma işleminde kuru-EEİ'de EEİ frezelemeye göre 6 kat daha iyi TKM ve 3 kat daha düşük TAM elde etmişlerdir. Üç boyutlu delik delme işleminde işleme zamanı

karşılaştırıldığında klasik-EEİ'nin en düşük sürede işleme yapabildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar tarafından dalma erozyon işleminde takım aşınması %10-15 arasında olduğu, klasik-EEİ'de takım aşınmasından kaynaklı delik yarıçap hatasının negatif yönde gerçekleştiği, kuru-EEİ'de yarıçap hatasının en düşük olduğu gösterilmiştir [33].

Baghel ve Mali (2018) TiN-Al₂O₃ seramik malzemesine mikro EEİ ile negatif polariteli tungsten takım elektrotu (Ø200 µm) kullanarak mikro delik delme işlemi yapmıştır. Deneysel parametreleri olarak dönme hızı (900, 1200, 1500 rpm), kapasitans (0,01, 0,1, 0,4 µF), referans voltajı (90, 110, 130 V) parametrelerinin değişken olarak ve ilerlemeyi 1,5 mm/dak olarak belirlemişlerdir. Araştırmacılar Taguchi L9 deney tasarımına göre değişkenlerin TKM (0,003-0,007 mm³/dk), TAM (0,0003-0,004 mm³/dk), BA, radyal kesme (60-90 µm), koniklik açısı (0,09-0,34 radyan) ve dairesellik üzerine etkilerini incelemiştir. Referans voltajı ve kapasitanstaki artış vurum enerjisini arttıracığından (40-3380 µJ), bu artışın elektron hareketliliğinde yükselmeye sebep olarak TKM'yi arttıracığını belirtmişlerdir. 1200 rpm dönme hızı performans sonuçları için en uygun değer olarak görmüş ve vurum enerjisinin geometri üzerine etkisini incelemek amacıyla dönme hızını sabit tutarak 6 deney yapmışlardır. 400-500 µJ vurum enerjisi aralığında TKM (0,0045-0,0050 mm³/dk) orta, TAM (0,000075-0,00015 mm³/dk) en az, radyal kesme (55-65 µm) ve koniklik açısı değerleri en iyi dairesellik olmak üzere en az hesaplanan performans sonucu değer aralığı olarak belirtmişlerdir. Yazarlara göre TAM vurum enerjisi ile artar, kapasitansın koniklik açısı üzerine etkisi düşük seviyededir. Yazarlar işleme sırasında artık tabaka gözlemlenmediğinden mikro EEİ'nin belirlenen koşullarda makro işlemeye kıyasla daha etkili olabileceğini vurgulamışlardır [34].

Ganachari vd. (2019) içi boş bakır takım elektrot kullanarak kuru-EEİ ve yarı-kuru EEİ arasında karşılaştırma yapmak amacıyla yay çeliğine (100x100x2 mm) delik delme işlemi uygulamışlardır. Dielektrik olarak yeşil çevre anlayışı ile yarı-kuru EEİ'de oksijen ve su karışımı kullanmış, kuru-EEİ de sadece hava kullanmışlardır. 5 lt/dk akış hızında dielektrik geçişini bakır boru içinden iş parçasına doğru sağlamışlardır. Deneyleri Taguchi L9 ortogonal dizinine göre gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar işleme sırasında boşalım akımı (10, 14, 18 A), referans voltajı (50, 60, 70 V),

vurum süresi (100, 200, 300 μ s), dielektrik basıncı (0,5, 1, 1,5 bar) parametrelerinin TKM, TAM ve yüzey morfolojisi üzerine etkilerini incelemiştir. Kuru-EEİ için TKM (0,003-0,018 mm^3/dk) üzerine boşalım akımının etkisinin düşük, TAM (0,000013-0,0010 mm^3/dk) için ise dielektrik basıncının etkisinin düşük olduğu söylenmiştir. Yarı-kuru EEİ için TKM (0,0067-0,031 mm^3/dk) üzerine referans voltajı ve vurum süresi parametrelerinin önemli bir etkisinin bulunmadığı, TAM (0,0001-0,001 mm^3/dk) için ise dielektrik basıncı ve vurum süresi parametrelerinin etkisinin düşük olduğu belirtilmiştir. Dielektrik basıncı erimiş malzemeyi (döküntüyü) temizlemesi sebebiyle TKM'de gelişmeye, takım ve iş parçası arasındaki teması korumaya yardımcı olurken TAM için tam tersi durum söz konusudur. Kuru-EEİ ve yarı-kuru EEİ işleme SEM sonuçlarında yüzey morfolojisini inceleyen yazarlar yarı-kuru EEİ'nin mikro çatlaklar, derin kraterler, beyaz tabaka, koniklik ve darbe delikleri yönünden daha iyi bir sonuç gösterdiğini belirlemiş, sıvı-gaz karışımı işlemenin termal hasarı önlediğinden bahsetmişlerdir. Yarı-kuru EEİ daha iyi TKM ve daha düşük TAM sonucunu verirken döküntü birikmesi sorununa çözüm getirmektedir [35].

BÖLÜM 3

SERAMİKLER VE SEMENTE KARBÜR

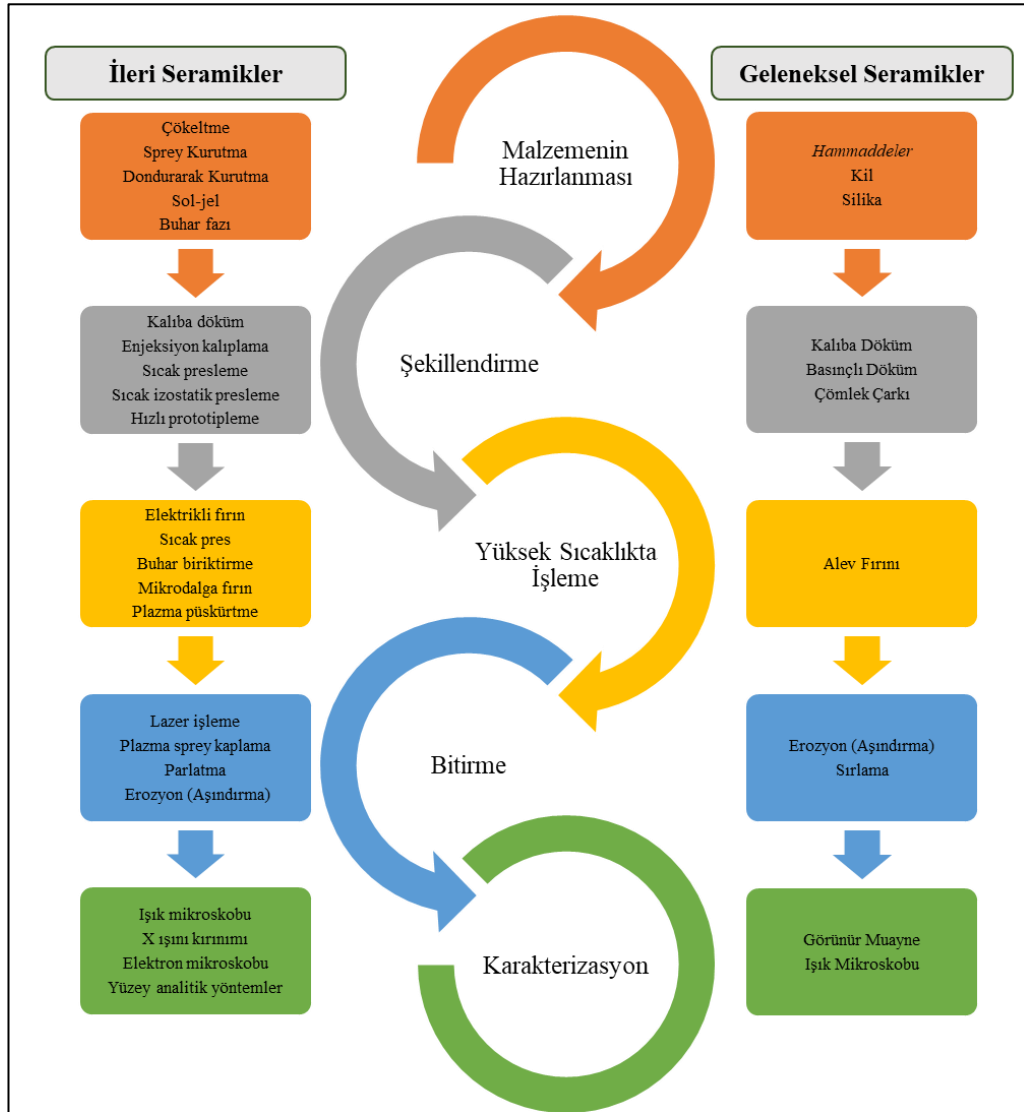
Seramik malzemeler, hem iyonik hem kovalent inorganik fazlardan oluşan, kısmen amorf yapıda ve istenilen şekilde “sıkıştırılmış” tozun yüksek sıcaklıklarda sinterleme ile birleştirilmesiyle meydana gelen sentetik malzemelerdir [36]. Aslında çağlar boyu gelişen seramik bilimi tanımlamanın tek düze indirilemeyeceği bir kapsamdadır. Seramikler için bilim, mühendislik ve imalat alanlarında farklı tanımlamalar yapılmaktadır.

Çağlara adını veren seramikler bu süreçte de insanlara çoğu alanda kolaylık sağlamıştır. Geleneksel olarak adlandırılan eski seramikler inşaat, sanat, mutfak eşyaları gibi çeşitli alanlarda kullanım gösterirken seramiklerin üstün fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklı avantajlar daha spesifik şekilde ve daha geniş alanlarda kullanım sağlayacak yeni seramiklerin üretilmesine ve geliştirilmesine olanak sağlamıştır [37].

Genel olarak seramikler geleneksel seramikler (camlar, killer, refrakterler, aşındırıcılar, çimentolar) ve ileri seramikler olarak sınıflandırılabilir [38]. Batıya seramik malzemelere olan ilgi artışının nedenlerine bağlı olarak seramiklerin genel özelliklerini, yüksek sıcaklık dayanıklılığı, sertlik, metallerle göre hafiflik, kimyasal olarak kararlı, hammadde olarak erişilebilir ve ucuz; erozyon, aşınma ve oksitlenme direnci, sürtünme katsayısının düşüklüğü, yüksek basma mukavemeti olarak sıralamıştır [39]. Sert ve kırılabilir yapıda olan bu seramiklerin geleneksel imalat yöntemleriyle işlenmesi bazı sıkıntıları da beraberinde getirmiştir (iş parçasında derin çatlaklar, işleme süresindeki uzunluk, kısalan takım ömrü vb.). Geleneksel olmayan imalat yöntemlerindeki gelişme, iç ve dış piyasada yüksek ihtiyaç duyulan ileri seramik ürünlerin işlenmesinde de kolaylık sağlamış, üretimine hız kazandırmıştır [40,41].

3.1. GELENEKSEL SERAMİKLER

Geleneksel seramikler yüksek plastisitesi nedeni ile şekillendirmeye yatkın temel bileşen kilden oluşur. Bu seramikler, alüminyum, silikon ve oksijenden oluşan doğal silikat ve alüminosilikat mineralleri ile karşı katyonlardan (Ca, Mg, Na, K, vb.) elde edilir. Ayrıca son şekli elde etmek için fırınlama gerektirmeyen inorganik çimento esaslı malzemeleri (çimento, alçı ve kireç) de bu gruba dahildir. Yetersiz özellikleri, az işlevsellik ve yetersiz güvenilirliği ile gelişen sanayi için olumsuz özellikler barındırır. Geleneksel ve ileri seramikler Şekil 3.1’de gösterilen prosedürler ile imal edilebilmektedir.



Şekil 3.1. Geleneksel ve ileri seramiklerin imalat aşamaları.

3.2. İLERİ SERAMİKLER

Son asırda kullanılan ve geliştirilen ileri seramiklere “özel”, “teknik” veya “mühendislik” seramikleri de denmektedir. Bu seramikler üstün mekanik özellikler, korozyon – oksidasyon direnci, elektrik, optik veya manyetik özellikler sergilerler.

İleri seramikler yüksek saflıkta sentetik kimyasallar tarafından oluşturulan gelişmiş seramik grubu olarak bilinmektedir. Genellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılan bu seramikler kimyasal olarak oksitlerden, nitrürlerden ve karbürlerden oluşur. Elmas ve grafit de yapılan tanım gereği bu kategoriye aittir. Bu nedenle, ileri seramikler genellikle bileşimlerine göre oksit veya oksit olmayan seramikler olarak sınıflandırılır. İleri seramiklerin gelişmesiyle doğal olarak çatışan özellikleri uyumlu olarak birleştirebilen, çok işlevli seramikler oluşturulmuştur [42].

İleri seramikler çeşitli uygulama alanlarında kullanımlarına göre sınıflandırılabilir.

Yapısal seramikler; metallerin bozulmaya uğradığı yüksek stresli, yüksek sıcaklıkta veya aşındırıcı ortamlar için tercih edilir. Kullanım alanları arasında motorlar, aşınan parçalar, termal yönetim, işleme ekipmanı ve biyomedikal ve dental bileşenler bulunur. Bu kategorideki bileşimleri alümina, silikon nitrür, silikon karbür, zirkonya, bor nitrür, mullit, kordiyerit ve molibden disilisit olarak belirtilebilir.

Elektronik seramikler; kapasitör, sensör, yarı iletken, süper iletken, iyonik iletken, varistör ve substrat / paketleme uygulamaları için tercih edilir. Elektronik yüzeyler için alümina, alüminyum nitrür ve bor nitrür kullanılır. Titanat bileşimleri ise kapasitörler, sensörler, aktüatörler ve ferroelektrikler için kullanılır.

Optik seramikler ve camlar; teknolojik ekran, katı hal lazerleri, optik veri iletimi, fotoelektrikler, dalga boyu ayarlı pencereler ve tasarlanmış aynalar gibi uygulamalarda tercih edilir. Yaygın bileşim aileleri titanatlar, nadir toprak oksitleri ve kalkojenit camlardır.

Aşınma ve korozyon direnci seramikler; pompa bileşenleri (contalar, yataklar, pistonlar), musluklar (contalar, valfler) ve döner ekipman (yataklar) için tercih edilir. Yaygın bileşimler arasında alümina, zirkonya, silikon karbür ve silikon nitür bulunur.

Manyetik seramikler; aktüatör, sensör, bilgi depolama, transformatör, kayıt, sonar ve mikrodalga uygulamaları için kullanılır. Bu seramikler için ferritler, nadir toprak oksitleri ve bakır oksit bileşimleri kullanılmaktadır.

Takım seramikleri (işleme ve taşlama); uzun ömür ve yüksek verimlilik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu uygulama alanları için elmas, silisyum karbür, tungsten karbür, silisyum nitür ve alümina uygun bileşimler olarak belirtilebilir.

Kaplama seramikleri; koruma, aşınma ve korozyon direnci uygulamalarında kullanılır. Seramik kaplamalar için titanyum karbür ve nitür, elmas bileşimleri, silisyum karbür ve diğer bileşimler kullanılmaktadır.

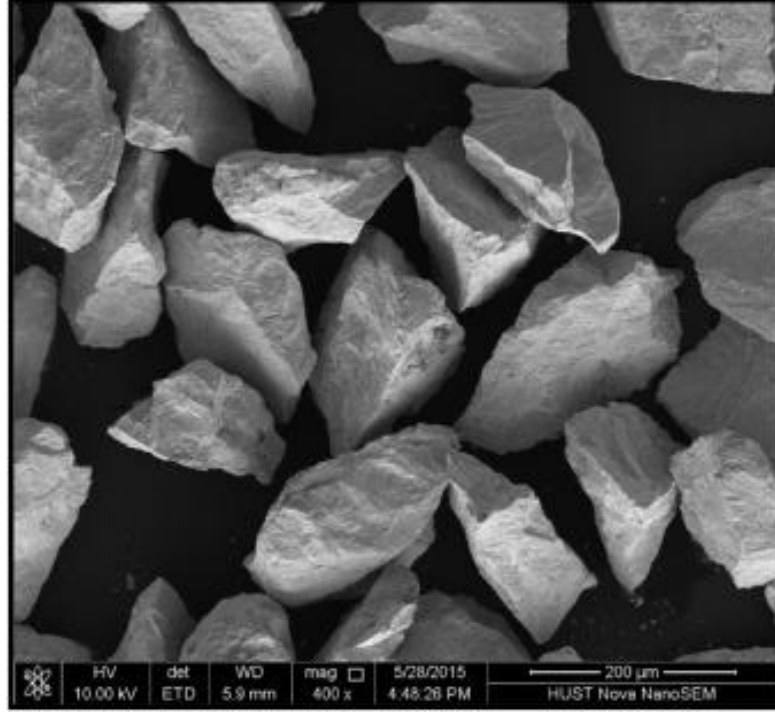
Ayrıca ileri seramikler otomotiv, nükleer, biyomedikal ve termal uygulamalarda sıklıkla kullanılan malzeme çeşitlerini içermektedir [43].

3.3. SEMENTE KARBÜR

Semente karbürler üstün özellikleri ile yüksek aşınma direnci ve tokluğa sahip uygulamalarda kullanılırlar. Semente karbürler, ana bileşen olarak sert, kırılğan ve yüksek erime noktasına sahip olan ince taneli refrakter karbür (WC, TiC, TaC, Cr₃C₂ veya Mo₂C) parçacıklarından ve nispeten yumuşak ve sünek olan bağlayıcı metal kobaltdan (nadir olarak nikel ve diğer demir grubu metalleri) oluşur [44,45].

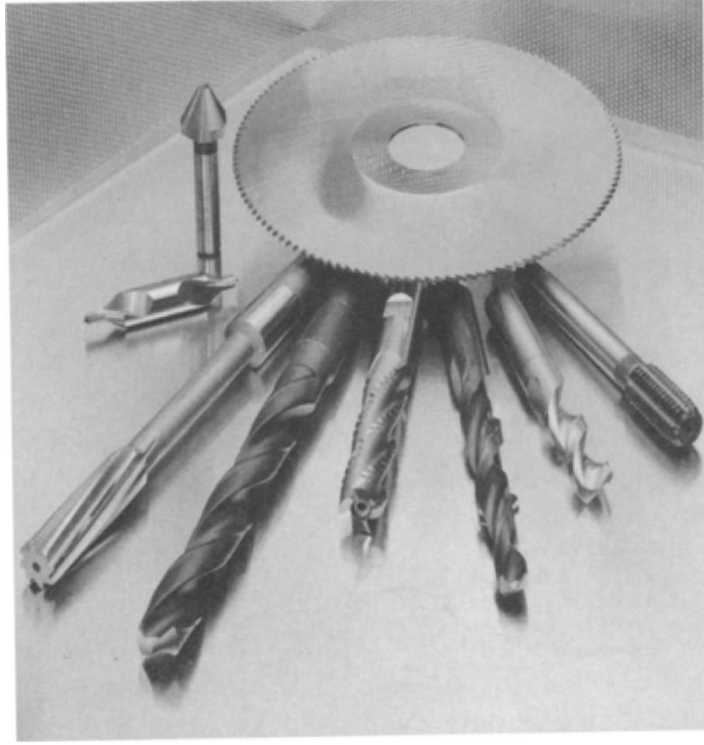
Semente karbürün ana bileşeni refrakter malzemelerden en yaygın olarak kullanılan tungsten karbür malzemedir. Tungsten karbür, 1850–2000 °C'de tungsten metal ve karbon arasında kimyasal reaksiyonla sentezlenir. Yaklaşık 2870 °C olan yüksek bir erime noktasına sahiptir. Yüksek sertlik, yüksek erime noktası, iyi elektrik ve termal iletkenlik ve yüksek korozyon direnci gibi çekici mekanik, fiziksel ve kimyasal

özellikleri nedeniyle çoğu endüstride oldukça istenen bir malzemedir [46]. Tungsten karbür tozunun SEM mikrografı Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Tungsten karbür tozunun mikro ölçekte görünümü [46].

Semente karbüre eklenen tungsten karbürün tane boyutu endüstride dişçilik, kesme bıçakları, delme, talaş kaldırma, metal ve ahşap işleme (Şekil 3.3) gibi farklı uygulamalar için önemli kriterdir. Takım ve kalıp endüstrisinde tane boyutu büyüklüğü 1-2 gm aralığındadır. Altmikron tanecikli tungsten karbür içeren semente karbürler yüksek aşınma direnci ve sertliğe sahipken düşük süneklik özelliği gösterirler. Altmikron bağlayıcı içeriği %15-20 olan semente karbürler yüksek hız çelikleri ile eşdeğer toklukta ve daha yüksek aşınma direncine sahiptirler. Frezeleme takımları için yüksek aşınma direncine sahip 1000-2200 HV sertlikte semente karbürler geliştirilmiştir. İşleme verimliliğini etkileyen faktör sadece takım malzemesi değil aynı zamanda takım ömrü de etki faktörlerinden biridir. Semente karbürün takım ömründeki verimliliği homojen yapısı ve yüksek güvenilirlik (düşük takım aşınması, kesme kenarı sağlamlığı vb.) faktörü ile mümkün olmuştur [47].



Şekil 3.3. Çeşitli alanlarda kullanılan işleme takımları [47].

Şekillendirme prosesleri için en önemli kriter olan aşınma direnci karbür malzemeye olan talebin giderek artmasına neden olmuştur. Karbür malzemeler belirtildiği gibi yüksek sertlik, yüksek basınç dayanımı, ancak düşük gerilme mukavemeti ile karakterizedir. Geleneksel yöntemler yüksek gerilme yükleri kullanarak işleme yapmaktadır. Bu nedenle karbürlerin işlenmesi, özel işleme yöntemleri gerektirir. Takım yapımında taşlama ve elektro erozyon ile işleme (EEİ) endüstriyel standartta kendisini daha çok göstermektedir [1].

Semente karbürler 1923 yılında Almanya’da üretiminden itibaren 100 yıllık tarihinde sürekli büyüyen bir pazar olmaya devam etmektedir. Karbürle bu sürenin ardından imalat endüstrisi için geçici bir çözümden çok başarılı ve neredeyse yeri doldurulamaz bir malzemeye dönüşmüştür. Teknoloji ve malzeme alanındaki yeniliklerin getirdiği yeni takımlama çözümlerinin gerekliliklerini üstün özellikli ve uygun maliyetli karbür takımlar karşılayabilecektir. Sert metaller için günümüzde bile WC ve Co’nun optimum kombinasyonunun en iyi sert karbür ve metalik bağlayıcı kombinasyonu olduğu düşünülmektedir [48].

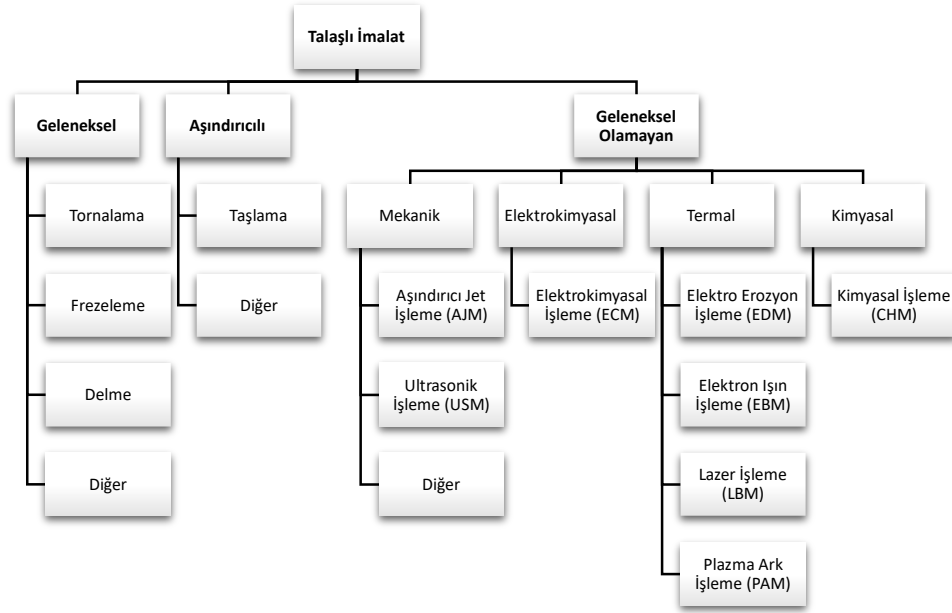
BÖLÜM 4

TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ

Talaşlı imalat, fazla olan malzemenin çalışma parçasından çeşitli yöntemlerle çıkarıldığı ve böylece geriye istenilen geometrinin elde edildiği bir şekillendirme işlemleri bütünüdür. Talaşlı imalat yöntemlerini Şekil 4.1’de gösterildiği gibi geleneksel, aşındırıcılı ve geleneksel olmayan talaşlı imalat olarak gruplandırabiliriz.

Malzemeyi mekanik olarak kesmek için keskin ve iş parçasından daha sert bir kesme ucunun kullanıldığı yöntem geleneksel talaşlı imalat yöntemidir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri tornalama, frezeleme, delme ve diğer talaşlı imalat yöntemleri (planyalama, broşlama vb.) olarak ayrılır. Diğer bir yöntem sert ve aşındırıcı parçacıkların etkisiyle malzemeyi mekanik olarak uzaklaştıran aşındırıcılı talaşlı imalat yöntemidir. Bu yöntem taşlama ve diğer aşındırıcılı imalat yöntemlerini (honlama, lepleme vb.) içerir. Geleneksel olmayan imalat yönteminde ise malzemeyi çıkarmak için keskin kesici alet ve aşındırıcı parçacıklar olmadan çeşitli enerji formları kullanılarak talaş kaldırma işlemi gerçekleşir. Bu imalat yöntemi mekanik, elektrokimyasal, termal ve kimyasal enerji formlarından oluşur [8].

Çoğunlukla kullanılan ileri imalat çeşitlerini; aşındırıcı jet işleme, kimyasal işleme, elektron ışın işleme, elektro kimyasal işleme, elektro erozyon işleme (EEİ), lazer işleme, plazma ark işleme, ultrasonik işleme ve su jeti ile işleme olarak sıralayabiliriz [49].



Şekil 4.1. Talaşlı imalat yöntemleri ve sınıflandırılması.

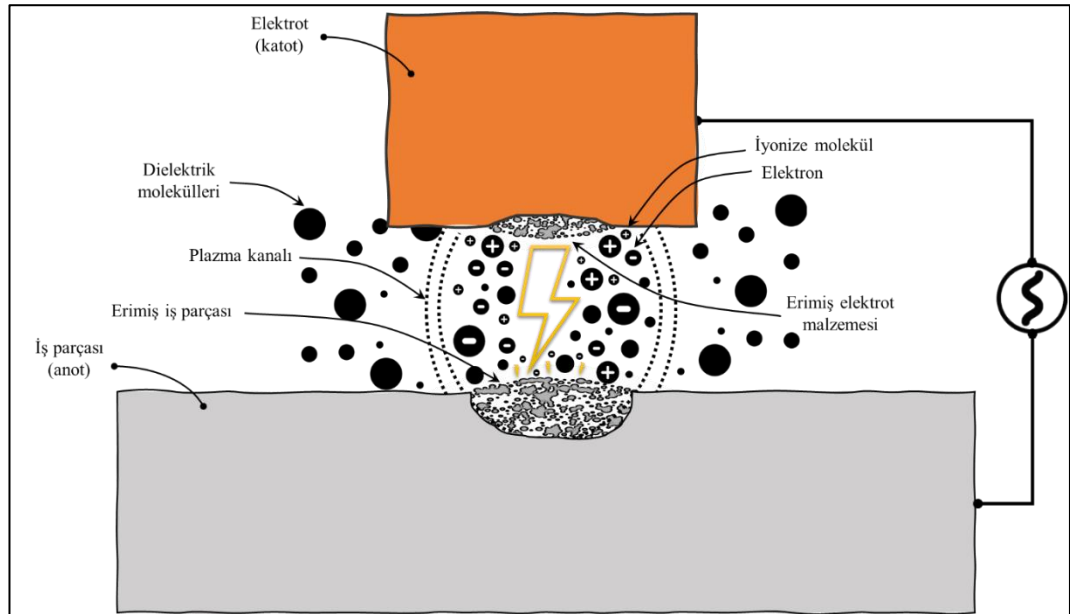
Yıllarca kullanılan geleneksel seramik imalat yöntemleri teknik seramiklerin şekillendirilmesi sırasında oluşan zorluklara (kısılan takım ömrü, ince işçilik, aşırı artık malzeme, çatlak oluşumu, artan maliyet vb.) karşı cevap vermede yetersiz kalmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerinin yetersizliği, işlemede zorluk, uzun işleme süresi, çatlak oluşumunun en aza indirilmesi imalat sektörünü ileri tekniklerin kullanılmasına yönlendirmiştir. İleri imalat yöntemleri malzeme özelliklerini bozmadan, malzeme israfını ve çatlak oluşumunu en aza indiren ekonomik yöntemlerdir [5,6]. Diaz vd. yaptığı derleme çalışmasında endüstride kullanılan mukavemet ve ağırlık gibi teknik özelliklerinden tercih edilen bazı seramik kompozitlerin yüksek sertlik ve gevrekliklerinden dolayı geleneksel yöntemlerle işlenmesinin zor olduğuna değinmiştir [50]. Yüksek maliyetli işleme imalat sektörü için kaçınılması gereken bir durumdayken ileri seramiklerin geleneksel işleme yöntemleriyle işlenebilmesi için yüksek maliyetli (elmas ve kübik boron nitrat) takımların kullanılması gerekmektedir [51].

İleri seramiklerin ve kompozitlerinin işleme maliyetleri ve mekanik özelliklerinden dolayı geleneksel işlemin aksine temassız işleme yapabilen elektro erozyon yöntemi ile işlenmesi endüstri tarafında alternatif yöntem olarak kabul edilmektedir [7]. Ancak elektro erozyon işlemi için 100-300 Ω cm elektriksel direnç eşiği, uygulama alanı için

bir sınırlama getirmiştir. Bazı çalışmalarda olumlu sonuç alınmış olan yardımcı elektrot yöntemi ile bu sınırlandırmaya da çözüm bulunarak elektro erozyon yöntemine daha çok ilginin artması sağlanmıştır. Ayrıca seramik-metal kompozit malzemelerin elektro erozyon ile işlenmesi diğer geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldığında işleme hızının yavaş olmasına karşın yüzey hasarını en aza indiren yöntem olarak görülmüştür. Seramik ve kompozitlerinin elektro erozyon ile işlenmesi bu avantajlar sayesinde uygun bir tercih sebebi olmaktadır [52–54].

