



T.C.

**YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**MİRRAX KALIP ÇELİĞİNİN ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİ İLE
İŞLENMESİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEFA YAMAN

TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. Ali KALYON

**YALOVA
HAZİRAN 2025**



T.C.

YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

MİRRAX KALIP ÇELİĞİNİN ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİ İLE
İŞLENMESİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEFA YAMAN

228113001

TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ALİ KALYON

YALOVA

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım “Mirrax Kalıp Çeliğinin Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşlem Parametrelerinin Yüzey Bütünlüğüne Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Sefa YAMAN

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez sürecimde, tez konumu belirlememde ve tez çalışmalarım süresince engin bilgi ve birikimini bana aktaran, ilgi, alaka ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Ali KALYON'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ayrıca yaptığım çalışmalar için laboratuvar ve teknik malzemelerini kullanmamda bana yardımcı olan Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na ve Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi destek sağlayan aileme ve moral kaynağım eşim ve çocuklarıma da teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışmasının desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No: 2024/YL/0004) teşekkür ederim.

Haziran 2025

Sefa YAMAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEMENİN GENEL YAPISI.....	7
3.1. Elektro Erozyonla İşleme	7
3.2. EEİ Sürecinde İşleme Mekanizması	8
3.2.1. Vurum hazırlığı.....	8
3.2.2. Vurum/Darbe	9
3.2.3. Vurum aralığı	9
3.3. EEİ Sürecinde İşleme Parametreleri	10
3.4. Dielektrik Sıvı	11
4. MATERYAL VE YÖNTEM	13
4.1. Elektro Erozyon Tezgahı	13
4.2. Elektrotlar	13
4.3. İş Parçası Malzemesi	15
4.4. Dielektrik Sıvının Özellikleri	16
4.5. Yanal Açıklık Ölçümü	16
4.6. Yüzey Çatlak Yoğunluğu Ölçümü	16
5. DENEY TASARIMI VE ANALİZİ	17
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	19
6.1. Yanal Açıklık Analizi	21
6.1. Yüzey Çatlak Yoğunluğu Analizi	26
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	32
KAYNAKLAR.....	33
ÖZGEÇMİŞ.....	39
TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER	39

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

A	: Amper
I	: Akım
μm	: Mikro metre
CuCoNiBe	: Cupro CNB
CuCrZr	: Cupro Max
CuNi2SiCr	: Cupro NSS
İe	: Boşalım akımı (A)
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)
Toff	: Ark aralığı (μs)
Ton	: Ark süresi (μs)
V	: Gerilim

KISALTMALAR

ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
EAH	: Elektrot Aşınma Hızı (g/dk)
EEİ	: Elektro Erozyon İle İşleme
İİH	: İş Parçası İşleme Hızı (g/dk)
MRR	: Talaş Kaldırma Oranı
PMEEİ	: Karışımli EEİ
ROC	: Yanal Açıklık
S/N	: Signal/Noise (İşaret/Gürültü)
TWR	: Aşınma Oranı
WEEİ	: Tel EEİ
YÇY	: Yüzey Çatlak Yoğunluğu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. EEİ tekniğinin yapısı.....	8
Şekil 3.2. Dielektrik uygulama çeşitleri.....	13
Şekil 5.1. Yanal açıklık değerlerine göre hesaplanan sinyal-gürültü (S/N) oranlarının ana etkiler grafiği.....	21
Şekil 5.2. Yanal açıklık için elektrot malzemesi ile işlem parametreleri arasındaki etkileşim grafiği.....	23
Şekil 5.3. Yanal açıklık ölçüm sonuçlarına ait görüntüler.....	24
Şekil 5.4. İşleme faktörlerinin yanal açıklık üzerindeki etki oranları.....	25
Şekil 5.5. YÇY değerlerine göre hesaplanan sinyal-gürültü (S/N) oranlarının ana etkiler grafiği.....	26
Şekil 5.6. YÇY için elektrot malzemesi ile işlem parametreleri arasındaki etkileşim grafiği.....	28
Şekil 5.7. CuCr1Zr elektrot ile işlenen yüzeye ait YÇY ölçümleri, (I = 25 A), (Ton = 200 µs), (Toff = 400 µs).....	29
Şekil 5.8. CuCoNiBe elektrot ile işlenen yüzeye ait YÇY görüntüsü, (I = 25 A), (Ton = 50 µs), (Toff = 800 µs).....	30
Şekil 5.9. İşleme faktörlerinin YÇY üzerindeki etki oranları.....	31

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. CuNi2SiCr (Cupro NSS) mekanik ve fiziksel özellikler.....	14
Tablo 4.2. CuCoNiBe (Cupro CNB) mekanik ve fiziksel özellikler.....	14
Tablo 4.3. CuCr1Zr (Cupro Max) mekanik ve fiziksel özellikler.....	14
Tablo 4.4. İş parçası malzemesi kimyasal bileşimi.....	15
Tablo 4.5. Faktörler ve seviyeleri.....	17
Tablo 5.1. Deneysel ve analiz çalışma sonuçları.....	20
Tablo 5.2. ANOVA analizi sonuçları.....	24
Tablo 5.3. ANOVA analizi sonuçları.....	31

MİRRAX KALIP ÇELİĞİNİN ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİ İLE İŞLENMESİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, elektro erozyon işlemi (EEİ) kapsamında farklı elektrot malzemeleri (CuCoNiBe, CuNi₂SiCr ve CuCr₁Zr) ve işlem parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresi) işlenmiş yüzey üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışma, Taguchi L27 deney tasarımı doğrultusunda gerçekleştirilmiş olup, işleme sonrası oluşan yanal açıklık ve yüzey çatlak yoğunluğu (YÇY) parametreleri üzerinden analizler yapılmıştır.

Deney sonuçları, yanal açıklık açısından en uygun sonuçların CuCoNiBe elektrotu ile düşük boşalım akımı (6 A), kısa vurum süresi (50 μ s) ve orta düzeyde bekleme süresi (200 μ s) kullanıldığında elde edildiğini göstermektedir. ANOVA analizine göre, yanal açıklık üzerinde en etkili parametreler sırasıyla boşalım akımı (%31,77) ve vurum süresi (%16,88) olarak belirlenmiştir.

YÇY açısından ise en düşük çatlak yoğunluğu, CuCoNiBe elektrotu ile yüksek akım (25 A), kısa vurum süresi (50 μ s) ve uzun bekleme süresi (800 μ s) kombinasyonunda elde edilmiştir. Elektrot tipi, %58,97 katkı oranı ile YÇY üzerinde en baskın etkiye sahip faktör olarak öne çıkmıştır. Bu kapsamda, CuCoNiBe elektrot malzemesi, EEİ uygulamaları için önerilen bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen bulgular, endüstriyel uygulamalarda yüksek kaliteli yüzey üretimi için rehber niteliği taşımakta ve ileride yapılacak çalışmalar için temel oluşturmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Elektro erozyon işlemi, yanal açıklık, yüzey çatlak yoğunluğu, CuCoNiBe, ANOVA analizi

EXAMINATION OF THE EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON SURFACE INTEGRITY IN PROCESSING MIRRAX MOLD STEEL WITH THE ELECTRO EROSION METHOD

ABSTRACT

In this thesis study, the effects of different electrode materials (CuCoNiBe, CuNi₂SiCr, and CuCr₁Zr) and machining parameters (discharge current, pulse-on time, and pulse-off time) on the machined surface were investigated within the scope of the Electrical Discharge Machining (EDM) process. The experimental study was conducted based on the Taguchi L27 experimental design, and analyses were carried out focusing on the machining outcomes of overcut and surface crack density (SCD).

The experimental results revealed that the most favorable outcomes in terms of overcut were obtained using the CuCoNiBe electrode in combination with a low discharge current (6 A), short pulse-on time (50 μ s), and medium pulse-off time (200 μ s). According to ANOVA analysis, the most influential parameters on the overcut were determined as discharge current (31.77%) and pulse-on time (16.88%).

In terms of SCD, the lowest crack density was achieved using the CuCoNiBe electrode with high discharge current (25 A), short pulse-on time (50 μ s), and long pulse-off time (800 μ s). Electrode type emerged as the most dominant factor affecting SCD, with a contribution ratio of 58.97%. In this context, the CuCoNiBe electrode material stands out as a recommended alternative for EDM applications. The findings serve as a guide for achieving high-quality surfaces in industrial applications and lay a foundation for future studies.

Key Word: Electrical discharge machining, overcut, surface crack density, CuCoNiBe, ANOVA analysis

1. GİRİŞ

Günümüzde imalat teknolojileri, artan rekabet koşulları, ürün kalitesine yönelik yüksek talepler ve zor işlenebilir malzemelerin artışıyla birlikte sürekli gelişmektedir. Bu gelişim doğrultusunda, geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin sınırlarını zorlayan ve hatta aşan, özel işleme teknolojilerine olan ihtiyaç da giderek artmaktadır. Bu özel yöntemlerden biri elektro erozyon ile işleme (EEİ), iletken malzemelerin karmaşık şekillerde, yüksek hassasiyetle ve minimum mekanik gerilme ile işlenmesini sağlayarak modern üretim süreçlerinde önemli bir yer edinmiştir [1], [2].

EEİ, 1940'lı yıllardan itibaren geliştirilmeye başlanmış ve özellikle sert ve zor işlenebilir malzemelerin işlenmesinde büyük kolaylıklar sağlamıştır. Bu yöntemin temel prensibi, iş parçası ile elektrot arasında kontrollü bir şekilde oluşan elektriksel kıvılcımların (deşarjların) yüksek sıcaklık etkisiyle iş parçasından malzeme kaldırmasıdır. Bu süreçte elektrot ile iş parçası birbirine temas etmez, malzeme talaş kaldırma yerine lokal ergitme ve buharlaştırma yoluyla şekillendirilir. Bu sayede, çok sert ya da kırılğan malzemelerin, geleneksel yöntemlerin aksine, yüksek hassasiyetle işlenebilmesi mümkün olur [3], [4], [5].

EEİ'nin en önemli avantajlarından biri, karmaşık geometrilerin kolaylıkla elde edilebilmesidir. Ayrıca temas gerektirmeyen bir yöntem olması, mekanik kuvvetlerin devre dışı kalmasını sağlar ve bu da özellikle hassas veya ince yapıdaki parçalar için büyük bir avantajdır. Bununla birlikte, bu yöntemin bazı dezavantajları da mevcuttur. Özellikle işlem süresinin geleneksel yöntemlere göre daha uzun olması, elektrot aşınmasının dikkatle izlenmesini gerektirmesi ve işleme sonrası yüzeyde oluşabilecek çatlaklar, kraterler veya yeniden katılmış kalıntılar gibi yüzey hataları, sürecin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini zorunlu kılar [6], [7].

EEİ, özellikle kalıpcılık, havacılık, otomotiv, tıp teknolojileri ve savunma sanayi gibi yüksek hassasiyetin ve yüzey kalitesinin kritik olduğu sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalıp ve plastik enjeksiyon sektörlerinde kullanılan kalıp çelikleri, EEİ ile şekillendirilmektedir. Havacılıkta kullanılan süper alaşımlar, geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan nikel esaslı alaşımlar gibi malzemeler, EEİ sayesinde yüksek hassasiyetle işlenebilmektedir.

Tıpta kullanılan implantlar ve cerrahi aletler gibi bileşenler ise mikro EEİ teknolojisiyle oldukça küçük toleranslar dahilinde üretilebilmektedir [8].

Bu tez çalışmasında, EEİ tekniğinin iki önemli çıktısı olan yüzey çatlak yoğunluğu (YÇY) ve yanal açıklık üzerine odaklanılmıştır. Bu parametreler, parçanın mekanik ve geometrik bütünlüğünü etkileyerek, özellikle hassas üretimlerde kritik rol oynamaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında, üç farklı bakır esaslı elektrot (CuCoNiBe, CuNi₂SiCr, CuCr₁Zr) kullanılarak, boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresinin YÇY üzerindeki etkileri incelenmiştir. İşlem sonrası yüzeyler SEM ile analiz edilmiş ve çatlak, krater gibi yapılar değerlendirilmiştir. Boşalım akımı ve uzun bekleme süresinin çatlak yoğunluğunu azalttığını, uzun vurum süresinin ise artırdığını göstermiştir. En iyi yüzey kalitesi CuCoNiBe elektroduyla elde edilirken, CuCr₁Zr en yüksek termal hasara yol açmıştır. Varyans analizi, elektrot tipinin YÇY üzerindeki en etkili parametre olduğunu ortaya koymuştur.

İkinci aşamada ise yanal açıklık incelenmiş, yine aynı elektrotlar ve parametreler kullanılmıştır. Taguchi yöntemiyle yapılan deneysel analizler, elektrot tipi ve işlem parametrelerinin yanal açıklık üzerinde de etkili olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışma EEİ'de yüzey kalitesini ve boyutsal hassasiyeti iyileştirmek adına işlem parametreleri ile elektrot malzemesi seçiminin ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

EEİ geleneksel imalat yöntemleriyle işlenmesi güç olan yüksek sertlikteki iletken malzemeler üzerinde hassas işlemler yapılabilmesini sağlayan gelişmiş bir üretim yöntemidir. EEİ'nin endüstrideki artan kullanımına paralel olarak, bu yöntemin daha verimli, hassas ve yüzey kalitesi açısından üstün hale getirilmesi amacıyla yapılan bilimsel çalışmalar da giderek artmaktadır. Özellikle elektrot malzemesinin seçimi, işlem parametrelerinin optimizasyonu, yüzey bütünlüğü, aşınma oranları ve ölçümsel hassasiyet gibi konular EEİ literatüründe yoğun şekilde ele alınmaktadır. Elektro erozyonla işlemede ilk gözlem 1770'ler de Joseph Priestley'in elektrik boşalmalarının metaller üzerinde erozyon etkisi oluşturduğunu gözlemlemesi ile olmuştur. Bu dönemde yöntem bir üretim tekniği olarak kullanılmamıştır. Daha sonra Sovyetler Birliği'nde geliştirme 1900'lerin başlarında başlamıştır. 1943 yılına gelindiğinde Boris ve Natalya Lazarenko adlı iki Sovyet bilim insanı, elektriksel boşalmanın kontrollü şekilde metal aşındırmakta kullanılabilirliğini keşfetti. Bu süreçte Lazarenko devresi adı verilen özel bir elektrik devresi tasarlandı ve modern EEİ sistemlerinin temelini oluşturdu. Ticari Kullanımın Başlaması 1950'ler den sonra başladı. 1950'lerden sonra elektro erozyon tezgâhları sanayide kullanılmaya başladı. İlk olarak kalıpcılık, havacılık ve savunma sanayisinde tercih edildi. Geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan sert metal uygulamaları için tercih edilmeye başlandı. 1970'ler den sonra CNC'ler üzerine entegre edilmeye başlandı.

Bu gelişme, işlemlerin hassasiyetini ve otomasyon seviyesini artırdı. Bu sayede, hassas kesimler için devrim niteliğinde bir gelişme oldu. 2000'lerden sonra mikro malzemeler içinde kullanımına başlanarak mikro tıp malzemeleri ve hassas kalıpcılık malzemeleri içinde tercih edilmeye başlandı. Günümüzde 3D üretim sistemleri, Yapay zeka ve robotik otomasyonlara entegre edilmektedir.

