



**NİKEL KROM ALAŞIMIN ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİYLE
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE İŞLEME
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

Emin Salih SAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Emin Salih SAN

21/04/2025

NİKEL KROM ALAŞIMIN ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİYLE
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN
OPTİMİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Emin Salih SAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

Bu çalışmada nikel-krom esaslı alaşımın elektro erozyon yöntemiyle işlenmesinde işleme parametrelerinin iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü ve mikro çatlak oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada değişken parametreler olarak akım, vurum süresi, vurum aralığı ve grafit tozu konsantrasyonu seçilmiştir. Toz karışımlı elektro erozyonla işleme deneylerinde kullanılmak üzere bir deney seti tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yanıt yüzeyi metodolojisi kullanılarak modeller oluşturulmuş ve regresyon denklemleri elde edilmiştir. En yüksek işleme hızı, en düşük takım aşınması ve en düşük yüzey pürüzlülüğü performans hedefleriyle parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiş; ideal işleme parametreleri belirlenmiştir. Oluşturulan model kullanılarak bu parametrelerle yapılacak işlemin sonucu tahmin edilmiş, modelin öngördüğü sonuçlar ve doğrulama deneyinin sonuçları kıyaslanarak modelin güvenilirliği test edilmiştir. Son olarak numunelerin işlenen yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu ile görüntülemiş, numunelerin çatlak oranları tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile işleme, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü, optimizasyon, grafit toz karışımı EEİ
Sayfa Adedi : 76
Danışman : Doç. Dr. Hacı Bekir ÖZERKAN

INVESTIGATION OF MACHINABILITY OF NICKEL CHROMIUM ALLOY BY
ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING AND OPTIMIZATION OF MACHINING
PARAMETERS

(M. Sc. Thesis)

Emin Salih SAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

In this study, the effects of machining parameters on material removal rate, electrode wear rate, surface roughness and micro crack formation in electrical discharge machining of nickel-chromium based alloy were investigated. Current, pulse duration, pulse interval and graphite powder concentration were selected as variable parameters in the study. An experimental set was designed and manufactured to be used in powder electrical discharge machining experiments. Models were created using response surface methodology and regression equations were obtained. Parameter optimization was performed with the performance targets of highest machining speed, lowest tool wear and lowest surface roughness; ideal machining parameters were determined. The result of the machining to be done with these parameters was predicted using the created model, the reliability of the model was tested by comparing the predicted results of the model and the results of the verification experiment. Finally, the machined surfaces of the samples were imaged with a scanning electron microscope and the crack rates of the samples were determined.

Science Code : 91438

Key Words : Electrical discharge machining, material removal rate, electrode wear rate, surface roughness, optimization, graphite powder mixed EDM

Page Number : 76

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hacı Bekir ÖZERKAN

TEŞEKKÜR

Tez sürecimi başından sonuna kadar yöneten ve bana tez ile ilgili çalışmalarında yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Hacı Bekir ÖZERKAN'a, tez çalışması sırasında bana yardımcı olan değerli hocalarım Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK, Doç. Dr. Mehmet SUBAŞI, Öğr. Gör. Dr. Emre AYHAN ve Doç. Dr. Ahmet MAVİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışması, Gazi Üniversitesi ile Ankara Ticaret Odası (ATO) iş birliği ve diş hekimliği alanında faaliyet gösteren Osman Kuşçu Ağız ve Diş Sağlığı Polikliniği'nin katkılarıyla ortaklaşa yürütülmüştür. Bu vesile ile çalışmada kullanılan numuneleri sağlayan diş protez teknikeri İbrahim TUFAN'a da teşekkürlerimi sunarım. Çalışmada, akademik bilgi birikimi ile sektörel uygulama tecrübesi bir araya getirilerek hem bilimsel hem de pratik fayda sağlayacak sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir. Son olarak tez çalışması boyunca yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEME (EEİ).....	11
2.1. EEİ Tarihçesi.....	11
2.2. EEİ İşleme Mekanizması	12
2.3. EEİ Yönteminin Çeşitleri.....	13
2.4. EEİ'nin Avantaj ve Dezavantajları.....	14
2.5. EEİ Parametreleri	15
2.5.1. EEİ performans ölçütleri	16
2.5.2. Dielektrik sıvı.....	19
2.5.3. Elektrot (takım)	20
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Tezgah Altyapısı	23
3.1.1. İş parçası.....	23
3.1.2. Elektrot	24
3.1.3. EEİ tezgahı	25