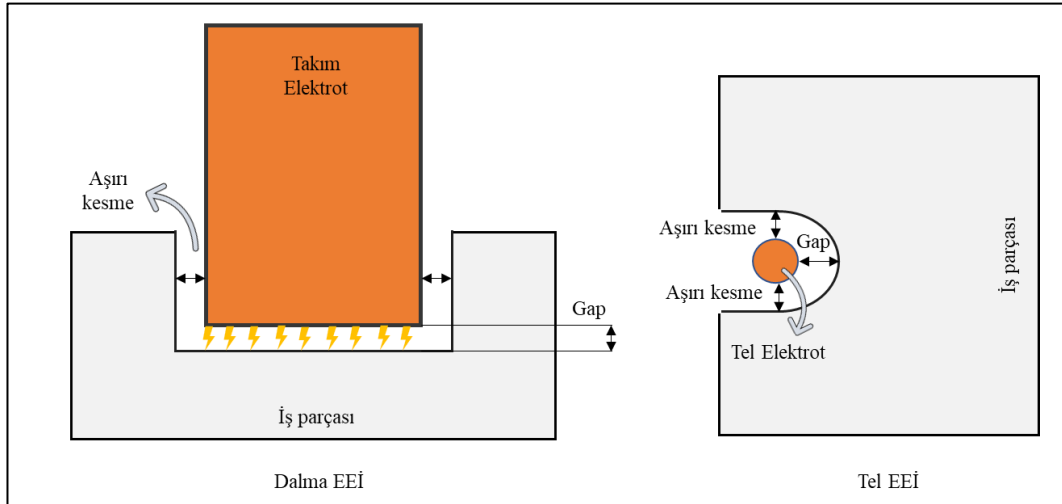
4.1. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), en yaygın olarak kullanılan geleneksel olmayan malzeme kaldırma işlemlerinden biridir. EEİ yüksek frekanslı boşalım akımında kıvılcım oluşturularak kıvılcımın termal enerjisi ile malzeme kaldırma işleminin gerçekleştirildiği bir elektro termal işleme sürecidir (Şekil 4.2). Kıvılcımın oluşabilmesi için iki iletken elektrot; takım (katot) ve iş parçası (anot) arasında potansiyel fark uygulanır. Bölgesel olarak oluşan yoğun termal akı, anlık olarak 12000 °C'ye kadar sıcaklık artışına neden olabilir. Sıcaklıktaki bu tür artış malzemenin eriyerek veya buharlaşarak kaldırılmasını sağlar. Döküntü olarak adlandırılan erimiş malzeme dielektrik yardımı ile uzaklaştırılır [55].



Şekil 4.2. Elektro erozyon ile işleme kıvılcım mekanizması.

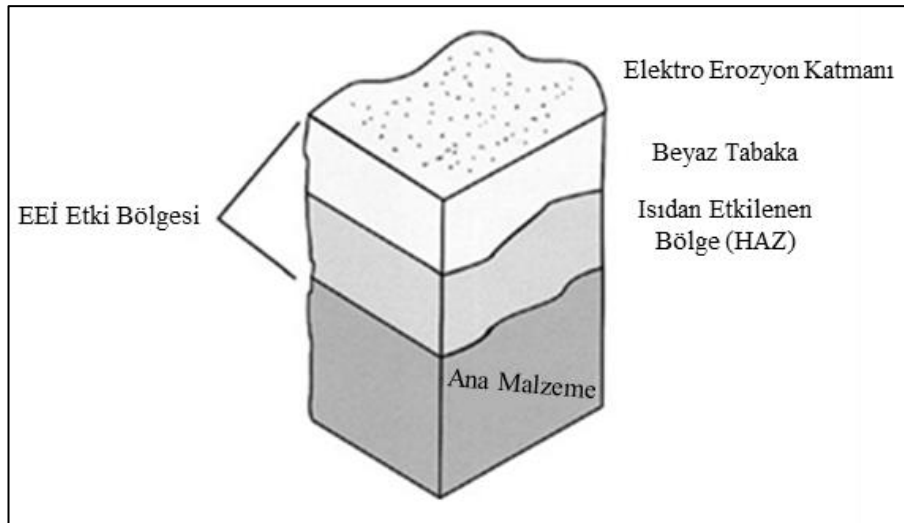
Elektro erozyon ile işleme teknolojisi ilk olarak ikinci dünya savaşı sırasında hem Sovyetler Birliğinde otomobillerde kullanılan kontak kesicilerin içerisindeki tungstenin aşırı aşınmasından yola çıkılarak hemde ABD’de kırık kılavuz ve matkap parçalarını çıkarmak için bir yöntem geliştirmek amacıyla keşfedilmiştir. Bu durum birbirinden habersiz olarak yapılan çoklu keşif prensibine işaret etmektedir. Elektro erozyon ile işleme teknolojisi temassız bir işleme teknolojisi olduğundan işleme sırasında aşırı kesme bölgeleri oluşur. Boşluk (gap) ve aşırı kesme bölgeleri, işleme sırasında takım ile iş parçası arasında kıvılcımların oluşmasını sağlayacak bölgelerdir. Aşırı kesme bölgesi takım köşesi ile iş parçası duvarı arasında kalan bölgeye verilen isimdir. Gap mesafesi takım işleme yüzeyi ile iş parçası yüzeyi arasındaki boşluktur (Şekil 4.3). Gap mesafesi aşırı kısa olursa işleme sırasında kısa devreler ve düzensiz kıvılcım atımları oluşabilir. Bu durum toleranslı işlemeye sebebiyet verir. İşleme sırasında ilk önce kıvılcım mesafesine en yakın bölgeler aşınır. Bu işlem, işleme süresi veya mesafesi bitene kadar tekrarlı olarak devam eder. Gap mesafesi arttıkça kıvılcım oluşturacak bölge azalır ve yüzeysel olarak daha pürüzlü bir işlem gerçekleşir [56].



Şekil 4.3. Dalma ve Tel tipi EEİ’de aşırı kesme ve gap bölgeleri.

Elektro erozyon işlemi, işleme bölgesinde sadece görünür yüzey yapısını etkileyen bir uygulama değildir. Elektro erozyon işlemi sonrasında işlenen bölge kesitinin incelenmesi sonucunda üç farklı tabakanın oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.4). Üste bulunan ve kolayca çıkarılabilen elektro erozyon katmanı, iş parçası yüzeyine yapışan

takım elektrotu ve işlenmiş malzemedan oluşur. Bu tabaka erozyon işlemi sırasında sürekli değişir ve işleme sonrasında parçaların birleştirilmesinde kolaylık sağlar. Bir sonraki katman olan beyaz tabaka katmanı, dielektrik malzemesi (karbon) içeren; yeniden katılmış ve dışarı atılmayan ergimiş elektrot (takım ve iş parçası) malzemesinden oluşur. Vurum aralığında ergimiş malzeme dielektrik tarafından hızla soğutularak katılır. Bu durum, beyaz tabaka katmanının sertleşmesini ve kırılma dayanımını sağlar ve bu döngü yapıda mikro çatlaklar oluşturabilir. Beyaz tabaka kalınlığı iş parçası kullanım ömrünü azaltabilir ancak korozyon ve aşınma direncini iyileştirir. Beyaz tabaka içerisinde bulunan karbonun, karbon bazlı dielektrikten ayrılarak (piroliz ile) iş parçasına nüfuz ettiği; su bazlı dielektriklerde ise oksijenin iş parçasına nüfuz ettiği belirlenmiştir. Son katman olan ısıdan etkilenen bölge (HAZ), ergime olmadan sadece tavlanmış bölge olarak tanımlanır. Beyaz tabaka ve ısıdan etkilenen bölge (HAZ) katmanlarının derinliği malzemenin özgül ısı değeri ve vurum enerjisine göre değişkenlik gösterir [57,58].

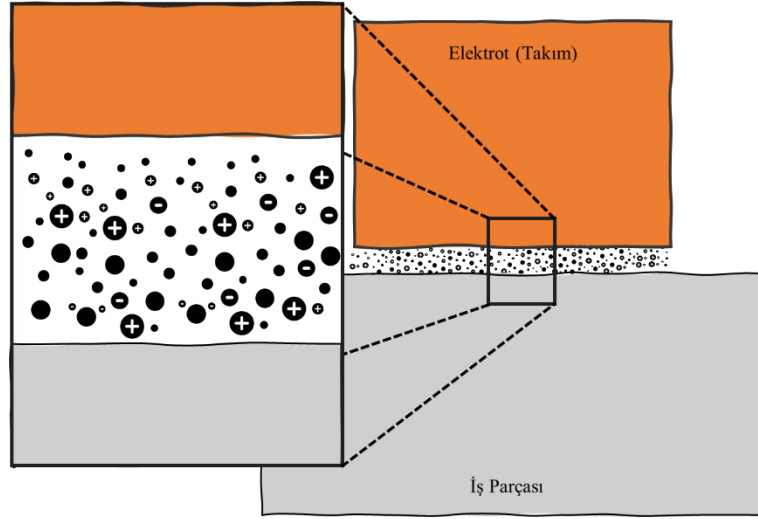


Şekil 4.4. Elektro erozyon işleminden sonra yüzey katmanları [57].

EEİ için alt iletkenlik sınırı $2 \times 10^2 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ dir ve bunun üzerinde bir kıvılcım oluşturmak imkansızdır. Seramik ve kompozitlerinin elektro erozyon ile işlenebilmeleri, boşalım akımını iletmek için bir iletken matrise sahip olmalarıyla mümkün olabilir [59].

4.2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME MEKANİZMASI

Elektro erozyon işleminde elektriksel olarak iletken olmayan dielektrik içerisinde güç kaynağına bağlı elektrotlar, servo mekanizması ile belirli bir mesafede birbirlerine yaklaştırılır. Yeterince büyük uygulanan elektrik potansiyeli dielektriğin yalıtkanlık özelliğini bozarak elektrik akımını geçirmesini sağlayacak iyonik (yükü) parçacıklar oluşturur. Bu süreçte elektro erozyon ile işleme vurum hazırlığı, vurum ve vurum aralığı aşaması olarak üç ana faza ayrılabilir. Elektro erozyon prosedüründeki başlangıç durumu Şekil 4.5'te görülmektedir. Her fazın ayrıntıları aşağıda açıklanmıştır.

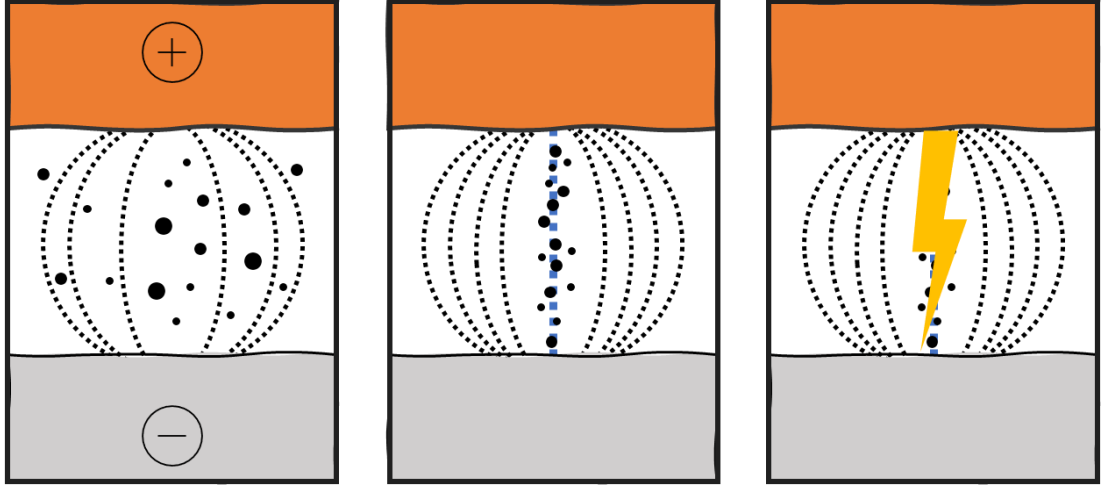


Şekil 4.5. Elektro erozyon ile işlemede takım ve iş parçası başlangıç durumu.

4.2.1 Vurum Hazırlığı Aşaması

İlk olarak açılan güç kaynağı ile elektrotlar arasındaki boşlukta elektrik alanı oluşturulur. Kısa devrelerin oluşmaması veya yeterli potansiyel farkın uygulanabilmesi için elektrotlar arası uygun boşluk bırakılmalıdır. Servo mekanizması ile elektrotlar arası boşluk otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Elektrik alan, elektrotlar arasındaki fark en küçük olduğu noktada maksimum değere ulaşır. Elektrik alan ile elektrostatik kuvvet kazanan iş parçası üzerindeki serbest elektronlar takıma doğru harekete başlar. Takıma doğru hareket eden elektronlar ile dielektrik moleküller arası iyonlaşmaya sebep olan çarpışmalar olur. Tekrar eden bu durum “plazma” olarak

bilinen elektriksel direnci daha az bir kanal oluşur. Kıvılcım aralığında bulunan elektronların ve iyonik parçaların sayısı artar. Artan elektronların takıma, pozitif iyonların iş parçasına doğru hareketi çığ olarak adlandırılır ve bir kıvılcım şeklinde görülür. Bu aşamada akımda bir artış gözlenir. Aşamadaki adımlar Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

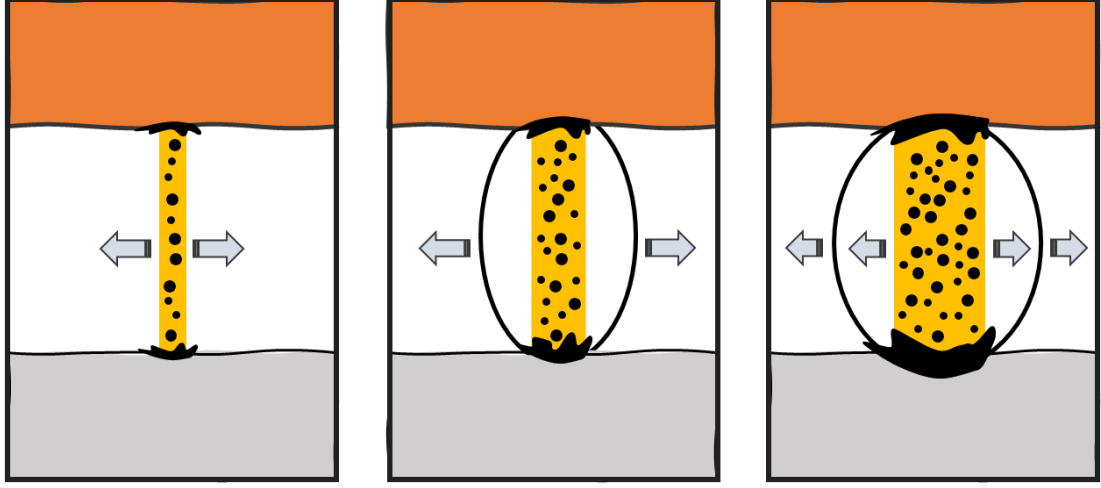


Şekil 4.6. Vurum hazırlığı adımları.

4.2.2. Vurum Aşaması

Plazma kanalından yüksek bir akım geçer ve elektrotların yüzeyinde yüksek bir ısı gözlemlenir. Bu aşamada, yüksek enerjili elektronlar takıma ve pozitif yüklü iyonlar iş parçasına çarpar (pozitif takım polaritesi için). Oluşan yüksek ısı ile iş parçası ve takımın bir kısmı buharlaşır. Bu durum plazma kanalı içinde çok yüksek basınç alanı ve boşaltma (deşarj) kanalı oluşturur. Yoğun dielektrik sıvı plazmaya dönüşerek iyonları kanal çevresindeki elektromanyetik alan tarafından çekilmeye ve plazma kanalı genişlemeye başlar. Plazma kanalının sürekli genişlemeye devam etmesi sıcaklık ve akım yoğunluğunu düşürür. Başka bir deyişle plazma kanal çapının genişlemesi takım ve iş parçası arasında üretilen ve buharlaşmayla kaybedilen ısı termal dengeye ulaştığında durur. Bu genişlemiş kanal, sıvı dielektriğin ve elektrot materyallerinin buharlaşması nedeniyle hala yüksek basınç altındadır. Buharlaşan malzeme, plazma kanalını çevreleyen bir gaz kabarcığı oluşturur. Son durumda boşaltma kanalı içerisinde buharlaşmış elektrot ve karbonlardan oluşan yüksek

sıcaklıktaki plazma içinden geçen güçlü bir akım görülür. Aşamadaki adımlar Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



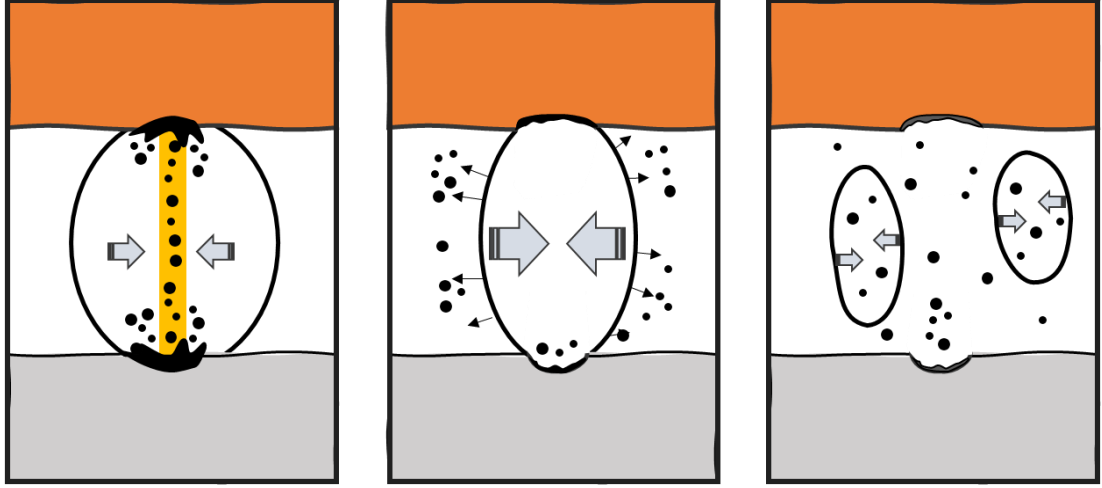
Şekil 4.7. Vurum adımları.

Elektronlar (pozitif iyonlardan daha küçük kütle) daha hızlı reaksiyon gösterdiğinden, ağırlıklı olarak anot malzemesi buharlaşarak aşınır. Bu etki, takım elektrotu katot iken minimum aşınmaya neden olur ve mikro veya ince talaş işleme operasyonlarında (kısa darbe sürelerinde) önem kazanır. Ancak plazma kanalının genişlemesi ile anot yüzeyinde geniş bir alanda yeniden katılaşma olur.

4.2.3. Vurum Aralığı Aşaması

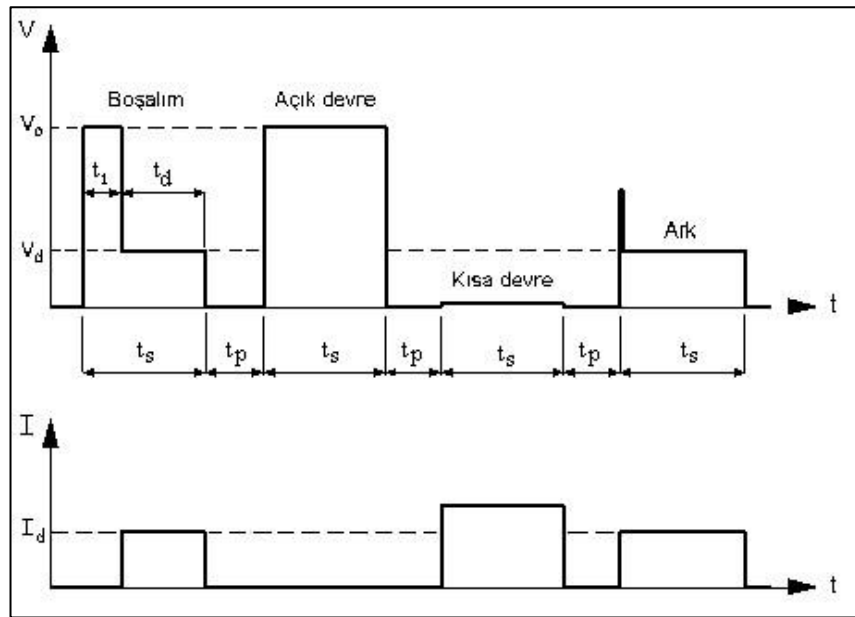
Elektrotlara giden gücün kapatılmasıyla vurum sona erdiğinden plazma kanalı deiyonize olur. Deiyonizasyon ile plazma kanalındaki basınç ve sıcaklık da düşer. Vurum basıncı altında aşırı ısınan elektrot noktalarındaki erimiş malzeme artık anlık olarak kaynamaya ve sıvı kürecikler oluşturmaya başlar. Oluşan gaz kabarcığı çöker ve eriyik malzeme elektrotların yüzeyinde buhar ve sıvı kürecikler olarak belirir. Buharlaşan elektrot malzemesi, oldukça soğuk olan dielektrik ortam ile temas ettiğinde hızla katılaşır ve işleme boşluğundan döküntü şeklinde uzaklaşır. Katı parçacıkların bir kısmı boşlukta kalır ve bir sonraki vurum döngüsü için dielektrik sıvının iyonizasyonuna yardımcı olur. Vurum aralığının yeterince uzun olmaması kalıntıların yeterince atılamaması istenmeyen arklara sebebiyet vererek kıvılcım mekanizmasını

kararsızlaştırabilir. Bu durum takım ve iş parçasında istenmeyen hasarlara sebebiyet verebilir. Aralık süresinin sonuna gelindiğinde güç açılarak döngü tekrardan başlatılır [60]. Aşamadaki adımlar Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

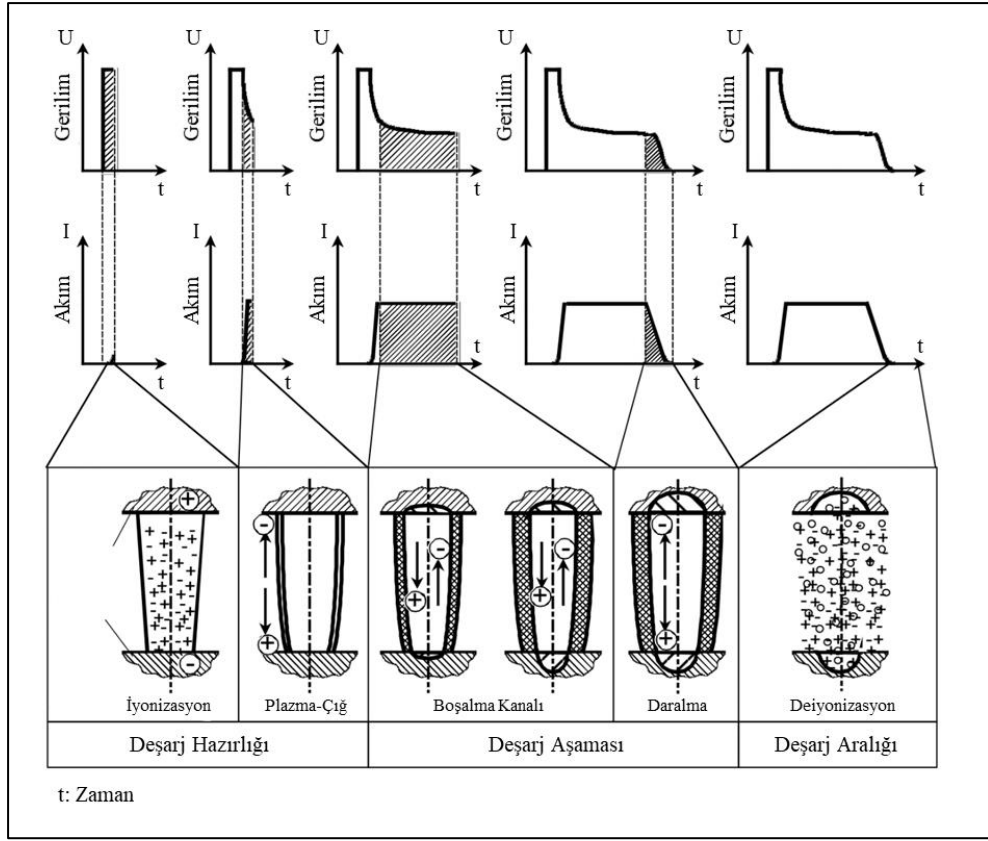


Şekil 4.8. Vurum aralığı adımları.

Elektro erozyon tekniğinde, servo kontrol ile işleme boşluğunda gerçekleşen vurum hareketliliği Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.10’da elektro erozyon ile işlemede temel parametreler olan gerilim [V] ve akımın [I] işleme esnasındaki hareket eğrilerinin fazlara göre değişimi gösterilmiştir.



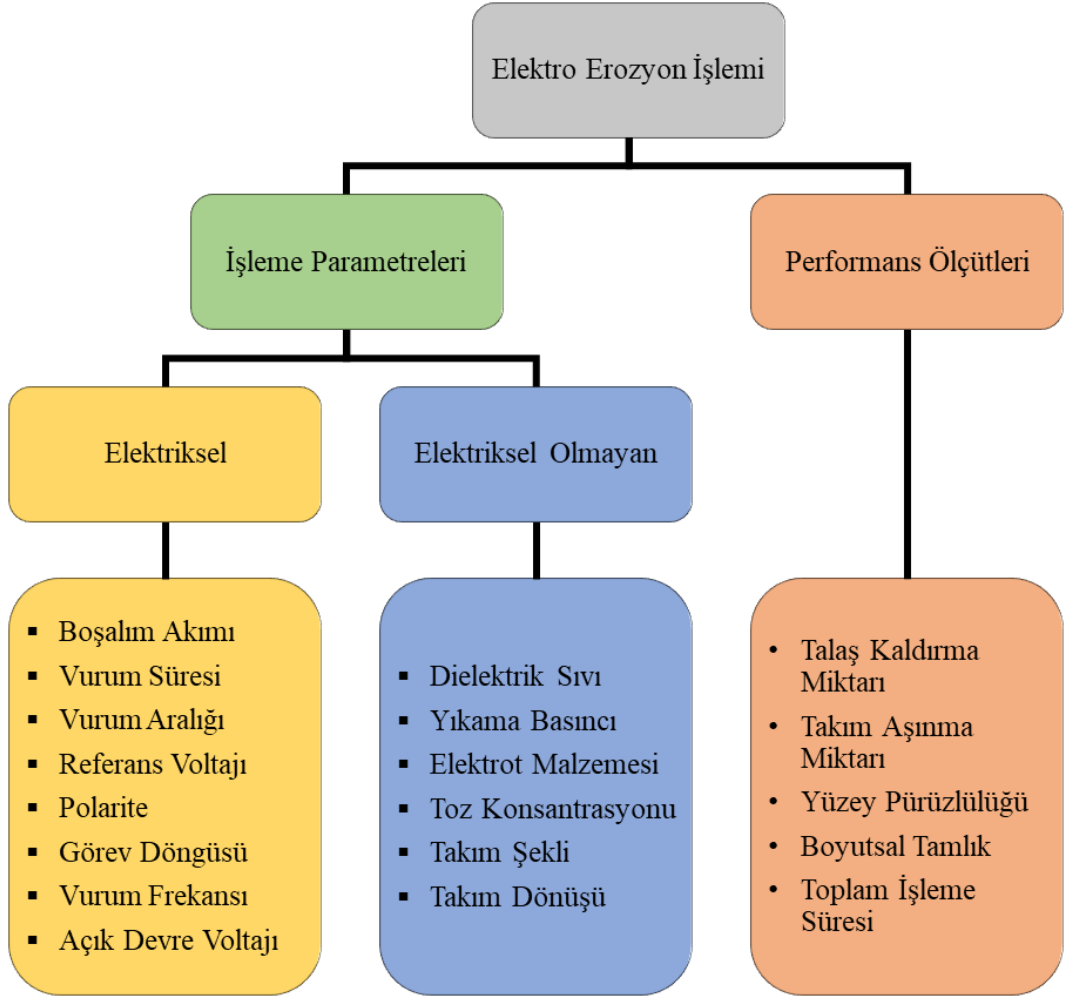
Şekil 4.9. EEİ sırasında oluşan gerilim ve akımın dalga biçimleri [61].



Şekil 4.10. Fazlara göre gerilim ve akımın işleme esnasındaki hareket eğrileri.

Katoda ilerleyen pozitif yüklü iyonların elektronlara kıyasla düşük hareketliliği anotta erozyonun gecikmeyle başlamasına neden olur. Elektronlar da katottan harekete geçtiği için katotta kanal daralmış olarak kalır. Bu nedenle katot üzerindeki plazma kanalı tabanı küçük bir yarı çapa sahip olur (Şekil 4.11).

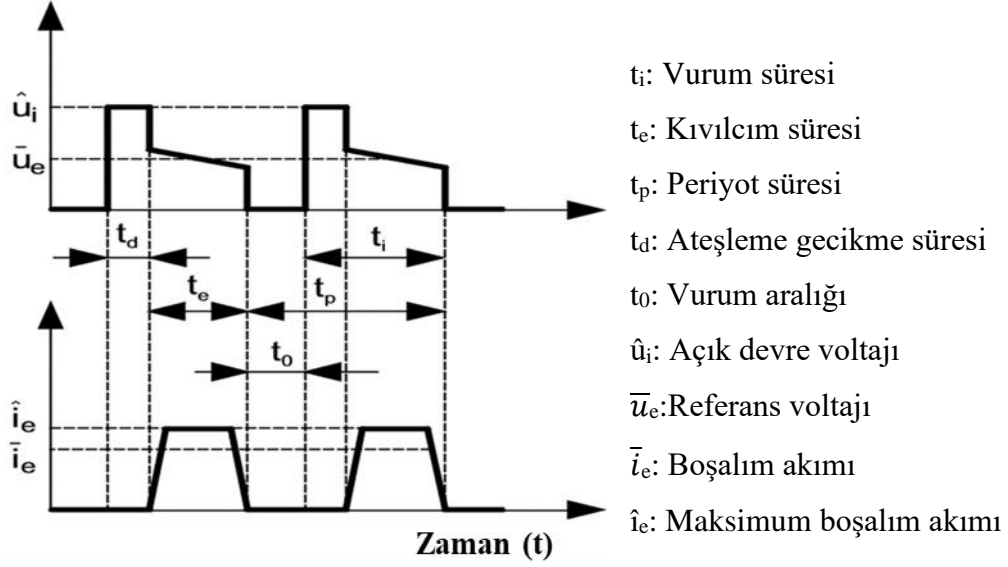
Elektronların daha hızlı ivmelenmesi sebebiyle kısa darbeler ($0,5 \mu\text{s}$ 'den küçük) anottan daha çok malzeme çıkarırken, pozitif iyonlar elektronlara kıyasla büyük kütlelerinden dolayı uzun vurum sonucunda daha fazla ısı üretecek çarpışmalar yapar ve katottan daha çok malzeme çıkarmaya başlar. Bu yüksek ısı ile dar plazma kanalına sahip katotta derin erimiş bölgeler oluşur. Bu duruma ek olarak dar kanala doğru ilerleyen iyonların ivmesinin artması, geniş kanalda elektronların ivmesinin azalması mümkündür.



Şekil 4.12. Elektro erozyon ile işlemede en yaygın kullanılan proses parametreleri ve performans ölçütleri.

4.3.1. Elektriksel Parametreler

Şekil 4.13'te elektriksel parametreler, elektro erozyon ile işlemede gerilim ve akımın kıvılcım boşalımları ve işleme esnasındaki hareket eğrilerinin değişimi içerisinde gösterilmiştir. Elektro erozyon için gereken elektriksel parametreler şu şekildedir:



Şekil 4.13. Elektro erozyon ile işlemede elektriksel parametrelerin akım ve gerilim hareket eğrileri içerisinde tanımlanması [64].

Kıvılcım (deşarj) süresi (t_e): Boşalım sırasında akımın aktığı zamandır.

Ateşleme gecikmesi (t_d): Voltaj açılmasından boşalım oluşana kadar geçen süredir, diğer bir deyişle akımın mevcut yükselişine kadar. Ateşleme gecikmesi, boşaltma kanalını kurmak ve dielektrik sıvının iyonlaşması için gereklidir. Bu sebepten ateşleme gecikmesinin süresi çalışma boşluğunun durumuna bağlı olarak ayarlanmalıdır.

Vurum süresi (t_i): Voltajın açılmasında itibaren oluşan darbe süresidir (jeneratör ile ayarlanabilir). Kıvılcım süresi ile ateşleme gecikmesinin toplamına eşittir:

$$t_i = t_e + t_d \quad (4.1)$$

Sabit darbe süreli izofrekans jeneratörlerinde, çalışma aralığındaki farklı ateşleme koşulları nedeniyle, farklı vurum süreleri meydana gelebilir.