Bu bölümde, elektro erozyonla işleme konusunda yapılan önceki çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiş; yüzey çatlak yoğunluğu ve yanal açıklık gibi kritik çıktıların çeşitli elektrot malzemeleri ve işlem parametreleriyle olan ilişkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, Taguchi yöntemi ve varyans analizleri gibi deneysel tasarım tekniklerinin EEİ çalışmalarında nasıl kullanıldığına dair literatürdeki yaklaşımlara da yer verilmiştir. Bu sayede, çalışmanın bilimsel temeli güçlendirilmiş ve mevcut literatüre nasıl bir katkı sağlandığı daha net ortaya konmuştur.

H.T. Lee ve T.Y. Tai, D2 ve H13 takım çeliklerinin EEİ ile işlenmesini araştırmış ve boşalım akımı ile vurum süresinin yüzey çatlakları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Geliştirdikleri çatlak tahmin haritası, 12–16 A boşalım akımı ve 6–9 µs vurum süresi ile yüzey kusurlarının en aza inebileceğini göstermiştir [9]. Benzer şekilde, H.T. Lee ve arkadaşları, elektrot çapının yüzey çatlaklarına etkisini inceleyerek, elektrot çapına bağlı olarak değişen ve çatlak oluşmayan bölgeyi etkileyen çatlak kritik hattı kavramını ortaya koymuştur [10]. Anish Kumar ve arkadaşları, Tel EEİ (WEEİ) üzerinde yaptıkları çalışmada, vurum süresi, bekleme süresi ve tepe akımının YÇY ve yeniden katılma tabakası kalınlığı üzerinde önemli etkileri olduğunu belirlemişlerdir. Bulgular, yüzey kalitesini artırmak adına bu parametrelerin dikkatli şekilde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır [11]. Son yıllarda geliştirilen Toz Karışımı EEİ (PMEEİ) ve hibrit EEİ teknikleri, yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde büyük potansiyel sunmaktadır. Arun Kumar Rouniyar ve Pragya Shandilya, Manyetik Alan Destekli PMEEİ (MFAPM-EEİ) yönteminin, Alüminyum 6061 alaşımında YÇY'yi %85 oranında azalttığını ve mikrosertliği %76 oranında artırdığını tespit etmiştir [12]. Munmun Bhaumik ve Kalipada Maity, AISI 304 paslanmaz çeliğin PMEEİ yöntemiyle işlenmesinde tepe akım ve toz konsantrasyonunun artırılmasının yüzey çatlaklarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir [13]. Van Tao Le, tungsten karbür tozu kullanılan PMEEİ sürecinde, SKD61 çeliğinde YÇY'yi %52,56, yeniden katılma tabakası kalınlığını ise %63,37 oranında düşürmeyi başarmıştır [14]. Hasan Rahimi ve arkadaşları, dielektrik olarak deiyonize su kullanımının yüzey topografyasını iyileştirdiğini, mikro çatlakları azalttığını ve ısıdan etkilenmiş bölgeyi (HAZ) minimize ettiğini göstermiştir [15]. amlesh Paswan ve arkadaşları, yüksek viskoziteli dielektrik sıvıların malzeme kaldırma oranını artırmasına rağmen, yetersiz temizleme nedeniyle çatlak yoğunluğunu da artırabildiğini raporlamıştır [16]. Ayrıca, hava/gaz destekli EEİ ve küçük alanlı EEİ gibi yöntemler de araştırılmıştır. Hardik Beravala ve Pulak M. Pandey, argon gazı desteğinin çatlak genişliğini %72 oranında azalttığını, manyetik alan desteğinin ise yüzey pürüzlülüğünü %32 oranında düşürdüğünü belirtmiştir [17]. Hwa-Teng Lee ve arkadaşları, bakır–tungsten elektrotlarla yapılan küçük alanlı EEİ işleminde, artık gerilme ile beyaz tabaka kalınlığı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve uzun vurum süresinin YÇY'yi azaltabildiğini göstermiştir [18]. Soo Hiong Lee ve Xiaoping Li, tungsten karbür işleme sırasında tepe akım ve vurum süresinin mikro çatlak yoğunluğunu ve yeniden katılma tabakası kalınlığını artırdığını gözlemlemiştir [19]. H.R. Rezaei Ashtiani ve F. Hojati, malzeme kaldırma oranı ile yüzey pürüzlülüğü arasında denge kurmak için kıvılcım

enerji yoğunluğunun optimize edilmesinin önemine dikkat çekmiştir[20].

Arun Kumar ve arkadaşları, Manyetik Alan Destekli Toz Karışımli Elektro Erozyon İşleme (MFAPM-EEİ) yöntemini, Alüminyum 6061 alaşımı üzerinde uygulayarak özellikle yanal açıklık (overcut) üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada boşalım akımı, toz konsantrasyonu, vurum süresi ve manyetik alan şiddeti gibi çeşitli işlem parametreleri değiştirilmiş ve analizlerde Box-Behnken deney tasarımı kullanılmıştır. Bulgular, yarı-ampirik bir modelin yanal açıklık tahmininde daha yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir [21]. Benzer şekilde, Anshuman Das ve arkadaşları, boşalım akımı, kıvılcım aralığı, gerilim, vurum süresi ve bekleme süresi gibi parametrelerin yanal açıklık üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneysel çalışmalarında, Box-Behnken düzenine sahip Yanıt Yüzeyi Yöntemi (RSM) kullanılmıştır. Sonuçlar, boşalım akımı ve vurum süresinin yanal açıklık üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu, bekleme süresi ve boşluk aralığının da yanal açıklığın azaltılmasında rol oynadığını ortaya koymuştur [22]. Başka bir çalışmada, S. Rajamanickam ve J. Prasanna, Ti-6Al-4V alaşımının pirinç tüp elektrotla EEİ'sini incelemiş ve malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yanal açıklık gibi performans ölçütleri üzerinden çok amaçlı optimizasyon uygulamıştır. Deneyler Yanıt Yüzeyi Yöntemi - Merkez Kompozit Tasarım (RSM-CCD) ve "İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği (TOPSIS)" kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle elde edilen değerler, malzeme kaldırma oranı için 3.6996 mm³/sn, takım aşınma oranı için 0.0625 mm/sn ve yanal açıklık için 0.33 mm olmuştur [23]. Reza Teimouri ve Hamid Baseri, döner elektrot ve döner manyetik alanın elektrot aşınma oranı (EWR) ve yanal açıklık üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bulgular, boşalım enerjisi arttıkça elektrot aşınma oranının da arttığını, ancak pirolitik karbonun yüksek enerji bölgelerinde bu aşınmayı azaltmaya yardımcı olduğunu göstermiştir. Elektrot ve manyetik alan hızlarının artması, işleme boşluğundaki talaşların daha verimli şekilde uzaklaştırılmasıyla elektrot aşınmasını artırmıştır. Ancak bu durum, pirolitik karbon oluşumunu engellemiş ve özellikle yüksek enerjili bölgelerde daha büyük boşalımların meydana gelmesine neden olarak yanal açıklığın artmasına yol açmıştır [24]. Munmun Bhaumik ve Kalipada Maity, AISI 304 paslanmaz çeliğinin elektro erozyonla işlenmesinde, kriyo-işlem görmüş çift temperli elektrotların radyal yanal açıklık (ROC) üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmalarında tungsten karbür elektrotlarla yapılan işlemlerde ROC değerleri değerlendirilmiş ve regresyon analizi ile işlem parametreleriyle olan ilişkileri modellenmiştir. Mikro yapı analizleri sonucunda, geleneksel EEİ'nin toz karışımli EEİ'ye kıyasla en düşük radyal yanal açıklığı sağladığı, kriyo-işlem görmüş elektrotların ise

işlenmemiş elektrotlara göre ROC değerlerini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir [25]. Zhao ve arkadaşları, EEİ sürecinde tepe akım ve vurum süresi gibi parametreleri analiz ettikleri bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada yanal açıklık için en küçük kareler yöntemiyle bir ampirik formül geliştirilmiş ve elde edilen formülün deneysel sonuçlarla makul bir uyum gösterdiği doğrulanmıştır [26].

Yukarıda özetlenen çalışmalar, elektro erozyonla işlemenin yüzey çatlak yoğunluğu ve yanal açıklık gibi kritik çıktılar üzerindeki çok yönlü etkilerini ortaya koymakta ve işlem parametrelerinin optimize edilmesinin ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Özellikle boşalım akımı, vurum süresi, bekleme süresi, tepe akım ve elektrot özellikleri gibi değişkenlerin dikkatle seçilmesi, işlem verimliliğini artırmanın yanı sıra yüzey bütünlüğünü ve ölçümsel hassasiyeti de iyileştirmektedir. Ayrıca, toz karışımı ve manyetik alan destekli gibi hibrit EEİ tekniklerinin geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün yüzey kalitesi ve daha düşük yanal açıklık değerleri sağladığı çeşitli çalışmalarda kanıtlanmıştır. Literatürdeki bu bulgular ışığında, bu çalışmanın amacı da hem yüzey çatlak yoğunluğu hem de yanal açıklık bakımından minimum deformasyon sağlayacak işlem parametrelerinin belirlenmesine katkıda bulunmak ve EEİ prosesine dair literatürdeki mevcut bilgi birikimini daha da ileri taşımaktır.

3. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEMENİN GENEL YAPISI

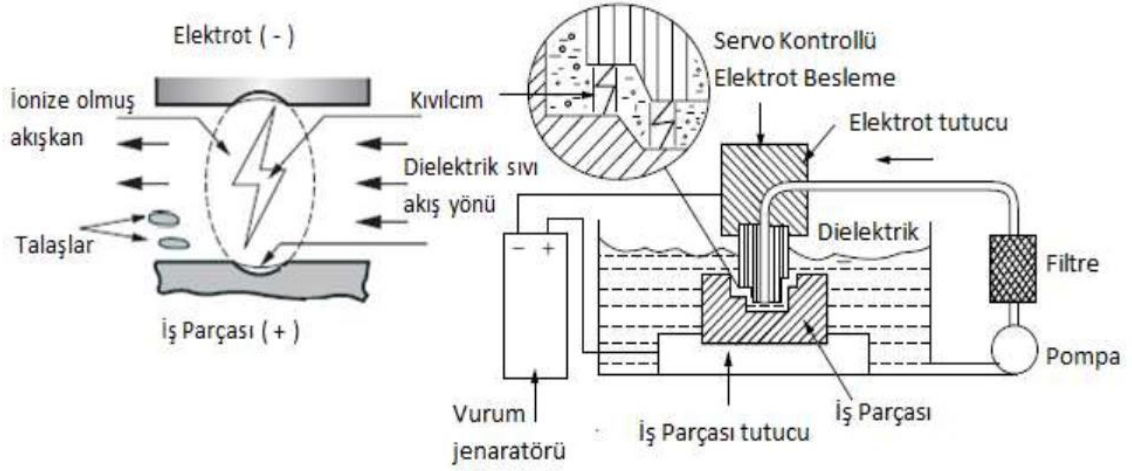
3.1. Elektro Erozyonla İşleme

EEİ, imalat sanayinde geniş bir uygulama alanına sahip olan gelişmiş bir üretim yöntemidir. Elektriksel kıvılcımlar uygulanarak sert ve zor işlenebilir metalleri hassas bir şekilde şekillendirmeye yarayan bir talaşsız imalat yöntemidir. Her ark, iş parçasının çok küçük bir kısmını eritir ve buharlaşmasına neden olarak şekillendirilmesini sağlar. Bu şekilde malzemeler işlenir ve şekil verilir. Mikron düzeyinde hassasiyet sağlar ve karmaşık geometriler elde edilebilir. Lakin sadece elektrik iletkenliği olan malzemelere uygulanabilir.

Dalma tipi EEİ sistemleri; takım tezgahı, dielektrik ünite ve güç kaynağı olmak üzere üç temel üniteden oluşur. Takım tezgahı ünitesinde, bir tezgah iskeleti, X-Y koordinat masası, servo kontrollü iş kafası, çalışma tankı ve dielektrik sıvıların besleme-dağıtım sistemleri yer almaktadır. Dielektrik ünitesi ise bir pompa, filtre elemanı, dielektrik yağ ile birlikte emme ve boşaltma borularından oluşur. EEİ uygulamalarında yaygın olarak kullanılan dielektrik sıvılar; gazyağı, trafo yağı, parafin ve mineral yağ gibi maddelerdir [6], [7], [27], [28].

Güç kaynağı ünitesi, kıvılcımın üretimi ve kontrolünü sağlayan darbe üretici devresini içerir. Bu sistem, direnç-kapasitans (R-C tipi) güç kaynağı ya da transistör kontrollü darbe güç kaynağıyla donatılmıştır. EEİ makineleri genellikle dakikada 2000 ile 500.000 arasında kıvılcım üreterek çalışır ve bu kıvılcımların sıcaklığı 10.000–20.000 °C seviyelerine ulaşır. Her bir kıvılcım anında, elektrot ile iş parçası arasında milyonlarca elektron akışı meydana gelir [21], [25], [28].

Bu elektronlar belirli bir noktada dielektrik sıvıyı iyonize ederek elektromanyetik bir akı sütunu oluşturur ve bu bölge, plazma kanalı olarak adlandırılır. Plazma kanalının yüksek enerji yoğunluğu, iş parçası yüzeyinde aşırı ısınma, erime ve buharlaşmaya neden olur. Bunun sonucunda, iş parçası üzerinde krater oluşumu meydana gelir. Vurum süresi sonunda, plazma kanalı daralır ve kabarcık oluşumu gerçekleşir. Bu kabarcığın kaldırma kuvveti sayesinde döküntüler uzaklaştırılırken, dielektrik sıvı da işleme boşluğunu temizler. Plazma temizleme verimliliğine bağlı olarak, erimiş malzemenin bir kısmı uzaklaştırılırken, kalan kısım yeniden katılarak yüzeyde yeniden döküm katmanını, yani beyaz tabakayı oluşturur [27], [29], [30], [31].



Şekil 3.1. EEİ tekniğinin yapısı

3.2. EEİ Sürecinde işleme mekanizması

EEİ işleminde, elektrik iletkenliği olmayan bir dielektrik sıvı içerisinde, güç kaynağına bağlı elektrot çifti (takım ve iş parçası), tezgâhın servo mekanizması aracılığıyla birbirine yaklaştırılır. Bu yaklaşma süreci sırasında, uygulanan elektriksel potansiyel, dielektrik sıvının yalıtkanlık özelliğini bozar ve ortamda elektrik akımının iletimini sağlayacak iyonlar, yani yüklü parçacıklar oluşur.

Bu noktadan itibaren, EEİ süreci üç temel aşamada gerçekleşir: vurum hazırlığı, vurum (ya da darbe) ve vurum aralığı. Her bir aşama, işleme mekanizmasının verimliliği ve yüzey kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu aşamaların detayları aşağıda açıklanmıştır.

3.2.1. Vurum Hazırlığı

Güç kaynağının devreye alınmasıyla birlikte, elektrotlar (takım ve iş parçası) arasındaki boşlukta bir elektriksel alan oluşur. Kısa devrenin önlenmesi ve yeterli potansiyel farkın sağlanabilmesi için, elektrotlar arasında uygun bir kıvılcım aralığı (gap) bırakılması gereklidir. Bu aralık, EEİ tezgahının servo mekanizması aracılığıyla otomatik olarak ayarlanabilir [31], [32].