	Sayfa
3.1.4. Toz karışımı EEİ deney seti	26
3.2. Deney Tasarımı.....	27
3.2.1. Deney parametreleri.....	27
3.2.2. Numunelerin işlenmesi	28
3.2.3. İİH ve EAH hesaplanması	30
3.2.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü	31
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	33
4.1. YYM Analizi ve Parametre Optimizasyonu	36
4.1.1. İİH için YYM analizi.....	37
4.1.2. EAH için YYM analizi	40
4.1.3. R _a için YYM analizi.....	43
4.1.4. Deney sonuçlarının optimizasyonu.....	46
4.2. Yüzey Görüntüleme ve Kimyasal Analiz Sonuçları	49
4.2.1. SEM görüntülerinin değerlendirilmesi	49
4.2.2. EDS analizi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR	67
EKLER.....	71
EK-1. EEİ tezgahının teknik özellikleri.....	72
EK-2. Toz karışımı EEİ deney setinde kullanılan polipropilen dielektrik tankının teknik resmi	73
EK-3. Çatlak oranı tespit algoritması	74
ÖZGEÇMİŞ	76

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. EEİ işleme parametreleri ve performans ölçütleri	15
Çizelge 2.2. Farklı malzemeden imal edilmiş elektrotların özellikleri	21
Çizelge 2.3. Farklı iş parçası ve elektrot malzemeleri için kullanılan elektrot yükleri ..	21
Çizelge 3.1. Alaşımın kimyasal bileşimi (kütlece yüzde).....	24
Çizelge 3.2. İş parçası mekanik özellikleri	24
Çizelge 3.3. Elektrot özellikleri	25
Çizelge 3.4. Deney parametreleri.....	27
Çizelge 3.5. Deney tasarım	28
Çizelge 4.1. Deney sonuçları	33
Çizelge 4.2. İİH için oluşturulan modelin performans çıktıları	37
Çizelge 4.3. İİH için oluşturulan modelin varyans analizi sonuçları.....	38
Çizelge 4.4. İİH için oluşturulan düzeltilmiş modelin performans çıktıları	38
Çizelge 4.5. İİH için oluşturulan düzeltilmiş modelin varyans analizi sonuçları	39
Çizelge 4.6. EAH için oluşturulan modelin performans çıktıları	41
Çizelge 4.7. EAH için oluşturulan modelin varyans analizi sonuçları	41
Çizelge 4.8. EAH için oluşturulan düzeltilmiş modelin performans çıktıları.....	41
Çizelge 4.9. EAH için oluşturulan düzeltilmiş modelin varyans analizi sonuçları	42
Çizelge 4.10. R _a için oluşturulan modelin performans çıktıları.....	43
Çizelge 4.11. R _a için oluşturulan modelin varyans analizi sonuçları.....	44
Çizelge 4.12. R _a için oluşturulan düzeltilmiş modelin performans çıktıları	44
Çizelge 4.13. R _a için oluşturulan düzeltilmiş modelin varyans analizi sonuçları.....	45
Çizelge 4.14. Optimizasyon parametreleri.....	47
Çizelge 4.15. Model tarafından öngörülen doğrulama deneyi sonuçları	48

Sayfa

Çizelge 4.16 Model tarafından öngörülen sonuçlarla gerçek sonuçların kıyaslanması..	48
Çizelge 4.17. Numunelerin çatlak oranları	56
Çizelge 4.18. Tüm numunelerin EDS analizi sonuçları.....	64