Vurum aralığı (t_0): Voltajın kapanması ile açılması arasındaki kıvılcımın oluşmadığı zaman aralığıdır (jeneratörde ayarlanabilir). Bu süre zarfında, önceki kıvılcımların boşaltma yolu (işleme bölgesi) deiyonize edilir, böylece elektrotlar arasında gerçekleşen ateşleme farklı bir noktada başlayabilir.

Periyot süresi (t_p): Bir gerilim darbesinin açılmasından sonraki gerilim darbesinin açılmasına kadar geçen süredir. Vurum süresi t_i ve vurum aralığı t_0 toplamına eşittir:

$$t_p = t_i + t_0 \quad (4.2)$$

Görev döngüsü (τ): Vurum süresinin periyot süresine oranıdır

$$\tau = \frac{t_i}{t_p} \quad (4.3)$$

Vurum frekansı (f_p): Birim zamanda açılan darbe gerilimlerinin sayısıdır:

$$f_p = \frac{1}{t_p} \quad (4.4)$$

Çalışma boşluğundaki koşullar sürekli değiştiğinden, elektro erozyon süreci genellikle gösterilen gerilim ve akım eğrilerinin belirsiz bir dizisidir. Aşağıdaki parametreler buna göre tanımlanır:

Kıvılcım (deşarj) frekansı (f_e): İşleme boşluğunda birim zamanda oluşan kıvılcım boşalmalarının sayısıdır.

Frekans oranı (λ):deşarj frekansının f_e vurum frekansına f_p oranıdır.

$$\lambda = \frac{f_e}{f_p} \quad (4.5)$$

Bu değişken, erozyon sürecinin kalitesini değerlendirmek için anlamlı bir değer olarak kullanılabilir.

Açık devre voltajı (\hat{u}_i): Akım akışı olmadığında maksimum değer olarak boşaltma yolunda meydana gelir. Genellikle jeneratörde birkaç seviye olarak ayarlanabilir ve bir kıvılcımın oluşabileceği boşluk genişliğini belirler.

Referans voltajı (u_e): Kıvılcım ateşlendiğinde ve akım oluşurken boşaltma yolunda meydana gelir. Bu değişken zamana bağlı olduğundan, genellikle ortalama voltaj değeri \bar{u}_e verilir. Ortalama voltajı seviyesi \bar{u}_e , kullanılan malzeme çeşidine bağlı olarak çoğu uygulama için 15 ile 30 V arasındadır.

Çalışma voltajı (U): İşleme sırasında boşalım yoluna uygulanan voltajın aritmetik ortalama değeridir.

Boşalım akımı (i_e): Vurum sırasında kıvılcım yolundan akar. Ortalama boşalım akımı \bar{i}_e çalışma sırasında meydana gelen akım darbelerinin ortalama değeridir. Jeneratörün çıkış performansı ile sınırlıdır ve jeneratör üzerinde kademeler halinde ayarlanabilir.

Çalışma akımı (I): İşleme sırasında boşalım yolundan akan akımın aritmetik ortalama değeridir. Çalışma voltajı U ve çalışma akımı I, elektro erozyon sürecini ayarlamak ve izlemek için kullanılan iki ölçülebilir değişkendir.

Polarite: Elektrotlarda birikmiş yükün gösterimidir. Anot (+) ve katot (-) olarak ayrılır. Takım ve iş parçası üzerinde farklı aşınmalara sebebiyet verebilir.

Plazma kanalı, yarıçapı ve ısı akışı vurum süresi ile değişkenlik göstermektedir. Vurum süresi arttıkça plazma kanalı radyal yönde genişler ve akım yoğunluğu azalır. Bu durumda elektronların iyon akımına oranı ve anodun katoda göre aşınması azalır. Genellikle mikro işlemlerde katot takım olarak kullanılırken makro işlemlerde anot takım olarak kullanılır.

Vurum enerjisi (W_e): Vurum sırasında boşaltma kanalında dönüştürülen enerjidir. Aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$W_e = \int_{t_p} u_e(t) \cdot i_e(t) dt \approx \bar{u} \cdot \bar{i}_e \cdot t_e \quad (4.6)$$

Oluşan vurum miktarı ve aşınmış yüzeyin oluşumu, vurum enerjisi tarafından belirlenir.

Servo kontrol; takım elektrotunu vurum, aşınma ve ilgili boşluk koşullarına göre izleme görevine sahiptir. Servo kontrol ile mümkün olduğunca kısa devreler, yanlış kıvılcımlar veya boşta darbeler meydana gelmez. Bu kontrol çalışma aralığıyla orantılı bir değişken olan ateşleme gecikme süresi (t_d) ile sağlanır.

İyi bir erozyon sürecini sağlamak için, çalışma aralığında kısa devrelerin, yanlış vurumların ve rölanti darbelerinin oluşumunu mümkün olduğunca ortadan kaldıran vurum koşulları sağlanmalıdır. Her vurumdan sonra elektriksel iletkenlik çalışma boşluğundaki koşullar, dielektriğin kirliliği, sıcaklık vb. gibi değişken özelliklerden dolayı değiştiğinden, EEİ makinelerinde uygun bir servo kontrolü olmalıdır [64].

4.3.2. Elektriksel Olmayan Parametreler

4.3.2.1. Dielektrik Sıvı

Tüm elektro erozyon sistemlerinde çalışma ortamı olarak dielektrik kullanılır. Çünkü erozyon sırasında oluşan döküntünün giderilmesi ve elektrotlar arası yalıtıklık gereklidir. Dielektriğin ana görevleri şunlardır:

1. Döküntünün boşluktan uzaklaştırılması
2. Aşınan ve aşırı ısınan işleme noktalarının soğutulması
3. Boşlukta iyonlaşmanın sağlanması
4. Takım ve iş parçası elektrotlarının yalıtımı
5. Enerji yoğunluğunu arttırmak için boşaltma kanalının daralması

EEİ gereksinimlerine göre özel olarak uyarlanmış dielektrik sıvıları kullanılabilir. Maliyet açısından temel olarak mineral yağ veya sentetik ürünler şeklindeki hidrokarbon bileşikler ve su dielektrik olarak kullanılır. Deiyonize su genellikle tel-EEİ ve mikro-EEİ işlemlerinde kullanılır [65].

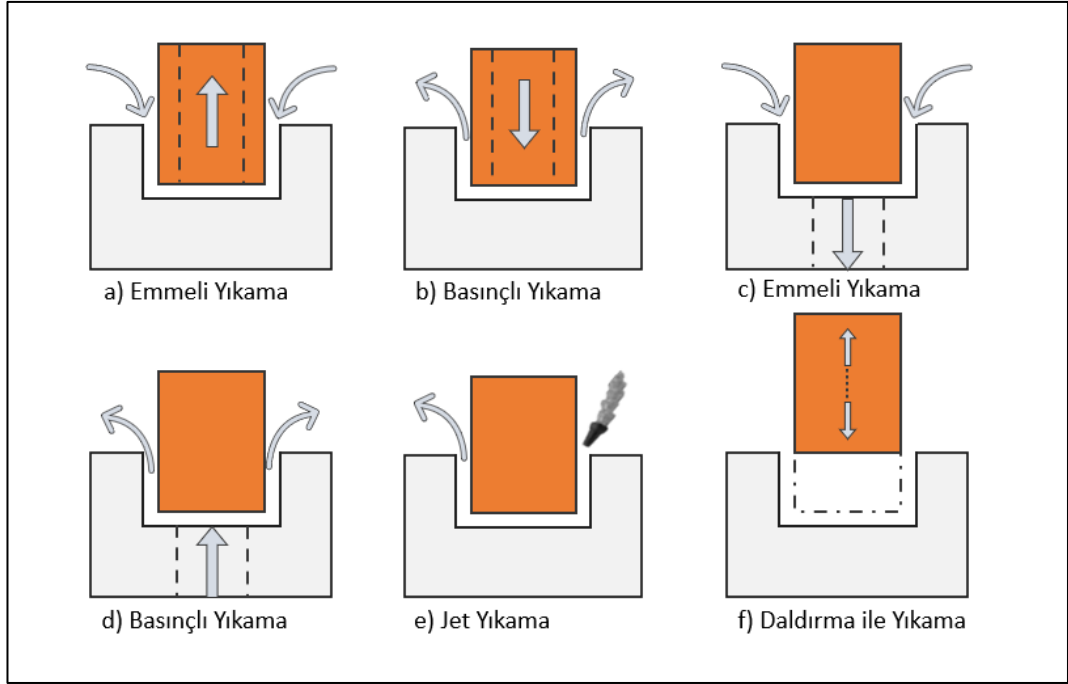
Bazı yağ dielektrikler yangın tehlikesi oluşturabilir. Bu dielektrikler ile işleme sırasında operatör ve çevre sağlığını olumsuz yönde etkileyecek koku ve gaz salınımına rastlanabilir. EEİ tezgahlarında parlama noktası 85 °C'den az sıvıların kullanılması önerilmemektedir. EEİ için özel hazırlanmış sıvılar bulunmaktadır. Çizelge 4.1'de elektro erozyon için kullanılan sıvılar ile literatürde sıkça rastlanan diğer sıvıların karşılaştırmalı özellikleri gösterilmiştir [66].

Çizelge 4.1. Elektro erozyon tezgahlarında dielektrik olarak kullanılan bazı yağların özellikleri.

Ürün / Parametre	Gazyağı	Mazot	Standart erozyon sıvıları
Parlama noktası	40°C	52°C	103°C-125°C
Rahatsız Edici Koku	Yüksek	Yüksek	Yok
Dielektrik Özellik	Düşük, Geçici	Düşük, Geçici	Çok iyi
Oksitlenme	Yüksek	Yüksek	Yok
Korozyon	Var	Var	Yok
Asit Oluşumu	Var	Var	Yok
Yangın Riski	Var	Var	Düşük
Filtre Edilebilme	Çok Düşük	Çok Düşük	Çok İyi
Talaş Taşıyabilme	Düşük	Düşük	Çok İyi
Çevre ve İşçi Sağlığı	Çok Kötü	Çok Kötü	Çok İyi

Dielektrik uygulama biçimleri;

1. Dielektrik sıvının takım veya iş parçası içerisinden verilmesi ile uygulanan basıncılı yıkama (Şekil 4.14.b – 4.14.d),
2. Dielektrik sıvının işleme bölgesinden çekilmesi ile uygulanan emmeli (ters) yıkama (Şekil 4.14.a – 4.14.c),
3. Dar kanalların ve deliklerin işlenmesinde kullanılan sürekli bir akışın işleme bölgesine yönlendirilmesiyle uygulanan jet (kenar) yıkama (Şekil 4.14.e),
4. Sığ işlemler için dielektrik içerisinde akış olmaksızın kullanılan daldırma ile yıkama olarak kategorize edilir (Şekil 4.14.f) [67].



Şekil 4.14. Dielektrik uygulama biçimleri.

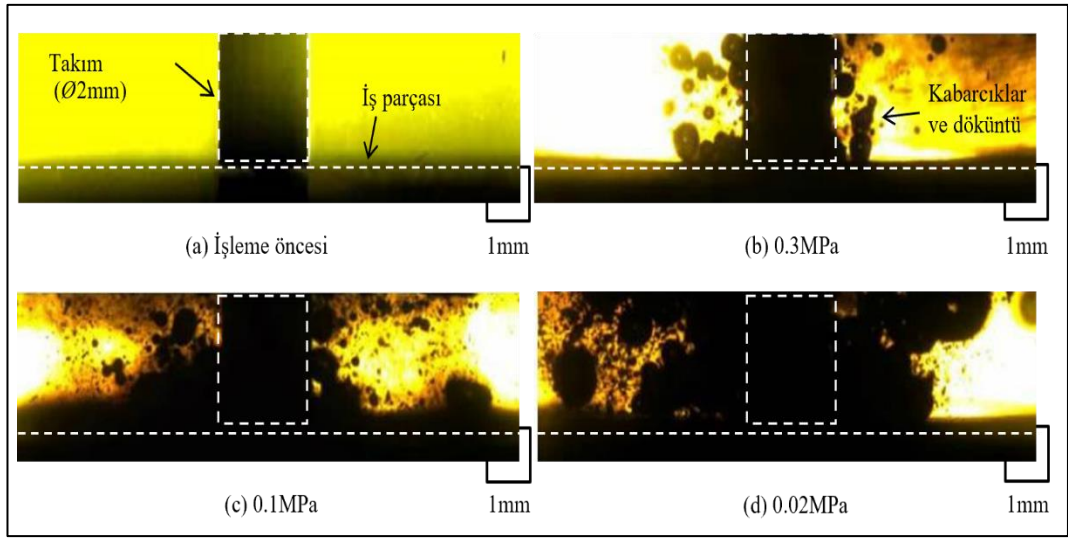
Vurum aralığında oluşan kabarcıklar ve dielektrik akışı döküntünün giderilmesi için ana etkenlerdir. Döküntünün temizlenebilmesi işleme hızı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilidir. Yıkama yöntemi ve yıkama basıncı ile değişkenlik gösterir.

Yıkama yöntemleri; yıkamasız, kesikli ve sürekli olarak ayrılır. Kanal ve derin deliklerin işlenmesinde sürekli yıkama yöntemi diğer yöntemlere göre döküntünün temizlenmesinde etkin rol oynar. Etkin bir yıkama için takım elektrotu işlemenin başladığı noktadan daha yüksek bir noktaya çekilmelidir. Dielektrik akış hızı artırılır ise işleme süresini azaltmak için geri çekilme mesafesi azaltılabilir [68].

Yıkama basıncı;

Erozyon ile işleme esnasında oluşan gaz kabarcıkları vurum sonrasında oluşan döküntü için birikme ortamı oluşturur. Döküntü ve gaz kabarcıkları daha sonra dielektrik basıncı ile uzaklaştırılır ve işleme bölgesi deiyonize olur. Gaz kabarcığı işleme bölgesi için dielektrik geçirgenliği düşük bir ortam oluşturur. Bu kabarcıklar işleme kararlılığı açısından önemli bir etkidir. Dielektrik basıncının artması ile (0.02,

0.06, 0.1, 0.3 MPa) gaz kabarcıkları küçülür (Şekil 4.15). Çok küçük gaz kabarcıklarının hacmi nedeniyle kaldırma kuvveti düşük olacağından işleme bölgesinden uzaklaştırılması zordur, çok büyük gaz kabarcıkları ise işleme boşluğunu doldurarak kararsız işleme koşullarına neden olabilir. Düşük dielektrik basıncı elektrotların kaynama noktasını azalacağından, düşük dış basınç (dielektrik basıncı) altında talaş kaldırma miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Dielektrik basıncının çok düşük olması veya olmaması artık materyalin temizlenememesi ve vurum aralığında oluşacak kısa devreler ile sonuçlanabilir [69].



Şekil 4.15. Yıkama basıncının işleme sırasındaki etkisi [69].

4.3.2.2. Takım (Elektrot) Seçimi ve Aşınması

EEİ takımlarında işleme bütünlüğü açısından malzemenin uygun olarak seçilmesi önemli bir gerekliliktir. Elektro erozyon ile işlemede genel olarak kullanılan takım elektrotları bakır, grafit, tungsten, pirinç, gümüş ve çelik malzeme formundadır. Takımın termal genişlemesi iş parçası doğruluğunu belirler. Yüksek malzeme kaldırma miktarı ve düşük takım aşınması için yüksek elektriksel ve termal iletkenliğin yanı sıra takım elektrotu için yüksek erime noktası gereklidir. Yüksek erime noktasına sahip malzemelerde elektrot yüzeyindeki sıcaklık, erime ve buharlaşma için yeterli olmadığından aşınma gerçekleşmeyecektir. Takım elektrotun mukavemeti üç boyutlu, karmaşık ve ince konturlu şekillerin daha rahat üretilmesine olanak sağlar. Bakır (Cu), yüksek elektriksel ve termal iletkenliği ile EEİ için en yaygın kullanılan takım

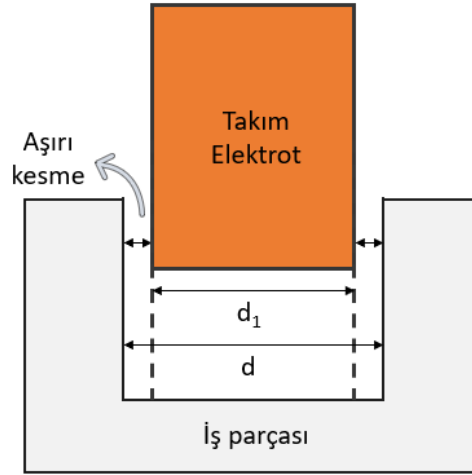
çeşididir. Ayrıca yüksek bir erime noktasına, iyi elektriksel ve termal iletkenliğe sahip malzemeler, tercihen takım aşınmasını azaltmak için bakır elektrotlara eklenerek kullanılabilir [70].

İşleme esnasından dielektrikten elektrot yüzeyine aktarılan karbon, takım aşınmasını önemli ölçüde etkilemektedir. Takım yüzeyinde tutunan karbon nedeniyle düşük takım aşınması gerçekleşir. Çalışma sıvısı olarak karbon bazlı yağlar kullanılması durumunda çok küçük takım aşınmasının gerçekleşmesinin nedeni budur. Bu nedenle, takım üzerine tutunan karbon ile talaş kaldırma miktarının dengesi göz önünde bulundurulduğunda çok uzun vurum süresi sayesinde takım elektrotunun sifıra yakın aşınması gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte takım aşınmasının takımın şekline bağlı olduğu ve takım ucu kenarının, elektro erozyon ile işlemenin başlangıcında dikkat çekici şekilde aşındığı bulunmuştur [71].

Takım tasarımı

Elektro erozyon tekniğinde, takım elektrotunun iş parçasına kopyalanması ile işleme gerçekleşir. Takım aşınması, işleme maliyeti ve işleme zamanı hesaba katıldığında takım basit geometrilerde tasarlanmalıdır. Takım, iş parçasına göre geleneksel yöntemlerle daha rahat işlenecek yapı ve özelliklerde olmalıdır. Genellikle basit takım şekilleri geleneksel kesme yöntemi ile üretilebilirken, karmaşık geometrilerdeki takımlar çeşitli talaşlı imalat yöntemleri (döküm, elektro şekillendirme veya metal püskürtme vb.) ile üretilebilir [72].

Elektro erozyon işlemi sırasında kullanılan güç seviyesine göre plazma kanalındaki genişleme sebebiyle takım elektrot iş parçasını bir miktar tolerans ile işlemektedir. Tolerans yani aşırı kesme bölgesi vurum süresine, boşalım akımına ve takım aşınmasına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle takım işlenecek bölgenin ölçülerinden aşırı kesme mesafesi (işleme toleransı) kadar küçültülerek tasarlanmalıdır.



Şekil 4.16. Takım elektrotu aşırı kesme.

Yani Şekil 4.16’da şematik gösterimi verilen ve d = işlenecek bölge çapı, d_1 = takım çapı olmak üzere; takım tasarımında Eşitlik 4.7 kullanılabilir.

$$d_1 = d - \text{Aşırı kesme} \quad (4.7)$$

Takım seçiminde etkili olan faktörler;

1. Takımın aşınma direnci,
2. Takımın iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi,
3. Takım işlenebilirliği,
4. Takım mekanik özellikleri,
5. Talaş kaldırma miktarı,
6. Takım malzemesi maliyeti olarak verilebilir [72].

İş Parçası Özellikleri

Elektro erozyon ile işleme iş parçası malzemesinin mekanik özelliklerinden bağımsız elektrik iletkenliğine göre işleme yapabilen bir teknolojidir. Bu bağlamda oldukça karmaşık parçaların ve yüksek sertlikteki malzemelerin ekonomik olarak işlenebilmesi için uygun bir alternatiftir. Elektro erozyon tezgahlarında geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor genellikle biyomedikal, otomotiv, uçak ve uzay sanayinde; takım ve

kalıp yapımında yaygın olarak kullanılan metaller, seramikler ve kompozitler iş parçası olarak kullanılmaktadır. Sürekli gelişen teknoloji, kalıp ve takım endüstrisinde gelişime ve son teknoloji proseslerini uygulamaya zorlamaktadır. Sürekli değişim içinde olan endüstride diğer uygulama yöntemleri ile EEİ yönteminin rekabetçi kalabilmesi için işlenmesi zor malzeme ve geometrilerin imalatında endüstriyel katkı sağlayacak şekilde araştırma yapılması gerekmektedir [73].

4.3.3. Yüzey Karakteristiği

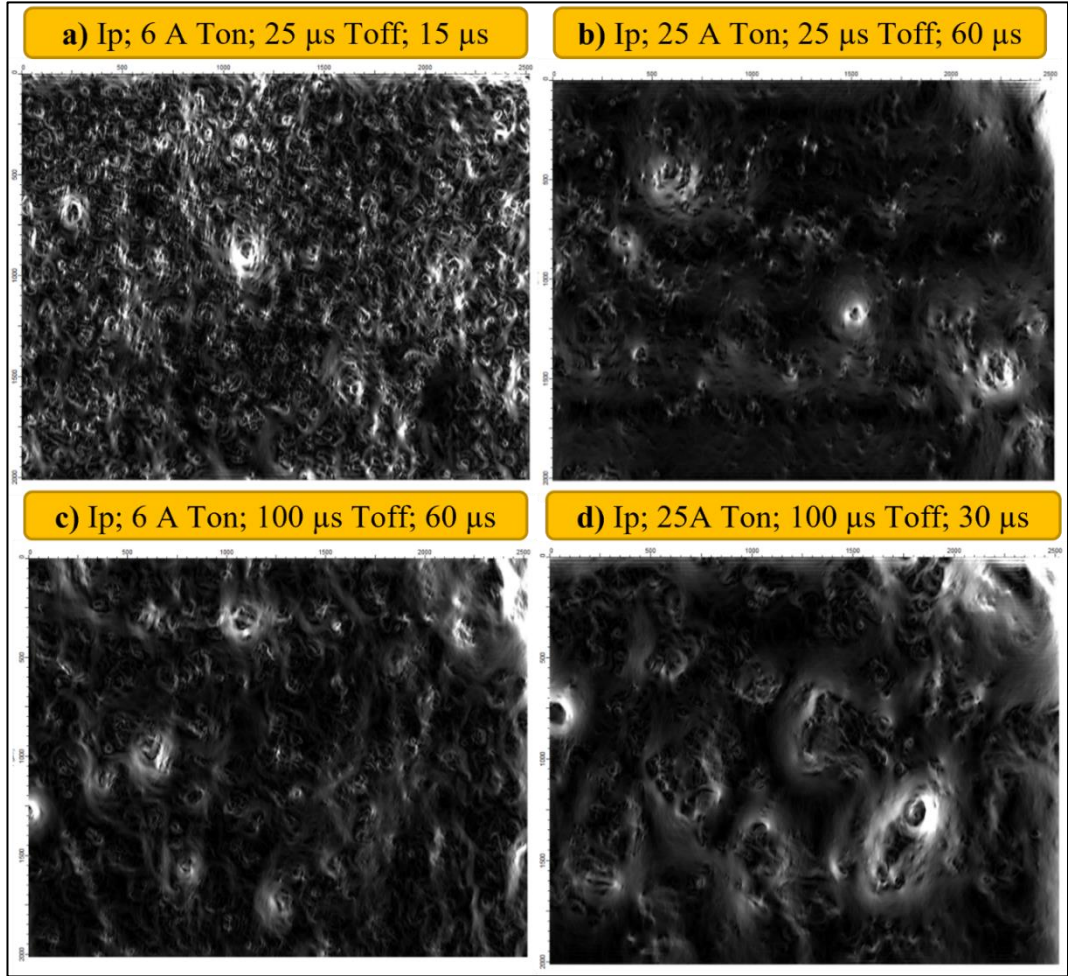
Elektro erozyon işlemi iş parçası ve takım malzemesinin aşındığı iki yönlü bir işleme tekniğidir. İş parçasından takım yüzeyine hareket eden elektronlar ve dielektrikten iş parçasına (katot) hareket eden pozitif iyonlar ile veya tam tersi şekilde işleme gerçekleşmektedir. Bu durum işleme bölgesinde kıvılcım olarak görülmektedir. Her bir kıvılcım seçilen polariteye göre iş parçası ve takım üzerinde bir miktar alanı aşındırarak krater oluşturur. İşleme sürecinde meydana gelen hızlı ısıtma ve soğutma nedeniyle işlenmiş yüzeylerde termal olarak etkilenmiş tabakanın oluşması muhtemeldir. Böylece, bu tabakada EEİ sonrasında elektrot malzemesinin mekanik özelliklerini etkileyecek krater ve mikro çatlaklar görmek olası bir durumdur [74].

İş parçası yüzey karakteristiği

Elektro erozyon tekniği kullanılarak rasgele kıvılcımların yüksek termal enerjisi ile erime ve buharlaşma sonrası hızla soğutmanın etkisinde işlenmiş iş parçası yüzeyinde düzensiz eriyik yapıları, döküntü kürecikleri, yüzeysel kraterler, partiküller, boşluk ve çatlaklar oluşabilir [75].

Elektro erozyon sürecinde bazı elektriksel ve elektriksel olmayan parametreler yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkiye sahiptir. Bunlardan boşalım akımı kıvılcımların şiddetini arttırarak eriyiğin derinliği etkilerken, vuruş süresi plazma kanalındaki genişleme ile malzeme yüzeyine aktarılan ısı enerjisinin alanını arttırarak daha fazla malzeme erimesine neden olur. Vuruş aralığı ise eriyiğin işleme bölgesinden daha rahat uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Düşük boşalım akımında vuruş süresi arttırılarak daha geniş kraterler ile ortalama yüzey pürüzlülüğünü (Ra) sabit tutmak mümkündür

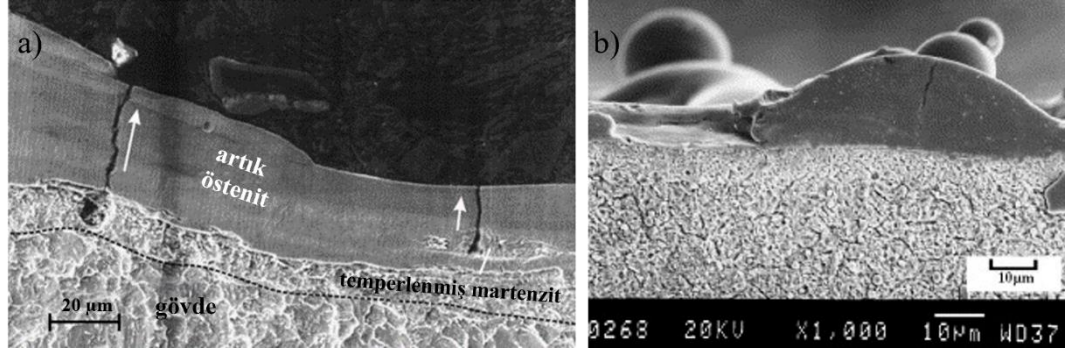
(Şekil 4.17). Bu durum biyomedikal ve enjeksiyon kalıpları gibi çeşitli uygulamalar için EEİ ile üretilen fonksiyonel parçaların kullanım alanını genişletmiştir. Sabit vurum aralığı ve basınçla dielektriğin döküntü taşıma kapasitesi sabittir. Vurum aralığında uzaklaştırılmayan eriyik soğutma safhasında yeniden katılarak yüzey pürüzlülüğünde etkili beyaz tabaka olarak adlandırılan dalgalı bölgeyi oluşturmaktadır [76,77].



Şekil 4.17. Optik mikroskop altında semente karbür malzemenin işlenmiş yüzey görüntüleri [78].

Hızla soğutmanın etkisi ile yeniden katılan eriyiğin oluşturduğu beyaz tabakanın sertliği ve aşınma direnci işlenen malzemedен yüksektir. Şekil 4.18’de SEM görünümü verilmiş beyaz görünen tabakaya beyaz tabaka denmektedir. Soğutma sırasında dielektrikten gelen karbon, eriyik içerisine piroliz sonucu nüfuz ederek beyaz tabaka sertliğini yüksek oranda arttırmaktadır. Beyaz tabakada, ısı akışının homojen

olmamasından ve metalürjik dönüşümlerden kaynaklı artık gerilmeler oluşabilmektedir. Sıcak ergimiş katmanın soğutulması sırasında oluşan büzülme alt katmanda bulunan soğuk bölge tarafından sınırlandırılır. Bu durum yüksek çekme gerilmelerine neden olarak bölgede çatlakların oluşmasına neden olabilir [79].

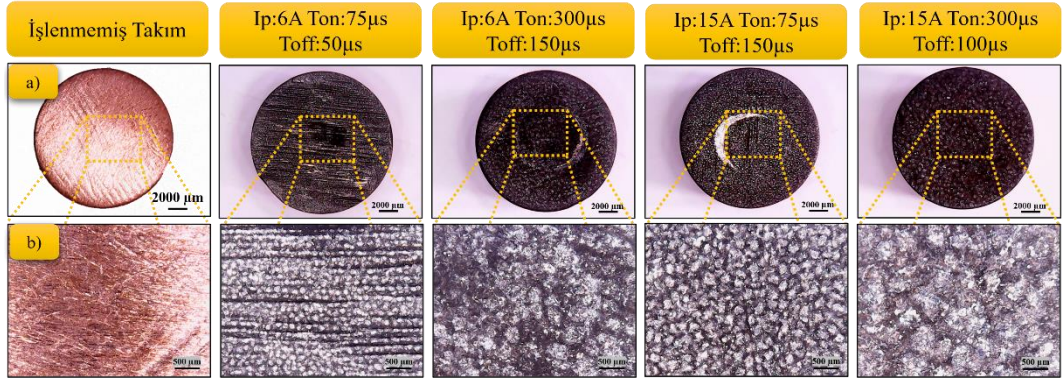


Şekil 4.18. a) Beyaz tabaka çatlakları (Ip:24 A, Ton:400 µs, E:240 mJ) [80] b) SEM fotoğrafı, yüksek boşalım akımında beyaz tabaka kalınlığının yüksek sapması (malzeme: D2; Ip:12 A, Ton:12 µs) [77].

Beyaz tabakanın sertliği ve aşınma direnci elektro erozyon ile işleme tekniğinin bir avantajı sayılabilmektedir. Ancak beyaz tabaka üzerinde bulunan mikro ve nano ölçekte yüzey oluşumlarının (çatlak, kraterler, mikro boşluklar) malzemenin yorulma mukavemeti üzerindeki olumsuz etkisi bu tekniğin dezavantajı olarak görülmektedir. Yüzey çatlakları işlenen malzemenin çekme mukavemetini aşan termal gerilmeler ve hızla soğumanın etkisinde plastik deformasyon ile oluşabilmektedir. Yüzey çatlaklarının derinliği ise beyaz tabaka kalınlığı (Ort.: kaba işleme; 20-40 µm, ince işleme; ~3 µm) ile vurum enerjisini bağlı olarak artış gösterir [80,81].