Elektrotlar arasındaki mesafe en düşük seviyeye ulaştığında, oluşan elektrik alan maksimum değere çıkar. Bu noktada ortaya çıkan elektrostatik kuvvet sayesinde, iş parçasındaki serbest elektronlar takım elektrotta doğru hareket eder. Bu hareket sırasında, elektronlar ile dielektrik sıvı molekülleri arasında çarpışmalar meydana gelir ve bu çarpışmalar iyonlaşma sürecini

başlatır. Döngüsel olarak gerçekleşen bu olay sonucunda, elektriksel direnci düşük olan ve “plazma kanalı” olarak adlandırılan bir iletken yol oluşur [3], [4].

3.2.2. Vurum/Darbe

Plazma kanalı boyunca büyük miktarda akım geçerken, elektrot yüzeyinde oldukça yüksek bir ısı oluşur. Bu süreçte, yüksek enerjili elektronlar elektrotta, pozitif yüklü iyonlar ise işlenen malzeme yüzeyine çarpar (+ polarite). Bu çarpışmaların sonucunda oluşan aşırı sıcaklık, hem iş parçasının hem de elektrot yüzeyinin bir kısmının buharlaşmasına neden olur. Buharlaşma olayı, plazma kanalında oldukça yüksek bir basınç yaratır ve bu durum, bir deşarj kanalının oluşmasına yol açar [2], [5], [33].

Dielektrik sıvı, bu süreçte plazma haline dönüşürken, iyonlar elektromanyetik alan etkisiyle kanal boyunca çekilir. Bu çekilme, plazma kanalının genişlemesine neden olur. Ancak kanal çapının sürekli olarak büyümesi, ısı ve akım yoğunluğunu zamanla azaltır. Başka bir ifadeyle, plazma kanalındaki genişleme süreci, elektrot ve iş parçası arasında oluşan ısının buharlaşma yoluyla giderilmesiyle birlikte, sistemin termal kararlılığa ulaşmasıyla sona erer [19], [34].

Kanalın genişlemesi, hem dielektrik sıvının hem de elektrot-malzeme çiftinin buharlaşmasıyla birlikte ortamda yüksek bir basınç yaratmaya devam eder. Buharlaşan malzeme, plazma kanalını çevreleyen bir gaz kabarcığına dönüşür. Elektronlar, pozitif iyonlara göre daha hafif olduklarından daha hızlı hareket eder ve daha erken tepki verir. Bu nedenle çoğunlukla anot konumundaki iş parçası erir ya da buharlaşır. Bu durum, katot olarak kullanılan elektrotun daha az aşınmasına neden olur; bu da özellikle mikro işlemede önemli bir avantaj sağlar. Ancak, plazma kanalının anot tarafında genişlemesi, iş parçası yüzeyinde daha geniş bir alanda yeniden döküm katmanının (beyaz tabaka) oluşmasına sebep olur [1], [35], [36].

3.2.3. Vurum Aralığı

Bu aşamada, elektrot çiftine giden elektrik gücünün kesilmesiyle birlikte vurum sonlanır ve plazma kanalındaki iyonlaşma süreci azalmaya başlar. Deiyonizasyon sonucunda, plazmanın sıcaklığı ve basıncı düşer. Deşarj sırasında oluşan yüksek ısı nedeniyle, elektrot çevresinde eriyen malzeme anlık olarak kaynar ve sıvı kürecikler hâline gelir. Ardından, buharlaşan malzeme dielektrik sıvı ile temas ettiğinde hızla katılaşıyor ve oluşan parçacıklar, gap boşluğundan dışarı atılır [37], [38], [39], [40].

Bu işlem sırasında oluşan katı partiküllerin bir kısmı plazma kanalında kalır ve sonraki

vurum çevrimlerinde iyonlaşmaya katkı sağlar. Ancak, vurum aralığının uygun olmaması durumunda, döküntülerin yeterince uzaklaştırılmaması kıvılcım oluşumunu kararsızlaştırır. Vurum aralığının sonunda ise güç kaynağı otomatik olarak yeniden devreye girer ve işlem döngüsü tekrar eder [41], [42], [43].

EEİ işleminde temel işleme parametreleri olan gerilim (V) ve akım (I), işleme süresince fazlara göre değişkenlik gösterir. Elektronlar, daha hızlı ivmelendiklerinde kısa darbeler (0,5 μ s'den az) sırasında anottan daha fazla malzeme uzaklaştırırlar. Ancak pozitif iyonların kütlesi daha büyük olduğundan, elektronlara göre daha fazla ısı oluşturan çarpışmalara neden olurlar ve bu da katotta daha fazla talaş oluşmasına yol açar. Yüksek sıcaklıkta, dar plazma kanallı katotta oluşan erimiş bölgeler daha derin olur. Takım elektrotun anot, iş parçasının ise katot olarak seçildiği durumlarda, optimum işleme şartı 10-100 μ s darbe süresi aralığında sağlanır [17], [44], [45], [46].

3.3. EEİ Sürecinde İşleme Parametreleri

EEİ işlemi, hem elektriksel hem de elektriksel olmayan pek çok parametre tarafından kontrol edilir. Elektriksel parametreler arasında deşarj voltajı, tepe akımı, vurum süresi ve aralığı, takım boşluğu, polarite ve darbe dalga şekli yer almaktadır. Elektriksel olmayan parametreler ise elektrot ve iş parçasının dönüş hareketi, kullanılan dielektrik sıvının tipi ve uygulama yöntemi gibi unsurları kapsamaktadır [20], [47].

Bu parametrelerin EEİ işlem performansına etkileri; talaş kaldırma oranı (MRR), takım aşınma oranı (TWR), yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyet ve işleme süresi gibi ölçütlerle değerlendirilmektedir. İşleme ya da deşarj voltajı, kıvılcım aralığı içerisindeki ortalama gerilimi temsil eder. Deşarj gerçekleştiğinde, açık devre voltajından ani bir düşüş gözlemlenirken tepe akımı yükselir. Malzeme kaldırma işlemi, bu çalışma voltajı seviyesinde gerçekleşir. Deşarj voltajı, aynı zamanda kıvılcım boşluğunun boyutunu ve kesim fazlalığını doğrudan etkiler. Genellikle, yüksek elektriksel iletkenliğe sahip takım ve iş parçası malzemeleri ile düşük voltaj kullanılırken, düşük iletkenliğe sahip malzemeler daha yüksek voltaj gerektirir [13], [19], [34], [48], [49].

EEİ sürecinde en yüksek enerji girdisini temsil eden tepe akımı, işlemi etkileyen kritik bir parametredir. Vurum süresi boyunca ulaşılan en yüksek akım seviyesi olan bu değer, doğrudan MRR, TWR ve işleme hassasiyetini etkiler. Vurum süresi, deşarj akımının uygulandığı zaman aralığını tanımlar. Bu süreçte oluşan plazma kanalı, elektrot ve iş parçasını ısıtarak malzeme erozyonunu sağlar. Üretilen enerji miktarı, vurum süresiyle doğru

orantılı olarak MRR'ye etki eder. Uzun süreli darbelerle elde edilen yüksek enerji, MRR'yi artırabilir [10], [11], [50], [51].

Deşarj çevrimi boyunca malzeme döküntüleri oluşur ve bu bir yalıtım tabakası oluşturarak ark oluşumuna neden olabilir. Bu tabaka, vurum aralığı olarak adlandırılan ve deşarjın uygulanmadığı süre içinde dielektrik sıvı ile temizlenebilir. Kısa vurum aralıkları işleme hızını artırabilir; ancak aralığın, döküntülerin boşluktan uzaklaştırılmasına yetecek kadar uzun olması gerekir. Aksi takdirde, vurum aralığı fazla uzatıldığında işlenen yüzey gereğinden fazla soğuyabilir ve bu durum da MRR üzerinde olumsuz etki yaratabilir [14], [15], [16], [52].

Vurum dalga formu genellikle dikdörtgen şeklindedir. Bununla birlikte, elektrot aşınmasını azaltmak amacıyla trapezoid gibi alternatif darbe şekilleri de kullanılabilir. Deşarj mekanizmasının rastlantısal doğası nedeniyle, EEİ süreç parametrelerinin performansa etkisini net olarak açıklamak zordur. Bu yüzden, literatürde birçok çalışma bu parametrelerin performans ölçütlerine olan etkisini analiz etmiş ve en verimli sonuçları veren optimum parametre aralıklarını belirlemeye çalışmıştır [12], [53], [54], [55].

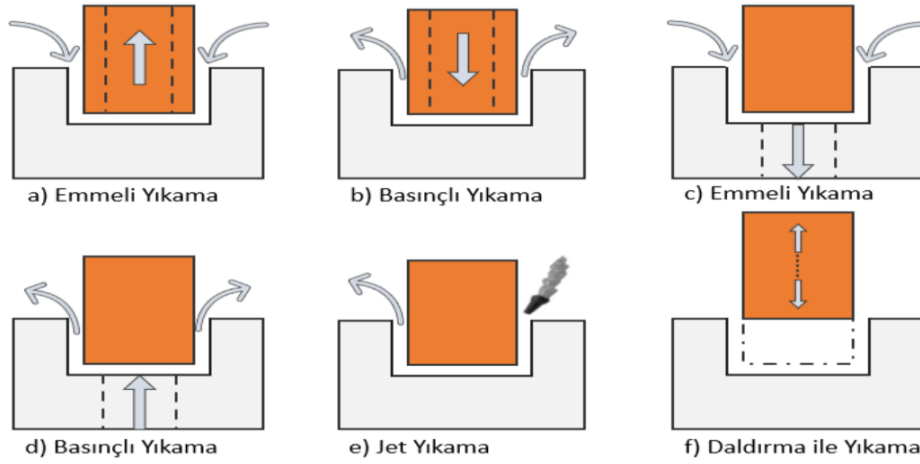
Son olarak, EEİ performansını etkileyen bir başka önemli etken ise takım polaritesidir. Bu polarite pozitif ya da negatif olabilir. Dalma EEİ sistemlerinde kullanılan jeneratörler, işlem ihtiyacına göre takım polaritesini değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Genellikle, pozitif polarite elektrot aşınmasını azaltmak amacıyla tercih edilir. Ancak, daha yüksek MRR elde etmek isteniyorsa, negatif polarite daha uygun olabilir; bu da takım aşınmasında artışa yol açar [3], [56], [57].

3.4. Dielektrik Sıvı

EEİ tekniklerinde, işlemin sağlıklı ve verimli bir şekilde gerçekleşmesi için dielektrik sıvı kullanılmaktadır. Bu sıvı, elektrot çifti arasında yalıtkan bir ortam oluşturarak kıvılcım deşarjlarının kontrollü bir şekilde meydana gelmesini sağlar. Ayrıca işlem sırasında oluşan döküntü ve parçacıkların ortamdaki uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Aynı zamanda, aşınan ve yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerin soğutulmasını sağlayarak hem takım hem de iş parçasının zarar görmesini engeller. Dielektrik sıvı, gap (boşluk) içerisinde iyonlaşmayı destekleyerek plazma kanalının oluşumunu kolaylaştırır. Bununla birlikte, enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla plazma kanalının daralmasını teşvik eder ve işlem verimliliğini artırır [2], [33], [36].

EEİ işlemlerinde kullanılan dielektrik sıvılar, işleme sürecinde döküntülerin ortamdaki

uzaklaştırılması, elektrotlar arasında yalıtıklık sağlanması ve işleme bölgesinin soğutulması gibi birçok önemli görev üstlenir. Hidrokarbon bazlı dielektrikler, geleneksel olarak tercih edilen türler arasında yer alsa da, bu yağların yeniden kullanımı zordur ve işlem sırasında zararlı dumanlar, aerosoller ve toksik gazlar yaymaları çevresel açıdan sorun yaratır. Günümüzde, biyomedikal uygulamalara yönelik organik bazlı dielektrikler, biyoaktif hidroksiapatit süspansiyonları ve biyodizel yağları gibi daha çevreci alternatifler kullanılmaktadır. Su bazlı dielektrikler ise kolay temin edilebilir ve çevre dostu olmalarıyla öne çıkar, ancak performans açısından her zaman yeterli değildir. Bu nedenle, su-glikol, su-makine yağı veya su-gliserin gibi karışımlar tercih edilmektedir [58], [59], [60]. Gaz bazlı dielektrikler, özellikle hava ve oksijen gibi bileşenlerden oluşur; daha az kirletici olmalarının yanı sıra, uygun şekilde kullanıldıklarında sıvı dielektriklerle benzer performans gösterebilirler. Toz katkılı dielektrikler ise modern bir yaklaşımla yüzey kalitesini artırmakta, çatlak ve gözenek oluşumunu azaltmakta etkili olup, kerosen sıvısı içinde grafit, SiC, Al₂O₃, Al ve Cr gibi iletken tozlarla zenginleştirilmiştir. EEİ’de genellikle düşük maliyetli mineral yağlar veya sentetik sıvılar tercih edilirken, saf su özellikle WEDM ve mikro-EDM işlemlerinde kullanılmaktadır. Yağ bazlı dielektriklerin yangın riski taşıması ve işlem sırasında zararlı gaz yaymaları çevre ve çalışan sağlığı açısından olumsuz etkiler yaratır. Bu nedenle, parlama noktası 85 °C’nin altındaki sıvıların kullanımı önerilmez [61]. Dielektrik sıvılar; akışsız, kesikli ve sürekli gibi çeşitli yöntemlerle uygulanabilirken, özellikle kanal ve derin delik işlemlerinde sürekli yıkama yöntemi döküntülerin uzaklaştırılmasında daha etkilidir. Takımın başlangıç seviyesinden geriye çekilerek dielektrik akış hızının artırılması, işlem süresinin kısaltılmasına katkı sağlar. Ayrıca, EEİ sırasında oluşan gaz kabarcıkları döküntülerin birikmesini tetikleyebilir; bu kabarcıklar yıkama basıncı ile uzaklaştırılarak işlem bölgesinin deiyonizasyonu sağlanır. Öte yandan, büyük kabarcıklar gap boşluğunu doldurarak işlem düzensizliğine sebep olabilir. Düşük basınç ise takımın kaynama noktasını düşürerek talaş kaldırma miktarını artırabilir [8], [62], [63].