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Basit bir EEİ tezgahı.....	11
Şekil 2.2. Kıvılcım oluşumu	13
Şekil 2.3. EEİ ile işleme sırasında oluşan akım ve gerilim dalgaları.....	16
Şekil 2.4. İİH'nin vurum süresi ve boşalım akımına göre değişimi	17
Şekil 2.5. EAH'nin vurum süresi ve boşalım akımına göre değişimi.....	18
Şekil 2.6. Yüzey pürüzlülüğünün vurum süresi ve boşalım akımına göre değişimi.....	18
Şekil 2.7. Çeşitli dielektrik püskürtme yöntemleri	20
Şekil 4.1. İİH ana etki grafiği	34
Şekil 4.2. EAH ana etki grafiği.....	35
Şekil 4.3. R_a ana etki grafiği	36
Şekil 4.4. İİH için normal olasılık grafiği.....	40
Şekil 4.5. EAH için normal olasılık grafiği	43
Şekil 4.6. R_a için normal olasılık grafiği	46
Şekil 4.7. Optimizasyon sonuçları	47
Şekil 4.8. Çatlak oranı ana etki grafiği	57

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Çalışmada kullanılan numuneler	23
Resim 3.2. Çalışmada kullanılan elektrotlar	24
Resim 3.3. Çalışmada kullanılan EEİ tezgahı	25
Resim 3.4. Toz karışımlı EEİ deney seti.....	26
Resim 3.5. Toz karışımlı EEİ deney setinin tezgah üzerine yerleştirilmesi	27
Resim 3.6. Tezgah kontrol paneli	29
Resim 3.7. Toz karışımlı işleme	30
Resim 3.8. İşleme sonrası dielektrik tankının boşaltılması.....	30
Resim 3.9. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü (solda), yakın çekim (sağda)	31
Resim 4.1. SEM/EDS analizlerinin gerçekleştirildiği cihaz	49
Resim 4.2. 1 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	50
Resim 4.3. 2 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	50
Resim 4.4. 3 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	51
Resim 4.5. 4 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	51
Resim 4.6. 5 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	51
Resim 4.7. 6 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	52
Resim 4.8. 7 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	52
Resim 4.9. 8 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	52
Resim 4.10. 9 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	53
Resim 4.11. 10 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	53
Resim 4.12. 11 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	53
Resim 4.13. 12 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	54
Resim 4.14. 13 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri	54

Sayfa

Resim 4.15. 14 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri.....	54
Resim 4.16. 15 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri.....	55
Resim 4.17. 16 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri.....	55
Resim 4.18. 17 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri.....	55
Resim 4.19. 18 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri.....	56
Resim 4.20. 1 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	58
Resim 4.21. 2 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	58
Resim 4.22. 3 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	58
Resim 4.23. 4 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	59
Resim 4.24. 5 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	59
Resim 4.25. 6 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	59
Resim 4.26. 7 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	60
Resim 4.27. 8 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	60
Resim 4.28. 9 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	60
Resim 4.29. 10 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	61
Resim 4.30. 11 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	61
Resim 4.31. 12 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	61
Resim 4.32. 13 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	62
Resim 4.33. 14 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	62
Resim 4.34. 15 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	62
Resim 4.35. 16 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	63
Resim 4.36. 17 no.lu numunenin EDS analizi sonucu.....	63
Resim 4.37. 18 no.lu numunenin EDS analiz sonucu.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
°C	Derece celcius
C	Karbon
cm	Santimetre
cm³	Santimetreküp
Cr	Krom
dk	Dakika
Fe	Demir
GPa	Gigapascal
g	Gram
J	Joule
°K	Derece kelvin
L	Litre
MPa	Megapascal
m	Metre
m²	Metrekare
mm	Milimetre
mm³	Milimetreküp
Mo	Molibden
Ni	Nikel
µs	Mikrosaniye
Ω	Ohm
Pa	Pascal
Si	Silisyum
V	Volt
W	Watt