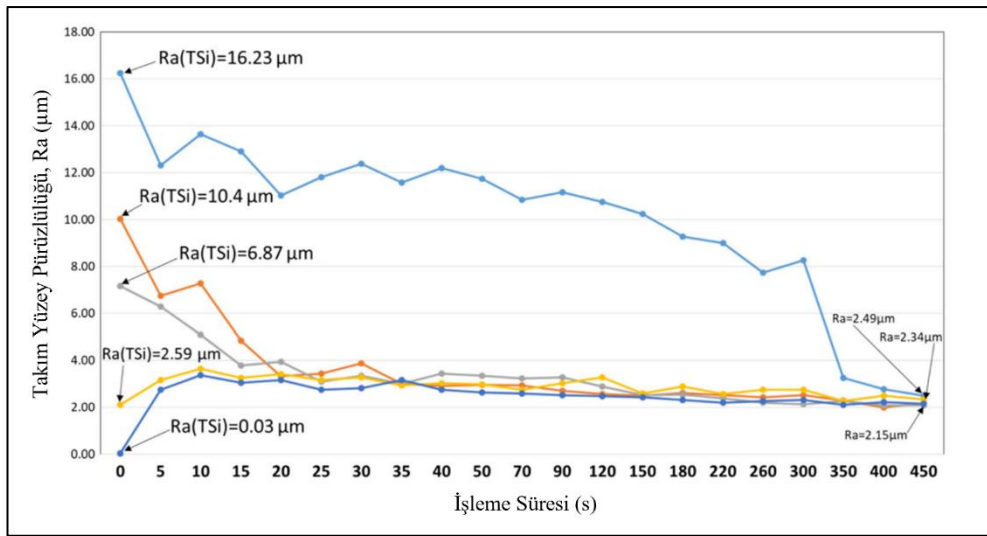
Takım yüzey karakteristiği

Elektro erozyon tekniğinde elektrot malzemelerinin aşınmasından kaynaklı takım yüzeyinde mikro çatlak ve kraterlerin oluşması olası bir durumdur (Şekil 4.19). Katot bakır takım elektrotun anot takım elektrotuna göre daha az aşındığı bilinmektedir. Ancak uzun vurum sürelerinde bu durum tam tersi şekildedir. Spesifik olarak işleme esnasında karbon bazlı dielektrikten anot olan bakır takım elektrotuna karbon nüfuzu gerçekleşir. Uzun vurum sürelerinde karbon, takım aşınmasını engelleyici daha kalın bir katman oluşturur [82,83].



Şekil 4.19. Takım malzemesinin yüzey görüntüleri a) 2000 µm ölçeğinde b) 500 µm ölçeğinde [82].

Takım yüzey pürüzlülüğü, işleme parametrelerine göre büyük bir oranda değiştiği gibi işleme öncesi takım yüzey pürüzlülüğüne göre de değişmektedir. İşleme bölgesinde kıvılcımlar en yakın noktadan harekete geçerek zıt kutba ulaşır ve ilk önce bu noktalarda erime/buharlaşıma gerçekleşir. Takım elektrot daha fazla kıvılcım alanı ve tepe noktası oluşturmak için büyük tepe noktaları sürekli eritecektir. İşleme öncesi takım yüzey pürüzlülüğü arttıkça talaş kaldırma miktarı azalmakta, takım aşınma miktarı ve takım yüzey pürüzlülüğü olumsuz etkilenmektedir. Ancak işleme süresi uzadıkça (0-450 sn) pürüzlülük ve karbon tabakası ideal seviyeye ulaşmakta, böylece iş parçası ve takım yüzey pürüzlülüğü sadece işleme parametrelerin etkisinde sonuçlanmaktadır (Şekil 4.20) [27].



Şekil 4.20. Takım yüzey pürüzlülüğünün işleme süresine göre değişimi (0,5 mm derinlik, Ton: 180 µs, Toff: 46 µs) [27].

Muthuramalingam vd. işleme sırasında eriyik içine karışan aşınmış takım malzemesi soğutma sonrası beyaz tabaka sertliğini etkilediğini bildirmişlerdir. Yazarlar çalışmasında iş parçasından daha düşük sertliğe sahip takım elektrotunun iş parçası yüzeyinde beyaz tabaka sertliğini azalttığı belirtmişlerdir [84].

4.3.4. Performans Ölçütleri

Elektro erozyon ile işlenen elektrotların verimliliği ve performanslarının değerlendirilmesi amacıyla hesaplanan sonuç parametreleri aşağıda verilmiştir.

Talaş kaldırma miktarı (TKM): Birim zamanda çıkarılan iş parçası miktarıdır. Talaş kaldırma miktarı, çıkarılan malzemenin hacmi veya işleme öncesi ve sonrası iş parçası ağırlığındaki fark ile hesaplanabilir.

$$TKM = \frac{\text{İş parçasından kaldırılan malzeme miktarı}}{\text{İşleme süresi}} = \frac{w_b - w_a}{t} \left[\frac{g}{dk} \right] \quad (4.8)$$

Takım aşınma miktarı (TAM): Birim zamanda aşınan takım miktarı. Aşınma miktarı TKM ile aynı şekilde aşınan takım hacmi veya işleme öncesi ve sonrasında takım ağırlığındaki fark ile hesaplanabilir.

$$TAM = \frac{\text{Elektrotta aşınan malzeme miktarı}}{\text{İşleme süresi}} = \frac{w_{tb} - w_{ta}}{t} \left[\frac{g}{dk} \right] \quad (4.9)$$

Bağlı aşınma (BA): Takım aşınma miktarının talaş kaldırma miktarına oranıdır.

$$BA = \frac{TAM}{TKM} = \frac{w_{tb} - w_{ta}}{w_b - w_a} \quad (4.10)$$

Eşitlik 4.9-4.10'da w_b ve w_a iş parçasının işleme öncesi ve sonrası gram cinsinden ağırlıkları, w_{tb} ve w_{ta} takım elektrotun işleme öncesi ve sonrası gram cinsinden ağırlıkları, t ise dakika cinsinden işleme süresidir

Yüzey kalitesi: Ortalama pürüzlülük değeri Ra, ortalama pürüzlülük derinliği Rz, ortalama pürüzlülük genişliği Rsm, mikro yapı mikroskobu gibi değerlendirmeler ile belirlenir.

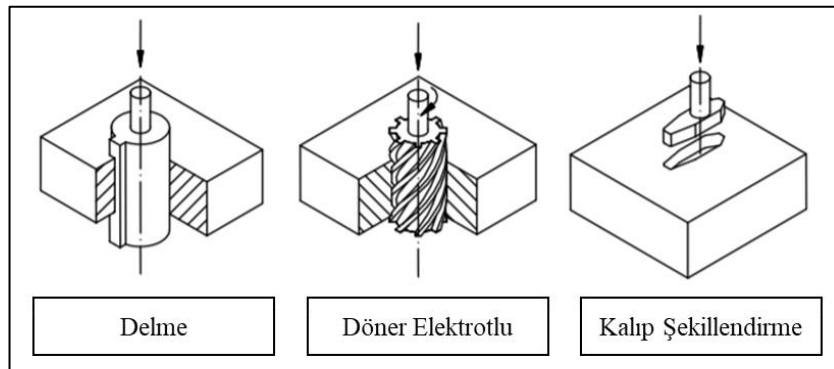
İşleme süresi: işleme süresi endüstri için gelişmekte olan imalat yöntemlerinin tercih eğilimlerini gösterir. İşleme süresinin uzun olması durumu, daha kısa ve ekonomik yöntemlere yönelimi artırır [76,85].

4.4. ELEKTRO EROZYON ÇEŞİTLERİ VE UYGULAMA YÖNTEMLERİ

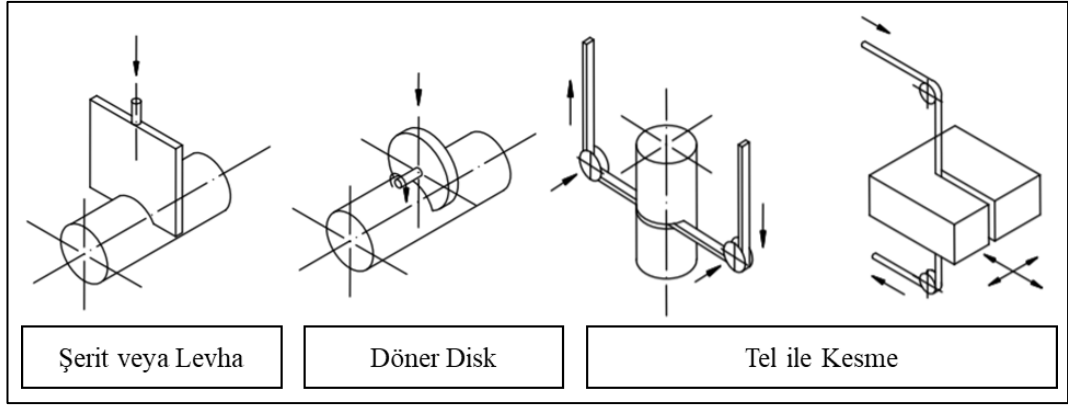
Elektro erozyon tekniği kullanım alanına göre birçok farklı yöntem ile uygulanabilmektedir. Aşağıda çeşitli elektro erozyon yöntemleri ve kullanım alanına göre bu yöntemlerin uygulamalarından bahsedilmiştir (Şekil 4.21).



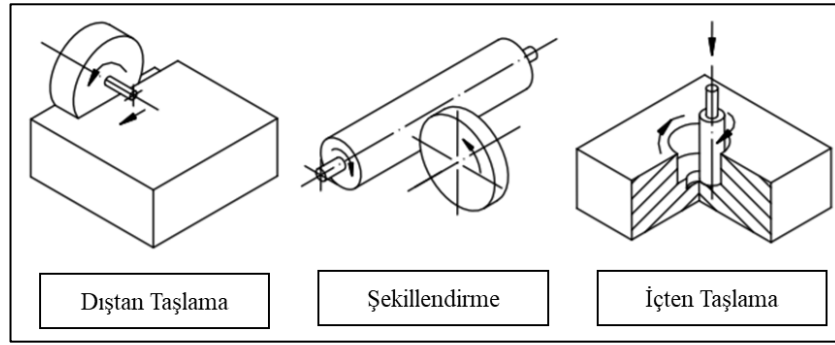
Şekil 4.21. Elektro erozyon ile işleme yöntemleri.



Şekil 4.22. Dalma EEİ yöntemleri.



Şekil 4.23. EEİ ile kesme yöntemleri.



Şekil 4.24. EEİ ile taşlama yöntemleri [86].

Ancak sanayinin birçok alanında çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dalma ve tel olmak üzere iki çeşit yöntem vardır.

Dalma Erozyon olarak da adlandırılan klasik elektro erozyon yöntemi (EEİ) takım şeklinin iş parçası üzerine ritmik kıvılcımlar aracılığıyla aktarılması işlemidir. EEİ tezgahında ana elemanlar olarak güç kaynağı sistemi, işlemenin gerçekleştiği hazne (iş parçası ve takım), takım besleme sistemi (servo mekanizması) ve dielektrik besleme ünitesi bulunmalıdır. Takım malzemesi olarak çeşitli iletkenler kullanılabilir. Bunlara örnek olarak bakır ve grafit elektrotlar yaygın kullanım alanına sahiptir. Bazı durumlarda erozyon tezgahında takım aşınması sebebiyle çok iyi bir yüzey işlemi için yeni bir elektrot kullanılması gerekebilir. Ancak hidro karbon dielektriklerin yüzey pürüzlülüğüne ve takım aşınmasına olumlu etkisi sebebiyle bu değişime gerek duyulmayabilir [87].

Tel Erozyon işleminde (TEEİ) dielektrik içinde iş parçası şeklinden bağımsız küçük çapa sahip iletken tel iş parçasını kesme amacıyla tanımlanmış bir yol üzerinde sürekli hareket etmektedir. Tel elektrotlar genellikle 0,1 mm boyutlarında iletken metallere yapılır [88].

Ayrıca elektro erozyon yöntemleri ile çeşitli uygulamalar için geliştirilen hibrit ve kombine sistemler kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Bu sistemlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

Mikro-EEİ, dalma erozyon ve tel erozyon ile aynı prensipte çalışmaktadır. Mikro erozyon 120 µm'den küçük bileşenler (mikro delik ve kanallar) için mikro ölçekte talaş kaldırma işlemi gerçekleştirir.

Toz Karışık EEİ (TK/EEİ), metal veya seramik gibi uygun materyalin tozu dielektrik sıvıya eklenerek işleme performansının artırılmasını hedefler. Toz partiküller takım ile iş parçası arasındaki boşluğu doldurarak yüksek iletkenlik sağlar ve elektro erozyon işlemi daha hızlı gerçekleştirir [89].

Kuru EEİ (K/EEİ)'nin klasik elektro erozyon yöntemi ile farkı dielektrik sıvı yerine basınçlı gaz kullanılmasıdır. Elektrot içinden akan basınçlı gaz döküntünün temizlenmesine ve işleme sıcaklığının düşürülmesini sağlar. Ayrıca K/EEİ yöntemi zararlı etkilerin azlığı sebebiyle çevresel elektro erozyon yöntemi olarak bilinmektedir [90].

Bu sistemlerin birçok dezavantajı ve avantajı bulunmaktadır. Bu çalışmada ise dalma erozyon olarak bahsedilen klasik elektro erozyon yöntemi kullanılmıştır (Şekil 4.25). Dalma erozyon yönteminin avantajları ve dezavantajları ise:

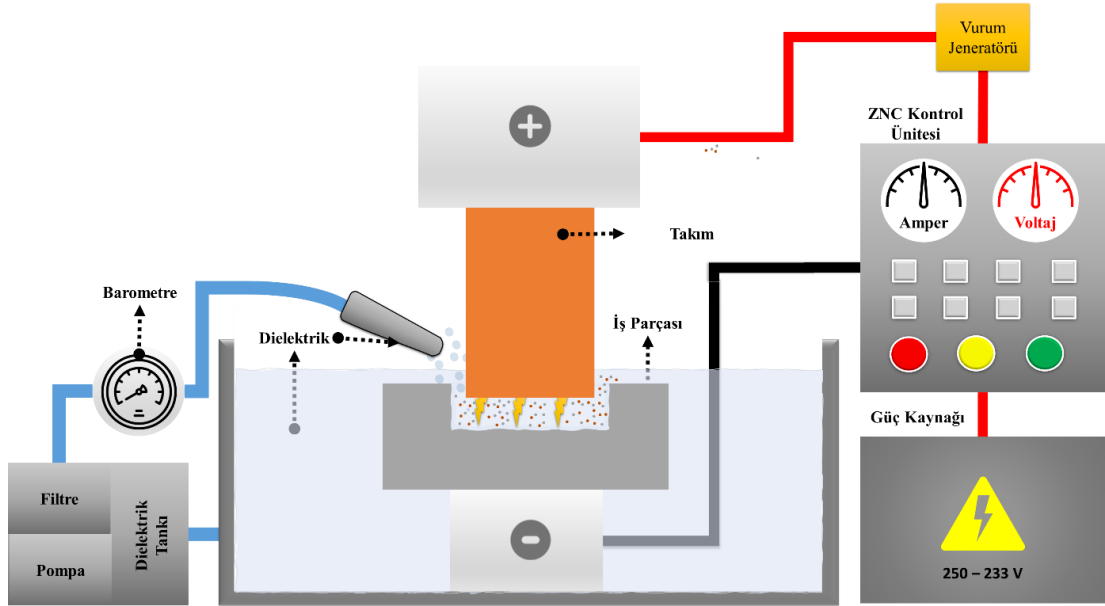
Avantajları

1. Sertliğin ve kırılmanın işleme için kriter olmaması,
2. Karmaşık şekillerin yüksek netlikle işlenebilmesi,
3. Kesme kuvvetleri olmadan temassız işleme,

4. Çapak oluşmaması,
5. Parlatma gerektirmeyen iyi yüzey kalitesi
6. Düşük takım maliyeti,
7. Toplam maliyet avantajı (özel takım, bitirme işlemi vb.) olarak sıralanabilir.

Dezavantajları

1. Yüksek enerji kullanımı,
2. İletkenlik gereksinimi,
3. Düşük işleme hızı,
4. Takım aşınması,
5. Aşırı kesme, çatlak ve beyaz tabaka oluşumu,
6. Karmaşık işleme prosesi (takım şekillendirilmesi, dielektrik, parametre seçimi vb.) olarak sıralanabilir [20].



Şekil 4.25. Dalma tipi elektro erozyon tezgahı şematik gösterimi.

4.5. KALİTE KONTROL YÖNTEMİ VE OPTİMİZASYON TEKNİĞİ

4.5.1. Üç Boyutlu Koordinat Ölçüm (CMM)

Mühendislik çalışmaları ve üretim endüstrisinde kalite kontrol konusundaki ihtiyaç ve yetersizlik sürekli artmaktadır. Bu nedenle üç boyutlu ölçüm teknolojisi, imal edilen parçaların üretim ve toleranslandırma standartlarına uygunluğunu kontrol etmede önemli bir yere sahiptir. Koordinat ölçüm cihazları (CMM) ise bu teknolojinin uygulanması için üretim endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Şekil 4.26). CMM özellikle seri üretim ve neredeyse her imalat yöntemi için kalite kontrol aracı olarak önem arz etmektedir. Bu yöntem parça üzerinden referans alınarak oluşturulan nokta koordinatlarının yüksek doğrulukla belirlenmesini sağlar. CMM yöntemi bir bilgisayar aracılığı ile elde edilen referans noktalarından (x, y ve z eksenlerinde) geometrik konum belirlemesi yaparak parça boyutunu veya işlenmiş yüzey ölçülerini belirler. Konum alma işleminde, bir probun iş parçası yüzeyine dokunması ile elde edilen noktanın geometrik yeri belirlenmiş olur. Tekrar eden dokunma işleminin sonucunda elde edilen noktalardan oluşan doğru ve düzlemlerin eksenlere göre farkı ölçülen yüzeyin geometrik şeklini vermektedir [91,92].



Şekil 4.26. Üç boyutlu koordinat ölçüm cihazı.

Güç aktarma sistemlerinde milin dönme eğilimini engellemeden tork aktarımını sağlayan kama yuvalarının performansı için ölçü tamlığının kontrol edilmesi ve kama yuvası şekli büyük öneme sahiptir. Mil çapına göre kama yuvası için önerilen toleransların ölçülmesi ve doğruluğunun kontrol edilmesi tork aktarımı ve sistemin çalışma koşulları için önemlidir. Yaygın olarak tercih edilen CMM teknolojisi, kama yuvası ölçü tamlığını kontrol etmede en uygun yöntem olarak gösterilebilir [93,94]

4.5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü ve Değerlendirmesi

Malzeme yüzeyleri imal metoduna ve çevre şartlarına (nem, korozyon, ısıl değişimler vb.) bağlı olarak birtakım düzensizlikler içerir. Her imalat yönteminin kendine özgü yüzey hasarı ve pürüzlülüğü mevcuttur. Yüzey pürüzlülüğü, malzemenin nominal yüzeyinde oluşan tekrarlı veya rasgele sapmalardır. Ne kadar hassas olursa olsun üretim ve imalat metoduna bağlı olarak yüzey hasarları kaçınılmazdır. Yüzey

pürüzlülüğü ve yüzey özellikleri temas, sürtünme, aşınma ve yağlama alanını etkileyen temel faktörlerdir. Fonksiyonel parçaların görünümünde, boyama alanında, optik, elektriksel ve termal performansında yüzey özellikleri önemli etkiye sahiptir.

Yüzey pürüzlülüğü yaygın olarak bir referans düzlemine göre yüzeyin yüksekliğindeki sapmaları ifade eder. Pürüzlülük iş parçası yüzeyine dik tek bir çizgi profili boyunca (2B) veya alan oluşturacak bir dizi paralel çizgi profili boyunca (3B) ölçülür. Genellikle Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafında uygun görülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve standart sapma (σ) yani Rq kullanılmaktadır [95].

Yüzey kontrolü sağlanacak malzemedeki, işleme sonrası yüzey hasarları olduğu gibi çatlak, ezik ve çizik gibi ölçüm koşullarını olumsuz etkileyecek öğeler vardır. Bu olumsuz öğelerin ölçüm sırasında filtrelenmesi gerekmektedir. Bu durumu sağlamak amacıyla birincil, pürüzlülük ve dalga profili olmak üzere üç farklı metot kullanılmaktadır. Profil filtreleme metotları, bazı profil elemanları terimleri ve pürüzlülük parametreleri aşağıda tanımları ile verilmiştir.

Örneklem uzunluğu (lr): malzemenin nominal yüzeyinden tekrarlayan veya rasgele sapmaları (yüzey pürüzlülüğünü) ölçmek için x ekseninde belirlenen uzunluktur.

Değerlendirme uzunluğu (ln): Ölçülen pürüzlülük parametrelerini değerlendirmek için kullanılan x ekseninde belirlenen profilin uzunluğudur.

Birincil profil (P-profil), kaydedilen pürüzlülük ölçümü ile ilgili olmadığı düşünülen λ_s (kesme dalga boyu) değerinden kısa dalga boyu bileşenlerini kaldırarak ölçüm sağlar. Parametreleri P sembolü ile gösterilir. Değerlendirme uzunluğu (ln) örneklem uzunluğu (lr) ile eşittir.

Pürüzlülük profili (R-profil), birincil profilden dalgalılığı bastırarak türetilen R-profil, kaydedilen pürüzlülük ölçümü ile ilgili olmadığı düşünülen λ_c değerinden uzun dalga boylarını kaldırarak ölçüm sağlar. Parametreleri R sembolü ile gösterilir.

Değerlendirme uzunluğu (l_n) içerisinde örneklem uzunluğu (l_r) kesme dalga boyuna (λ_c) eşittir.

Dalga profili (W-profil), birincil profilde λ_c değerlerinden kısa λ_f değerinden uzun dalga boyu bileşenlerini kaldırarak ölçüm sağlar. Örneklem uzunluğu (l_r) ile λ_f eşittir.

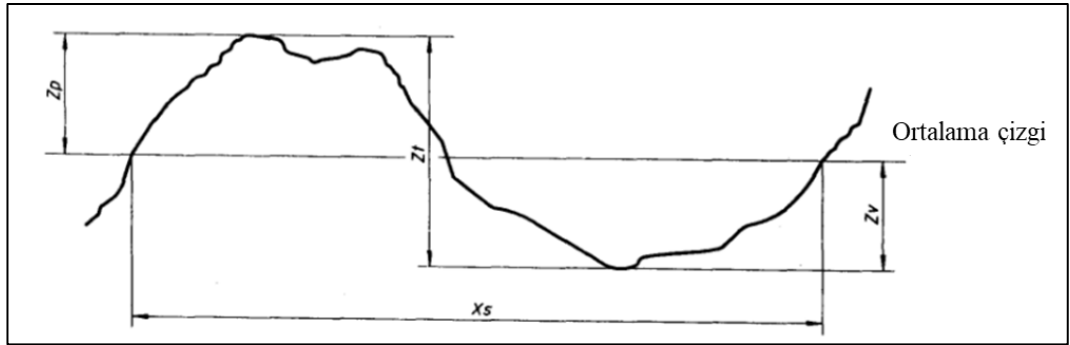
Ortalama çizgi: λ_s , λ_c ve λ_f koşullarından sonra profil parametrelerini belirlemede kullanılan referans çizgidir.

Profil tepe yüksekliği (Z_p): x ekseninde ortalama çizginin üzerindeki en yüksek profil tepesidir.

Profil vadi derinliği (Z_v): x ekseninde ortalama çizginin üzerindeki en derin profil vadisidir.

Profil yüksekliği (Z_t): en yüksek ve en derin profil elemanının toplamıdır.

Profil genişliği (X_s): x ekseninde ortalama çizgiyi kesen Z_t genişliğidir (Şekil 4.27).



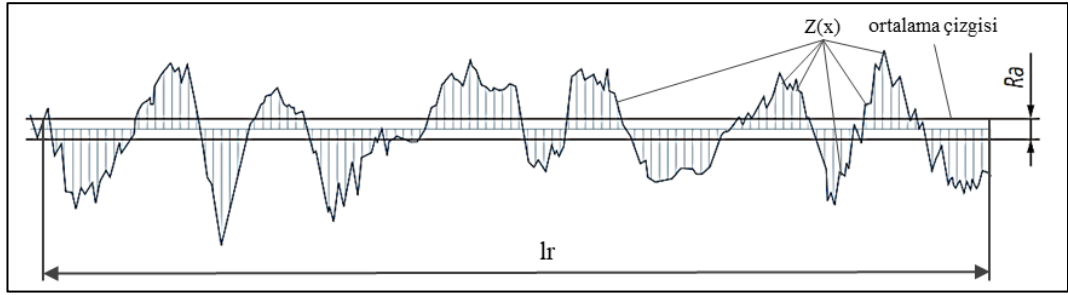
Şekil 4.27. Yüzey pürüzlülük profil genişliği.

Yüzey pürüzlülüğü parametreleri, sapmaların dikey özelliklerini belirlemede genlik, sapmaların yatay özelliklerini belirlemede aralık ve hibrit olarak işlevselliğine göre üç gruba ayrılır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde kullanılan bazı parametreler;

Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra)

Ortalama yüzey pürüzlülüğü parametresi, genel kalite kontrolü için sıklıkla kullanılan pürüzlülük parametresidir. Örneklem uzunluğu boyunca ortalama çizgiden sapmaların ($Z(x)$) mutlak değerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır (Şekil 4.28). Bu parametrenin tanımlanması, ölçülmesi kolaydır ve yükseklik değişimlerinin genel tanımını verir. Dalga boyu ve profildeki küçük değişiklikler hakkında bilgi vermez. Ortalama yüzey pürüzlülüğü parametresinin matematiksel tanımı aşağıdaki gibidir:

$$\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (4.11)$$



Şekil 4.28. Ortalama yüzey pürüzlülüğü.

Pürüzlülük parametreleri tek başına parça yüzeyi hakkında yeterli bilgiyi sağlayamaz. Kullanılan parametre sayısı arttırıldığında yüzey hakkında doğru bir sonuç elde edilebilir.

Maksimum yüzey pürüzlülük yüksekliği (Rz)

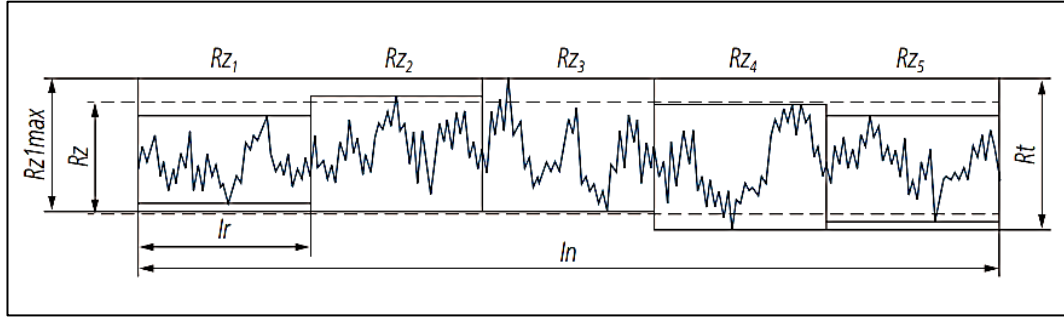
Maksimum yüzey pürüzlülük yüksekliği, Ra parametresinde tespit edilemeyen seyrek olan en yüksek tepe noktaları ve derin vadiler hakkında bilgi verir. Bir örneklem içerisinde en yüksek tepe notası ve en derin vadinin toplamı Rz_i olarak tanımlanır. Değerlendirme uzunluğu boyunca hesaplanan Rz_i değerlerinin ortalaması alınarak Rz elde edilir (Şekil 4.29). Maksimum yüzey pürüzlülük yüksekliğinin matematiksel tanımı aşağıdaki gibidir:

$$Rz_i = Zp_i + Zv_i \quad (4.12)$$

$$Rz = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Rz_i \quad (4.13)$$

Toplam yüzey pürüzlülük (profil) yüksekliği (Rt, Rmax), değerlendirme uzunluğu içerisinde en yüksek tepe noktası ve en derin vadinin ortalama çizgiye göre uzunlukları toplamıdır (Şekil 4.29). Toplam yüzey pürüzlülük (profil) yüksekliğinin matematiksel tanımını aşağıdaki gibidir:

$$Rt = Zp + Zv \quad (4.14)$$



Şekil 4.29. Maksimum yüzey pürüzlülük yüksekliği ve toplam yüzey pürüzlülük yüksekliği.

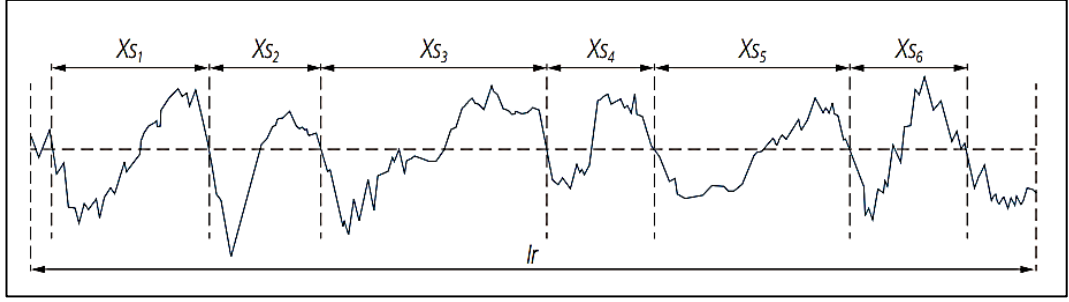
Rz1max: maksimum yüzey pürüzlülük yüksekliğinin en büyük değeridir.

n: değerlendirme uzunluğunda bulunan örneklem sayısıdır.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü genişliği (Rsm, Sm)

Ortalama yüzey pürüzlülüğü genişliği, yükseklik parametrelerinde tespit edilemeyen tepe ve vadilerin genişliği hakkında genel bilgi verir. Değerlendirme uzunluğu boyunca hesaplanan Xs değerlerinin ortalaması alınarak Rsm elde edilir (Şekil 4.30). Profil genişliği (Xs) örneklem içerisinde tanımlanır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü genişliğinin matematiksel tanımı aşağıdaki gibidir [96,97]:

$$Rsm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Xs_i \quad (4.15)$$



Şekil 4.30. Ortalama yüzey pürüzlülük genişliği.

4.5.3. Taguchi ile Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ve Çoklu Optimizasyon

EEİ de elde edilen performans sonuçlarının ölçüm yöntemleri farklı olduğu gibi ölçüm birimleri de farklıdır. Dolayısıyla, farklı birimlere sahip sonuçların karşılaştırılabilir olması gereklidir. Taguchi esaslı gri ilişkisel analiz (TGİA), farklı özellikteki performans sonuçları arasındaki karmaşık ilişkileri optimize etmek için uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Bu analizde performans sonuçlarının karşılaştırılabilir dizi haline getirilmesi ile bir sıralama yapılmaktadır. Performans sonuçlarının optimizasyonu için izlenecek adımlar;

1. Performans sonuçlarının normalizasyonu,
2. Her bir sonuç için gri ilişkisel katsayıların (GRC) hesaplanması,
3. GRC ile gri ilişkisel derecelerin (GRG) hesaplanması,
4. GRG ile değişken parametreler için Taguchi ve varyans analizlerinin yapılması ve parametrelerin önem derecelerinin bulunması,
5. Optimum değişken parametrelerin seçilmesi ve doğrulama deneyi şeklinde sıralanabilir.

Gri ilişkisel analizde ilk olarak yapılan normalizasyon deneysel olarak ölçülen performans sonuçları 0 ile 1 değer aralığına indirgemektedir. Bunun amacı bütün sonuçları eşit ve değerlendirilebilir skalada tutmaktır. Performans sonuçları için normalizasyon Eşitlik 4.16-4.18'ten en uygunu kullanılarak yapılabilir.

Performans sonuçları için büyük daha iyidir yaklaşımı;

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij})}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (4.16)$$

Performans sonuçları için küçük daha iyidir yaklaşımı;

$$x_{ij} = \frac{\max(y_{ij}) - y_{ij}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (4.17)$$

Performans sonuçları için nominal daha iyidir yaklaşımı;

$$x_{ij} = 1 - \frac{y_{ij} - y_j^*}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.16-4.18'de yer alan x_{ij} normalize edilmiş sonuçlar, $\min(y_{ij})$ veri aralığındaki en küçük değer, $\max(y_{ij})$ veri aralığındaki en büyük değer, y_j^* hedef değer ve y_{ij} ise j performans sonucundan seçilen y_i olarak tanımlanmaktadır.