Şekil 3.2. Dielektrik uygulama çeşitleri

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Elektro Erozyon Tezgâhı

Deneysel çalışmalar, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Laboratuvarı'nda yer alan "FURKAN EDM M25 A" model elektro erozyon tezgâhı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektro erozyon tezgâhları, klasik takım tezgâhları arasında yer almakla birlikte, özellikle karmaşık geometrilere sahip iş parçalarının hassas bir şekilde işlenmesinde büyük avantaj sağlar. Bu nedenle, kalıpcılık sektöründe sıklıkla tercih edilen ve vazgeçilmez olarak kabul edilen bir üretim teknolojisidir. EEİ yöntemi, yalnızca elektrik iletkenliğine sahip malzemelerin işlenmesine olanak tanır ve bu yönüyle metal işleme süreçlerinde önemli bir yer tutar. Deneyselde kullanılan FURKAN EDM M25 A model tezgâhın kontrol paneli, işleme sırasında kullanılan tüm parametrelerin ayarlanabildiği, voltaj, akım, darbeli enerji, boşluk voltajı gibi işlem değişkenlerinin hassas biçimde kontrol edilebildiği bir arayüz sunmaktadır. Bu özellik, deneysel çalışmalarda tekrarlanabilirliğin sağlanması ve optimum işlem koşullarının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

4.2. Elektrotlar

Deneysel çalışmalarda, elektrot malzemesi olarak üç farklı sert bakır alaşımı tercih edilmiştir: CuCrZr (Cupro Max), CuCoNiBe (Cupro CNB) ve CuNi2SiCr (Cupro NSS). Bu alaşımlar, yüksek elektrik iletkenliği ve iyi termal dayanım özellikleri sayesinde elektro erozyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneyselde kullanılan tüm elektrotlar Ø15x10 mm boyutlarında silindirik formda hazırlanmıştır. Elektrotların bu ölçüde seçilmesi, işleme esnasında tutarlılığın sağlanması ve malzeme davranışlarının karşılaştırılabilir olması açısından önem taşımaktadır. Her bir elektrot türüne ait yoğunluk, sertlik, elektriksel

iletkenlik

gibi fiziksel ve mekanik özellikler detaylı şekilde Tablo 4.1, Tablo4.2 ve Tablo 4.3'te sunulmuştur. Bu veriler, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde ve farklı alaşımların performanslarının karşılaştırılmasında temel referans olarak kullanılmıştır.

Tablo 4.1. CuNi2SiCr (Cupro NSS) mekanik ve fiziksel özellikler.

Mekanik Özellikler		
Sertlik	HB	190-230
Çekme Mukavemet	N/mm ²	600-800
Akma Mukavemet	N/mm ²	500-600
Uzama L:5D	%	11.15
Elastisite Modülü (20°C)	Gpa	140
Fiziksel Özellikler		
Elektrik İletkenliği	MS/mm	22-27
Isıl Genleşme Katsayısı (273-573 K)	10 ⁻⁶ /K	17
Isıl İletkenlik (20°C)	(W/m.K)	190-230
Yoğunluk	(g.cm ³)	8.8

Tablo 4.2. CuCoNiBe (Cupro CNB) mekanik ve fiziksel özellikler.

Mekanik Özellikler		
Sertlik	HB	230-260
Çekme Mukavemet	N/mm ²	700-900
Akma Mukavemet	N/mm ²	600-700
Uzama L:5D	%	11.15
Elastisite Modülü (20°C)	Gpa	130
Fiziksel Özellikler		
Elektrik İletkenliği	MS/mm	25-30
Isıl Genleşme Katsayısı (273-573 K)	10 ⁻⁶ /K	17
Isıl İletkenlik (20°C)	(W/m.K)	200-230
Yoğunluk	(g.cm ³)	8.75

Tablo 4.3. CuCr1Zr (Cupro Max) mekanik ve fiziksel özellikler.

Mekanik Özellikler		
Sertlik	HB	135-170
Çekme Mukavemet	N/mm ²	400-500
Akma Mukavemet	N/mm ²	320-410
Uzama L:5D	%	18
Elastisite Modülü (20°C)	Gpa	122
Fiziksel Özellikler		
Elektrik İletkenliği	MS/mm	45
Isıl Genleşme Katsayısı (273-573 K)	10 ⁻⁶ /K	17
Isıl İletkenlik (20°C)	(W/m.K)	320
Yoğunluk	(g.cm ³)	8.9

4.3. İş Parçası Malzemesi

Elektro erozyonla işleme deneylerinde, iş parçası malzemesi olarak yüksek tokluk ve iyi parlatılabilirlik özellikleriyle bilinen Mirrax plastik kalıp çeliği tercih edilmiştir. Bu çelik türü, özellikle kalıpcılık uygulamalarında, yüksek yüzey kalitesi ve aşınma direnci gerektiren işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan iş parçası numunesi 30x25x20 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Bu ölçüler, hem elektro erozyon işleminin etkinliğini değerlendirmek hem de yüzey karakterizasyonu gibi sonrasındaki analizleri sağlıklı bir şekilde gerçekleştirebilmek adına uygun bulunmuştur. Deneyde kullanılan iş parçasının kimyasal bileşimi Tablo 4.4'te detaylı olarak verilmektedir. Bu bileşim bilgileri, malzemenin elektro erozyon işlemi sırasındaki davranışlarını yorumlamak ve işleme performansını değerlendirmek açısından önemli bir temel oluşturmaktadır.

Tablo 4.4. İş parçası malzemesi kimyasal bileşimi.

Element	% Ağırlık
Karbon	0,25
Krom	13,3
Vanadyum	0,35
Silikon	0,35
Molibden	0,35
Manganez	0,55
Nikel	1,35

4.4. Dielektrik Sıvının Özellikleri

Elektro erozyon tezgâhlarında işleme işlemi, tamamen yalıtkan bir ortamda gerçekleştirilir ve bu ortamı sağlamak amacıyla elektriksel iletkenliği olmayan dielektrik sıvılar kullanılır. Dielektrik sıvı, EEİ sırasında yalnızca yalıtkan bir ortam sağlamakla kalmaz; aynı zamanda iş parçası ile elektrot arasında oluşan kıvılcımın iletimine aracılık eden plazma kanalının oluşmasına da katkı sağlar. Bu kanal sayesinde elektriksel boşalma gerçekleşir ve iş parçası yüzeyinden kontrollü şekilde malzeme uzaklaştırılır. Dielektrik sıvı, aynı zamanda işleme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklığı düşürerek soğutma işlevi görür. Bu çalışmada, dielektrik ortam olarak yaygın şekilde tercih edilen kerosen sıvısı kullanılmıştır. Deneylerde dielektrik sıvının işleme bölgesine etkili bir şekilde ulaşması için yanal püskürtme yöntemi tercih edilmiş, böylece hem etkin bir soğutma hem de talaş uzaklaştırma sağlanmıştır. Bu uygulama, işleme verimliliğini artıran önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir.

4.5. Yanal Açıklık Ölçümü

Yanal açıklık incelemeleri için, optik gözlem amacıyla BestScope BS-3020T model stereo mikroskop kullanılmıştır. Bu mikroskop tipi cihaz, numunelerin yüzey morfolojisini düşük büyütme seviyelerinde üç boyutlu olarak gözlemlemeye olanak tanıyan ve özellikle mikro ölçekteki işleme etkilerini analiz etmekte yaygın olarak tercih edilen bir enstrümandır. İnceleme sürecinde, EEİ işlemine tabi tutulan bölgelerdeki yanal açıklık miktarları mikroskobik büyütme altında değerlendirilerek kayıt altına alınmıştır. Gözlemler, farklı işleme parametrelerinin oluşturduğu kenar genişlemeleri ve malzeme taşmaları gibi ayrıntıların belirlenmesini sağlamış; bu veriler, EEİ performans değerlendirmesi kapsamında yanal açıklık analizlerine temel oluşturmuştur.

4.6. Yüzey Çatlak Yoğunluğu Ölçümü

Yüzey çatlak yoğunluğunun (YÇY) belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı kullanılmıştır. SEM, vakum ortamında çalışan ve elektromanyetik lensler aracılığıyla inceltelen elektron demetiyle malzeme yüzeyini yüksek çözünürlükte analiz etmeye olanak tanıyan bir cihazdır. Bu çalışmada, maksimum 1 nm çözünürlüğe ve 12x–900.000x büyütme aralığına sahip ZEISS / Supra 40 VP marka SEM cihazı kullanılmıştır. Örnek yüzeylerinin görüntülenmesi 500x büyütme oranında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen mikro yapı görüntüleri üzerinde ImageJ yazılımı kullanılarak çatlakların toplam uzunluğu ve görüntü alanı ölçülmüştür. Bu verilere dayanarak yüzey çatlak yoğunluğu, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, çatlakların toplam uzunluğunun mikro görüntü alanına oranı alınarak

hesaplanmıştır.

Bu yöntem sayesinde, EEİ işleminin sonrasında oluşan mikroyapısal çatlak dağılımı sayısal olarak değerlendirilmiştir.

$$YÇY (\mu\text{m}/\mu\text{m}^2) = \text{Toplam Çatlak Uzunluğu} / \text{Mikroğraf Alanı} \quad (4.1)$$

5. DENEY TASARIMI VE ANALİZİ

Deneyle, Taguchi'nin L27 ortogonal dizi yöntemi kullanılarak planlanmış ve dört farklı işlem parametresi dikkate alınmıştır. Bu parametreler; elektrot tipi, boşalım akımı (I), vurum süresi (Ton) ve bekleme süresi (Toff) olarak belirlenmiştir. Tüm deney koşullarında iş parçası işleme süresi sabit tutulmuş ve 30 dakika olarak ayarlanmıştır. Belirlenen bu girdi parametrelerinin, deneyler sonucunda elde edilen yanal açıklık ve yüzey çatlak yoğunluğu üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Boşalım akımı için 6 A, 12 A ve 25 A; vurum süresi için 50 μs , 100 μs ve 200 μs ; bekleme süresi için ise 200 μs , 400 μs ve 800 μs seviyeleri seçilmiştir. Deneylede kullanılan faktörler ve seviyeleri Çizelge 4.5'te sunulmaktadır. Elde edilen deneysel verilere %95 güven aralığında varyans analizi (ANOVA) uygulanarak yanal açıklık ve yüzey çatlak yoğunluğu parametreleri üzerinde işlem değişkenlerinin etkisi değerlendirilmiştir. Deney tasarımı ve istatistiksel analizler Minitab17 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.5. Faktörler ve seviyeleri.

Faktörler	Seviye			
	Değişken	1	2	3
Elektrot	A	CuCoNiBe	CuNi2SiCr	CuCr1Zr
Akım, I (A)	B	6	12	25

Vurum süresi, Ton (μ s)	C	50	100	200
Bekleme süresi, Toff (μ s)	D	200	400	800



6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı elektrot malzemeleri (CuCoNiBe, CuNi₂SiCr ve CuCr1Zr) ile uygulanan elektriksel erozyon işlemlerinin yanal açıklık ve yüzey çatlak yoğunluğu (YÇY) üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüzey çatlak yoğunluğunu en fazla etkileyen parametrelerden birinin elektrot malzemesi olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle CuCoNiBe elektrotu ile yapılan işlemlerde, diğer elektrotlara kıyasla çok daha düşük YÇY değerleri elde edilmiştir. En düşük YÇY değeri %0,0005 ile 25 A boşalma akımı, 50 µs vurum süresi ve 800 µs bekleme süresi ile gerçekleştirilen A₁B₃C₁D₃ numaralı deneyde kaydedilmiştir. Buna karşılık, en yüksek YÇY değeri ise %0,0306 ile CuCr1Zr elektrodu kullanılarak 25 A akım, 200 µs vurum ve 400 µs bekleme süresi parametreleriyle yapılan A₃B₃C₃D₂ numaralı deneyde elde edilmiştir. Yanal açıklık açısından değerlendirildiğinde, en düşük değer 203 µm ile CuCoNiBe elektrodu, 6 A akım, 50 µs vurum süresi ve 200 µs bekleme süresi ile yapılan 1 numaralı deneyde gözlemlenirken; en yüksek değer 905 µm ile yine CuCoNiBe elektrodu kullanılan A₁B₃C₃D₂ numaralı deneyde ölçülmüştür. Bu bulgular, yüksek boşalma akımı ve uzun vurum süresi gibi agresif işlem parametrelerinin hem YÇY hem de yanal açıklığı artırdığını ortaya koymaktadır. Taguchi L27 deney seti kullanılarak gerçekleştirilen çalışma sonucunda elde edilen deney sonuçları Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

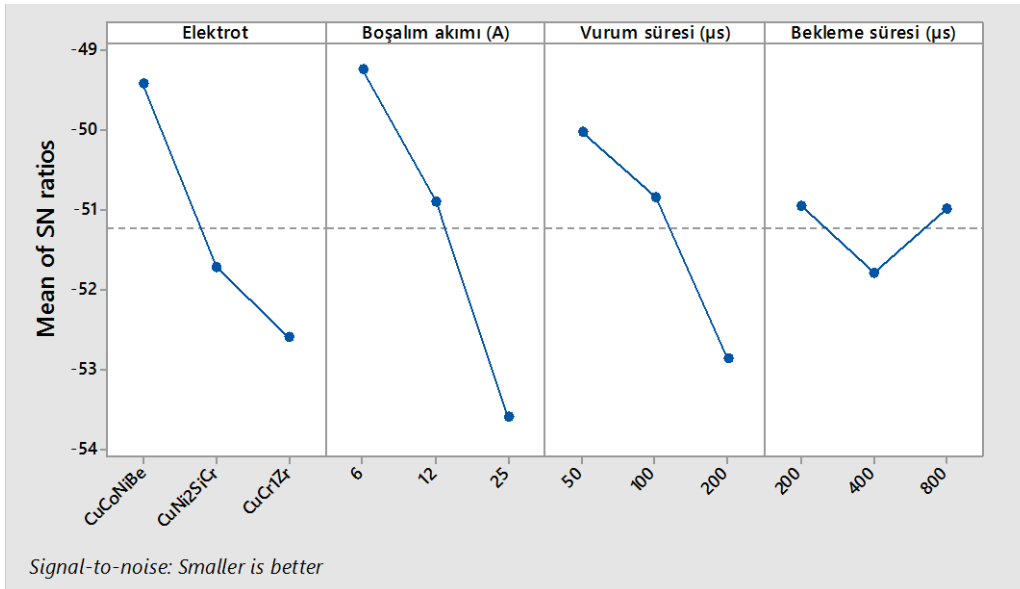
Tablo 5.1. Deneysel ve analiz çalışma sonuçları