Kısaltmalar**Açıklamalar****ANOVA**

Varyans analizi

DC

Doğru akım

EAH

Elektrot aşınma hızı

EDS

X-ışını spektrometresi

EEİ

Elektro erozyonla işleme

I

Boşalım akımı

İİH

İş parçası aşınma hızı

R_a

Ortalama yüzey pürüzlülüğü

RC

Rezistans-kapasitans

SEM

Taramalı elektron mikroskopu

T_{on}

Vurum süresi

T_{off}

Vurum aralığı

YYM

Yanıt yüzeyi metodolojisi

1. GİRİŞ

Elektro erozyon ile işleme (EEİ) en yaygın alışılmamış imalat yöntemlerinden biridir. EEİ yöntemi kalıpcılık, otomotiv, havacılık ve uzay gibi pek çok sanayi kolunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem yüzey sertliği yüksek malzemelerin işlenmesi için de uygundur. İşleme sırasında elektrot ve iş parçası arasında temas olmaması, dolayısıyla mekanik kuvvet aktarımı olmaması yöntemin önemli avantajlarından. Yöntemin bir diğer avantajı da eğimli yüzeyler gibi karmaşık geometriler elde etmek için uygun olmasıdır [1]. Ayrıca çeşitli çalışmalar EEİ ile işlenen yüzeylerin biyouyumluluğunda iyileşme olduğunu göstermiştir [2].

Önceki çalışmalarda iş parçasına uygulanan çeşitli kaplamalar ve dielektrik sıvıya eklenen yardımcı malzemeler yardımıyla işleme hızının ve yüzey kalitesinin iyileştirilebildiği görülmüştür. Ayrıca çeşitli istatistiksel yöntemlerden yararlanılarak ideal işleme parametreleri tespit edilmiş ve işleme sonuçları iyileştirilmiştir. Bu çalışmanın mevcutlardan farklılığı EEİ ile işlenebilirliği test edilmemiş nikel krom molibden alaşımın iş parçası olarak kullanılmasıdır.

Toz karışimsız ve toz karışimli EEİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalardaki bulgulardan yola çıkılarak bakır elektrot ve toz karışimli işlemlerde grafit tozu kullanılmasına karar verilmiştir. Toz karışimli deneyler için dielektrik tankı, sirkülasyon pompası ve püskürtme hortumundan oluşan ayrı bir deney seti tasarlanmış, imal edilmiş ve kullanılmıştır.

Deneylerde değişken parametreler grafit tozu konsantrasyonu, akım şiddeti (I), vuruş süresi (T_{on}) ve vuruş aralığı (T_{off}) olarak belirlenmiştir. Açık devre gerilimi ve boşalım gerilimi sabit tutulmuştur. Gerçekleştirilen işlemlerde iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve yüzey pürüzlülüğü (R_a) ölçülüp işlenen numunelerin yüzey topografyası ve kimyasal bileşimi incelenmiştir. Elde edilen bulgular tablo ve grafik haline getirilmiş ve yorumlanmıştır. Parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkilerini ve hangi parametrenin hangi sonuç üzerinde daha etkili olduğunu tespit etmek amacıyla varyans analizi (ANOVA) yöntemi kullanılmıştır. Son olarak çok değişkenli optimizasyon için yanıt yüzeyi metodolojisi (YYM) yöntemi kullanılarak işleme parametre girdileri

üzerinden işleme performans çıktılarını tahmin eden bir matematiksel model elde edilmiş, ideal işleme parametreleri belirlenmiş ve doğrulama deneyiyle elde edilen modelin doğruluğu test edilmiştir.

Bu bölümde toz karışumlu EEİ ve işleme parametreleri optimizasyonu ile ilgili önceki çalışmalar incelenmiş, çalışmalarda elde edilen bulgulardan ve tez çalışmasına sundukları katkılardan bahsedilmiştir.

Jeswani (1981) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada grafit toz karışumlu dielektriğin EEİ ile işlemeye etkisi incelenmiştir. Çalışmada çelik iş parçası ve bakır elektrot kullanılmış, toz karışumlu ve toz karışumsuz gazyağı dielektrik kullanılarak farklı parametrelerle işlemler gerçekleştirilmiş, her işleme için İİH ve EAH hesaplanmıştır. Dielektriğe 4 g/L oranında 10 µm ortalama çapa sahip grafit toz eklenmesinin İİH'yi %60, EAH'yi %15 arttırdığı, EAH / İİH'yi %28 azalttığı tespit edilmiştir [3].