Analizin bir sonraki aşaması olarak $x_0 = 1$ referans dizisi olarak tanımlanır ise x_{ij} 'nin x_{0j} 'ye yakınlığını belirlemek amacı ile Eşitlik 4.19 ile gri ilişkisel katsayılar hesaplanır.

$$\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{ij} + \zeta \Delta_{max}} \quad (4.19)$$

Eşitlik 4.19'da yer alan $\gamma(x_{0j}, x_{ij})$, x_{ij} ile x_{0j} arasındaki gri ilişkisel katsayı, $\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}|$, Δ_{min} : Δ_{ij} 'de en küçük değer, Δ_{max} : Δ_{ij} 'de en büyük değer, ζ katsayısı $[0,1]$ değer aralığında olarak tanımlanır. Gri ilişkisel katsayı büyüdükçe x_{ij} 'nin referans değere yakınlığı azalır. ζ değeri gri ilişkisel katsayı aralığını genişletmek ya da sıkılaştırmak amacı ile kullanılır. Bu değer değiştikçe $\gamma(x_{0j}, x_{ij})$ 'nin değeri de her zaman değişecektir. Ancak ζ değerinin gri ilişkisel analize etkisinin çok küçük olması üzerine performans sonuçlarının öncelikli değerlerinin sırası aynı kalacaktır. Bu nedenle ζ katsayı değeri genellikle 0,5 olarak alınmaktadır.

Analizde deney sonuçlarının bir bütün olarak değerlendirilmesi ve tahmin edilmesi için gri ilişkisel derece (Eşitlik 4.20) ile bulunur. Gri ilişkisel derece elde edilecek en iyi performans sonucunu göstermektedir. Bu nedenle, en yüksek gri ilişkisel derece hesaplanan kriterler içinde en iyi performans sonucunu vermektedir.

$$\Gamma(X_0, X_i) = \sum_{j=1}^n w_j \gamma(x_{0j}, x_{ij}) \quad (4.20)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (4.21)$$

Eşitlik 4.20’de yer alan $\Gamma(X_0, X_i)$, X_0 ile X_i arasındaki gri ilişkisel derece, $\gamma(x_{0j}, x_{ij})$ gri ilişkisel katsayı ve w_j (Eşitlik 4.21) sonuç faktörünün ağırlığı olarak tanımlanır. Bütün sonuç faktörleri (n) eşit öneme sahip değil ise toplam $w_j = 1$ olacak şekilde gri ilişkisel derece hesaplanır [98,99].

Son aşama olarak Taguchi yöntemi ile gri ilişkisel dereceler için S/N oranı hesaplanır. S/N oranı işleme parametrelerinin optimum seviyelerini göstermektedir. Bu durumda en yüksek gri ilişkisel derece en iyi performans değerini vereceğinden “büyük daha iyidir” yaklaşımını benimsemek gerekmektedir. Bu yaklaşım için S/N değerleri Eşitlik 4.22 kullanılarak elde edilir.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.22)$$

Eşitlik 4.22’de sinyal gürültü oranı olan S/N maksimum değerinde performans sonuçları için optimum işleme parametre değerini vermektedir. Eşitlik 4.22’de yer alan y_i : i’inci deney sonucu, n: deney sayısını belirtmektedir [100,101].

Sonuç olarak optimizasyon sonucunda elde edilen parametreler için bir doğrulama deneyi yapılır. Doğrulama deneyinden elde edilen sonuçları başlangıç sonuçları ile karşılaştırmak gri ilişkisel analizin güvenilirlik derecesini verecektir.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 MALZEME VE EKİPMANLAR

Bu tez çalışmasında, elektro erozyon ile işlemede (EEİ) kullanılan malzeme, ekipmanlar, yöntem ve araştırma teknikleri aşağıda belirtildiği gibidir.

5.1.1 Elektro Erozyon Tezgahı

Deneysel çalışmalar Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu yerleşkesinde bulunan araştırma laboratuvarında Furkan marka “K1 Z-NC EDM” elektro erozyon tezgahı (Şekil 5.1) ile gerçekleştirilmiştir. Tezgaha ait teknik özellikler Çizelge 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Furkan K1 Z-NC elektro erozyon makinesi.

Çizelge 5.1. K1 Z-NC EDM elektro erozyon tezgahı teknik özellikleri.

Jeneratörler	Güç 220V 3 faz 380 VAC	3,5 KVA												
	Maksimum çalışma akımı	25A / Opsiyonel 50A												
	Güç seviyesi kontrolleri (Seviye/A)	1/32	1/16	3/32	1/8	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
	Açık voltaj seviyeleri	0,75	1,5	2,3	3	4,5	6	7,5	9	12,5	15	18	21	25
Makine Gövdesi	İş tablası ölçüleri	550 x 250 mm												
	Tabla hareket ölçüleri	300 x 200 mm												
	Tabla hassasiyeti	0,005 mm												
	İş haznesi ölçüleri	960 x 505 x 350 mm												
	İş parçası ölçüleri (maks.)	790 x 490 x 300 mm												
	İş parçası Ağırlığı (maks.)	200 kg												
	Elektrot Ağırlığı (maks.)	25 kg												
Z Eksen	Hareket mekanizması	Otomatik kafa ünitesi												
	Hareket kursu	180 mm												
	Okuma hassasiyeti	0,005 mm												
	Kafa hareket	Yüksek hassasiyetli servo												
Dielektrik	Dielektrik tank kapasitesi	270 litre												
	Pompa kapasitesi	40 lt/dk												
	Filtre hassasiyeti	5 µm												
Performans	Aşınmasız talaş kaldırma	155 mm ³ /dk (Bakır) 270 mm ³ /dk (Grafit)												
	Talaş kaldırma (maks.)	350 mm ³ /dk (%20 takım aşınma)												
	Elektrot aşınması (min.)	%0,5												
	En iyi yüzey kalitesi	1,5 µ [Ra]												

5.1.2. İş Parçası

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak sert karbür veya sement karbür olarak da adlandırılan tungsten karbür - kobalt (%85WC + %15Co) kullanılmıştır (Şekil 5.2). Yüksek mekanik mukavemete sahip sement karbür aşınma direnci ve erime noktasının istendiği uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir malzemedir. Çizelge 5.2’de iş paçası malzemesinin teknik özellikleri verilmiştir. Deneysel çalışmada iş parçası numunesi olarak Ø16 mm çubuklar kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Deney numunesi.

Çizelge 5.2. WC-Co teknik özellikleri.

Özellikler	Değer (Maks.-Min.)
Sertlik (Vickers)	1400
Sertlik (Rockwell A)	90,4
Yoğunluk (g/cm ³)	13,95
Eğilme Dayanımı (MPa)	4000
Basınç Dayanımı (MPa)	5350
Tane boyu (µm)	0,8

5.1.3. Takım Elektrotu

Deneyleerde takım (elektrot) malzemesi olarak elektrolitik bakır (Cu) kullanılmıştır. Elektrolitik bakır, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği ile kolay şekillendirilebilir olmasının yanı sıra karbon bazlı dielektrik ortamında işleme sırasında takım yüzeyinde oluşan karbon birikmesi takım aşınmasını minimize edici davranış sergilemektedir. Takım malzemesi ölçüleri DIN 6885 standartında uygun kama yuvası boyutları ve shaft çapı (Ø16 mm) esas alınarak belirlenmiştir (Şekil 5.3). Takım yüzeyinde istenmeyen çapak ve pürüzlülüğün oluşmaması için deneysel çalışmada kullanılacak takımlar kama yuvası ölçüleri esas alınarak Tel Erozyon tezgahında kesilerek hazırlanmıştır. Takım malzemesinin teknik özellikleri ise Çizelge 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Elektrolitik bakır takım elektrot.

Çizelge 5.3. Elektrolitik bakır teknik özellikleri.

Özellikler	Değer (Maks.-Min.)
<i>Akma Mukavemeti (MPa)</i>	125-145
<i>Çekme Mukavemeti (MPa)</i>	275-350
<i>Uzama (%)</i>	22
<i>Sertlik (Vickers)</i>	87
<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	2,66
<i>Elektriksel Direnç (Ω.cm)</i>	0,00000598
<i>Erime Sıcaklığı (°C)</i>	590,6-638
<i>Termal İletkenlik (W/mK)</i>	117
<i>Özgül Isı (J/g°C)</i>	0,900

5.1.4. Dielektrik

Bu çalışmada dielektrik olarak kokusuz, yüksek parlama noktası ve düşük viskoziteye sahip Belone EDM F standart elektro erozyon sıvısı kullanılmıştır. Deney sırasında

dielektrik işleme bölgesine sürekli olarak yanal yıkama biçiminde 35 kPa basınç ile gönderilmiştir. Dielektrik sıvı teknik özellikleri Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Belone EDM F elektro erozyon sıvısı teknik özellikleri.

Özellik	Birimi	Test Metodu	Tipik Değer
Görünüş	-	-	C&B
Yoğunluk@15 °C	kg/m ³	ASTM D 4052	0,760
Renk	Saybolt	ASTM D 156	+30
Kinematik viskozite@40 °C	mm ² /s	ASTM D 445	1,910
Alevlenme noktası, (COC)	°C, min.	ASTM D 92	102
Akma noktası	°C, maks.	ASTM 6749	0
Kırılma indisi@20 °C		ASTM D 1218	1,4280

5.1.5. Talaş Kaldırma ve Takım Aşınma Oranlarının Belirlenmesi

Talaş kaldırma ve takım aşınma oranlarının belirlenmesi için elektro erozyon işleminde kullanılan iş parçası ve takım bir kompresör yardımı ile iyice temizlenerek kurutulmuştur. Daha sonra takım ve iş parçası elektrotlarının işlem öncesi ve sonrası ağırlıkları 0.005g hassasiyete sahip bir teraziyle ölçülmüştür. Deney tasarımında takımın iş parçasına 3 mm dalması belirlenmiş ve her bir deney için işleme süresi tezgah içinde bulunan sayaç ve saat yardımı ile ölçülmüştür. İşleme sonrası talaş kaldırma oranı, dakikada malzeme yüzeyinden kaldırılan toplam malzeme kütlesi (Eşitlik 4.8) ve takım aşınması ise, dakikada aşınan toplam takım kütlesi (Eşitlik 4.9) olarak hesaplanmıştır.

5.1.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Çalışmada kullanılan deney numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri Mahr Perthometer M300 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.4). WC-Co malzemesinin elektro erozyon ile işlenmesinde elde edilen yüzey kalitesinin değerlendirilmesi için pürüzlülük kriteri olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) esas alınmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde $\lambda_c:0,8$ ve $\lambda_s:5,6$ olarak belirlenmiştir.

Deney numunelerinin her biri için kam yuvası tabanından üç yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak çalışmanın Ra sonucu elde edilmiştir.



Şekil 5.4. Perthometer marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

5.1.7. Topografik Ölçümler

Elektro tekniğinin kullanımında oluşan yüzey yapısını ve kalitesini belirlemek amacı ile yüzey profil ölçümleri yapılarak işlenmiş numunelerin yüzey topografyası belirlenmiştir. Yüzey profilinin ölçülmesinde Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Phase View marka optik profilometre cihazı kullanılmıştır. Topografik ölçümler deney numunesinin işleme bölgesinden 2500X2000 μm ölçeğinde yüzey görüntüleri ve 3B alansal pürüzlülük profili elde edilerek gerçekleştirilmiştir.

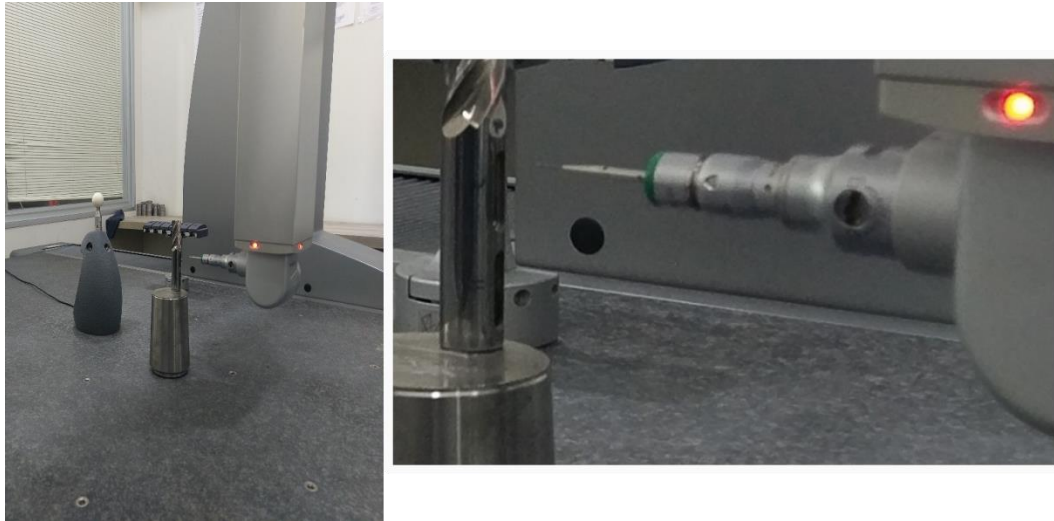
5.1.8. SEM ve EDS Analizleri

Elektro erozyon ile işleme sonucu oluşan yüzey hasarlarının (krater, mikro çatlak, enkaz kürecikleri, döküntü, yeniden katılaştıran malzeme ve beyaz tabaka) belirlenmesinde ve işlenmiş yüzeylerin mikro yapı analizinde SEM ve işlenmiş yüzeyin element kompozisyonunu belirlemede EDS cihazı kullanılmıştır. Yüzey analizinde elektro erozyon ile işlenmiş iş parçası numunelerinin kesit yüzeyleri kullanılmıştır. SEM ve EDS analizleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü

Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi SEM Laboratuvarı'nda bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak yapılmıştır.

5.1.9. Geometrik Ölçü Tamlığı

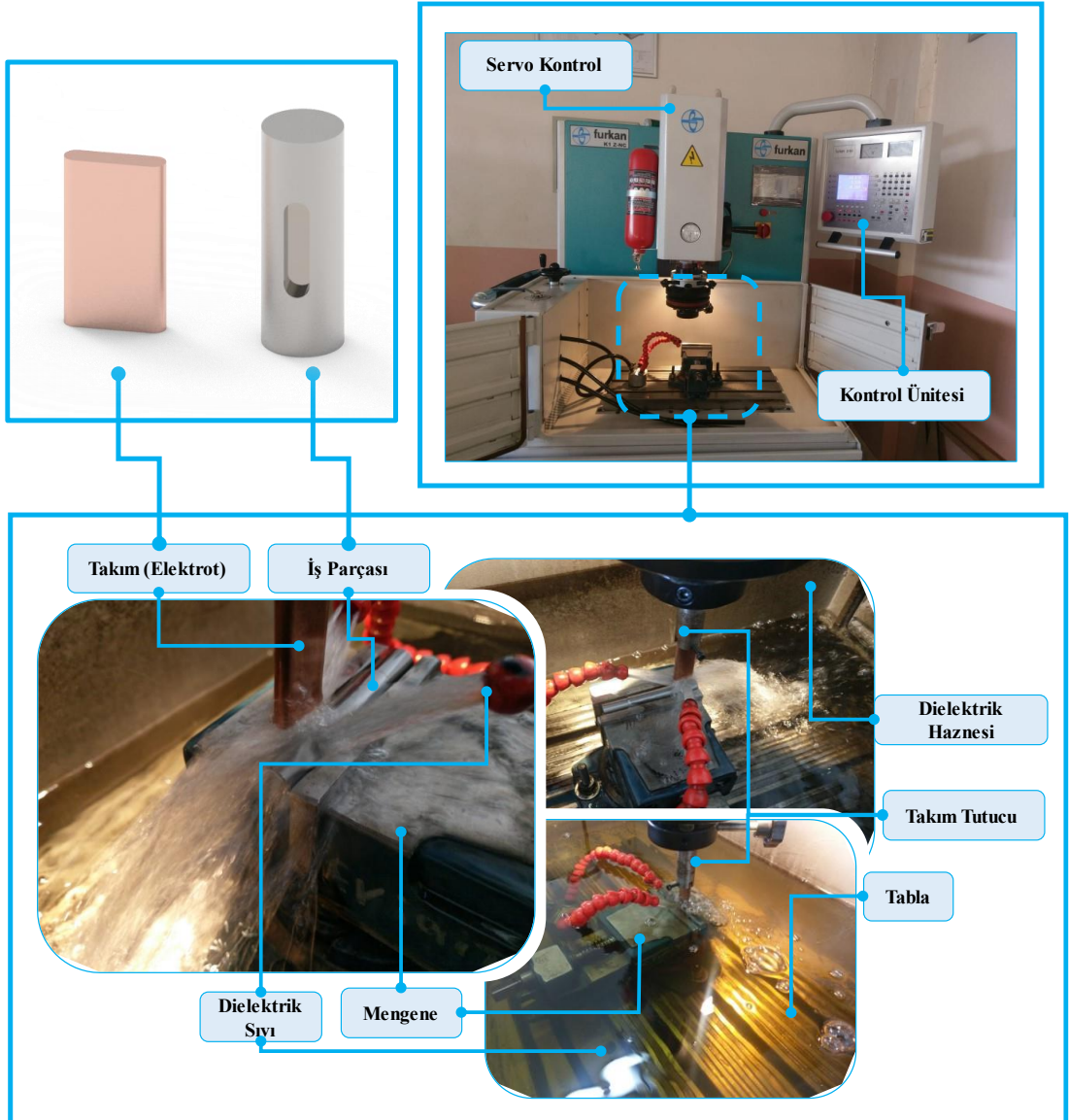
EEİ deneyleri sonrası elde edilen kama yuvasının geometrik ölçümleri Global Classic 091508 model koordinat ölçüm cihazı (CMM) ile yapılmıştır. Ölçümlerden önce A90B-90 açısında kalibrasyon işlemi yapılmıştır. İş parçasının zemin yüzeyinden oluşturulan düzlem "level" edildi ve kama kanalının bir kenarından oluşturulan "line" ile de doğrulama yapılarak iş parçasının konumu sabitlenmiştir. Zemindeki düzlem ile dış çapın en uç noktası hesaplanarak "derinlik" ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Kama yuvasının yan yüzeylerinde iki noktaya temas ettirilerek elde edilen line'lar ile "genişlik" ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Radüs (R) ölçümleri üç noktaya dokunarak oluşturulan daireler ile elde edilmiştir ve daireler arasındaki mesafe ölçümü ile "uzunluk" boyutunun kontrolleri yapılmıştır. Kama yuvasının yan duvarlarından zemine dik "line" oluşturularak taban zemindeki düzlem ile diklik kontrolleri yapılmıştır. Tüm kalibrasyon ve ölçüm işlemleri 21°C'de yapılmıştır. Deney numunelerinin ölçümü sırasında alınan görüntüler Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Global Classic 091508 koordinat ölçüm cihazı.

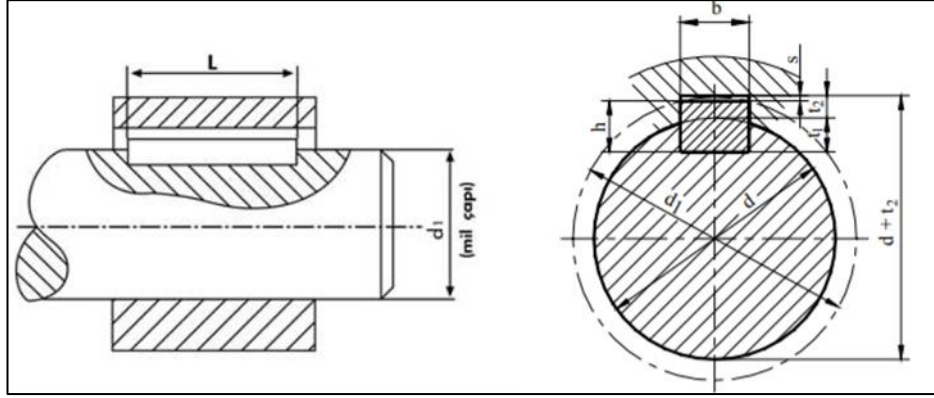
5.2. DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI VE PLANLAMA

Bu tez çalışması için yapılan deneysel araştırma dalma tipi elektro erozyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Dalma erozyon tezgahının şematik gösterimi ve işleme deney düzeneği ekipmanları Şekil 5.6’te verilmiştir. Elektro erozyon ile işleme yapılırken deneylerin verimliliğini arttırmak amacıyla takımını sabitleyecek takım tutucu ve iş parçasını sabitleyecek mengene Şekil 5.6’te deney düzeneği içerisinde görüldüğü gibi tezgâha bağlanmıştır.



Şekil 5.6. Elektro erozyon ile işleme deney düzeneği.

İş parçası Ø16 semente karbür çubuklar üzerine EEİ teknolojisi ile kama kanalı açmak için işleme deneyleri yapılmıştır. Ø16 karbür malzeme üzerine kama kanalı için (Şekil 5.7) DIN 6885 standardında $b=5$ mm, $h= 5$ mm, $L= 20$ mm 5X5X20 mm uygu kama için P9 sıkı yuva için t_1 ölçüsü 3 mm olarak verilmiştir. Elektro erozyon tezgahında iş parçası kama kanalı standartında bakır takım elektrot ile 3 mm derinlikle işlenmiştir.



Şekil 5.7. Kama kanalı için teknik çizim.

5.3. DENEY PARAMETRELERİ TASARIMI

Literatür taramasında bahsi geçen araştırmalar incelendiğinde tez çalışması için en uygun ve en etkili işleme parametreleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. Dalma erozyon için işleme parametreleri olarak dielektrik basıncı 35 kPa, boşalım akımı 6-25A aralığında, vurum süresi 25-100 μ s aralığında, vurum aralığı 15-60 μ s aralığında, açık devre voltajı 130 V ve referans voltajı 60 V seçilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan dalma erozyon tezgahı için özel parametrelerden çalışma süresi 3 sn., takım elektrotu geri çekilme mesafesi 4,5 mm ve elektrot güvenli yaklaşma mesafesi 250 μ m olarak belirlenmiştir. Takım malzemesi elektrolitik bakır, dielektrik ise standart elektro erozyon sıvısı seçilmiştir. Takım polaritesi pozitif, iş parçası negatif polarite belirlenmiştir. Boşalım akımı, malzeme kaldırma miktarında olumlu etkisi ancak yüzey kalitesi ve takım aşınmasındaki olumsuz etkisi nedeniyle yüksek değerde tutulmamış. Vurum aralığı, işleme süresini uzatmasının yanı sıra işleme bölgesinden döküntünün temizlenmesi sonucunda Ra için önemli bir parametre sayıldığı için nispeten yüksek seçilmiştir.

Çizelge 5.5. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler ve çalışma koşulları.

Çalışma Koşulları	Tanımlamalar
İş parçası	Semente Karbür
Takım	Bakır
Dielektrik	Elektro erozyon sıvısı
Güç kaynağı voltajı	250V-233V
Basınç	35 kPa
Polarite	Takım: pozitif; iş parçası: negatif
Akım	6-12,5-25 A
Vurum Süresi (Ton)	25-50-100 μ s
Vurum Aralığı (Toff)	15-30-60 μ s
Açık Devre Voltajı	130 V
Referans Voltajı	60V

Deneysel çalışmalar, belirtilen işleme parametreleri (faktörler) için 3 farklı değer aralığında tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak yapılmıştır. Değişken parametrelerin seviye değerleri Çizelge 5.6’da gösterildiği gibi üç seviyede verilmiştir.

Çizelge 5.6. Değişken parametrelerin değerleri ve seviyeleri.

Faktörler	Sembolü	Birimi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
<i>Boşalım akımı</i>	Ip	A	6	12,5	25
<i>Vurum süresi</i>	Ton	μ s	25	50	100
<i>Vurum aralığı</i>	Toff	μ s	15	30	60

Deneysel çalışmalar, belirlenen işleme parametreleri için etkileşimli Taguchi L_{27} (3^3) ortogonal dizinine göre oluşturulmuştur. Çalışmada belirlenen işleme parametreleri için deney tasarımı Çizelge 5.7’de verilmiştir. Deney sonrasında, performans sonuçları (TKM, TAM, Ra vd.) için işleme parametreleri optimize edilmiştir. Bu amaçla, çoklu optimizasyon metodolojilerinden Taguchi-GRA tekniği uygulanacağından deneyler ve ölçümler tekrarlı olarak yapılmıştır.

Çizelge 5.7. Deney tasarımı.

Deney No	Boşalım Akımı [A]	Vurum Süresi [μ s]	Vurum Aralığı [μ s]
1.	6	25	15
2.	6	25	30
3.	6	25	60
4.	6	50	15
5.	6	50	30
6.	6	50	60
7.	6	100	15
8.	6	100	30
9.	6	100	60
10.	12,5	25	15
11.	12,5	25	30
12.	12,5	25	60
13.	12,5	50	15
14.	12,5	50	30
15.	12,5	50	60
16.	12,5	100	15
17.	12,5	100	30
18.	12,5	100	60
19.	25	25	15
20.	25	25	30
21.	25	25	60
22.	25	50	15
23.	25	50	30
24.	25	50	60
25.	25	100	15
26.	25	100	30
27.	25	100	60

5.4. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ VE OPTİMİZASYON TEKNİĞİ

Deneyisel çalışmalar sonucunda boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı parametrelerinin TKM, TAM, Ra, topografik yüzey pürüzlülüğü, boyutsal ölçüm doğruluğu üzerindeki etkileri incelenerek yorumlanmıştır. Bu amaçla, tekrarlı olarak gerçekleştirilen deneysel sonuçların ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Varyans analizi (ANOVA) uygulanarak işleme parametrelerinin performans sonuçları üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Taguchi esaslı gri ilişkisel analiz (TGİA) metodolojisi uygulanarak optimum işleme parametreleri bulunmuştur. EEİ sonrası işleme bölgesinde mikro çatlak, gözenek, krater, beyaz ve siyah tabaka oluşumu olası

yüzey deformasyonları olduğundan SEM ve EDS analizleri ile iş parçasının yüzey bütünlüğü incelenmiştir. Son olarak, elde edilen deneysel sonuçlar ve istatistiksel çalışmalardan detaylı bir analiz yapılmıştır.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada dalma tipi EEİ yöntemi kullanılarak semente karbür (WC-Co) çubuk üzerine DIN 6885 standartında kama yuvası açılmıştır. Deneyler üç farklı işleme koşulunda Taguchi L27 dikey dizinli deney tasarımına göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda Eşitlik 4.8-4.11 ile talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) hesaplanmıştır. Deneysel çalışma ile elde edilen TKM, TAM ve Ra sonuçları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Parametreler ve performans ölçüm sonuçları.

Deney No.	Ip	Ton	Toff	TKM [g/dk]	TAM [g/dk]	BA [%]	Ra [μ m]
1.	6	25	15	0,00456	0,000693	15,19	2,508
2.	6	25	30	0,00419	0,000644	15,36	2,672
3.	6	25	60	0,00388	0,000601	15,50	2,291
4.	6	50	15	0,00349	0,000408	11,70	3,559
5.	6	50	30	0,00358	0,000414	11,57	3,022
6.	6	50	60	0,00318	0,000363	11,41	3,186
7.	6	100	15	0,00256	0,000268	10,46	5,644
8.	6	100	30	0,00296	0,000331	11,18	4,674
9.	6	100	60	0,00329	0,000354	10,75	3,724
10.	12,5	25	15	0,01428	0,004309	30,17	3,246
11.	12,5	25	30	0,01540	0,005200	33,77	2,707
12.	12,5	25	60	0,01534	0,005184	33,80	2,925
13.	12,5	50	15	0,01395	0,002511	18,01	4,456
14.	12,5	50	30	0,01650	0,003067	18,59	4,069
15.	12,5	50	60	0,01408	0,002488	17,68	3,545
16.	12,5	100	15	0,01586	0,002044	12,89	6,319
17.	12,5	100	30	0,01383	0,001820	13,16	6,527
18.	12,5	100	60	0,01275	0,001779	13,95	5,218
19.	25	25	15	0,04655	0,026548	57,03	3,806
20.	25	25	30	0,04534	0,025909	57,14	3,344
21.	25	25	60	0,03246	0,017381	53,55	3,351
22.	25	50	15	0,04342	0,015000	34,55	5,485
23.	25	50	30	0,05130	0,017800	34,70	4,284
24.	25	50	60	0,04823	0,017396	36,07	3,877

Çizelge 6.1. (devam ediyor).

25.	25	100	15	0,04778	0,012870	26,94	8,324
26.	25	100	30	0,03519	0,008704	24,74	5,144
27.	25	100	60	0,04613	0,011452	24,83	5,604

6.1. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Varyans analizi (ANOVA), deneysel çalışmanın istatistiksel olarak değerlendirilmesi sürecinde işleme parametrelerinin çalışma sonuçları üzerindeki etkisini tanımlamak (araştırmak) amacı ile kullanılmıştır [102]. Çizelge 6.2’te TKM, TAM ve Ra’nın varyans analizi verilmiş ve işleme koşullarının deney sonuçları üzerindeki etkisi doğrulanmıştır. Çizelgede yer alan “P-Değeri” ($P < 0,05$ sınır şartı) parametrelerin deneysel çalışmaya katkısını ve % Etki ise parametrelerin kareler toplamına göre yüzde katkısını vermektedir. Verilen çizelgede işleme koşullarının serbestlik derecesi SD, kareler toplamını KT, kareler ortalamasını KO ve modeldeki önemini F değeri belirtmektedir [103]. Tam faktöriyel deney tasarımına göre oluşturulmuş deney düzeneği için serbestlik derecesinde hata üç parametrenin etkileşimi (Ip*Ton*Toff) olarak görünmektedir. ANOVA sonucuna göre TKM ve TAM için boşalım akımı en etkili parametre olurken (%96,06 ve %82,18), Ra için vurum süresi (%62,99) en etkili parametre olmuştur. P değerinin sınır şartı göz önüne alındığında TKM için boşalım akımı hariç diğer parametrelerin, TAM için Toff, Ip*Toff ve Ton*Toff, Ra için Ip*Ton, Ip*Toff ve Ton*Toff parametre ve etkileşimlerinin deneysel modele katkısının önemli olmadığı söylenebilir.

Çizelge 6.2. İşleme parametrelerinin deney sonuçlarına (TKM, TAM, Ra) istatistiksel etkisi.

Parametre	SD	KT	KO	F-değeri	P-değeri	% Etki
Talaş Kaldırma Miktarı (TKM)						
Ip	2	0,007888	0,003944	209,33	1,24E-07	96,06%
Ton	2	0,000020	0,000010	0,54	0,600947	0,25%
Toff	2	0,000010	0,000005	0,26	0,773946	0,12%
Ip*Ton	4	0,000046	0,000011	0,60	0,670561	0,55%
Ip*Toff	4	0,000012	0,000003	0,16	0,952308	0,15%
Ton*Toff	4	0,000085	0,000021	1,13	0,408884	1,03%
Hata	8	0,000151	0,000019			1,84%
Toplam	26	0,008212				100,00%

Çizelge 6.2. (devam ediyor).