Deneysel Sırası	Değişkenler	Elektrot	Boşalım akımı (A)	Vurum süresi (µs)	Bekleme süresi (µs)	Yanal Açıklık (µm)	YÇY (%)
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	CuCoNiBe	6	50	200	203	0,0074
2	A ₁ B ₁ C ₂ D ₂	CuCoNiBe	6	100	400	266	0,0103
3	A ₁ B ₁ C ₃ D ₃	CuCoNiBe	6	200	800	250	0,0148
4	A ₁ B ₂ C ₁ D ₂	CuCoNiBe	12	50	400	284	0,0053
5	A ₁ B ₂ C ₂ D ₃	CuCoNiBe	12	100	800	345	0,0049
6	A ₁ B ₂ C ₃ D ₁	CuCoNiBe	12	200	200	204	0,0027
7	A ₁ B ₃ C ₁ D ₃	CuCoNiBe	25	50	800	350	0,0005
8	A ₁ B ₃ C ₂ D ₁	CuCoNiBe	25	100	200	200	0,0017
9	A ₁ B ₃ C ₃ D ₂	CuCoNiBe	25	200	400	905	0,0021
10	A ₂ B ₁ C ₁ D ₁	CuNi ₂ SiCr	6	50	200	293	0,0026
11	A ₂ B ₁ C ₂ D ₂	CuNi ₂ SiCr	6	100	400	270	0,0073
12	A ₂ B ₁ C ₃ D ₃	CuNi ₂ SiCr	6	200	800	325	0,0111
13	A ₂ B ₂ C ₁ D ₂	CuNi ₂ SiCr	12	50	400	210	0,0113
14	A ₂ B ₂ C ₂ D ₃	CuNi ₂ SiCr	12	100	800	400	0,0114
15	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁	CuNi ₂ SiCr	12	200	200	598	0,0107
16	A ₂ B ₃ C ₁ D ₃	CuNi ₂ SiCr	25	50	800	455	0,0103
17	A ₂ B ₃ C ₂ D ₁	CuNi ₂ SiCr	25	100	200	525	0,0112
18	A ₂ B ₃ C ₃ D ₂	CuNi ₂ SiCr	25	200	400	603	0,0109
19	A ₃ B ₁ C ₁ D ₁	CuCr ₁ Zr	6	50	200	340	0,0144
20	A ₃ B ₁ C ₂ D ₂	CuCr ₁ Zr	6	100	400	338	0,0218
21	A ₃ B ₁ C ₃ D ₃	CuCr ₁ Zr	6	200	800	358	0,0199
22	A ₃ B ₂ C ₁ D ₂	CuCr ₁ Zr	12	50	400	427	0,0153
23	A ₃ B ₂ C ₂ D ₃	CuCr ₁ Zr	12	100	800	351	0,0132
24	A ₃ B ₂ C ₃ D ₁	CuCr ₁ Zr	12	200	200	533	0,0161
25	A ₃ B ₃ C ₁ D ₃	CuCr ₁ Zr	25	50	800	392	0,0109
26	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁	CuCr ₁ Zr	25	100	200	612	0,0225
27	A ₃ B ₃ C ₃ D ₂	CuCr ₁ Zr	25	200	400	590	0,0306

6.1. Yanal Açıklık Analizi

Şekil 5.1’de yanal açıklık değerlerine göre hesaplanan sinyal-gürültü (S/N) oranlarının ana etkiler grafiği gösterilmektedir. Grafik işlem parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini istatistiksel olarak ortaya koymaktadır. “daha küçük daha iyidir” (küçük daha iyidir) kriteri esas alınarak oluşturulan grafikte, daha düşük S/N oranı daha yüksek yanal açıklığa işaret etmektedir. Elektrot parametresi incelendiğinde, CuCoNiBe elektrotunun diğerlerine kıyasla daha düşük yanal açıklık değerleri oluşturduğu ve dolayısıyla daha yüksek S/N oranı sağladığı görülmektedir. Bu durum, CuCoNiBe elektrotunun yanal açıklığın minimize edilmesinde daha avantajlı bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.

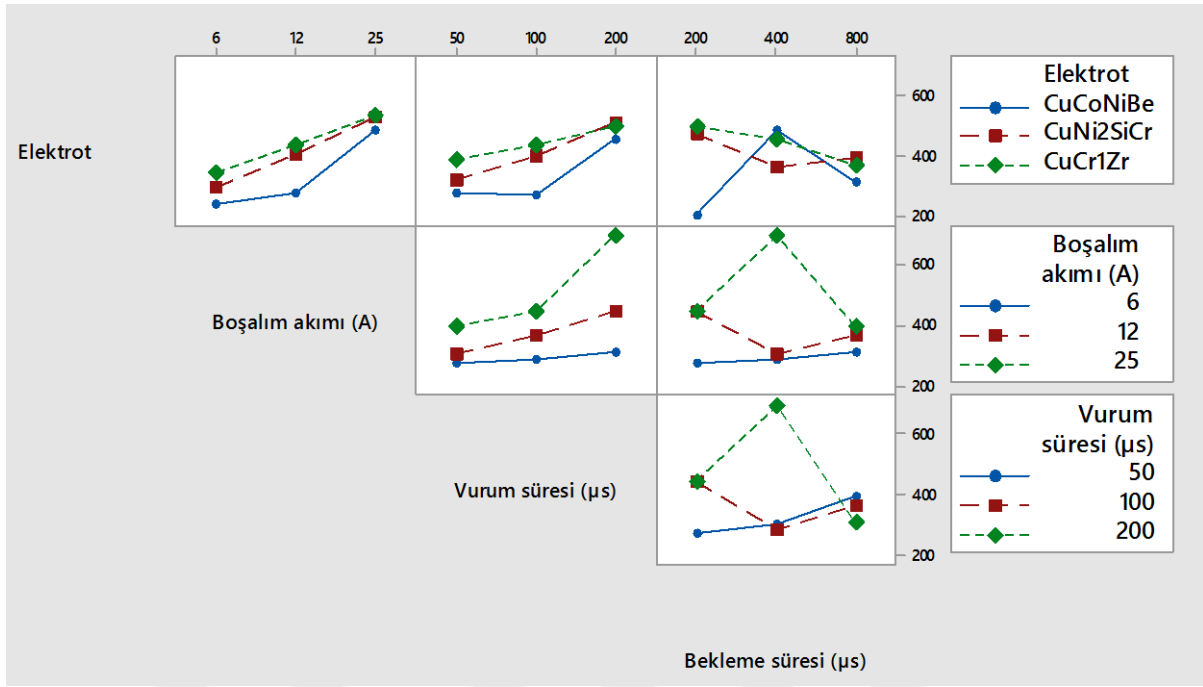
Boşalma akımı parametresi açısından değerlendirildiğinde, artan akım seviyesinin S/N oranını belirgin şekilde düşürdüğü gözlemlenmektedir. Bu durum, yüksek akım seviyelerinde yanal açıklığın arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, vurum süresi de benzer bir eğilim göstermekte olup, 200 μ s’ye kadar çıkan sürelerde yanal açıklığın önemli ölçüde arttığı, dolayısıyla S/N oranının azaldığı belirlenmiştir. Buna karşılık, bekleme süresi parametresi diğer üç faktöre kıyasla yanal açıklık üzerinde daha sınırlı bir etki göstermektedir; 400 μ s bekleme süresinde S/N oranının minimuma indiği, ancak 200 ve 800 μ s seviyelerinde bu oranın birbirine yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, yanal açıklığın minimize edilmesi açısından en uygun koşullar CuCoNiBe elektrotu, düşük boşalma akımı (6 A), kısa vurum süresi (50 μ s) ve 200 μ s bekleme süresi olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Yanal açıklık değerlerine göre hesaplanan sinyal-gürültü (S/N) oranlarının ana etkiler grafiği

Şekil 5.2’de, yanal açıklık değerleri açısından elektrot malzemesi ile işlem parametreleri (boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresi) arasındaki ikili etkileşimler gösterilmiştir. Bu grafikler, farklı parametre düzeylerinin yanal açıklık üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Elektrot–Boşalım akımı etkileşimi incelendiğinde, tüm elektrot tiplerinde boşalma akımının artışıyla yanal açıklık değerlerinin belirgin şekilde yükseldiği gözlemlenmektedir. Özellikle CuCr1Zr elektrodu ile 25 A boşalma akımı kullanıldığında en yüksek yanal açıklık değeri elde edilmiştir. CuCoNiBe elektrodu ise her akım seviyesinde en düşük yanal açıklık değerlerini göstermiştir; bu da bu elektrodun yüzey yanal açıklık değeri açısından daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Elektrot–Vurum Süresi etkileşiminde, vurum süresinin artışı tüm elektrotlar için yanal açıklıkta artışa neden olmaktadır. Ancak, CuCr1Zr elektrodu için bu artış daha keskin olup, 200 µs vurum süresinde yanal açıklık değerlerinde ciddi bir yükseliş gözlenmiştir. CuCoNiBe elektrodu bu parametrede de en düşük açıklık değerini sağlayarak işlem kararlılığı açısından ön plana çıkmaktadır [64], [65], [66].

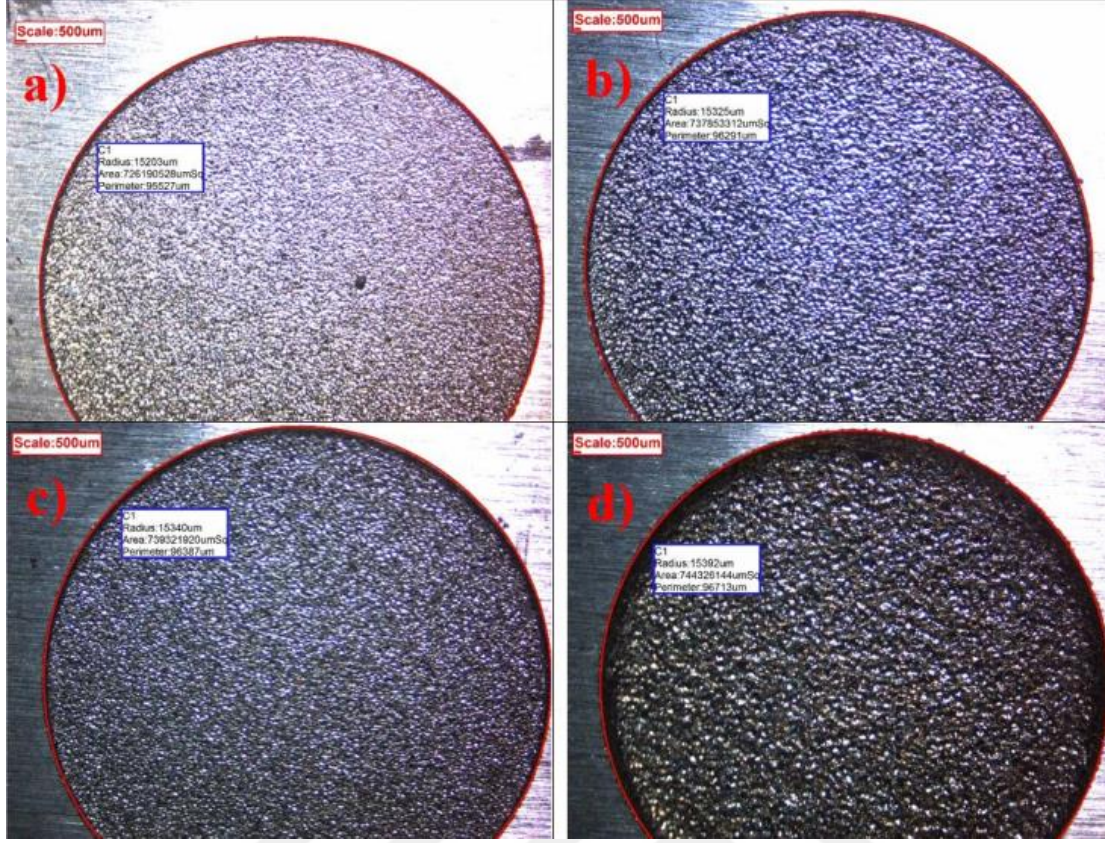
Elektrot–Bekleme Süresi etkileşimi, yanal açıklık üzerinde daha karmaşık bir etki göstermektedir. Özellikle CuCr1Zr elektrodu için 400 µs bekleme süresi en yüksek yanal açıklık ile sonuçlanırken, 800 µs süresinde bu değer bir miktar azalmıştır. Diğer elektrotlar ise daha dengeli bir profil sergilemiştir. Bu durum, CuCr1Zr elektrodu için bekleme süresine bağlı olarak işleme davranışının daha hassas olduğunu göstermektedir. Boşalım Akımı–Vurum Süresi etkileşiminde, özellikle yüksek akım (25 A) ve uzun vurum süresi (200 µs) kombinasyonunda yanal açıklık değerlerinin belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu parametrelerin eşzamanlı artışı, yüzeyde daha büyük erozyon alanlarının oluşmasına neden olmaktadır. Düşük akım ve kısa vurum süresi kombinasyonu ise en düşük açıklık değerlerini sunmaktadır. Boşalım Akımı–Bekleme Süresi ve Vurum Süresi–Bekleme Süresi etkileşimleri, özellikle orta ve yüksek bekleme süresi değerlerinde yanal açıklığın arttığını göstermektedir. Bekleme süresi arttıkça özellikle yüksek vurum süresiyle birlikte açıklıkta daha büyük değişimler gözlemlenmiştir. Bu durum, işleme süresinin uzamasıyla deşarj kanalının daha geniş etki alanı oluşturduğunu göstermektedir [22], [67], [68].



Şekil 5.2. Yanal açıklık için elektrot malzemesi ile işlem parametreleri arasındaki etkileşim grafiği

Şekil 5.3, üç farklı elektrot malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmanın yanıl açıklık ölçümlerine ilişkin genel bir görünüm sunmaktadır. Deneyslerde sırasıyla CuCoNiBe, CuNi₂SiCr ve CuCr₁Zr alaşımları kullanılmıştır. Şekil 5.1(a)'da yer alan deney koşullarında, CuCoNiBe elektrodu kullanılarak 6 A boşalım akımı, 50 µs vurum süresi ve 200 µs bekleme süresi uygulanmış; bu parametrelerle elde edilen yanıl açıklık değeri 203 µm olarak ölçülmüştür. CuNi₂SiCr elektrot ve 6 A akım değeri, 200 µs vurum süresi, 800 µs bekleme süresi kullanılan deneyde yanıl açıklık değeri belirgin şekilde artarak 325 µm'ye ulaşmıştır.

Şekil 5.1(c)'de ise farklı bir elektrot olan CuCr₁Zr malzemesi 6 A boşalım akımı ve 50 µs vurum süresi ve 200 µs bekleme süresiyle test edilmiş; sonuç olarak 340 µm'lik bir aşınma gözlemlenmiştir. Son olarak, Şekil 5.1(d)'de CuCr₁Zr elektrodu 25 A gibi yüksek bir boşalım akımı ve vurum ve bekleme süresi (200 µs, 400 µs) ile test edilmiştir. Bu parametreler altında oluşan 590 µm'lik yanıl açıklık değerini belirlemede kritik rol oynadığını açıkça göstermektedir.



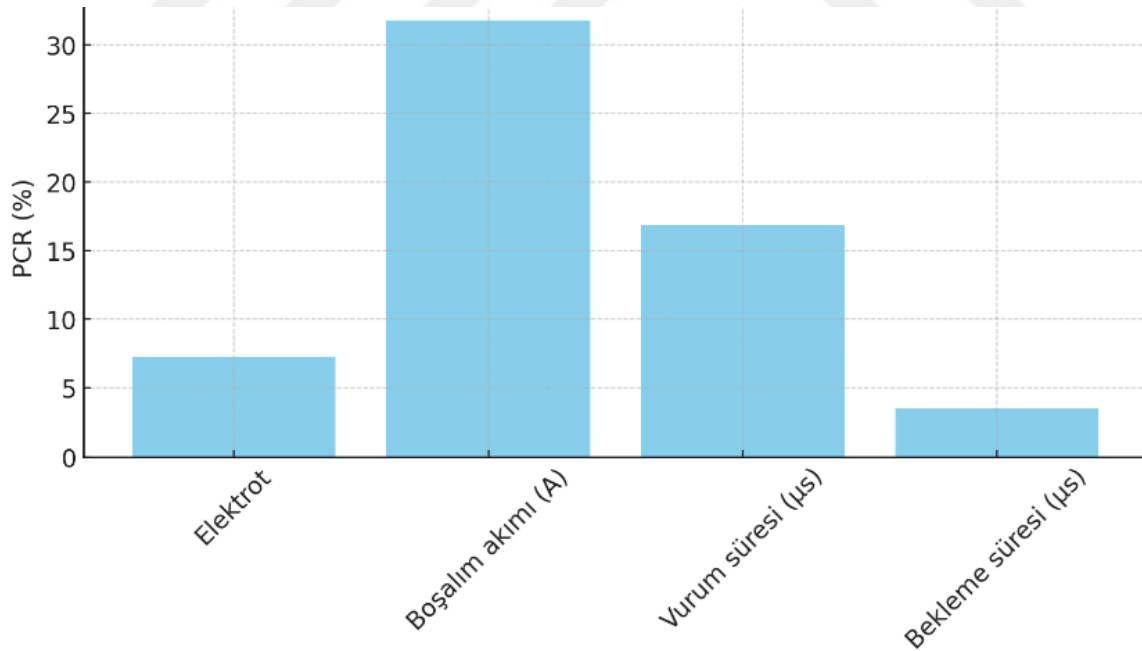
Şekil 5.3. Yanal açıklık ölçüm sonuçlarına ait görüntüler

Tablo 5.2’de ANOVA analizi sonuçları gösterilmektedir. ANOVA analizi sonuçlarına göre, deneysel tasarımda incelenen dört temel faktörün "yanal açıklık" üzerinde farklı seviyelerde etkili olduğu görülmektedir. Şekil 5.4’te Faktörlerin yanal açıklığa etkilerini yüzdesel olarak belirlemek amacıyla hesaplanan PCR (Percentage Contribution Ratio) değerleri verilmiştir.