Kansal ve arkadaşları (2005) tarafından yapılmış çalışmada EN-31 takım çeliğinin EEİ ile işleme parametrelerinin YYM ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bağımsız parametreler T_{on} , görev döngüsü, I, silisyum toz konsantrasyonu olarak; yanıt parametreleri ise İİH ve R_a olarak belirlenmiştir. Dielektrikteki silikon toz konsantrasyonu arttıkça İİH ve R_a 'da iyileşme görüldüğü ancak İİH'deki iyileşmenin daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ANOVA analizi gerçekleştirilerek sonuçlar üzerinde en etkili parametrelerin I ve toz konsantrasyonu olduğu sonucuna varılmıştır [4].

Kung ve arkadaşları (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kobalt bağlayıcılı tungsten karbür alaşımın toz karışumlu EEİ ile işlenmesinde İİH ve EAH incelenmiştir. Çalışmada değişken parametreler olarak farklı tanecik boyutlarında ve farklı konsantrasyonlarda alüminyum toz katkısı, I ve T_{on} değerleri seçilmiştir. Çalışma sonuçları YYM ile yorumlanmıştır. İİH ve EAH değerlerinin toz tanecik boyutu, I ve T_{on} arttıkça arttığı; toz konsantrasyonu arttıkça İİH'nin önce artıp sonra azaldığı, EAH'nin önce azalıp sonra arttığı görülmüştür [5].

Ntasi ve arkadaşları (2010) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada Kobalt-Krom dental alaşımların EEİ ile işlenmesinin korozyon dayanımına etkisi incelenmiştir. Çalışma

sonucunda EEİ ile işlenen yüzeylerin korozyon dayanımının alışılmış imalat yöntemleriyle elde edilen yüzeylere göre daha düşük olduğu bulunmuştur [6].

Kumar ve Davim (2011) tarafından yapılan çalışmada alüminyum-silisyum metal matrisli EEİ ile işlenmesinde silisyum tozunun etkisi incelenmiştir. Değişken parametreler toz konsantrasyonu, I , T_{on} ve açık devre gerilimi olarak seçilmiştir. Toz katkının İİH'de üç kata kadar artışa neden olduğu, R_a 'yı üçte bir oranına kadar azalttığı, toz konsantrasyonunun ve I 'nin sonuçlar üzerinde en etkili parametreler olduğu tespit edilmiştir [7].

Bhattacharya ve arkadaşları (2012) tarafından gerçekleştirilmiş kalıp çeliklerinin toz karışımı EEİ ile işlenmesinde optimum işleme parametrelerinin tespiti konulu çalışmada mineral yağı ve gazyağı dielektrik, bakır ve bakır-tungsten elektrot, grafit ve alüminyum toz katkı kullanılmış; farklı I , T_{on} ve T_{off} değerleriyle deneyler gerçekleştirilmiştir. En yüksek İİH bakır elektrot ve alüminyum toz katkıyla elde edilmiştir. Grafit tozunun İİH'yi ve R_a 'yı azalttığı görülmüştür. Çalışmada elektrot malzemesinin toz katkıdan bağımsız olarak çıktılar üzerinde kayda değer etkisinin olmadığı; İİH üzerinde T_{on} , I ve T_{off} daha etkiliyken R_a üzerinde T_{on} , I ve toz katkının en etkili parametreler olduğu belirtilmiştir [8].

Singh ve Yeh (2012) tarafından gerçekleştirilen alüminyum matrisli kompozitlerin toz karışımı EEİ ile işlenmesinde optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi konulu çalışmada gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. T_{on} , I , T_{off} , görev döngüsü, boşalım gerilimi, elektrot geri çekme süresi, toz konsantrasyonu ve toz boyutu değişken parametreler olarak alınmıştır. Performans kriterleri olarak en yüksek İİH, en düşük EAH ve en düşük R_a hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda en etkili parametrelerin sırasıyla T_{on} , elektrot geri çekme süresi, görev döngüsü ve toz boyutu olduğu, diğer parametrelerinin etkilerinin ihmal edilebileceği sonucuna varılmıştır. Toz katkının yük boşalımını kolaylaştırarak İİH'yi arttırdığı ancak toz boyutu fazla büyük olduğunda yük boşalımının zorlaştığı, İİH'nin azaldığı ve R_a 'nın arttığı belirtilmiştir. Çalışma sonunda İİH, EAH ve R_a değerlerinde iyileşme görülmüştür [9].