Takım Aşınma Miktarı (TAM)						
Ip	2	0,001420	0,000710	153,03	4,21E-07	82,18%
Ton	2	0,000123	0,000061	13,25	0,002893	7,11%
Toff	2	0,000004	0,000002	0,43	0,667250	0,23%
Ip*Ton	4	0,000118	0,000030	6,37	0,013203	6,84%
Ip*Toff	4	0,000008	0,000002	0,46	0,766778	0,49%
Ton*Toff	4	0,000017	0,000004	0,93	0,493405	1,00%
Hata	8	0,000037	0,000005			2,15%
Toplam	26	0,001727				100,00%
Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)						
Ip	2	8,149	4,0745	16,69	0,001397	15,19%
Ton	2	33,804	16,9021	69,24	8,90E-06	62,99%
Toff	2	5,472	2,7358	11,21	0,004787	10,20%
Ip*Ton	4	0,642	0,1606	0,66	0,638049	1,20%
Ip*Toff	4	1,680	0,4201	1,72	0,237910	3,13%
Ton*Toff	4	1,963	0,4908	2,01	0,185873	3,66%
Hata	8	1,953	0,2441			3,64%
Toplam	26	53,664				100,00%

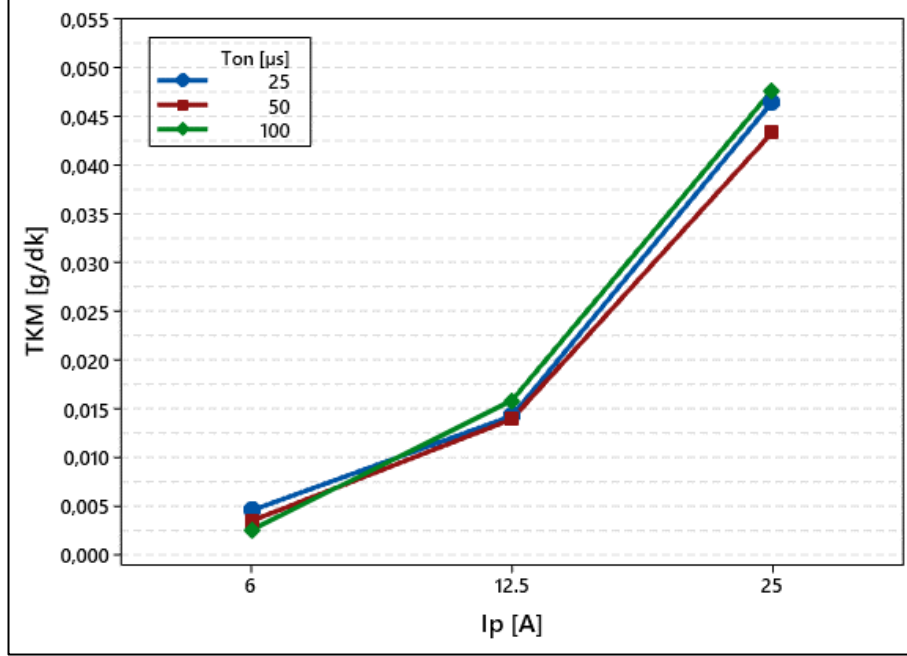
6.2. DENEY SONUÇLARININ GRAFİKSEL ANALİZİ

EEİ teknolojisiyle üretilen parçaların kalitesi ve işleme maliyeti için işleme hızı, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü en önemli kriterlerdir. Dolayısıyla, TKM'yi ve TAM'ı iyileştirmek üretim maliyetini düşürücü, Ra'yu iyileştirmek yüzey kalitesini yükselten etkenlerdir.

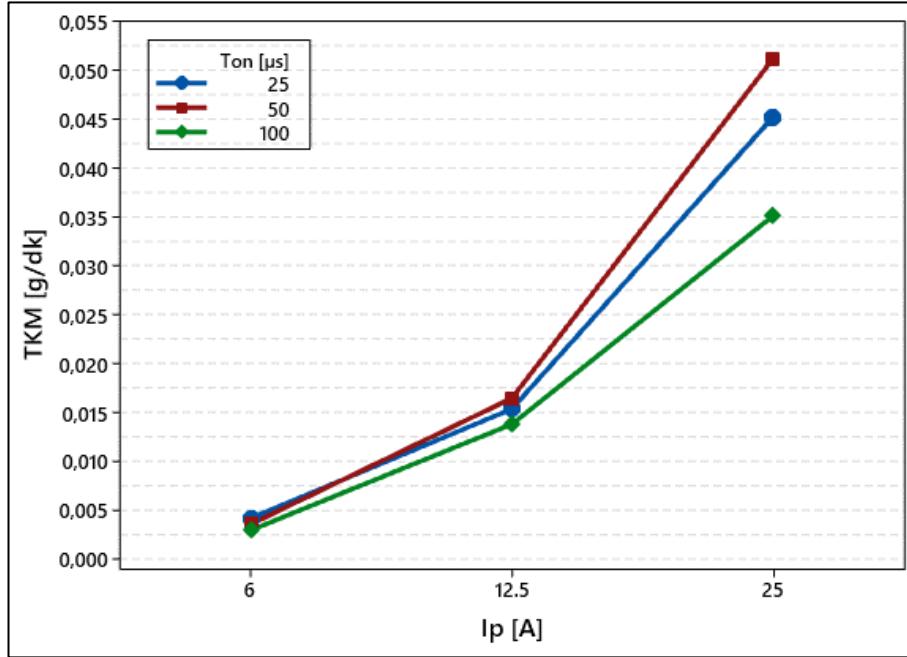
6.2.1. Talaş Kaldırma Miktarı (TKM)

Şekil 6.1-6.3'te grafikler 15, 30, 60 μ s vurum aralığına göre ayrılmış; grafikte vurum süresi ve boşalım akım değerlerinin TKM üzerine etkisi gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde boşalım akımının TKM üzerinde en çok değişime neden olduğu görülmektedir. Artan boşalım akımı vurum enerjisinde artışa sebep olarak şiddetli kıvılcımlar ile daha yüksek bir erozyona sebep olmaktadır. Boşalım sırasında malzemenin erime ve buharlaşması ile işleme boşluğunda oluşan döküntü bulutunun genişleme ve büzülme davranışları anlık değişen kuvvetlere (itici kuvvet) neden olur. Bu kuvvet ile döküntü işleme boşluğundan dielektrik ortama aktarılmaktadır [104].

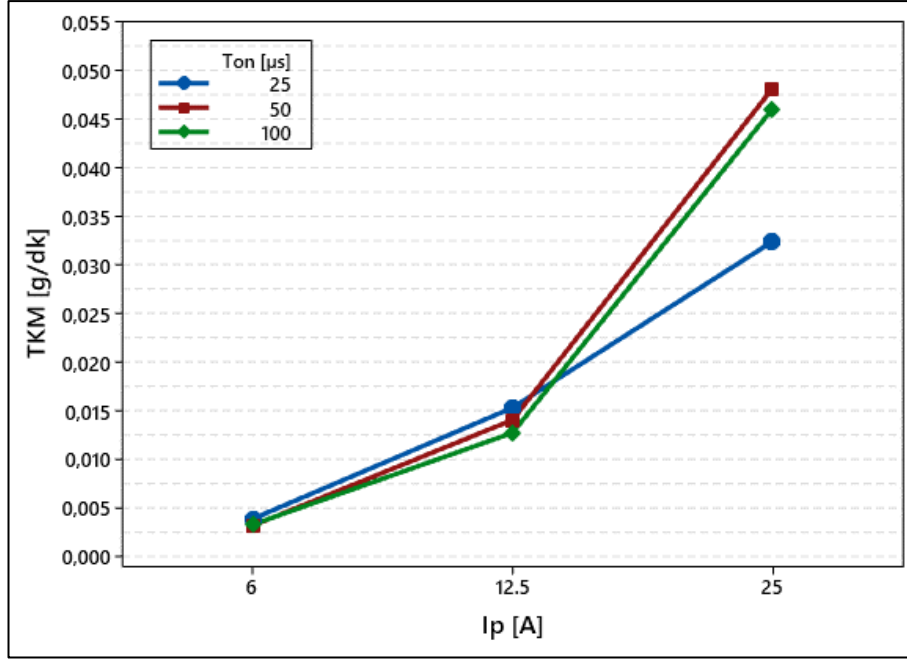
Böylece elde edilen verilere göre boşalım akımının artışı diğer parametrelerin artışına göre TKM'yi daha büyük bir oranda arttırmaktadır.



Şekil 6.1. Boşalım akımı ve vurum süresinin talaş kaldırma miktarına (TKM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 15 µs.



Şekil 6.2. Boşalım akımı ve vurum süresinin talaş kaldırma miktarına (TKM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 30 µs.



Şekil 6.3. Boşalım akımı ve vurum süresinin talaş kaldırma miktarına (TKM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 60 μ s.

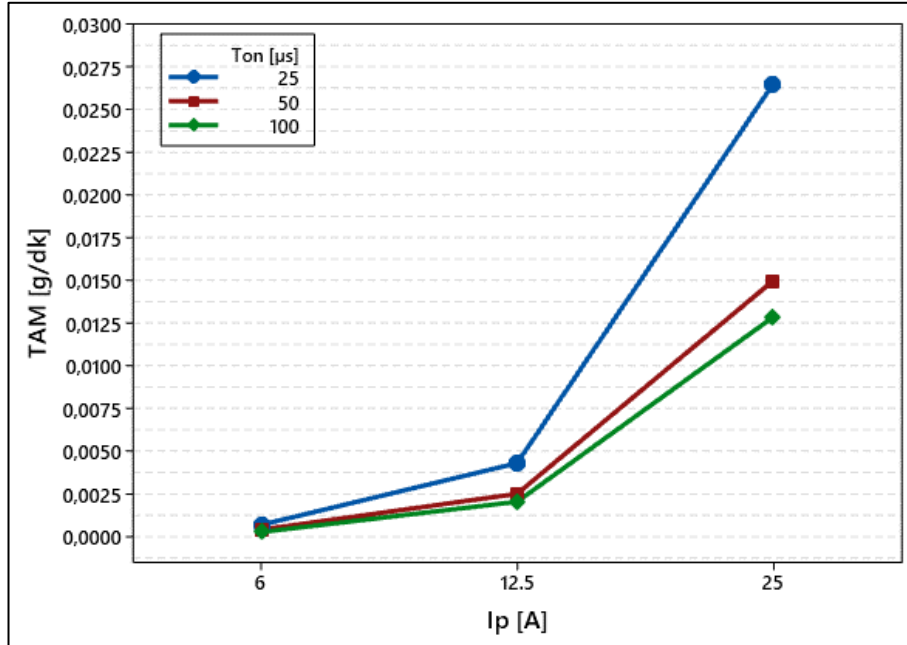
En yüksek TKM I_p :25A, Ton:50 μ s, Toff:30 μ s seviyesinde 0,05130 g/dk (Şekil 6.2), en düşük TKM I_p :6A, Ton:100 μ s, Toff:15 μ s seviyesinde 0,00256 g/dk (Şekil 6.1) olarak hesaplanmıştır. Yüksek vurum süresinde toplam vurum enerjisinin artmasına karşı plazma kanalındaki genişleme, işleme boşluğunda enerji yoğunluğunu azaltarak işleme bölgesinde birim alandaki ısı enerjisini düşürmektedir [105]. Bu nedenle vurum süresi uzun olduğunda TKM azaltmaktadır. Vurum süresi aşırı kısa olduğunda ise yeterli vurum enerjisi sağlanamadığından TKM düşük kalmaktadır. Grafiklerdeki küçük değişimler gözetildiğinde, ısı enerjisindeki değişim işleme sırasında erime buharlaşmayı yavaşlatarak TKM’de düşüşe sebep olabilir.

I_p :25A ve Toff:30 μ s değerinde (Şekil 6.2) vurum süresi sırasıyla 100, 25, 50 μ s seviyeleriyle TKM’nin artışına sebep olmuştur. Artan vurum süresinin malzemeyi hızla eritip buharlaştıracak vurum enerjisine sahip olmasının TKM’yi arttırdığı bilinmektedir. Ancak, TKM’nin 25A değerinde 100 μ s vurum süresinde diğer vurum sürelerine oranla düşük olması, artan vurum enerjisi ile elektrot yüzeyinde meydana gelen karbon birikmesinin kıvılcım mekanizmasını yavaşlatması [106], ve bu nedenle yeterli ısı enerjisi verilemediği için tam buharlaşmadan işlenmiş yüzeyde kalan ve

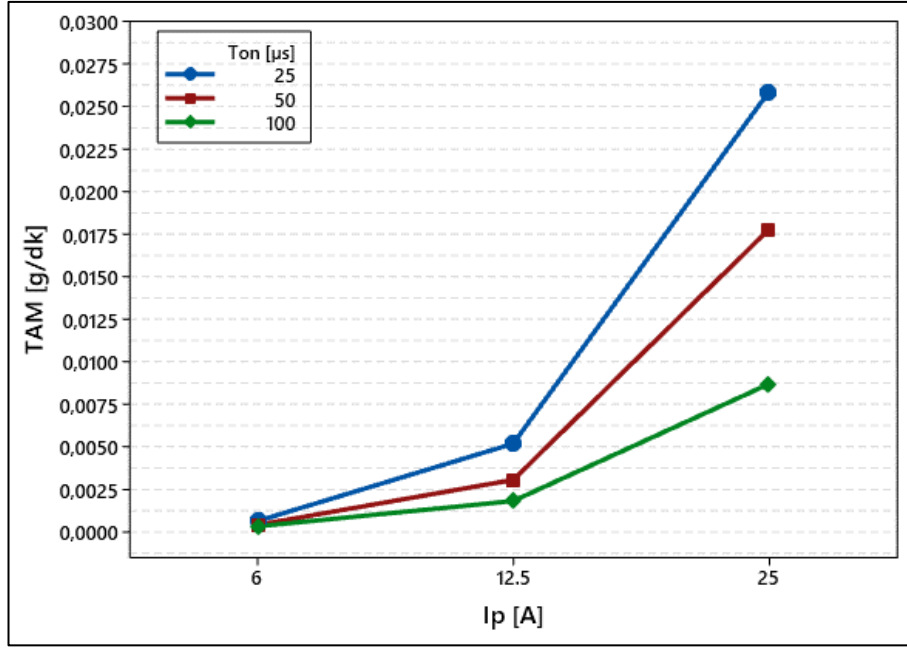
temizlenemeyen kalın tabakalı döküntünün işleme sonrası ve öncesi ölçülen kütle farkını azaltmasından kaynaklanabilir [107]. $I_p:25A$ ve $Toff:60\mu s$ değerinde (Şekil 6.3) vurum süresi sırasıyla 25, 100, 50 μs seviyelerinde TKM'de artışa sebep olmuştur. TKM'nin vurum süresi arttıkça artması 25A değerinde 25 μs vurum süresinde diğer vurum sürelerine oranla düşük olmasının göstergesi olabilir.

6.2.2. Takım Aşınma Miktarı (TAM)

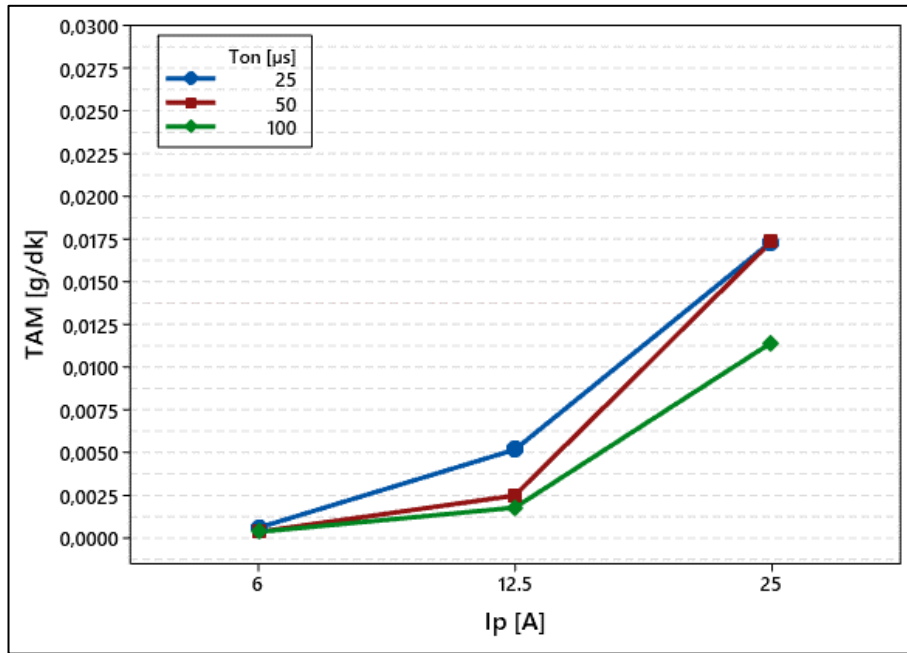
Şekil 6.4-6.6'da grafikler 15, 30, 60 μs vurum aralığına göre ayrılmış; grafikte vurum süresi ve boşalım akım değerlerinin TAM üzerine etkisi gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde boşalım akımının TAM üzerinde en etkili değişken olduğu görülmektedir. TKM ile aynı sebepten artan boşalım akımının vurum enerjisini arttırması ile açığa çıkan ısı enerjisi ve itici kuvvetin takım elektrotunu da aşındırdığı düşünülmektedir. Ayrıca artan vurum süresi ile dielektrik sıvıdan ayrılan karbon, takım elektrotu anot iken takım yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak aşınmayı azaltacağı öngörülmektedir [24]. Bu durumda Şekil 6.4-6.6'daki grafikler incelendiğinde vurum süresi arttıkça TAM'ın azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.4. Boşalım akımı ve vurum süresinin takım aşınma miktarına (TAM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 15 μs .



Şekil 6.5. Boşalım akımı ve vurum süresinin takım aşınma miktarına (TKM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 30 μ s.



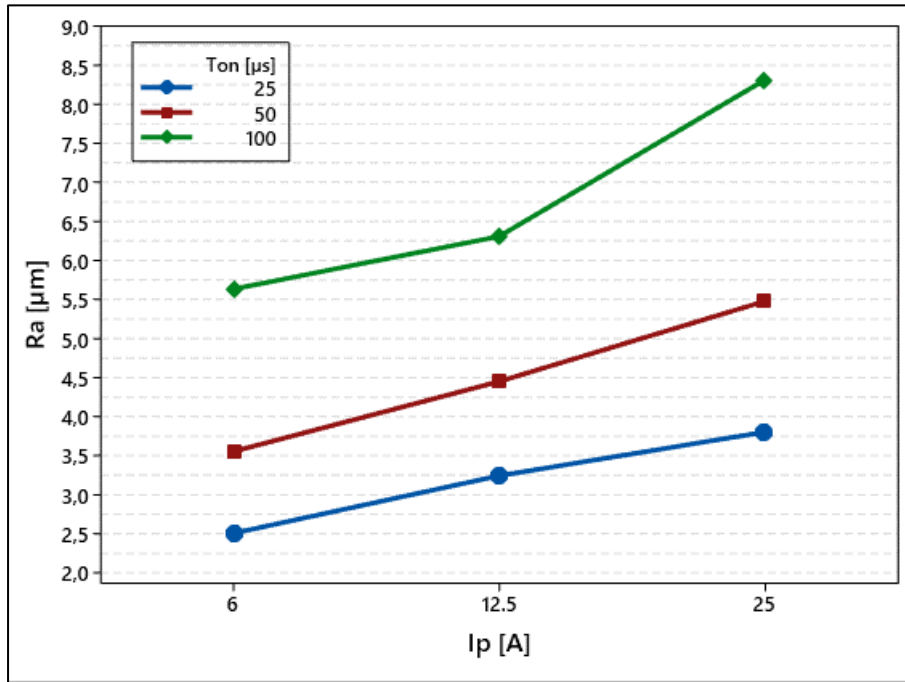
Şekil 6.6. Boşalım akımı ve vurum süresinin takım aşınma miktarına (TAM) etkisi, vurum aralığı (Toff): 60 μ s.

En yüksek TAM I_p :25A, T_{on} :25 μ s, T_{off} :15 μ s seviyesinde 0,026548 g/dk (Şekil 6.4), en düşük TAM I_p :6A, T_{on} :100 μ s, T_{off} :15 μ s seviyesinde 0,000268 g/dk (Şekil 6.4) olarak hesaplanmıştır. Deneysel verilerden elde edilen TAM grafikleri incelendiğinde

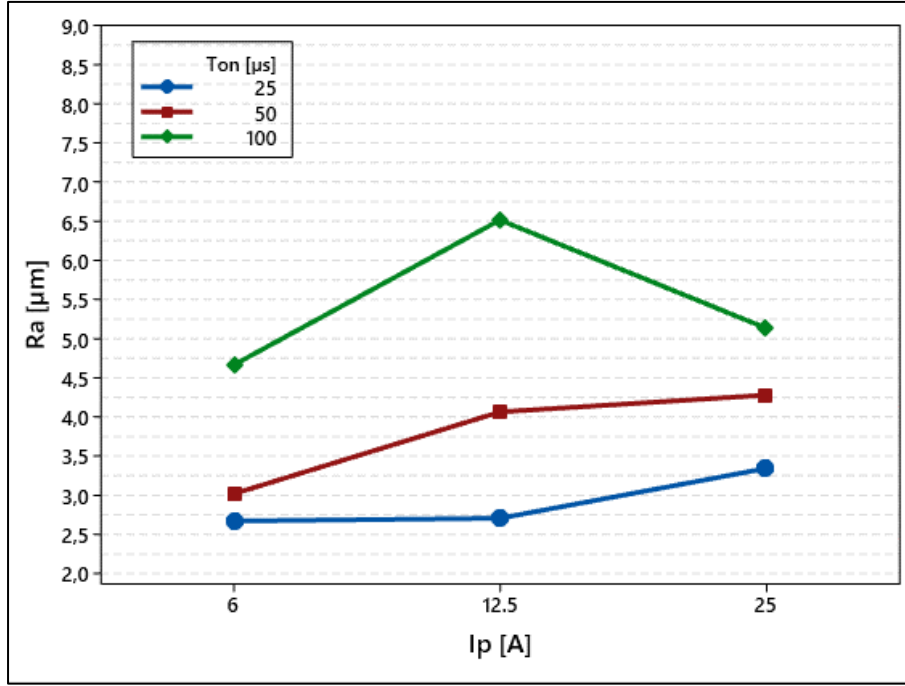
boşalım akımı arttıkça TAM artmış, vurum süresi arttıkça TAM azalmıştır. Grafiklerde vurum aralığının 6A ve 12,5A boşalım akımında TAM üzerinde ani değişimlere neden olmadığı görülmektedir. Vurum enerjisi ile açığa çıkan ısı, yüksek vurum aralığında hızla soğuyarak takım üzerinde bir karbon tabakasının oluşmasına neden olabilir. Ancak vurum enerjisi ile oluşan bölgesel ısının çok yüksek olması durumunda karbon tabakasının oluşumu ve katılaşması için belirlenen vurum aralığı yeteri kadar uzun olmayabilir [71,83]. Grafiklerden görülebileceği gibi, bu fenomene vurum aralığının artışı ile TAM'da azalma olarak gözlemlenmiştir.

6.2.3. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)

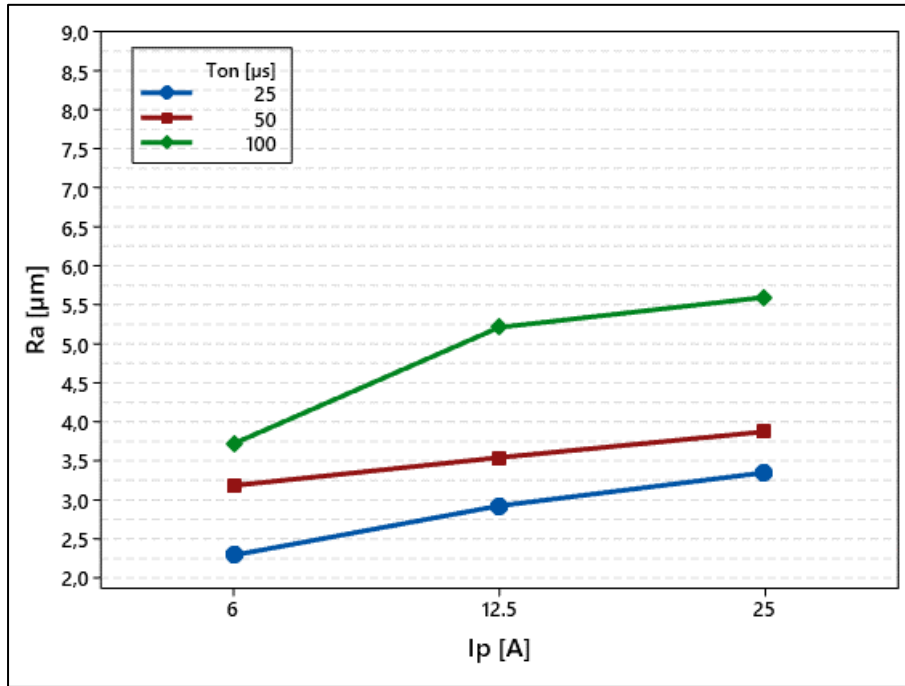
Yüzey pürüzlülüğü işlenen iş parçasının kalitesini belirleyen en yaygın performans değeridir. Şekli 6.7-6.9'te görüldüğü üzere grafikler 15, 30, 60 μ s vurum aralığına göre ayrılmış; grafikte vurum süresi ve boşalım akım değerlerinin Ra üzerine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Boşalım akımı ve vurum süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi, vurum aralığı (Toff): 15 μ s.



Şekil 6.8. Boşalım akımı ve vurma süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi, vurma aralığı (Toff): 30 μs.

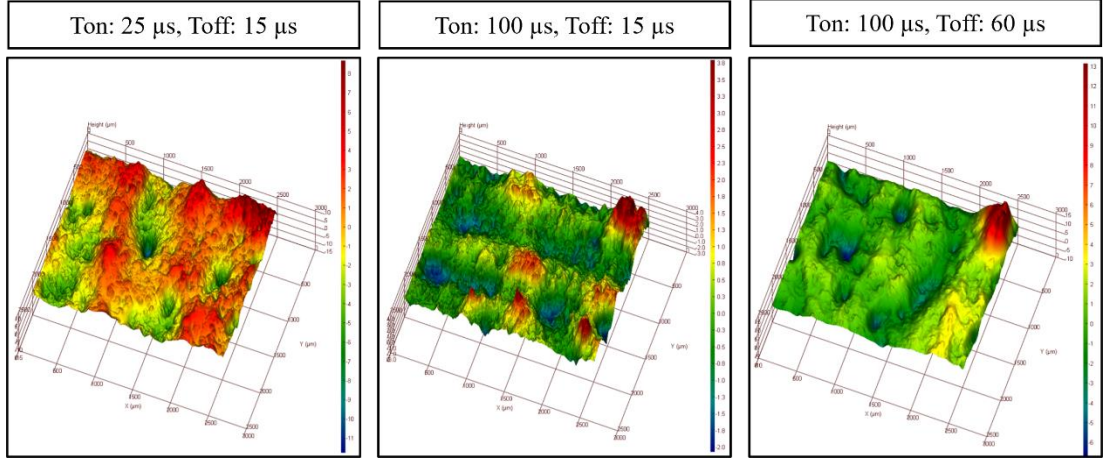


Şekil 6.9. Boşalım akımı ve vurma süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi, vurma aralığı (Toff): 60 μs.

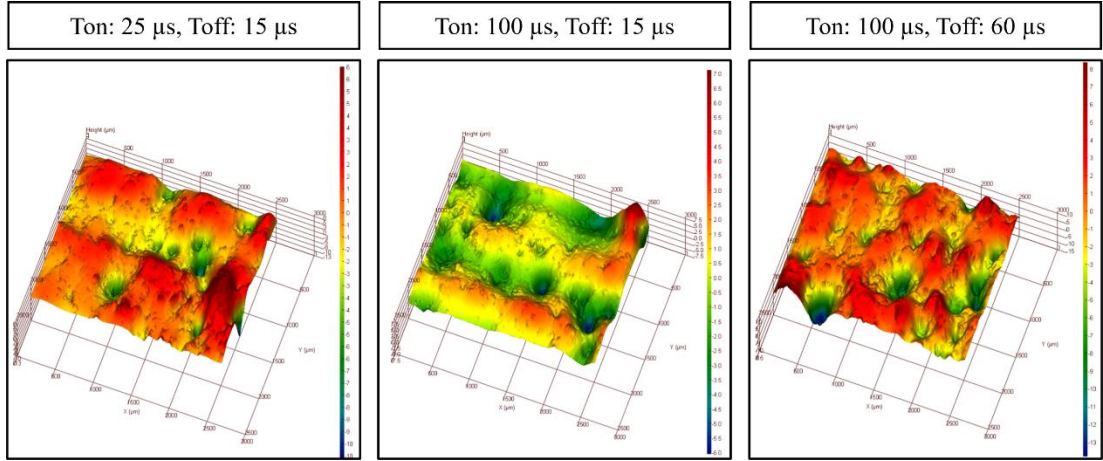
Boşalım akımındaki artış işleme sırasında iş parçası yüzeyine yoğun enerji aktararak daha derin kraterlere sebebiyet verirken vurum süresindeki artış ise plazma kanalındaki genişleme sebebi ile daha geniş çapta kraterlere sebep olmaktadır [108]. Böylece deneysel sonuçlardan elde edilen Ra grafiklerinde boşalım akımı ve vurum süresi arttıkça Ra artmaktadır. Vurum aralığı arttıkça Ra azalmaktadır. Ancak Şekil 6.8'de 100 us vurum süresinde Ra, boşalım akımı arttıkça önce artmış sonra azalmıştır. Bu sonuç, işleme sırasında oluşan kısa devre kıvılcımlarının temizlenemeyen döküntünün işleme bölgesinde kalın bir katman oluşturmasına [69] atfedilmiştir. Böylece, işlenmiş yüzeydeki krater oluşumu karmaşık bir formda oluşarak pürüzlülüğün artmasına sebebiyet vermiştir. En düşük Ra $I_p:6A$, $Ton:25\mu s$, $Toff:60\mu s$ seviyesinde $2,291 \mu m$ (Şekil 6.9), en yüksek Ra $I_p:25A$, $Ton:100\mu s$, $Toff:15\mu s$ seviyesinde $8,324 \mu m$ (Şekil 6.7) olarak hesaplanmıştır.

6.2.4. Yüzey Topografyası

EEİ'de malzeme kaldırma mekanizması, takım elektrotuna en yakın iş parçası yüzeyinde oluşan kıvılcım ile kraterler oluşturarak gerçekleşir. Bu durum rasgele kıvılcımlara sebebiyet vererek iş parçasının yüzey morfolojisinde rasgele tepeler, kraterler ve vadiler oluşturabilmektedir [109]. Bu bağlamda, yüzey morfolojisindeki değişimleri incelemek amacıyla I_p , Ton ve $Toff$ parametrelerinin en yüksek ve en düşük değerlerinde işlenen parçaların 3D topografik görüntüleri alınmıştır (Şekil 6.10 ve 6.11). Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de boşalım akımı arttıkça oluşan tepeler ve kraterlerin miktarı azalmakta; boyutlarının ise genişlemekte olduğu görülmektedir. Bunun nedeni artan boşalım akımı ile aktarılan enerjinin işleme bölgesinde daha fazla erime ve buharlaşmaya neden olmasıdır [57]. Azalan boşalım akımı işleme bölgesine aktarılan enerji azalarak buharlaşmayı yavaşlatır, yeterli ısı olmadığından eriyik malzeme katılarak tepe yoğunluğunu artırır. Vurum aralığı ve vurum süresi arttıkça oluşan kraterlerin ve tepelerin yüksekliği azalmaktadır. Vurum süresinin boşaltma çapını arttırmasından kaynaklı birim alana verilen enerji miktarı da azalmaktadır [24]. Bu durum yüksek vurum süresinde derin kraterler oluşmasını engellemekte, krater ve tepelerin çapını arttırmaktadır. Diğer yandan, vurum aralığının artması döküntünün daha iyi dışarı atılması ile sonuçlanır ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirir.



Şekil 6.10. İşlenmiş deney numunelerinin topoğrafya grafikleri (Ip: 6 A).



Şekil 6.11. İşlenmiş deney numunelerinin topoğrafya grafikleri (Ip: 25 A).