Tablo 5.2. ANOVA analizi sonuçları

Kaynak (Source)	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Elektrot	2	51.577	25.789	1,61	0,228
Boşalım akımı (A)	2	225.822	112.911	7,04	0,006
Vurum süresi (µs)	2	119.994	59.997	3,74	0,044
Bekleme süresi (µs)	2	24.913	12.456	0,78	0,475
Hata	18	288.545	16.030		
Toplam	26	710.851			

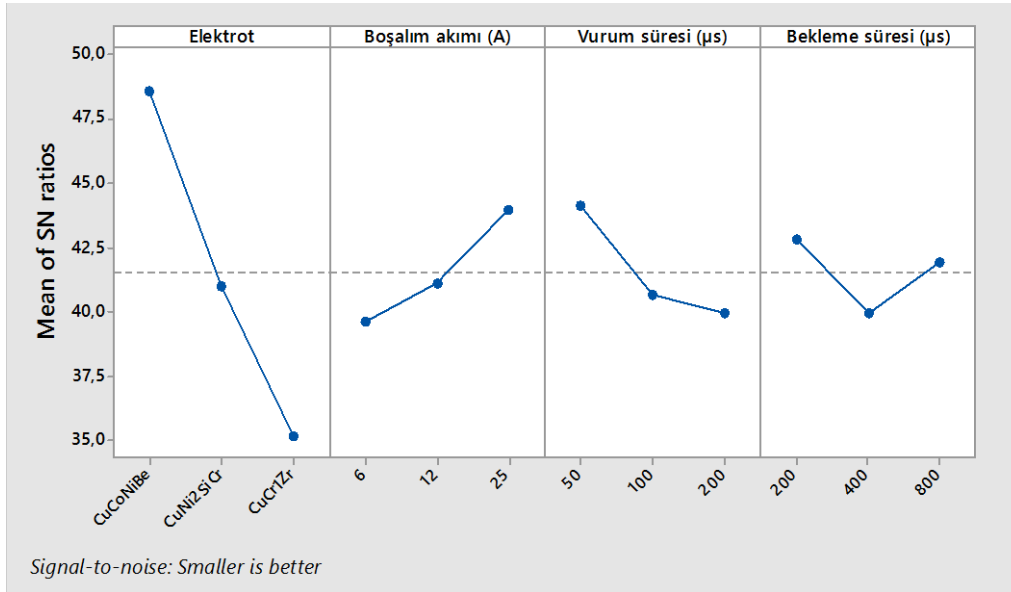
Faktörlerin yanal açıklığa etkilerini yüzdesel olarak belirlemek amacıyla hesaplanan PCR değerleri ve anlamlılık düzeyleri incelendiğinde boşalım akımının en yüksek katkıyı sağlayan parametre olup, toplam varyansın %31,77'sini açıklamaktadır. Ayrıca p-değeri 0,006 ile istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0,05$). Bu, boşalım akımının yanal açıklık üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu göstermektedir. Vurum süresi (μs): Toplam varyansın %16,88'ini oluşturmaktadır ve p-değeri 0,044 ile istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu da vurum süresinin yanal açıklık üzerinde etkili bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Elektrot tipi: %7,26 katkı ile sınırlı bir etki göstermektedir ve p-değeri 0,228 ile istatistiksel olarak anlamlı değildir. Yani, elektrot türünün yanal açıklığa etkisi düşük ve önemsizdir. Bekleme süresi (μs): %3,50 ile en düşük katkıyı sağlayan parametre olup, p-değeri 0,475 ile istatistiksel olarak da anlamlı değildir. Bu da bekleme süresinin yanal açıklık üzerinde dikkate değer bir etkisi olmadığını göstermektedir. Yüksek boşalım akımı ve uzun vurum sürelerinin yanal açıklık üzerinde önemli etkiler yarattığı anlaşılmaktadır. Grafikte de görüldüğü üzere, en yüksek katkı payı boşalım akımı, ardından vurum süresi ile gelmektedir. Bu sonuçlar, süreç parametrelerinin dikkatli ayarlanmasıyla yanal açıklık değerinin iyileşebileceğini göstermektedir.



Şekil 5.4. İşleme faktörlerinin yanal açıklık üzerindeki etki oranları

6.1. Yüzey Çatlak Yoğunluğu Analizi

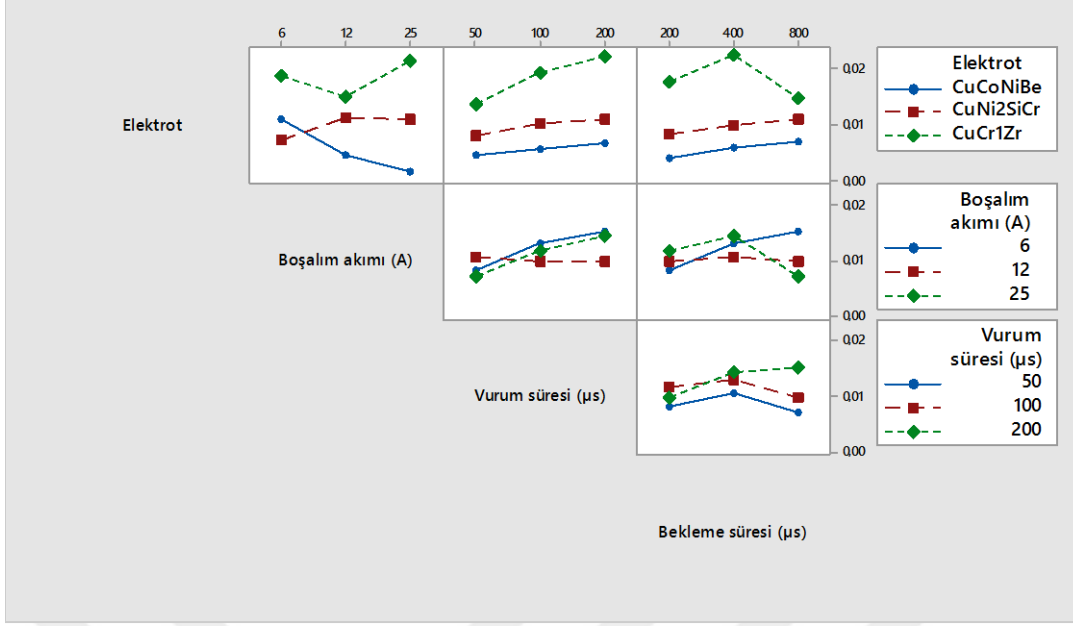
Taguchi L27 deneysel tasarımı kapsamında yürütülen çalışmada, YÇY üzerindeki işlem parametrelerinin etkisi “daha küçük daha iyidir” kriterine göre oluşturulan S/N oranları grafiği ile değerlendirilmiştir. Şekil 5.5’de görüldüğü üzere, YÇY üzerinde en belirgin etkiye sahip parametrelerin başında elektrot tipi gelmektedir. CuCoNiBe elektrodu, en yüksek S/N oranını göstermiş olup, bu durum ilgili elektrot ile yapılan işlemlerde yüzeyde oluşan çatlak yoğunluğunun minimum düzeyde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, CuCr1Zr elektrodu en düşük S/N değerine sahip olması nedeniyle en fazla çatlak oluşumuna sebebiyet vermektedir. Boşalım akımı parametresine bakıldığında ise artan akım değerleriyle birlikte S/N oranlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yüksek boşalım akımlarının çatlak yoğunluğunu azalttığını göstermekte, daha yoğun enerji iletimi sayesinde yüzeyin daha kısa sürede ve düzgün işlenmesini sağlamaktadır [1], [54], [56]. Vurum süresi açısından değerlendirildiğinde, en kısa vurum süresi olan 50 μ s ile en yüksek S/N oranı elde edilmiştir. Bu da daha kısa süreli darbe uygulamalarının yüzeyde oluşabilecek termal birikimi ve buna bağlı çatlakları minimize ettiği anlaşılmaktadır [8], [62]. Bekleme süresi parametresi incelendiğinde ise 200 μ s ve 800 μ s değerlerinde daha yüksek S/N oranları gözlemlenmiştir. Özellikle orta seviye bekleme süresi olan 400 μ s, en düşük S/N değerini vermiştir ve bu da çatlak yoğunluğunun bu aralıkta arttığını işaret etmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, YÇY’yi minimize etmek için CuCoNiBe elektrodu ile 25 A boşalım akımı, 50 μ s vurum süresi ve 200 μ s aralığında bir bekleme süresi kullanılması önerilmektedir.



Şekil 5.5. YÇY değerlerine göre hesaplanan sinyal-gürültü (S/N) oranlarının ana etkiler grafiği

Şekil 5.6’da sunulan etkileşim grafiği, deneysel çalışma kapsamında YÇY etkileyen işlem parametreleri arasındaki karşılıklı ilişkileri ortaya koymaktadır. Grafik, elektrot tipi, boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresi parametrelerinin YÇY üzerindeki ortalama etkilerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Elektrot-boşalım akımı etkileşimi incelendiğinde, özellikle CuCr1Zr elektrot tipinde artan akım değerlerinin YÇY’yi önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Bu durum, CuCr1Zr malzemesinin yüksek akımlara karşı daha hassas olduğunu ve yüzeyde daha fazla çatlak oluşumuna neden olduğunu düşündürmektedir [69], [70]. CuCoNiBe elektrodu ise akım arttıkça daha stabil ve düşük YÇY değerleri sunarak bu parametreye karşı daha dirençli bir yapı sergilemektedir. Elektrot-vurum süresi etkileşimi açısından bakıldığında, CuCr1Zr elektrodu ile 200 µs vurum süresinde YÇY’nin en yüksek düzeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Diğer elektrot tipleri daha düşük vurum sürelerinde görece daha dengeli sonuçlar vermektedir. Bu bulgu, vurum süresi arttıkça yüzeydeki termal gerilimlerin CuCr1Zr elektrodu ile daha fazla çatlak oluşumuna yol açtığını göstermektedir.

Elektrot-bekleme süresi etkileşiminde, CuCr1Zr elektrodu ile 400 µs bekleme süresinde YÇY’nin en yüksek değeri elde ettiği ve 800 µs’de ise azaldığı görülmektedir. Bu da işlem sırasında uygulanan bekleme süresinin çatlak oluşumunda önemli bir rol oynadığını ve CuCr1Zr için optimum bir süre seçilmesinin kritik olduğunu ortaya koymaktadır [71], [72], [73]. Boşalım akımı-vurum süresi etkileşimi değerlendirildiğinde, boşalım akımı arttıkça vurum süresinden bağımsız olarak YÇY’nin genel olarak arttığı, fakat düşük akım ve kısa vurum süresi kombinasyonlarında çatlak yoğunluğunun minimize edilebildiği görülmektedir [74], [75]. Boşalım akımı-bekleme süresi ve vurum süresi-bekleme süresi etkileşimleri ise daha sınırlı düzeyde etki göstermekte olup, özellikle bekleme süresi 400 µs olduğunda YÇY’nin bazı kombinasyonlarda artış gösterdiği görülmektedir.

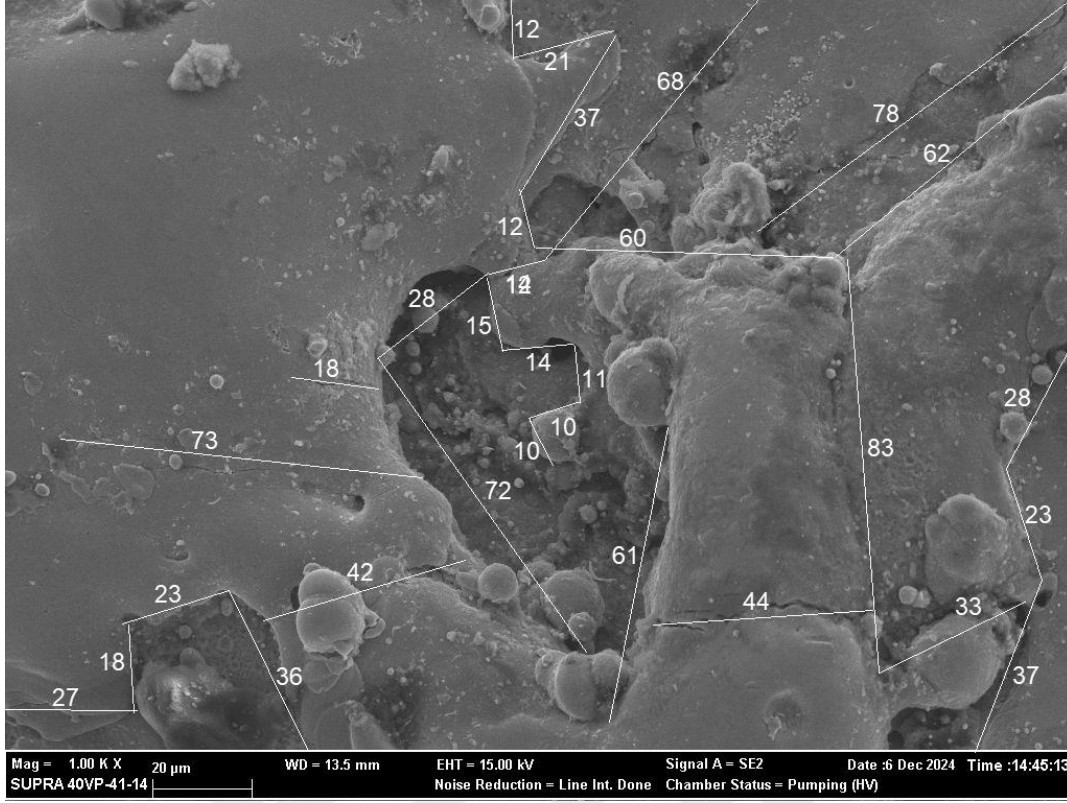


Şekil 5.6. YÇY için elektrot malzemesi ile işlem parametreleri arasındaki etkileşim grafiği

Şekil 5.7’de CuCr1Zr elektrotu kullanılarak en yüksek boşalım akımı ($I = 25$ A), en uzun vurum süresi ($T_{on} = 200$ μ s) ve orta düzeyde bekleme süresi ($T_{off} = 400$ μ s) ile işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü sunulmaktadır. Bu işlem parametreleri altında ölçülen YÇY değeri $0,0306$ μ m/ μ m²’dir.