Assarzdeh ve Ghoreishi (2013) tarafından yapılmış çalışmada CK45 karbon çeliğinin alümina toz karışımı EEİ ile işlenmesi ANOVA ve YYM kullanılarak modellenmiş ve parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada değişken parametreler I , T_{on} ve

açık devre gerilimi olarak alınmış; en düşük R_a ve en yüksek $\dot{I}H$ hedeflenmiştir. Deneyler sonucunda $\dot{I}H$ üzerinde en etkili parametrelerin I ve T_{on} , R_a üzerinde en etkili parametreninse I olduğu, $\dot{I}H$ 'nin I ve T_{on} arttıkça arttığı ancak bu iki parametre sabitken gerilim arttırıldığında azaldığı, düşük I ve T_{on} ile daha düşük R_a elde edildiği belirtilmiş; çalışmada elde edilen modelin doğruluk oranının yüksek olduğu gösterilmiştir [10].

Bhattacharya ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışmada çeşitli çelikler üzerinde grafit, bakır-tungsten, pirinç elektrotlarla ve silisyum, grafit, tungsten toz karışımı dielektriklerle EEİ deneyleri gerçekleştirilmiş; elektrot malzemesinin ve toz karışımı dielektriğin işlemeye etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda toz katkının R_a 'yı düşürdüğü, yüzeyde malzeme taşınımı ve karbür oluşumu nedeniyle yüzey mikrosertliğini arttırdığı tespit edilmiştir. R_a ve yüzey mikrosertliği üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla toz konsantrasyonu, I , T_{on} ve elektrot malzemesi olduğu bulunmuştur. En iyi R_a değeri pirinç elektrot ve tungsten toz karışımı dielektrik ile elde edilmiştir [11].

Jabbaripour ve arkadaşları (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada titanyum alüminit malzemenin toz karışımı EEİ ile işlenmesinde $\dot{I}H$, R_a ve korozyon dayanımı incelenmiştir. Deneylerde farklı konsantrasyonlarda alüminyum, grafit, silisyum karbür, krom ve demir toz karışımı dielektrik kullanılmıştır. En iyi R_a alüminyum toz karışımı dielektrik ile elde edilmiş; ideal toz konsantrasyonunun alüminyum, grafit ve silisyum karbür tozları için krom ve demir tozlarına göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu durum tozların özkütle farkıyla açıklanmıştır. En yüksek $\dot{I}H$ yine alüminyum toz katkı ile elde edilmiştir. Toz karışımı EEİ ile işlenen yüzeylerde toz kalıntısı tespit edilmiştir. Grafit toz karışımı dielektrikle işlenen numunelerin en yüksek korozyon direncine, alüminyum toz karışımı dielektrikle işlenen numunelerinse en düşük korozyon direncine sahip olduğu belirtilmiştir [12].

Kolli ve Kumar (2015) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada grafit toz karışımı dielektriğin ve iletken yüzey aktif maddenin Ti-6Al-4V alaşımının EEİ işleme performansına etkisi incelenmiştir. $\dot{I}H$ 'nin I ve grafit toz konsantrasyonu arttıkça arttığı, yüzey aktif madde konsantrasyonu belli bir değere ulaşana kadar artıp bu değerden sonra azaldığı görülmüştür. En düşük R_a ; düşük I , toz katkı ve yüzey aktif madde konsantrasyonuyla elde edilmiştir. EAH'nin I 'yla doğru, yüzey aktif madde ve grafit toz katkı konsantrasyonuyla ters orantılı olduğu bulunmuştur. Ergiyip katılmış katman kalınlığının I ve toz

konsantrasyonu arttıkça arttığı, yüzey aktif madde konsantrasyonun bir değerine kadar artıp sonrasında azaldığı belirtilmiştir. Sonuçlar ANOVA analiziyle yorumlanmış; İİH ve EAH'nin I ve yüzey aktif madde yoğunluğundan, R_a ve ergiyip katılmış katman kalınlığının I ve toz konsantrasyonundan daha çok etkilendiği kanısına varılmıştır [13].