6.3. GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ VE PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU

Çalışmada gelinen noktada elektro erozyon ile işlemede boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığının performans sonuçlarına etkisinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Aynı şekilde bu sonuçların birimleri de aynı değildir. Bu farklılıklardan dolayı optimum sonuç için uygun parametrelerin seçilmesinde bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak optimizasyon sırasında verilerin bir bütün olarak değerlendirilmesi gereklidir. Bu sebeple, deneysel çalışmada çoklu performans sonuçlarını değerlendirmek ve optimizasyonu için en uygun yöntem olan TGİA kullanılmıştır. Bölüm 4.5.3'te açıklandığı gibi optimizasyon için performans sonuçlarının yaklaşımı belirlenmelidir. Bu bağlamda TKM'yi maksimize etmek için

Eşitlik 4.16 “büyük daha iyidir”, TAM ve Ra’yı minimize etmek için Eşitlik 4.18 “küçük daha iyidir” yaklaşımı benimsenmiştir. Eşitlik 4.16 ve 4.18 ile normalize edilmiş TKM, TAM ve Ra için Eşitlik 4.19 kullanılarak gri ilişkisel katsayılar belirlenmiştir. Bir sonraki aşama olan gri ilişkisel derece Eşitlik 4.20 kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada her performans sonucu eşit öneme sahip olduğundan ($n = 3$) her bir performans sonucu için $w_j = 1/3$ olarak alınmıştır. Çizelge 6.3’te çalışmada elde edilen performans sonuçları için gri ilişkisel analiz verilerinin normalizasyonu, gri ilişkisel katsayısı, gri ilişki derecesi ve gri ilişki derece sıralaması verilmiştir.

Çizelge 6.3. Gri ilişkisel analiz sonuçları ve sıralama.

Deney No.	Normalizasyon			Gri İlişkisel Katsayı			Gri İlişki Derecesi	Sıra
	TKM	TAM	Ra	TKM	TAM	Ra		
1.	0,041	0,984	0,964	0,343	0,969	0,933	0,748	2
2.	0,034	0,986	0,937	0,341	0,972	0,888	0,734	3
3.	0,027	0,987	1,000	0,339	0,975	1,000	0,772	1
4.	0,019	0,995	0,790	0,338	0,989	0,704	0,677	6
5.	0,021	0,994	0,879	0,338	0,989	0,805	0,711	4
6.	0,013	0,996	0,852	0,336	0,993	0,771	0,700	5
7.	0,000	1,000	0,444	0,333	1,000	0,474	0,602	20
8.	0,008	0,998	0,605	0,335	0,995	0,559	0,630	14
9.	0,015	0,997	0,762	0,337	0,993	0,678	0,669	9
10.	0,241	0,846	0,842	0,397	0,765	0,760	0,640	13
11.	0,263	0,812	0,931	0,404	0,727	0,879	0,670	8
12.	0,262	0,813	0,895	0,404	0,728	0,826	0,653	11
13.	0,234	0,915	0,641	0,395	0,854	0,582	0,610	19
14.	0,286	0,893	0,705	0,412	0,824	0,629	0,622	16
15.	0,236	0,916	0,792	0,396	0,855	0,706	0,653	12
16.	0,273	0,932	0,332	0,407	0,881	0,428	0,572	25
17.	0,231	0,941	0,298	0,394	0,894	0,416	0,568	27
18.	0,209	0,943	0,515	0,387	0,897	0,508	0,597	21
19.	0,903	0,000	0,749	0,837	0,333	0,666	0,612	18

Çizelge 6.3. (devam ediyor).

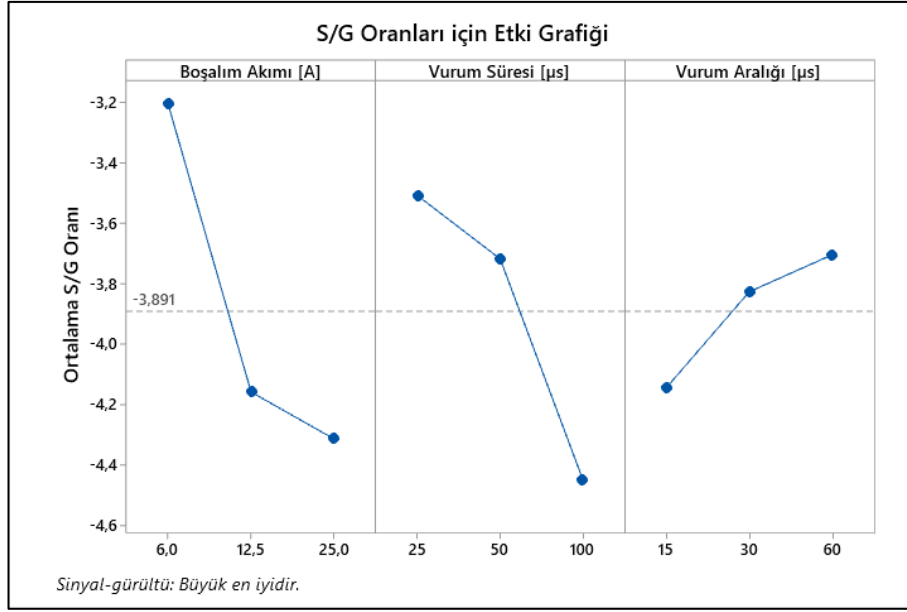
20.	0,878	0,024	0,825	0,804	0,339	0,741	0,628	15
21.	0,613	0,349	0,824	0,564	0,434	0,740	0,579	22
22.	0,838	0,439	0,471	0,756	0,471	0,486	0,571	26
23.	1,000	0,333	0,670	1,000	0,428	0,602	0,677	7
24.	0,937	0,348	0,737	0,888	0,434	0,655	0,659	10
25.	0,928	0,520	0,000	0,874	0,510	0,333	0,573	24
26.	0,669	0,679	0,527	0,602	0,609	0,514	0,575	23
27.	0,894	0,574	0,451	0,825	0,540	0,477	0,614	17

Elde edilen gri ilişkisel derecelere göre Taguchi metodolojisi ile en büyük en iyi yaklaşımı kullanılarak (Eşitlik 4.22) yapılan değerlendirme sonucunda Çizelge 6.4'teki ana etki ve Şekil 6.12'deki S/G grafikleri elde edilmiştir (Minitab 19). Çizelgede işleme parametrelerinin en yüksek değeri optimum değeri, delta sütunu ve etki sırası ise parametrelerin önem derecesini ifade eder. Çizelge 6.4'e göre A1B1C3 optimum parametre değeri olarak görülmektedir. Böylece 6A boşalım akımında, 25 us vurum süresi ve 60 vurum aralığında optimum parametre belirlenmiştir. Belirlenen koşullarda en uygun performans sonuçları TKM 0,003581 g/dk, TAM 0,000414 g/dk ve Ra 2,291 µm değerindedir. Şekli 6.12'deki grafikler yardımı ile başlangıç parametrelerinin doğruluğu kontrol edilmiş ve tahmini GRG sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 6.4. İşleme parametreleri için GRG ortalama verileri.

Sembol	Parametre	Faktör seviyelerine göre GRG ortalaması				
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Delta	Etki Sırası
A	I _p	0,6936	0,6206	0,6097	0,0839	1
B	T _{on}	0,6706	0,6533	0,6000	0,0706	2
C	T _{off}	0,6229	0,6460	0,6551	0,0322	3

GRG'nin toplam ortalama değeri = 0,6413



Şekil 6.12. Boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı etki dereceleri.

Elektro erozyon ile işleme parametrelerinin çoklu yanıt üzerindeki etkisini kapsamlı şekilde tanımlama amacı ile gri ilişkisel dereceler için %95 güven düzeyinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. P değeri sınır şartına göre I_p , T_{on} , T_{off} parametrelerinin ve $I_p * T_{on}$ ikili etkisinin GRG üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir. Varyans analiz sonucu boşalım akımının en önemli parametre olduğunu; ardından performans sonuçlarına sırasıyla boşalım akımının %44,23, vurum süresinin %28,77 ve vurum aralığının %5,87 etkisini göstermektedir (Çizelge 6.5).

Çizelge 6.5. Gri ilişkisel derece varyans analizi.

Tanımlar	DF	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	% Etki
I_p	2	0,037448	0,018724	33,79	0,00013	44,23%
T_{on}	2	0,024364	0,012182	21,98	0,00056	28,77%
T_{off}	2	0,004968	0,002484	4,48	0,04945	5,87%
$I_p * T_{on}$	4	0,008637	0,002159	3,90	0,04823	10,20%
$I_p * T_{off}$	4	0,001104	0,000276	0,50	0,73849	1,30%
$T_{on} * T_{off}$	4	0,003719	0,000930	1,68	0,24704	4,39%
Hata	8	0,004433	0,000554			5,24%
Toplam	26	0,084673				100,00%

Yapılan analiz sonucunda belirlenen optimum parametrelerde (I_p :6A, T_{on} :25µs, T_{off} :60µs) doğrulama deneyi yapılarak GRG'deki iyileşme miktarı belirlenmiştir. Bu deney sonrasında elde edilen TKM, TAM ve Ra için gri ilişkisel derece 0,7713 olarak

belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar tahmini sonuçlardan %2,21 daha iyidir. Çizelge 6.6'da tahmini gri ilişkisel derece ve optimum parametrelerde deneysel gri ilişkisel derece sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca çizelgede tahmini ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Çizelgede verilen sonuçlar incelendiğinde doğrulama deneyinden elde edilen gri ilişkisel derece başlangıç parametresine göre güven aralığı limitlerinde 0,15 fark ile %23,95 iyileşmiştir. Bu durumda EEİ yöntemi için Taguchi metodolojisi ile uygulanan gri ilişkisel analiz TKM, TAM ve Ra için uygulanabilir sonuçlar vermiştir.

Çizelge 6.6. Tahmini ve deneysel sonuçların karşılaştırması.

	Başlangıç Parametresi	Optimum Parametreler	
		Tahmini	Deneysel
Seviye	A2B2C2	A1B1C3	A1B1C3
TKM [g/dk]	0,0165		0,004185
TAM [g/dk]	0,00307		0,000619
Ra [μ m]	4,069		2,2942
Gri ilişkisel katsayı	0,622	0,7546	0,7713
GRG'de iyileşme: 0,15			
GRG'de yüzde iyileşme: %23,95			

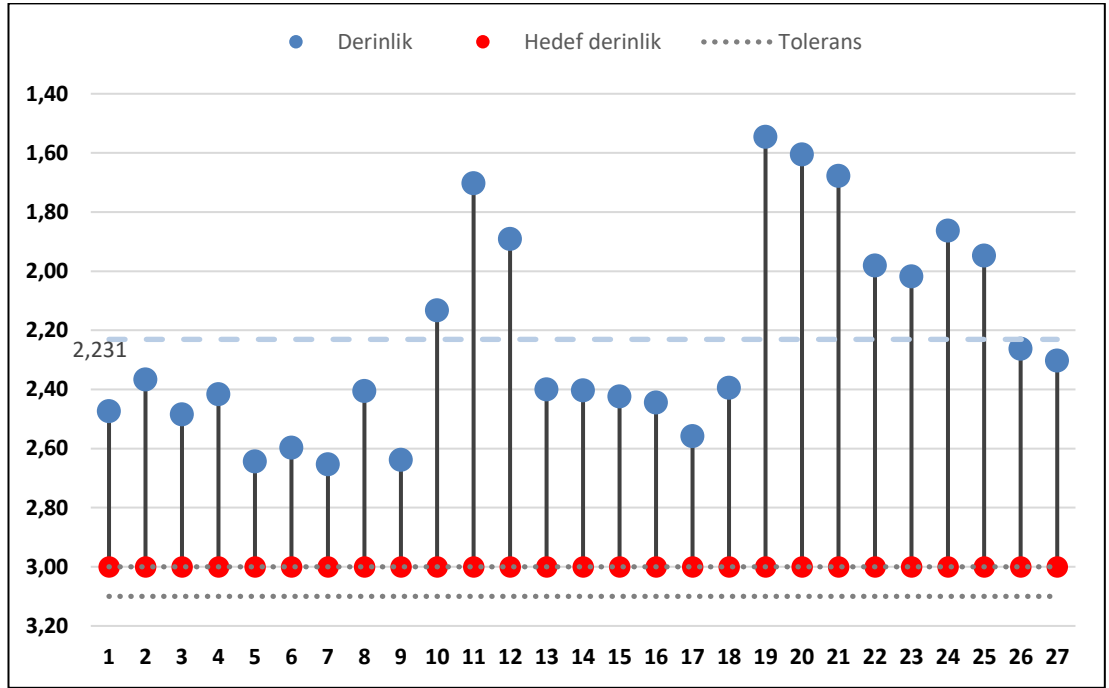
6.4. BOYUTSAL TAMLIK

EEİ yöntemi ile semente karbür (WC-Co) malzemesinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda DIN 6885 standartlarında olması istenen kama yuvasının boyutsal ölçümleri Bölüm 5.1.9'da bahsedilen CMM makinesi aracılığı ile yapılmıştır. Bu bölümde kama yuvası için uzunluk, genişlik ve derinlik ölçüm sonuçlarının deney sıralamasına göre oluşturulmuş grafikleri verilmiş ve işleme parametrelerinin ölçü tamlığına etkisi araştırılmıştır.

6.4.1. Derinlik

Deneysel sonuçlarda kullanılan mil çapı ve kama ölçülerine göre DIN6885 standartlarında delik derinliği toleransı +0,1 olarak belirlenmiştir. Şekil 6.13 incelendiğinde, deneysel

çalışmada elde edilen derinlik sonuçlarının ortalaması 2,231 mm olarak hesaplanmıştır. Hedeflenen kama yuvası derinliğine en yakın değer 7. deneyde (Ip:6A, Ton:100µs, Toff:15µs) elde edilmiştir. Bu deney sonucunda elde edilen 2,653 mm kama yuvası derinliği değeri hedeflenen kama yuvası derinliği arasındaki fark % 11,57 olarak hesaplanmıştır. Hedeflenen değer ile ölçülen değerler arasındaki en büyük fark 19. deney şartında (Ip:25A, Ton:25µs, Toff:15µs) %48,47 olmuştur.

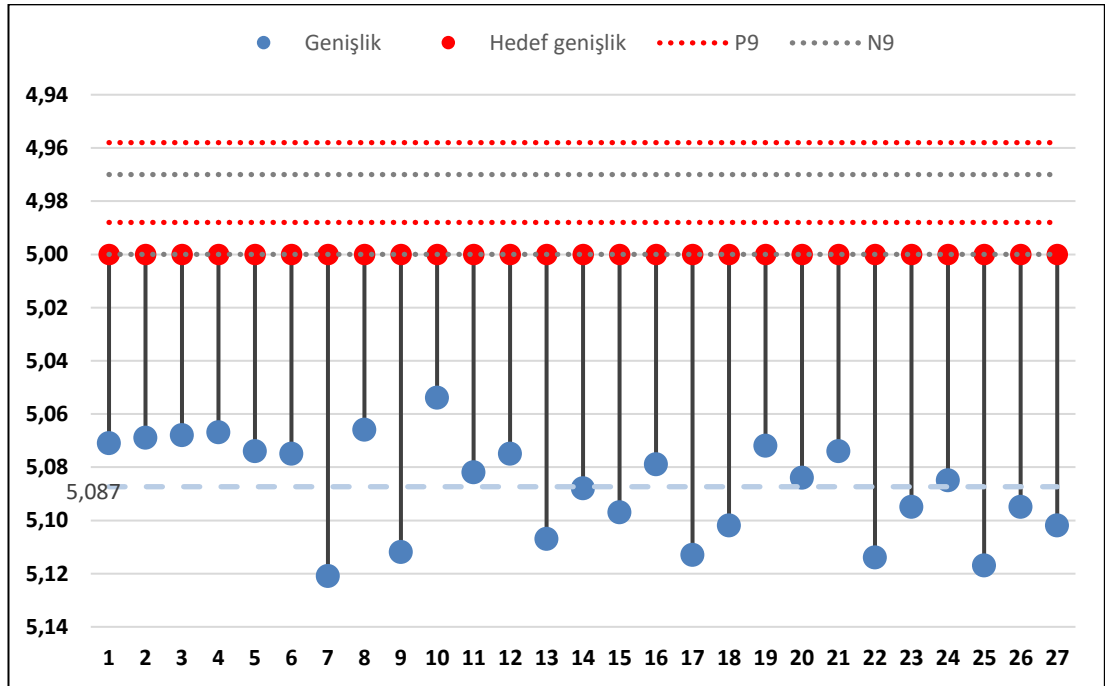


Şekil 6.13. Deney sıralamasına göre kama yuvası derinlik grafiği.

Derinlikteki değişimlerin, işleme parametrelerine bağlı olarak işleme süreci ve takım aşınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Boşalım akımı yüksek olduğunda vurum enerjisi artarak işleme yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık ve elektron hareketliliği daha hızlı takım aşınmasına neden olmaktadır [18,110]. Vurum süresi elektrot aşınmasını engelleyen karbon tabakasının oluşumuna yardımcı olmaktadır. Vurum aralığı, dielektrik içerisinde işleme sırasında karışan yoğun elektrot partiküllerini (döküntü) temizleyerek stabil işleme koşulunu sağlamaktadır [83]. Standartta uygun bir işleme kalitesi, boyutsal tamlıkta elde edilen derinlik sonuçları ile işleme derinliği ayarlanarak sağlanabilir.

6.4.2. Genişlik

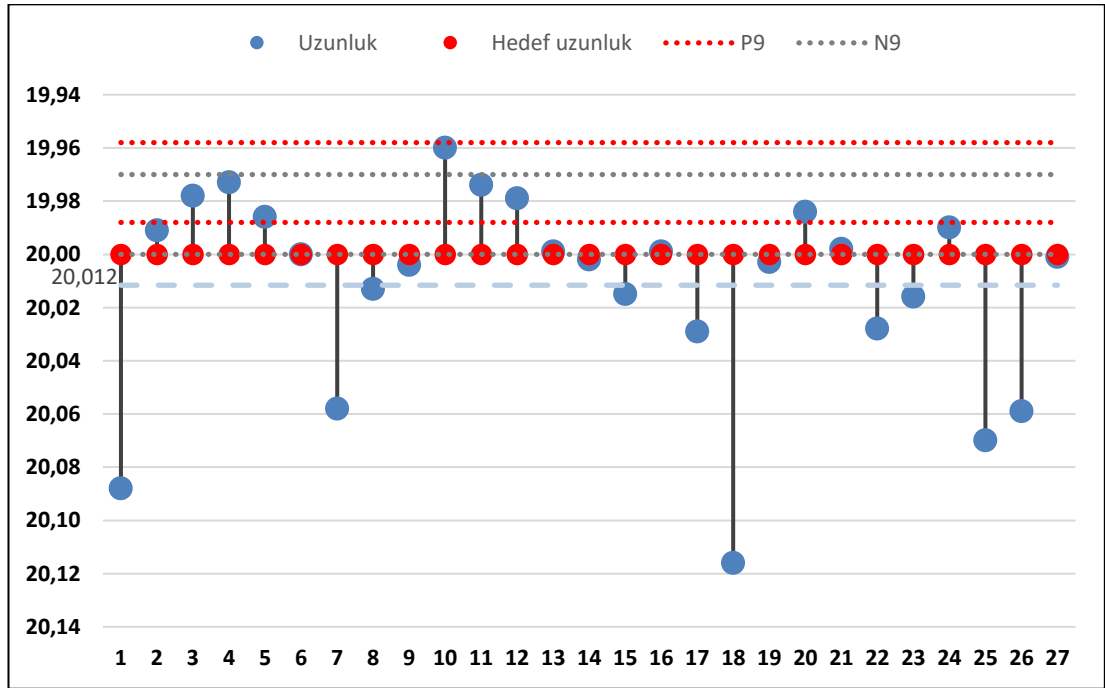
Deneyleerde kullanılan mil çapı ve kama ölçülerine göre DIN6885 standartında delik genişliği P9 veya N9 toleranslarına göre şekillendirilmelidir. CMM ölçümleri ile elde edilen sonuçlar EEİ’de takım elektrotun parametrelere göre işleme alanına uyguladığı genişlemeyi vermiştir. Şekil 6.14 incelendiğinde, deneysel çalışmada elde edilen genişlik sonuçlarının ortalaması 5,087 mm olarak hesaplanmıştır. Şekilde tolerans standartlarının aralığı ve hedef genişlik gösterilmiştir. Hedeflenen kama yuvası genişliğine en yakın değer 10 nolu deneyde (Ip:12,5A, Ton:25µs, Toff:15µs) elde edilmiştir. Bu deney sonucunda elde edilen 5,054 mm kama yuvası genişliği değeri hedeflenen kama yuvası genişliği arasındaki fark %1,07 olarak hesaplanmıştır. Hedeflenen değer ile ölçülen değerler arasındaki en büyük fark 7. deney şartında (Ip:6A, Ton:100µs, Toff:15µs) %2,36 olmuştur. Hedef genişlik ile ölçülen genişlik arasındaki fark elektro erozyon mekanizmasının genel prensiplerinden olan plazma kanalı genişlemesine göre değişmekte olduğu ön görülmektedir [111].



Şekil 6.14. Deney sıralamasına göre kama yuvası genişlik grafiği.

6.4.3. Uzunluk

Deneysel çalışma sonrası boyutsal tamlığı belirleyen uzunluk parametresi için hedef değerler genişlik sonucunda olduğu gibi DIN6885 standartında P9 ve N9 toleransına göre belirlenmiştir. CMM ölçümleri ile elde edilen sonuçlar EEİ’de takım elektrotun parametrelere göre işleme alanına uyguladığı uzamayı vermiştir. Şekil 6.15 incelendiğinde, deneysel çalışmada elde edilen uzunluk sonuçlarının ortalaması 20,012 mm olarak hesaplanmıştır. Şekilde tolerans standartlarının aralığı ve hedef genişlik gösterilmiştir. Şekil 6.15’te görüldüğü üzere hedeflenen kama yuvası uzunluğu ve belirlenen tolerans aralığında gözlemlenen deneyler bulunmaktadır. Hedeflenen değer ile ölçülen değerler arasındaki en büyük fark ise 18. deney şartında (Ip:12,5A, Ton:100µs, Toff:60µs) %0,58 olmuştur. Belirtilen değerler, kama genişliğindeki sapmanın uzamaya göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu durum, kama genişliği yüzey alanının fazla olmasından kaynaklı kıvılcım miktarındaki artış ve yoğun döküntü oluşumu olarak görülmektedir [112].

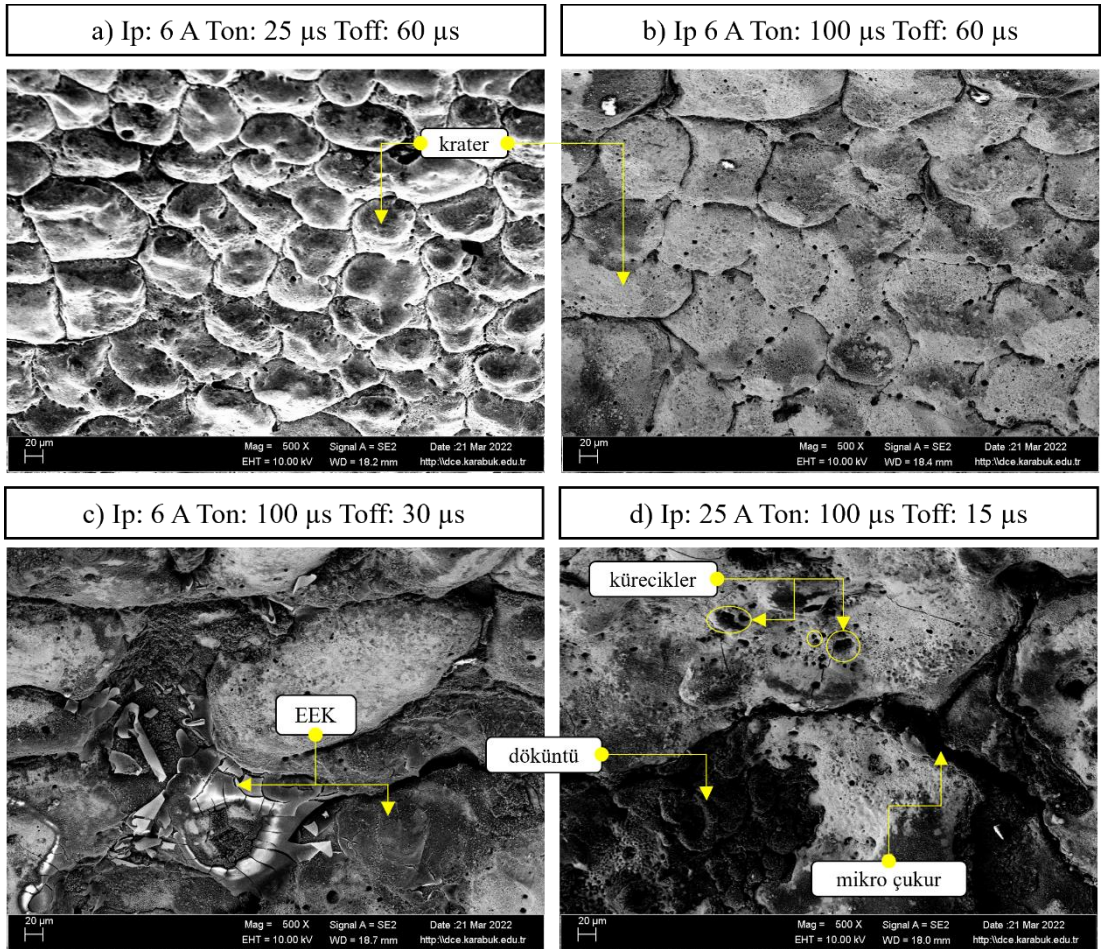


Şekil 6.15. Deney sıralamasına göre kama yuvası uzunluk grafiği.

Elde edilen ölçü tamlığı verileri ile takım elektrotu daraltılarak standarda uygun sonuçlar elde edilmesi mümkündür.

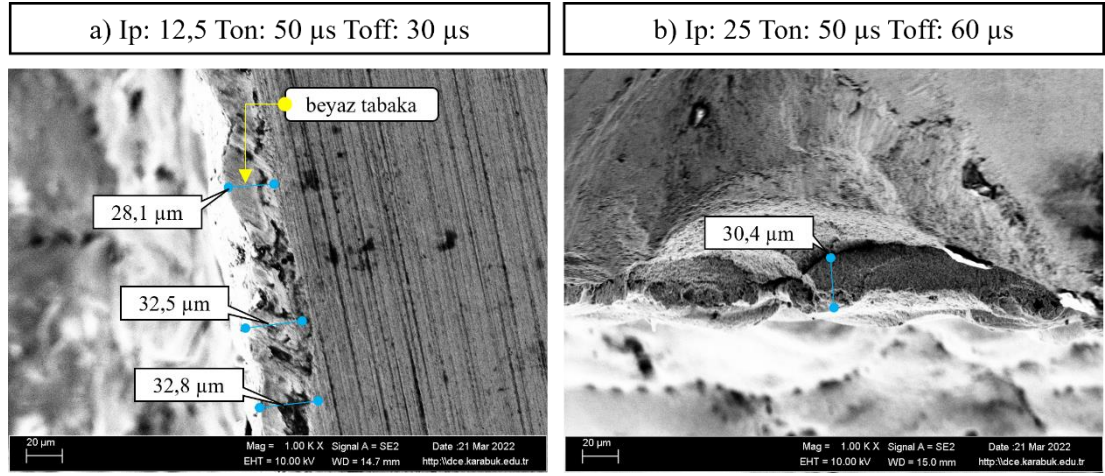
6.5. SEM VE EDS GÖRÜNTÜLERİ

Elektro erozyon ile işleme tekniği hassas ve karmaşık parçaların işlenmesi için ideal bir metot olmasına karşın işleme bölgesinde bu tekniğin dezavantajı olarak nitelendirilen yeniden döküm katmanı, mikro çatlaklar, kraterler ve yüksek termal enerjiden kaynaklı yüzey hasarları oluşmaktadır [113]. Şekil 6.16-6.18 iş parçası numunesinin işleme yüzeyi kesitlerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrograflarını ve enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) analizini göstermektedir. Şekil 6.16.a-6.16.b'de vurum süresine bağlı olarak kraterler genişlemektedir. Kraterlerde oluşan bu genişleme Bölüm 6.2.4'te bahsedildiği üzere vurum süresinin boşaltma çapına etkisinden kaynaklanabilmektedir. Düşük vurum aralığının etkisi Şekil 6.16.c ve 6.16.d'de döküntünün işleme yüzeyinden temizlenememesi sonucu oluşan elektro erozyon katmanı (EEK), kürecikler ve mikro çukurlar olarak görülmektedir.



Şekil 6.16. İşlenmiş yüzey SEM görüntüleri.

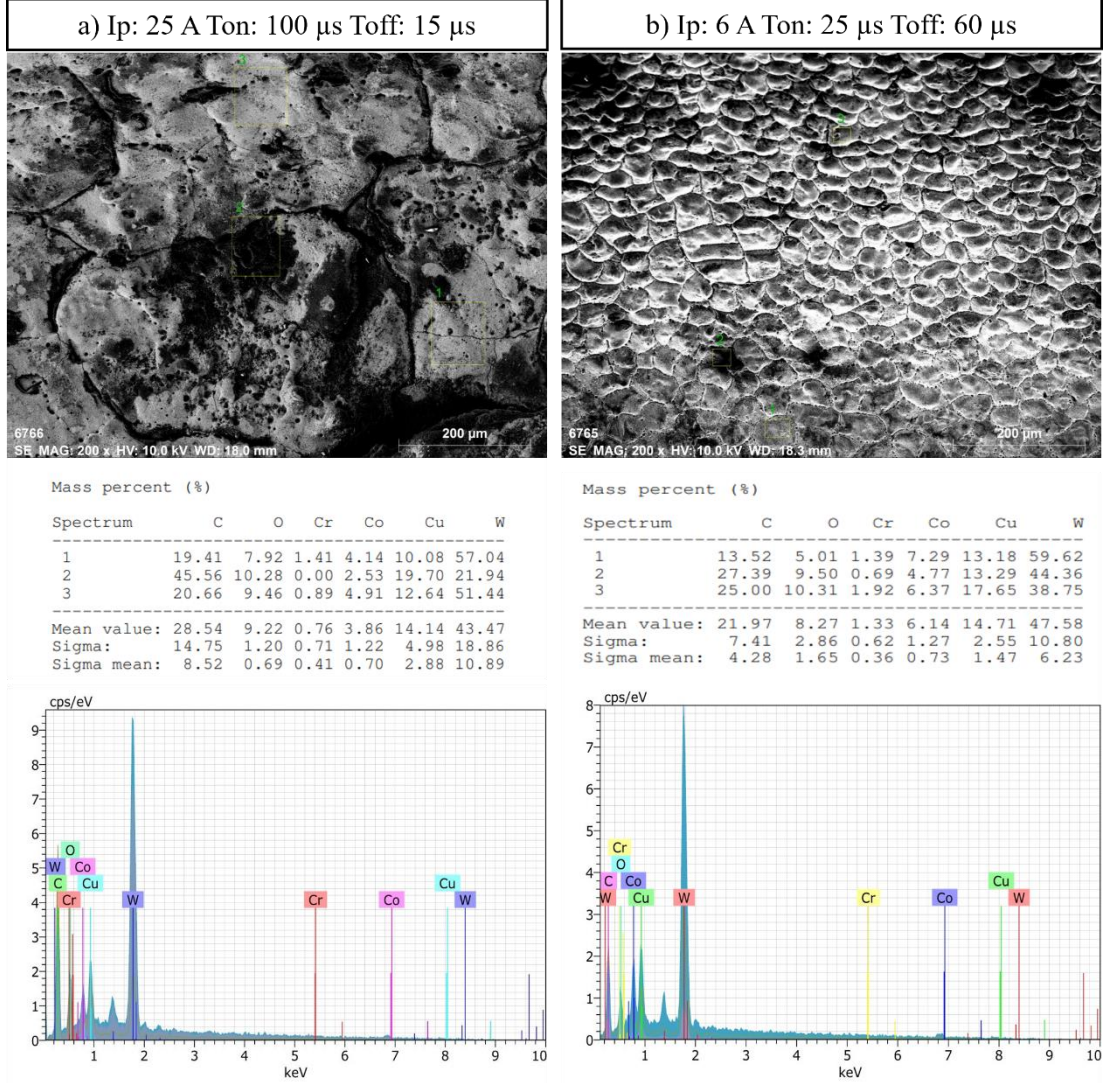
Boşalım akımı yeniden döküm katmanının kalınlığını etkileyen en önemli proses parametresi olarak görülmektedir [80,81]. EEİ’de yeniden döküm katmanı ve ısıdan etkilenen bölge kalınlıkları genellikle çok incedir [114]. Örnek olarak Şekil 6.17’de yeniden döküm katman kalınlığı 33 μm ’den azdır. Şekil 6.17.b’de verilen kesit alanda seyrek görülen sert yeniden döküm katmanı yüksek boşalım akımına bağlı olarak ortalama katman kalınlığını arttırmaktadır. Şekil 6.17.a ve 6.17.b’de belirlenen işleme parametrelerinde oluşan mikro çatlak ve kraterin ana parça katmanına nüfuz etmediği görülmektedir. Bu durumda, termal gerilmeler malzemenin dayanımını etkileyecek çatlaklar oluşmasına olanak vermemiştir.