SEM mikrografı incelendiğinde, yüzeyde belirgin düzensizlikler gözlemlenmektedir. Görüntü, yaygın şekilde mikroçatlak oluşumu, erimiş ve yeniden katılmış bölgeler ile yüzeye yapışmış artık partiküller içermektedir. Yüksek akım ve uzun süreli vurum, yüzeye yoğun enerji aktarımına neden olmuş; bu da yerel olarak erime ve ani soğuma süreçlerini tetiklemiştir. Bu termal şok etkisi, malzemenin yüzeyinde iç gerilmelerin artmasına ve çatlak ağlarının oluşmasına yol açmıştır [32].

Özellikle görüntüde görülen yoğun çatlak yapıları, işlenen yüzeyin bütünlüğünü ve mekanik dayanımını olumsuz etkileyebilecek potansiyele sahiptir. Bu durum, yüksek enerji parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki negatif etkisini açıkça ortaya koymakta ve bu tür uygulamalarda işlem parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir [76], [77], [78].



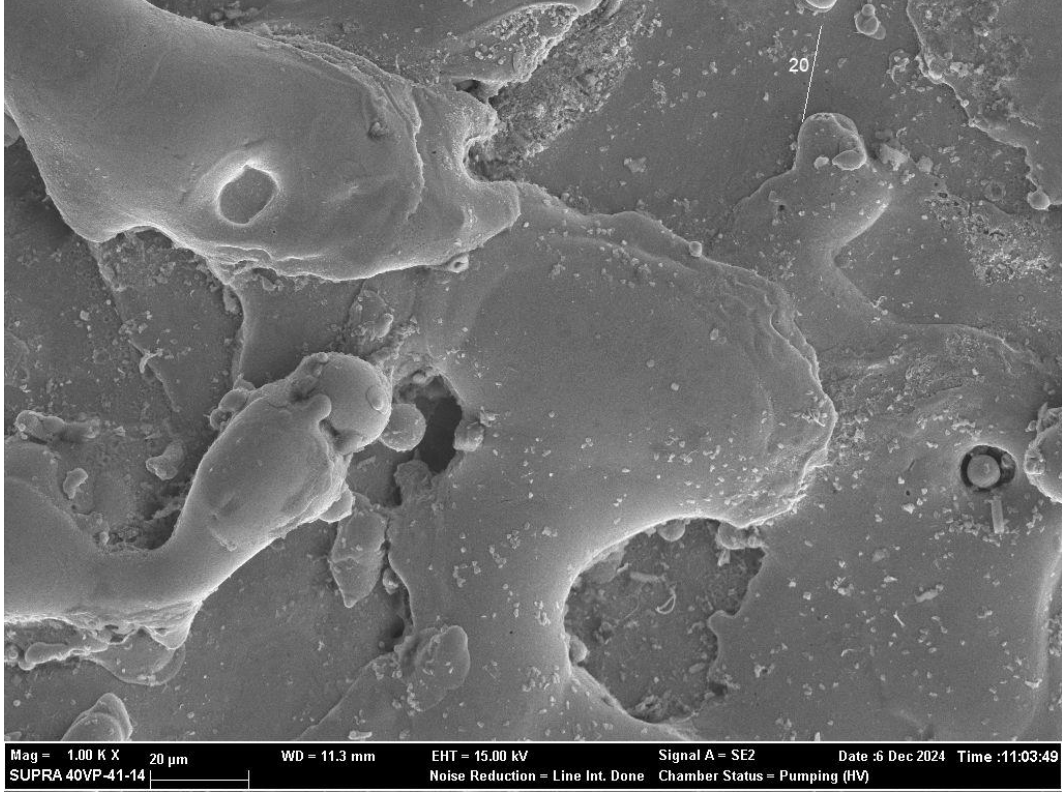
Şekil 5.7. CuCr1Zr elektrot ile işlenen yüzeye ait YÇY ölçümleri, (I = 25 A), (Ton = 200 µs), (Toff = 400 µs)

Şekil 5.8’de CuCoNiBe elektrotu kullanılarak en düşük YÇY değerinin elde edildiği işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü verilmektedir. Uygulanan işlem parametreleri; yüksek boşalım akımı (I = 25 A), kısa vuruş süresi (Ton = 50 µs) ve uzun bekleme süresi (Toff = 800 µs) şeklindedir. Bu parametre kombinasyonu sonucunda ölçülen YÇY değeri 0,0005 µm/µm² olup, deneysel çalışma kapsamında elde edilen en düşük çatlak yoğunluğuna işaret etmektedir.

Görüntü detaylı incelendiğinde, yüzeyin nispeten düzgün olduğu, çatlak oluşumunun oldukça sınırlı düzeyde gerçekleştiği ve yüzey hatalarının minimumda olduğu görülmektedir. Bu morfolojik yapının, uygulanan düşük enerji yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir. Kısa vuruş süresi, yüzeye uygulanan termal şokun süresini azaltırken; uzun bekleme süresi, yüzeyin soğuması için yeterli zaman tanımış ve böylece termal gerilmelerin önüne geçilmiştir [79], [80], [81].

Bu işlem koşullarının sonucu olarak, yüzeyde yeniden katılaşmış yapılar ve partikül birikimi düşük seviyede gerçekleşmiş; daha homojen ve stabil bir yüzey oluşmuştur. Bu da işlenen parçanın yüzey bütünlüğünü artırarak mekanik özelliklerinin ve servis ömrünün iyileştirilmesine katkı sağlayabilir [9], [82], [83].

Elde edilen bu sonuçlar, EEİ sürecinde yüzey kalitesini optimize etmek adına işlem parametrelerinin dikkatli bir şekilde ayarlanmasının önemini vurgulamaktadır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda, yüksek üretim hızı ile birlikte kaliteli yüzey özellikleri elde edilmesi açısından bu tür parametre kombinasyonlarının tercih edilmesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 5. 8. CuCoNiBe elektrot ile işlenen yüzeye ait YÇY görüntüsü, ($I = 25$ A), ($Ton = 50$ μ s), ($Toff = 800$ μ s)

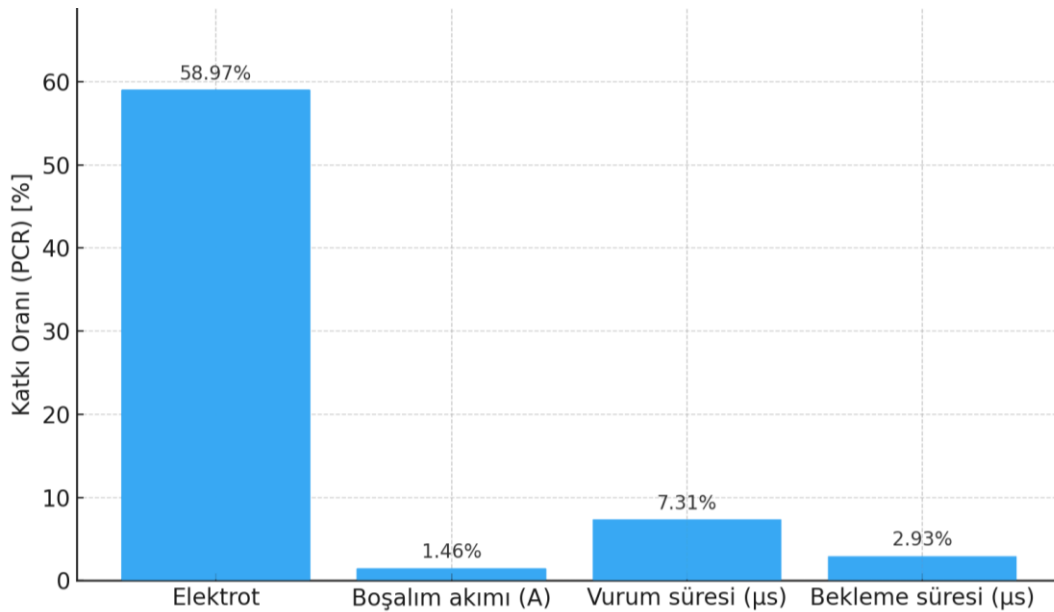
Tablo 5.3'te YÇY'ye etki eden işlem parametrelerinin istatistiksel anlamlılık düzeyleri varyans analizi ile değerlendirilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre, elektrot tipi, P-değeri 0,000 ile %5 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Elektrot tipine bağlı olarak oluşan yüzey çatlak yoğunluğunda belirgin bir farklılık olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, kullanılan elektrot malzemesinin boşalma esnasında yüzeyde oluşturduğu termal etkilerin çatlak oluşumuna doğrudan etki ettiğini göstermektedir.

Buna karşılık, boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresi değişkenlerinin P-değerleri sırasıyla 0,639, 0,134 ve 0,422 olup, %5 anlamlılık düzeyinin üzerindedir. Bu durum, bu üç parametrenin YÇY üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Ancak vurum süresinin P-değerinin 0,134 olması, bu faktörün YÇY üzerinde sınırda bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir.

Tablo 5.3. ANOVA analizi sonuçları

Kaynak (Source)	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Elektrot	2	0,000766	0,000383	18,07	0,000
Boşalım akımı (A)	2	0,000019	0,000010	0,46	0,639
Vurum süresi (μ s)	2	0,000095	0,000048	2,25	0,134
Bekleme süresi (μ s)	2	0,000038	0,000019	0,90	0,422
Hata	18	0,000381	0,000021		
Toplam	26	0,001300			

Şekil 5.9.'da YÇY'e etki eden kontrol faktörlerinin katkı oranlarını göstermektedir. Elektrot türü %58,97 katkı oranı ile en baskın etkindir. Bu durum, kullanılan elektrot malzemesinin elektriksel iletkenlik, termal iletim ve aşınma direnci gibi özelliklerinin işleme sırasında oluşan yüzey çatlakları üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Vurum süresi (Ton) %7,31 katkı oranıyla ikinci sırada yer almakta ve darbe süresinin uzamasıyla malzeme yüzeyinde oluşabilecek termal gerilmelerin çatlak oluşumuna etkisi vurgulanmaktadır. Bekleme süresi (Toff) %2,93 katkı oranı ile yüzey çatlakları üzerinde düşük ancak ihmal edilemeyecek bir etkiye sahiptir. Bu parametre, işleme aralığında ısının yayılmasına olanak tanıyarak yüzey bütünlüğünü etkileyebilir [9], [18]. Boşalım akımı (I) %1,46 gibi oldukça düşük bir katkı oranına sahiptir ve YÇY üzerinde sınırlı etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9. İşleme faktörlerinin YÇY üzerindeki etki oranları

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, EEİ yönteminde farklı elektrot malzemelerinin (CuCoNiBe, CuNi₂SiCr ve CuCr1Zr) ve erozyon parametrelerinin yanıl açıklık ve yüzey çatlak yoğunluğu (YÇY) üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. Taguchi L27 deney tasarımı kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonunda aşağıda belirtilen bulgular elde edilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, yanıl açıklığın en düşük seviyede tutulabilmesi için CuCoNiBe elektrotu, düşük boşalım akımı (6 A), kısa vurum süresi (50 µs) ve orta düzeyde bir bekleme süresi (200 µs) ile birlikte kullanılmalıdır. ANOVA analizine göre yanıl açıklık üzerinde en anlamlı etkiyi boşalım akımı ve vurum süresi oluşturmakta olup, bu parametrelerin dikkatli kontrolü yanıl açıklığın iyileştirme açısından kritik öneme sahiptir. Elektrot tipi ve bekleme süresinin ise yanıl açıklık üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi bulunmamaktadır.

Yüzey çatlak yoğunluğu açısından ise en düşük YÇY değeri CuCoNiBe elektrotu ile 25 A boşalım akımı, 50 µs vurum süresi ve 800 µs bekleme süresi parametreleriyle elde edilmiştir. Bu durum, daha kısa süreli enerji darbesi ve daha uzun soğuma süresinin çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. YÇY üzerinde en etkili parametre elektrot tipi olarak belirlenmiş olup, istatistiksel analizler bu parametrenin %58,97 katkı oranı ile en yüksek etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, hem yanıl açıklığın hem de yüzey çatlak yoğunluğunun optimize edilebilmesi için CuCoNiBe elektrot malzemesi ile düşük ve kontrollü enerji parametrelerinin tercih edilmesi önerilmektedir. Bu tez çalışması, elektro erozyon işlemlerinde uygun parametre kombinasyonlarının belirlenmesi ile yüzey bütünlüğünün korunabileceğini ve daha kaliteli işlenmiş yüzeylerin elde edilebileceğini göstermiştir. Gelecek çalışmalarda, farklı malzeme türleri ve mikro yapı analizleriyle desteklenen çok parametrelili optimizasyonlar gerçekleştirilerek EEİ prosesinin daha da geliştirilmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] S. Jain and V. Parashar, "Critical review on the impact of EDM process on biomedical materials," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 36, no. 15, pp. 1701-1724, Nov. 2021.
- [2] M. N. Alam, A. N. Siddiquee, Z. A. Khan, and N. Z. Khan, "A comprehensive review on wire EDM performance evaluation," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E: J. Process Mech. Eng.*, vol. 236, no. 4, pp. 1724-1746, Aug. 2022.
- [3] R. Sahoo, N. K. Singh, and V. Bajpai, "A novel approach for modeling MRR in EDM process using utilized discharge energy," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 185, p. 109811, Feb. 2023.
- [4] S. S. Kumar et al., "A review on the performance of the materials by surface modification through EDM," *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, vol. 4, no. 1, pp. 127-144, Mar. 2021.
- [5] M. M. Hasan et al., "Experimental modeling techniques in electrical discharge machining (EDM): A review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 127, no. 5-6, pp. 2125-2150, Jul. 2023.
- [6] T. Muthuramalingam and B. Mohan, "A review on influence of electrical process parameters in EDM process," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 87-94, Jan. 2015.
- [7] H. Marashi et al., "State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications," *Precis. Eng.*, vol. 46, pp. 11-33, Oct. 2016.
- [8] M. K. Dikshit et al., "Machining characteristics and optimization of process parameters in die-sinking EDM of Inconel 625," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 7, p. 302, Jul. 2019.
- [9] H. T. Lee and T. Y. Tai, "Relationship between EDM parameters and surface crack formation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 142, no. 3, pp. 676-683, Dec. 2003.
- [10] H. T. Lee et al., "Relationship between electrode size and surface cracking in the EDM machining process," *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 23, pp. 6981-6986, Dec. 2004.
- [11] A. Kumar, V. Kumar, and J. Kumar, "Surface crack density and recast layer thickness analysis in WEDM process through response surface methodology," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 201-230, Apr. 2016.
- [12] A. K. Rouniyar and P. Shandilya, "Study of surface crack density and microhardness of Aluminium 6061 alloy machined by EDM with mixed powder and assisted magnetic field," *J. Micromanufacturing*, vol. 5, no. 2, pp. 156-163, Nov. 2022.
- [13] M. Bhaumik and K. Maity, "Effect of process parameters on the surface crack density of AISI 304 in PMEDM," *World J. Eng.*, vol. 14, no. 6, pp. 475-482, Dec. 2017.
- [14] V. T. Le, "The influence of additive powder on machinability and surface integrity of SKD61 steel by EDM process," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 36, no. 9, pp. 1084-1098, Jul. 2021.
- [15] H. Rahimi, S. Masoudi, and M. Tolouei-Rad, "Experimental investigation of the effect of EDM parameters and dielectric type on the surface integrity and topography," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 118, no. 5-6, pp. 1767-1778, Jan. 2022.
- [16] K. Paswan et al., "An analysis of machining response parameters, crystalline structures, and surface topography during EDM of die-steel using EDM oil and liquid-based viscous dielectrics: A comparative analysis of machining performance," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 48, no. 9, pp. 11941-11957, Sep. 2023.

- [17] H. Beravala and P. M. Pandey, "Experimental investigations to evaluate the surface integrity in the magnetic field and air/gas-assisted EDM," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 4, p. 213, Mar. 2021.
- [18] H.-T. Lee, F.-C. Hsu, and T.-Y. Tai, "Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 364, no. 1-2, pp. 346-356, Jan. 2004.
- [19] S. H. Lee and X. Li, "Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 139, no. 1-3, pp. 315-321, Aug. 2003.
- [20] H. R. R. Ashtiani and F. Hojati, "The influences of spark energy density on the electrical discharge machining (EDM)," *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 3165-3181, Jul. 2022.
- [21] A. K. Rouniyar and P. Shandilya, "Semi-empirical modeling and optimization of process parameters on overcut during MFAPM-EDM of Al6061 alloy," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E: J. Process Mech. Eng.*, vol. 235, no. 6, pp. 1784-1796, Dec. 2021.
- [22] A. Das, S. Padhan, and S. R. Das, "Analysis on hole overcut during micro-EDM of Inconel 718," *Mater. Today: Proc.*, vol. 56, pp. 29-35, Jan. 2022.
- [23] S. Rajamanickam and J. Prasanna, "Multi objective optimization during small hole electrical discharge machining (EDM) of Ti-6Al-4V using TOPSIS," *Mater. Today: Proc.*, vol. 18, pp. 3109-3115, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.184.
- [24] R. Teimouri and H. Baseri, "Study of tool wear and overcut in EDM process with rotary tool and magnetic field," *Adv. Tribol.*, vol. 2012, Art. no. 895918, 2012.
- [25] M. Bhaumik and K. Maity, "Effects of process parameters and cryotreated electrode on the radial overcut of AISI 304 in SiC powder mixed EDM," *Surf. Rev. Lett.*, vol. 24, no. 1850029, Nov. 2017.
- [26] F. L. Zhao, H. Wang, and Z. Z. Lu, "Calculating the overcut in electro-discharge machining," *Key Eng. Mater.*, vol. 291-292, pp. 561-566, 2005.
- [27] I. Puertas, C. J. Luis, and L. Álvarez, "Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of WC-Co," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153-154, pp. 1026-1032, 2004.
- [28] K. H. Ho and S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 13, pp. 1287-1300, Oct. 2003.
- [29] B. Erman and A. Kalyon, "Multi objective optimization of parameters in EDM of Mirrax steel," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 38, no. 7, pp. 848-858, May 2023.
- [30] F. Ceritbinmez, E. S. Gökkaya, and E. Kanca, "MRR, EWR and KERF analysis in cold work tool steel machining in EDM method by copper and brass electrode," *Osman. Korkut Ata Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 6, no. 1, Mar. 2023.
- [31] S. Dewangan, S. Gangopadhyay, and C. K. Biswas, "Study of surface integrity and dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS and sensitivity analysis," *Measurement*, vol. 63, pp. 364-376, Mar. 2015.
- [32] A. Garg and J. S. L. Lam, "Modeling multiple-response environmental and manufacturing characteristics of EDM process," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1588-1601, Nov. 2016.

- [33] J. T. Philip, J. Mathew, and B. Kuriachen, "Transition from EDM to PMEDM - Impact of suspended particulates in the dielectric on Ti6Al4V and other distinct material surfaces: A review," *J. Manuf. Process.*, vol. 64, pp. 1105-1142, Apr. 2021.
- [34] A. K. Khanra, L. C. Pathak, and M. M. Godkhindi, "Application of new tool material for electrical discharge machining (EDM)," *Bull. Mater. Sci.*, vol. 32, no. 4, pp. 401-405, 2009.
- [35] M. K. Dikshit et al., "Surface characteristics optimization of biocompatible Ti6Al4V with RCCD and NSGA II using die sinking EDM," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 223-235, May 2023.
- [36] N. Praveen et al., "Synthesis and wire EDM characteristics of Cu-Al-Mn ternary shape memory alloys using Taguchi method," *J. Inst. Eng. India Ser. D*, vol. 105, no. 2, pp. 1187-1200, Aug. 2024.
- [37] A. Y. Fatatit and A. Kalyon, "Analysis of surface crack density and white layer thickness in EDM using Taguchi-based grey relational analysis," *Sādhanā*, vol. 50, no. 1, Feb. 2025.
- [38] H. Rahimi, S. Masoudi, and M. Tolouei-Rad, "Experimental investigation of the effect of EDM parameters and dielectric type on the surface integrity and topography," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 118, no. 5-6, pp. 1767-1778, Jan. 2022.
- [39] C. J. Luis, I. Puertas, and G. Villa, "Material removal rate and electrode wear study on the EDM of silicon carbide," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 164-165, pp. 889-896, 2005.
- [40] V. T. Le, "The influence of additive powder on machinability and surface integrity of SKD61 steel by EDM process," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 36, no. 9, pp. 1084-1098, Jul. 2021.
- [41] B. Sridhar Reddy, A. B. Koteswara Rao, and G. Ranga Janardhana, "Multi-objective optimization of surface roughness, recast layer thickness and surface crack density in WEDM of Al2124/SiCp using desirability approach," *Mater. Today: Proc.*, vol. 39, pp. 1320-1326, Jan. 2021.
- [42] F. Kazi, C. A. Waghmare, and M. S. Sohani, "Multi-objective optimization of machining parameters in hybrid powder-mixed EDM process by response surface methodology and normalized fuzzy logic algorithm," *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 15, no. 4, pp. 695-706, Dec. 2021.
- [43] E. Nas, "Experimental and statistical investigation of electro-erosion machining performance of cryogenic treated hardened AISI H13 hot work tool steel," *Tribol. Int.*, vol. 193, May 2024.
- [44] N. H. Phan et al., "Multi-object optimization of EDM by Taguchi-DEAR method using AlCrNi coated electrode," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 116, no. 5-6, pp. 1429-1435, Sep. 2021.
- [45] A. T. Işık, R. Çakıroğlu, and M. Günay, "Multiresponse optimization of performance indicators through Taguchi-grey relational analysis in EDM of cemented carbide," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 41, pp. 490-500, Apr. 2023.
- [46] A. Taherkhani et al., "Investigation of surface quality in Cost of Goods Manufactured (COGM) method of μ -Al₂O₃ Powder-Mixed-EDM process on machining of Ti-6Al-4V," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 116, no. 5-6, pp. 1783-1799, Sep. 2021.
- [47] M. J. Haddad and A. F. Tehrani, "Material removal rate (MRR) study in the cylindrical wire electrical discharge turning (CWEDT) process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 199, no. 1-3, pp. 369-378, 2008.

- [48] E. Aligiri, S. H. Yeo, and P. C. Tan, "A new tool wear compensation method based on real-time estimation of material removal volume in micro-EDM," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 15, pp. 2292-2303, 2010.
- [49] N. Singh Khundrakpam, G. Singh Brar, and D. Deepak, "Grey-Taguchi optimization of near dry EDM process parameters on the surface roughness," *Mater. Today*, vol. 5, no. 2, pp. 4445-4451, 2018.
- [50] A. K. Rouniyar and P. Shandilya, "Study of surface crack density and microhardness of Aluminium 6061 alloy machined by EDM with mixed powder and assisted magnetic field," *J. Micromanufacturing*, vol. 5, no. 2, pp. 156-163, Nov. 2022.
- [51] T. A. El-Taweel, "Multi-response optimization of EDM with Al-Cu-Si-TiC P/M composite electrode," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 1-2, pp. 100-113, 2009.
- [52] N. Kumar and A. K. Das, "Machining of micro features through μ -ECDSM process and evaluation of surface integrity," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 36, pp. 45-56, Jan. 2022.
- [53] S. Singh, S. Singh, Rahul, and R. Choudhary, "Surface topography and morphological study optimization of EDMed work surface of inconel 601 obtained using solid cylindrical cross-sectioned copper tool electrode," *Surf. Rev. Lett.*, vol. 30, no. 10, Oct. 2023.
- [54] K. Surani et al., "Performance comparison of powder mixed EDM and traditional EDM on TZM-molybdenum super alloy using response surface methodology," *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 17, no. 5, pp. 2647-2658, Oct. 2023.
- [55] L. Selvarajan et al., "Experimental investigation on surface morphology and recasting layer of Si_3N_4 -TiN composites machined by die-sinking and rotary EDM," *Ceram. Int.*, vol. 49, no. 5, pp. 8487-8501, Mar. 2023.
- [56] V. T. Tran et al., "Optimization design for die-sinking EDM process parameters employing effective intelligent method," *Cogent Eng.*, vol. 10, no. 2, Dec. 2023.
- [57] N. Pragadish et al., "Optimization of cardanol oil dielectric-activated EDM process parameters in machining of silicon steel," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, no. 15, pp. 14087-14096, Oct. 2023.
- [58] N. Ahmed et al., "EDM of Ti-6Al-4V: Electrode and polarity selection for minimum tool wear rate and overcut," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 34, no. 7, pp. 769-778, May 2019.
- [59] A. Moghanizadeh, "Reducing side overcut in EDM process by changing electrical field between tool and work piece," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 90, no. 1-4, pp. 1035-1042, Apr. 2017.
- [60] H. N. Chiang and J. J. J. Wang, "An analysis of overcut variation and coupling effects of dimensional variable in EDM process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 9-12, pp. 935-943, Aug. 2011.
- [61] M. Shabgard, M. Seyedzavvar, and S. Oliaei, "Influence of input parameters on the characteristics of the EDM process," *Stroj. Vestn.-J. Mech. Eng.*, vol. 57, no. 9, 2011.
- [62] S. K. Garg, A. Manna, and A. Jain, "An experimental investigation for optimization of WEDM parameters during machining of fabricated Al/ZrO₂(p)-MMC," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 38, no. 12, pp. 3471-3483, Dec. 2013.

- [63] K. Surani et al., "Mathematical modeling for radial overcut on powder mixed micro-electrical discharge machining (μ -EDM) of TZM-molybdenum superalloy by response surface methodology," *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, Jul. 2023.
- [64] R. Mahajan, H. Krishna, A. K. Singh, and R. K. Ghadai, "A review on copper and its alloys used as electrode in EDM," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 377, no. 1, 2018.
- [65] D. Marelli, S. K. Singh, S. Nagari, and R. Subbiah, "Optimisation of machining parameters of wire-cut EDM on super alloy materials - A review," *Mater. Today: Proc.*, vol. 26, pp. 1021-1027, Jan. 2020.
- [66] N. M. Abbas, D. G. Solomon, and M. F. Bahari, "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 7-8, pp. 1214-1228, Jun. 2007.
- [67] A. Kalyon, "Alüminyum 6082 Alaşımının Pirinç Elektrot İle İşlenebilirliğinin Optimizasyonu," *El-Cezeri J. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 1, Jan. 2019.
- [68] A. A. Khan, "Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 39, no. 5-6, pp. 482-487, 2008.
- [69] M. Dastagiri and A. H. Kumar, "Experimental investigation of EDM parameters on stainless steel & En41b," *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 1551-1564, Jan. 2014.
- [70] K. Jarosz, P. Nieslony, and P. Löschner, "Investigation of the effect of process parameters on surface roughness in EDM machining of ORVAR® Supreme die steel," in *Advances in Manufacturing Engineering and Materials*, S. Hloch et al., Eds. Cham: Springer, 2019.
- [71] E. Nas, "Experimental and statistical investigation of electro-erosion machining performance of cryogenic treated hardened AISI H13 hot work tool steel," *Tribol. Int.*, vol. 193, May 2024.
- [72] S. Dewangan et al., "Optimization of input parameters used for machining heat-treated 0.2%-C steel under the EDM method," *J. Inst. Eng. India Ser. D*, Mar. 2024.
- [73] R. S., M. P. Jenarathanan, and B. K. A. S., "Experimental investigation of powder-mixed electric discharge machining of AISI P20 steel using different powders and tool materials," *Multidiscip. Model. Mater. Struct.*, vol. 14, no. 3, pp. 549-566, Jan. 2018.
- [74] H. N. Chiang and J. J. J. Wang, "An analysis of overcut variation and coupling effects of dimensional variable in EDM process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 9-12, pp. 935-943, Aug. 2011.
- [75] P. Kumar, S. Dewangan, and C. Pandey, "Analysis of surface integrity and dimensional accuracy in EDM of P91 steels," *Mater. Today: Proc.*, vol. 33, pp. 5378-5383, Jan. 2020.
- [76] B. Ekmekci, O. Elkoca, and A. Erden, "A comparative study on the surface integrity of plastic mold steel due to electric discharge machining," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 36, no. 1, pp. 117-124, Feb. 2005.
- [77] M. Antar et al., "Surface integrity evaluation of modified EDM surface structure," *Procedia CIRP*, vol. 68, pp. 308-312, Jan. 2018.
- [78] M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, and B. Skoric, "Influence of discharge energy on

machining characteristics in EDM," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 173-179, Jan. 2012.

- [79] H. Ramasawmy and L. Blunt, "Effect of EDM process parameters on 3D surface topography," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 148, no. 2, pp. 155-164, May 2004.
- [80] J. Y. Kao et al., "Optimization of the EDM parameters on machining Ti-6Al-4V with multiple quality characteristics," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 47, no. 1-4, pp. 395-402, Mar. 2010.
- [81] S. Hinduja and M. Kunieda, "Modelling of ECM and EDM processes," *CIRP Ann.*, vol. 62, no. 2, pp. 775-797, 2013.
- [82] T. R. Newton et al., "Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 513-514, pp. 208-215, Jul. 2009.
- [83] H. Sidhom et al., "Effect of electro discharge machining (EDM) on the AISI316L SS white layer microstructure and corrosion resistance," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 1-4, pp. 141-153, Mar. 2013.

ÖZGEÇMİŞ

Sefa YAMAN ilk ve orta öğrenimini Samsun Vezirköprü de tamamladı. 2018 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği lisans bölümünden mezun oldu. 2022 yılından beri Yalova üniversitesi Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programında eğitimine devam etmektedir. Evlidir. Özel sektörde üretim mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

S. Yaman and A. Kalyon, “Optimization of Overcut in EDM of Mirrax Steel Using Copper Alloyed Electrodes”, MATECA, vol. 5, no. 3, pp. 237–247, 2024, doi: 10.52795/mateca.1558327.