Şekil 6.17. İşlenmiş yüzey kesitinin SEM görüntüleri.

Şekil 6.18, 25 ve 6 A boşalım akımında işlenen yüzeylerden elde edilen EDS analizini göstermektedir. Şekilde işaretli yüzeylerden alınan analiz sonuçlarının spektrum grafiği ve tablo olarak gösterimi verilmiştir. Şekil 6.18’de işleme yüzeyinde her bölgede karbon ve bakır yüzdesinin bulunduğu görülmektedir. Bu durum döküntü içerisinde bulunan dielektrik (karbon) ve takım malzemesinin (bakır) iş parçası yüzeyinde katılaşması olarak ifade edilebilir [82]. Literatürde işleme yüzeyinde görünen siyah leke karbon tabakası veya siyah katman olarak nitelendirilmektedir [115–117]. Şekil 6.18.a’da 2 numaralı bölgede bulunan siyah katmanın karbon ve bakır yüzdesinin diğer bölgelere göre yüksektir. Şekil 6.18.a ve 6.18.b ortalama kobalt yüzdesi 3,86 ve 6,14 ana malzemenin ortalama kobalt yüzdesi ise %15’tir. İşleme sırasında oluşan sıcaklık etkisinde bağlayıcı özelliğini yitiren kobalt, tungsten karbür bileşeninden ayrılır. Bu durumda kobalt, karbür bileşeninden daha hızlı erime ve

buharlaştırma göstererek yeniden döküm katmanında yüksek oranda azalmış olarak görülmektedir [118,119]. Böylece, semente karbürün dalma tipli elektro erozyon ile işlenmesinde malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısında bir değişim gözlemlenmektedir.



Şekil 6.18. İşlenmiş yüzey enerji dağılım spektrometresi (EDS).

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada dalma tipi elektro erozyon yöntemi ile semente karbür malzeme üzerine kama yuvası açılmıştır. Deneylede boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Taguchi L27 dizinine göre yapılan deneyler sonucunda, değişken parametrelerin ölçülen TKM, TAM ve Ra sonuçları üzerine etkisi istatistiksel olarak araştırılmıştır. Performans sonuçlarının çoklu optimizasyonu Taguchi-GRA metodolojisi yardımı ile gerçekleştirilmiştir. İşleme sonrası elde edilen kama yuvası boyutsal ölçüm sonuçlarının kapsamlı değerlendirilmesi yapılmıştır. İşlenen yüzeyden alınan SEM ve EDS görüntüleri ile işleme parametrelerinin yüzey yapısına etkisi yorumlanmıştır. Deneysel çalışma sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Deneysel ve istatistiki analizlere göre en etkili parametre olan boşalım akımı arttıkça TKM, TAM ve Ra'nın arttığı belirlenmiştir. Vurum süresinin artmasıyla Ra belirli bir oranda artarken, TAM azalmıştır. Vurum aralığı artırıldığında TKM, TAM ve Ra'nın azaldığı görülmekle birlikte, vurum aralığı en fazla Ra üzerinde değişime sebep olmuştur.
2. İşleme parametrelerinin yüzey morfolojisine etkilerini daha iyi tanımlamak amacıyla alınan 3D topografik görüntüler, boşalım akımının artmasıyla işlenmiş yüzeydeki tepeler ve kraterlerin miktarının azaldığını, boyutlarının ise derinleştiğini göstermiştir. Vurum süresi arttıkça genişleyen plazma kanalı çapından dolayı birim alana dağılan termal enerji azalmış ve böylece genişliği fazla, ancak derinliği düşük olan kraterler oluşmuştur. Diğer yandan, vurum aralığının artması döküntünün daha iyi dışarı atılması ile sonuçlanmış ve yüzey pürüzlülüğü iyileşmiştir.

3. Performans göstergeleri için uygulanan ANOVA sonuçları, Ip, Ton ve Toff'un GRG değerlerini sırasıyla %44,23, %28,77, %5,87 oranında etkilediğini göstermiştir. Aynı zamanda Ip*Ton (%10,20) ikili etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir.
4. Performans göstergeleri için en iyi sonuçlar; TKM'de Ip: 25A, Ton: 50µs, Toff: 30µs seviyesinde 0,05130 g/dk, TAM'de Ip: 6A, Ton: 100µs, Toff: 15µs seviyesinde 0,000268 g/dk ve Ra'da Ip: 6A, Ton: 25µs, Toff: 60µs seviyesinde 2,291 µm olarak elde edilmiştir.
5. TGRA sonucunda optimum parametreler Ip: 6A, Ton: 25µs ve Toff: 60µs olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılan doğrulama deneyi ile başlangıç parametrelerinin sonuçları karşılaştırıldığında, GRG'de %23,95 oranında iyileşme sağlandığı görülmüştür.
6. İşlenen yüzeyden alınan SEM görüntülerinde mikro çukurlar, kraterler, döküntü, kürecikler ve düşük kalınlıkta beyaz tabaka katmanına rastlanmıştır.
7. İşlenen yüzeylerde rastlanan takım (Cu) ve dielektrik (C) malzemesi elektro erozyonun iş parçası malzemesinin fiziksel ve kimyasal yapısını değiştirdiğini göstermektedir.
8. Düşük boşalım akımı ile iş parçasına daha az termal enerji aktarılması ve iş parçasından daha küçük parçacıklarda talaş kaldırılması ile ölçü tamlığında hedeflenen değerlere daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.
9. Takım aşınmasının işlenen yüzeylerin ölçü tamlığı üzerinde etkiye sahip olduğu görülmüştür. Takım aşınması boşalım akımı arttıkça artarken, vurum süresi ve vurum aralığı arttıkça azalmıştır.

KAYNAKLAR

1. Merkleina, M., Andreas, K., and Engela, U., "Influence of machining process on residual stresses in the surface of cemented carbides", *Procedia Engineering*, 19: 252–257 (2011).
2. Patel, K. M., Pandey, P. M., and Venkateswara Rao, P., "Surface integrity and material removal mechanisms associated with the EDM of Al₂O₃ ceramic composite", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 27 (5): 892–899 (2009).
3. Ayode Otitoju, T., Ugochukwu Okoye, P., Chen, G., Li, Y., Onyeka Okoye, M., and Li, S., "Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications", *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, 85: 34–65 (2020).
4. Liang, Y. and Dutta, S. P., "Application trend in advanced ceramic technologies", *Technovation*, 21 (1): 61–65 (2001).
5. Carter, C. B. and Norton, M. G., "Ceramic Materials: Science and Engineering", 2. Ed., *Springer-Verlag*, New York, (2013).
6. Rakshit, R. and Das, A. K., "A review on cutting of industrial ceramic materials", *Precision Engineering*, 59: 90–109 (2019).
7. Klocke, F., Chrubasik, L., Klink, A., and Hensgen, L., "Analysis of Fundamental Process Characteristics for Sinking-EDM of Cemented Carbides as a Function of Polarity", *Procedia CIRP*, 68: 313–318 (2018).
8. Groover, M. P., "Fundamentals of Modern Manufacturing", 4. Ed., (2010).
9. Palanikumar, K. and Davim, J. P., "5 - Electrical discharge machining: study on machining characteristics of WC/Co composites", *Machining and Machine-Tools*, *Woodhead Publishing*, 135–168 (2013).
10. Bilal, A., Jahan, M. P., Talamona, D., and Perveen, A., "Electro-Discharge Machining of Ceramics: A Review", *Micromachines*, 10 (1): 10 (2019).
11. Puertas, I. and Luis, C. J., "Optimization of EDM conditions in the manufacturing process of B₄C and WC-Co conductive ceramics", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 59 (5): 575–582 (2012).

12. Alagarsamy, S. V., Ravichandran, M., Sakthivelu, S., Dinesh Kumar, S., Chanakyan, C., and Meignanamoorthy, M., "Optimization of electric discharge machining parameters on surface roughness for Al/ZrO₂ composite through response surface methodology", *Materials Today: Proceedings*, 27: 1006–1012 (2020).
13. Shirguppikar, S. S., Patil, M. S., and Ghorapade, V., "Grey fuzzy multiobjective optimization of process parameters for dry electro discharge machining process", *Materials Today: Proceedings*, 27: 671–676 (2020).
14. Yerui, F., Yongfeng, G., and Zongfeng, L., "Experimental Investigation of EDM Parameters for TiC/Ni Cermet Machining", *Procedia CIRP*, 42: 18–22 (2016).
15. Kou, Z. and Han, F., "Machining characteristics and removal mechanisms of moving electric arcs in high-speed EDM milling", *Journal Of Manufacturing Processes*, 32: 676–684 (2018).
16. Guu, Y. H., Tsai, K.-L., and Chen, L.-K., "An Experimental Study on Electrical Discharge Machining of Manganese–Zinc Ferrite Magnetic Material", *Materials And Manufacturing Processes*, 22 (1): 66–70 (2007).
17. Davis, R., Singh, A., and Kachhap, S., "Experimental Investigation of the Effect of Input Control Variables in Near Dry Electric Discharge Drilling Process", *Materials Today: Proceedings*, 18: 3027–3033 (2019).
18. Ji, R., Liu, Y., Diao, R., Xu, C., Li, X., Cai, B., and Zhang, Y., "Influence of Electrical Resistivity and Machining Parameters on Electrical Discharge Machining Performance of Engineering Ceramics", *PLOS ONE*, 9 (11): e110775 (2014).
19. Kumar, S. V. and Kumar, M. P., "Machining process parameter and surface integrity in conventional EDM and cryogenic EDM of Al–SiCp MMC", *Journal Of Manufacturing Processes*, 20: 70–78 (2015).
20. Qudeiri, J. E. A., Zaiout, A., Mourad, A.-H. I., Abidi, M. H., and Elkaseer, A., "Principles and Characteristics of Different EDM Processes in Machining Tool and Die Steels", *Applied Sciences*, 10 (6): 2082 (2020).
21. Chaudhury, P. and Samantaray, S., "A comparative study of different dielectric medium for sustainable EDM of Non-Conductive material by Electro-Thermal modelling", *Materials Today: Proceedings*, 41: 437–444 (2021).
22. Lee, S. H. and Li, X., "Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide", *Journal Of Materials Processing Technology*, 139 (1): 315–321 (2003).
23. Gadalla, A. M. and Bozkurt, B., "Expanding heat source model for thermal spalling of TiB₂ in electrical discharge machining", *Journal Of Materials Research*, 7 (10): 2853–2858 (1992).

24. Lin, Y.-C., Chen, Y.-F., Lin, C.-T., and Tzeng, H.-J., "Electrical Discharge Machining (EDM) Characteristics Associated with Electrical Discharge Energy on Machining of Cemented Tungsten Carbide", *Materials And Manufacturing Processes*, 23 (4): 391–399 (2008).
25. Basha, S. M., Basha, M. M., Raj, G. V. P., Venkaiah, N., and Sankar, M. R., "Past and current trends in electric discharge based machining of Silicon Carbide", *Materials Today: Proceedings*, 26: 542–548 (2020).
26. Agarwal, N., Shrivastava, N., and Pradhan, M. K., "Optimisation of edm process parameters using jaya algorithm", *Materials Today: Proceedings*, 24: 825–834 (2020).
27. Hadad, M., Bui, L. Q., and Nguyen, C. T., "Experimental investigation of the effects of tool initial surface roughness on the electrical discharge machining (EDM) performance", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 95 (5): 2093–2104 (2018).
28. Singh, J. and Sharma, R. K., "Multi-objective optimization of green powder-mixed electrical discharge machining of tungsten carbide alloy", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal Of Mechanical Engineering Science*, 232 (16): 2774–2786 (2018).
29. Sarıkaya, M. and Yılmaz, V., "Optimization and predictive modeling using S/N, RSM, RA and ANNs for micro-electrical discharge drilling of AISI 304 stainless steel", *Neural Computing And Applications*, 30 (5): 1503–1517 (2018).
30. Amorim, F. L., Weingaertner, W. L., and Bassani, I. A., "Aspects on the optimization of die-sinking EDM of tungsten carbide-cobalt", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 32: 496–502 (2010).
31. Çakıroğlu, R. and Günay, M., "Comprehensive analysis of material removal rate, tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (4): 7305–7317 (2020).
32. Mausam, K., Kumar Singh, P., Sharma, K., and Gupta, R. C., "Investigation of Process Parameter of EDM using Genetic Algorithm (GA) Approach for Carbon Fiber based Two Phase Epoxy composites", *Materials Today: Proceedings*, 3 (10, Part B): 4102–4108 (2016).
33. Yu, Z., Jun, T., and Masanori, K., "Dry electrical discharge machining of cemented carbide", *Journal Of Materials Processing Technology*, 149 (1): 353–357 (2004).
34. Baghel, R. and Singh Mali, H., "A study on effects of discharge energy on geometric characteristics of high aspect ratio micro-holes on TiN-Al₂O₃ ceramics", *Materials Today: Proceedings*, 5 (9, Part 3): 17828–17837 (2018).
35. Ganachari, V. S., Chate, U. N., Waghmode, L. Y., Mullya, S. A., Shirguppikar, S. S., Salgar, M. M., and Kumbhar, V. T., "A Comparative Performance Study

- of Dry and Near Dry EDM Processes in Machining of Spring Steel Material", *Materials Today: Proceedings*, 18: 5247–5257 (2019).
36. Boch, P. and Niepce, J.-C., "Ceramic Materials: Processes, Properties, and Applications", *John Wiley & Sons*, (2010).
 37. Baykara, T., Toy, Ç., and Tekin, A., "Yüksek Teknoloji Seramik ve Kompozitleri", *Bilim Ve Teknik*, (293): 6–9 (1992).
 38. Callister Jr, W. D. and Rethwisch, D. G., "Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach", 4. Ed., *John Wiley & Sons*, (2012).
 39. Batıbay, A. B., "Alümina-geçiş Metali İkili Sistemlerin Zırh Malzemesi Olarak İncelenmesi", *Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2014).
 40. Liang, Y. and Dutta, S. P., "Application trend in advanced ceramic technologies", *Technovation*, 21 (1): 61–65 (2001).
 41. Özel İhtisas Komisyonu, "Seramik Çalışma Grubu Raporu", *T. C. Kalkınma Bakanlığı*, Ankara, 153 (2015).
 42. Salamon, D., "Advanced ceramics", *Advanced Ceramics for Dentistry*, 1. Ed., *Elsevier*, Massachusetts, 103–122 (2014).
 43. Pfeifer, M., "Materials Enabled Designs: The Materials Engineering Perspective to Product Design and Manufacturing", *Butterworth-Heinemann*, (2009).
 44. Upadhyaya, G. S., "Materials science of cemented carbides—an overview", *Materials & Design*, 22 (6): 483–489 (2001).
 45. Exner, H. E., "Physical and chemical nature of cemented carbides", *International Metals Reviews*, 24 (1): 149–173 (1979).
 46. Liu, J., Yang, S., Xia, W., Jiang, X., and Gui, C., "Microstructure and wear resistance performance of Cu–Ni–Mn alloy based hardfacing coatings reinforced by WC particles", *Journal Of Alloys And Compounds*, 654: 63–70 (2016).
 47. Prakash, L. J., "Application of fine grained tungsten carbide based cemented carbides", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 13 (5): 257–264 (1995).
 48. Ortner, H. M., Etmayer, P., and Kolaska, H., "The history of the technological progress of hardmetals", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 44: 148–159 (2014).
 49. Rohith, R., Shreyas B., K., Kartikgeyan, S., Sachin B., A., Umesha K., and Nanjundeswaraswamy, D. T. S., "Selection of Non-Traditional Machining Process", *International Journal Of Engineering Research & Technology*, 8 (11): 148–155 (2019).

50. Diaz, O. G., Garcia Luna, G., Liao, Z., and Axinte, D., "The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 139: 24–36 (2019).
51. Bonny, K., De Baets, P., Vleugels, J., Salehi, A., Van der Biest, O., Lauwers, B., and Liu, W., "Influence of secondary electro-conductive phases on the electrical discharge machinability and frictional behavior of ZrO₂-based ceramic composites", *Journal Of Materials Processing Technology*, 208 (1): 423–430 (2008).
52. Grigoriev, S., Peretyagin, P., Smirnov, A., Solís, W., Díaz, L. A., Fernández, A., and Torrecillas, R., "Effect of graphene addition on the mechanical and electrical properties of Al₂O₃-SiCw ceramics", *Journal Of The European Ceramic Society*, 37 (6): 2473–2479 (2017).
53. Ho, K. H. and Newman, S. T., "State of the art electrical discharge machining (EDM)", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 43 (13): 1287–1300 (2003).
54. Pachaury, Y. and Tandon, P., "An overview of electric discharge machining of ceramics and ceramic based composites", *Journal Of Manufacturing Processes*, 25: 369–390 (2017).
55. Equbal, A. and Sood, A. K., "Electrical Discharge Machining: An Overview on Various Areas of Research", *Manufacturing And Industrial Engineering*, 13: 1–6 (2014).
56. Jameson, E. C., "Electrical Discharge Machining", *Society Of Manufacturing Engineers*, (2001).
57. Kumar, S., Singh, R., Singh, T. P., and Sethi, B. L., "Surface modification by electrical discharge machining: A review", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (8): 3675–3687 (2009).
58. Prakash, V., Shubham, Kumar, P., Singh, P. K., Das, A. K., Chattopadhyaya, S., Mandal, A., and Dixit, A. R., "Surface alloying of miniature components by micro-electrical discharge process", *Materials And Manufacturing Processes*, 33 (10): 1051–1061 (2018).
59. Razzell, A. G., "Joining and Machining of Ceramic Matrix Composites", *Comprehensive Composite Materials*, 689–697 (2000).
60. Saha, S. K., "Experimental investigation of the dry electric discharge machining (Dry EDM) process", *M. Tech. Thesis, IIT Kanpur, Kanpur*, 208016: (2008).
61. Ünses, E., "Ti-6al-4v alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde grafit tozu karışimli dielektrik sıvının işleme performansına etkisinin deneysel incelenmesi", *Gazi Üniversitesi*, Ankara, (2012).

62. DiBitonto, D. D., Eubank, P. T., Patel, M. R., and Barrufet, M. A., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model", *Journal Of Applied Physics*, 66 (9): 4095–4103 (1989).
63. Sanghani, C. R. and Acharya, G. D., "A Review of Research on Improvement and Optimization of Performance Measures for Electrical Discharge Machining", *Journal Of Engineering Research And Applications*, 4 (1): 433–450 (2014).
64. König, W., "Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung", 4. Ed., *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, (2007).
65. Marashi, H., Jafarlou, D. M., Sarhan, A. A. D., and Hamdi, M., "State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications", *Precision Engineering*, 46: 11–33 (2016).
66. "Furkan Kompak 1 Z-NC Kullanım Kılavuzu", *Makim Makine İmalat San. Ve Tic. Ltd. Şti*, (2021).
67. Wong, Y. S., Lim, L. C., and Lee, L. C., "Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces", *Journal Of Materials Processing Technology*, 48 (1): 299–305 (1995).
68. Ayesta, I., Flaño, O., Izquierdo, B., Sanchez, J. A., and Plaza, S., "Experimental Study on Debris Evacuation during Slot EDMing", *Procedia CIRP*, 42: 6–11 (2016).
69. Koyano, T., Suzuki, S., Hosokawa, A., and Furumoto, T., "Study on the Effect of External Hydrostatic Pressure on Electrical Discharge Machining", *Procedia CIRP*, 42: 46–50 (2016).
70. Li, L., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., and Lu, L., "EDM performance of TiC/copper-based sintered electrodes", *Materials & Design*, 22 (8): 669–678 (2001).
71. Mohri, N., Suzuki, M., Furuya, M., Saito, N., and Kobayashi, A., "Electrode Wear Process in Electrical Discharge Machinings", *CIRP Annals*, 44 (1): 165–168 (1995).
72. Jha, B., Ram, K., and Rao, M., "An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining.", *Journal Of Engineering Science & Technology Review*, 4 (2): (2011).
73. Altan, T., Lilly, B., Yen, Y. C., and Altan, T., "Manufacturing of Dies and Molds", *CIRP Annals*, 50 (2): 404–422 (2001).
74. Rebelo, J. C., Morao Dias, A., Kremer, D., and Lebrun, J. L., "Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels", *Journal Of Materials Processing Technology*, 84 (1): 90–96 (1998).
75. Kumar, M., Datta, S., and Kumar, R., "Electro-discharge Machining Performance of Ti–6Al–4V Alloy: Studies on Parametric Effect and Phenomenon of Electrode

- Wear", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 44 (2): 1553–1568 (2019).
76. Antar, M., Hayward, P., Dunleavey, J., and Butler-Smith, P., "Surface Integrity Evaluation of Modified EDM Surface Structure", *Procedia CIRP*, 68: 308–312 (2018).
 77. Lee, H. T. and Tai, T. Y., "Relationship between EDM parameters and surface crack formation", *Journal Of Materials Processing Technology*, 142 (3): 676–683 (2003).
 78. Işık, A. T., Çakıroğlu, R., and Günay, M., "Seramik malzemenin elektro erozyon ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi", 2: *International Euroasia Congress on Scientific Researches and Recent Trends 9*, Antalya, 476–486 (2022).
 79. Bleys, P., Kruth, J.-P., Lauwers, B., Schacht, B., Balasubramanian, V., Froyen, L., and Van Humbeeck, J., "Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM", *Advanced Engineering Materials*, 8 (1–2): 15–25 (2006).
 80. Cusanelli, G., Hessler-Wyser, A., Bobard, F., Demellayer, R., Perez, R., and Flükiger, R., "Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique", *Journal Of Materials Processing Technology*, 149 (1): 289–295 (2004).
 81. Guu, Y. H., Hocheng, H., Chou, C. Y., and Deng, C. S., "Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel", *Materials Science And Engineering: A*, 358 (1): 37–43 (2003).
 82. Işık, A. T. and Çakıroğlu, R., "Investigation of Workpiece and Tool Surface Quality in Electro Discharge Machining of Al 5083 Alloy Produced by Powder Metallurgy", *İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları*, 3 (1): 47–58 (2022).
 83. Kunieda, M. and Kobayashi, T., "Clarifying mechanism of determining tool electrode wear ratio in EDM using spectroscopic measurement of vapor density", *Journal Of Materials Processing Technology*, 149 (1): 284–288 (2004).
 84. Muthuramalingam, T., Mohan, B., and Jothilingam, A., "Effect of Tool Electrode Resolidification on Surface Hardness in Electrical Discharge Machining", *Materials And Manufacturing Processes*, 29 (11–12): 1374–1380 (2014).
 85. Kumar, P. M., Sivakumar, K., and Jayakumar, N., "Multiobjective optimization and analysis of copper–titanium diboride electrode in EDM of monel 400™ alloy", *Materials And Manufacturing Processes*, 33 (13): 1429–1437 (2018).
 86. Pandey, P. C. and Shan, H. S., "Modern Machining Processes", *Tata McGraw-Hill Education*, 190 (1980).
 87. Bisaria, H. and Shandilya, P., "Machining of metal matrix composites by edm and its variants: a review.", DAAAM International Scientific Book, *DAAAM International*, Vienna, Austria, 267–282 (2015).

88. Kruusing, A., Leppävuori, S., Uusimäki, A., Petrêtis, B., and Makarova, O., "Micromachining of magnetic materials", *Sensors And Actuators A: Physical*, 74 (1): 45–51 (1999).
89. Schubert, A., Zeidler, H., Kühn, R., Hackert-Oschätzchen, M., Flemmig, S., and Treffkorn, N., "Investigation of Ablation Behaviour in Micro-EDM of Nonconductive Ceramic Composites ATZ and Si₃N₄-TiN", *Procedia CIRP*, 42: 727–732 (2016).
90. Liqing, L. and Yingjie, S., "Study of Dry EDM with Oxygen-Mixed and Cryogenic Cooling Approaches", *Procedia CIRP*, 6: 344–350 (2013).
91. Kopáčik, A., Erdélyi, J., and Kyrinovič, P., "Coordinate Measuring Systems and Machines", Engineering Surveys for Industry, *Springer International Publishing*, Cham, 121–141 (2020).
92. Teke, İ., Yandayan, T., and Karadayı, R., "Koordinat Ölçüm Metrolojisi, Üç Boyutlu Ölçüm Cihazı CMM Modernizasyonu, Kalibrasyonu, Verifikasyonu, Dünyada ve Ülkemizdeki Durum", *Mühendis Ve Makina*, 18–25 (2013).
93. Munteanu, A. and Cioata, F., "Solutions for Measuring the Position Deviation for Internal Keyways – Case Study", *Applied Mechanics And Materials*, 657: 669–673 (2014).
94. Sahu, M. K. and Pardeep, "Optimization of the Keyway Design with Consideration of Effect of Stress Concentration on Different Materials", *International Journal Of Engineering Research & Technology*, 3 (5): (2014).
95. Bhushan, B., "Surface roughness analysis and measurement techniques", Modern Tribology Handbook, Two Volume Set, *CRC Press*, 79–150 (2000).
96. TS 6956 EN ISO 4287, "Geometrical product specifications (GPS)-Surface texture: Profile method-Terms, definitions and surface texture parameters", Türk Standardı, İsviçre, 1–22 (1997).
97. Mutitoyo, "Quick guide to surface roughness measurement : reference guide for laboratory and workshop", Başvuru Kılavuzu, USA, 1–8 (2016).
98. Kao, J. Y., Tsao, C. C., Wang, S. S., and Hsu, C. Y., "Optimization of the EDM parameters on machining Ti–6Al–4V with multiple quality characteristics", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 47 (1–4): 395–402 (2010).
99. Kuo, Y., Yang, T., and Huang, G.-W., "The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems", *Computers & Industrial Engineering*, 55 (1): 80–93 (2008).
100. Günay, M., "Modeling and multiple optimization in face milling of hardfacing welding applied steel: Force, roughness, power", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal Of Mechanical Engineering Science*, 09544062211065998 (2022).

101. Nguyen, P. H., Banh, T. L., Mashood, K. A., Tran, D. Q., Dong Pham, V., Muthuramalingam, T., Duc Nguyen, V., and Nguyen, D. T., "Application of TGRA-Based Optimisation for Machinability of High-Chromium Tool Steel in the EDM Process", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 45 (7): 5555–5562 (2020).
102. Yilmaz, V., Sarikaya, M., and Dilipak, H., "Deep micro-hole drilling for hadfield steel by electro-discharge machining (edm)", *Materiali In Tehnologije*, 49 (3): (2015).
103. Asal, V. D., Patel, R. I., and Choudhary, A. B., "Optimization of process parameters of EDM using ANOVA method", *International Journal Of Engineering Research And Applications*, 3 (2): 1119–1125 (2013).
104. Tamura, T. and Kobayashi, Y., "Measurement of impulsive forces and crater formation in impulse discharge", *Journal Of Materials Processing Technology*, 149 (1): 212–216 (2004).
105. Singh, H. and Shukla, D. K., "Optimizing electric discharge machining parameters for tungsten-carbide utilizing thermo-mathematical modelling", *International Journal Of Thermal Sciences*, 59: 161–175 (2012).
106. Çaydaş, U., "Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması / Investigation of the machinability of Ti6Al4V alloy by electrical discharge and electrochemical machining processes", (2008).
107. Jadam, T. and Datta, S., "Machinability of Ti-5Al-2.5Sn for electro-discharge machining: an experimental investigation", *Sādhanā*, 45 (1): 238 (2020).
108. Çakiroğlu, R., "Elektro erozyon ile işlemede yüzey bütünlüğünün yorulma üzerine etkisinin incelenmesi", Thesis, (2020).
109. Guu, Y. H. and Hou, M. T.-K., "Effect of machining parameters on surface textures in EDM of Fe-Mn-Al alloy", *Materials Science And Engineering: A*, 466 (1): 61–67 (2007).
110. Shabgard, M., Seyedzavvar, M., and Oliaei, S., "Influence of Input Parameters on the Characteristics of the EDM Process", *STROJNISKI VESTNIK-JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING*, 57 (9): (2011).
111. Perumal, A., Kailasanathan, C., Stalin, B., Rajkumar, P. R., Gangadharan, T., and Venkatesan, G., "Evaluation of EDM process parameters on titanium alloy through Taguchi approach", *Materials Today: Proceedings*, 45: 2394–2400 (2021).
112. Cakiroglu, R., "Investigation of The Effects of Processing Parameters on Measuring Accuracy in Electro Erosion Machining of Ti-6Al-4V Alloy", *Gazi University Journal Of Science Part C: Design And Technology*, 10 (1): 77–85 (2022).

113. Liu, S., Thangaraj, M., Moiduddin, K., and Al-Ahmari, A. M., "Influence of Adaptive Gap Control Mechanism and Tool Electrodes on Machining Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy in EDM Process", *Materials*, 15 (2): 513 (2022).
114. Qu, J., Riester, L., Shih, A. J., Scattergood, R. O., Lara-Curzio, E., and Watkins, T. R., "Nanoindentation characterization of surface layers of electrical discharge machined WC-Co", *Materials Science And Engineering: A*, 344 (1): 125–131 (2003).
115. Marafona, J., "Black layer characterisation and electrode wear ratio in electrical discharge machining (EDM)", *Journal Of Materials Processing Technology*, 184 (1): 27–31 (2007).
116. Sabur, A., Ali, M. Y., Maleque, Md. A., and Khan, A. A., "Investigation of Material Removal Characteristics in EDM of Nonconductive ZrO₂ Ceramic", *Procedia Engineering*, 56: 696–701 (2013).
117. Steuer, P., Rebschläger, A., Weber, O., and Bähre, D., "The Heat-affected Zone in EDM and its Influence on a Following PECM Process", *Procedia CIRP*, 13: 276–281 (2014).
118. Assarzadeh, S. and Ghoreishi, M., "Statistical modeling and optimization of process parameters in electro-discharge machining of cobalt-bonded tungsten carbide composite (WC/6% Co)", *Procedia Cirp*, 6: 463–468 (2013).
119. Mahdavinejad, R. A. and Mahdavinejad, A., "ED machining of WC-Co", *Journal Of Materials Processing Technology*, 162–163: 637–643 (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Tolunay IŞIK, Ankara’da ilk, orta ve lise öğrenimini tamamladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenime başlayıp 2020 yılında mezun oldu. 2020 yılında Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans’a başladı.