Singh ve arkadaşları (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada grafit toz karışımı ve toz katkısız dielektrikle Superco 605 alaşım üzerinde EEİ ile işleme gerçekleştirilmiş; I, T_{on} ve elektrot yükünün R_a ve yüzey sertliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Toz katkı kullanımının işleme sonrasındaki yüzey sertleşmesini ve R_a 'yı azalttığı, iş parçasının yüzeyindeki karbon oranını arttırdığı belirtilmiştir. I arttıkça R_a 'nın da arttığı görülmüştür [14].

Talla ve arkadaşları (2015) tarafından yapılmış çalışmada alüminyum alümina metal matrisli kompozit malzemenin toz karışımı EEİ ile işlenmesi incelenmiştir. Çalışma sonucunda alüminyum toz karışımı dielektriğin İİH'ye ve R_a 'ya olumlu etkisi olduğu saptanmıştır [15].

Ünses ve Çoğun (2015) tarafından yapılan çalışmada Ti-6Al-4V alaşımın EEİ performansına grafit toz karışımı dielektriğin etkisi incelenmiştir. Çalışmada grafit toz seçilme nedenleri olarak alternatif tozlara göre daha ucuz olması ve düşük yoğunluğu nedeniyle dielektrik içinde askıda kalmasının daha kolay olması verilmiştir. Toz karışımsız dielektrik ve toz karışımı dielektrikle gerçekleştirilen işlemlerin İİH, EAH değerleri ve yüzey topolojileri kıyaslanmıştır. Grafit toz karışımı dielektriğin İİH'yi arttırdığı ve R_a 'yı azalttığı ancak EAH'yi de arttırdığı gözlenmiştir. İİH'deki artışa oranla EAH'deki artışın daha düşük olduğu belirtilmiştir [16].

Long ve arkadaşları (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada çeşitli kalıp çelikleri farklı konsantrasyonlarda titanyum toz karışımı dielektrik kullanılarak EEİ ile işlenmiş ve en yüksek İİH'nin elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada titanyum toz konsantrasyonu arttıkça İİH'nin arttığı, grafit elektrot kullanıldığında bakır elektrota kıyasla kayda değer şekilde daha yüksek İİH elde edildiği görülmüştür. Ayrıca toz katkının işleme boşluğunu arttırdığı tespit edilmiştir [17].

Prakash ve arkadaşları (2016) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada EEİ yöntemi kullanılarak β tipi titanyum alaşım üzerinde biyouyumlu katman elde edilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada değişken parametreler I, T_{on} , görev döngüsü ve silisyum toz konsantrasyonu olarak belirlenmiş; çalışmada titanyum elektrot kullanılmıştır. NSGA-II yöntemi kullanılarak en yüksek yüzey mikrosertliği ve en düşük R_a 'yı sağlayan parametreler tespit edilmiştir. I ve toz konsantrasyonunun her iki çıktı için de en önemli parametreler olduğu sonucuna varılmış; işlenen yüzeyde oluşan oksit ve karbür içerikli gözenekli yapının biyouyumuluğu arttırdığı görülmüştür [2].

Singh ve Sharma (2016) tarafından yapılan çalışmada tungsten karbür – kobalt alaşımın bakır elektrot ve grafit toz karışımı dielektrik kullanılarak EEİ ile işlenmesi incelenmiştir. Bu amaçla farklı I, T_{on} , dielektrik püskürtme basıncı ve dielektrik sıvı seviyesi değerleriyle gazyağı, ticari EEİ yağı ve saf su dielektrik kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş; EAH ve dielektrik sıvı tüketiminin minimum olması amaçlanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre düşük T_{on} , düşük I ve yüksek püskürtme basıncı en düşük EAH değerini ve en düşük dielektrik sıvı eksilmesini sağlamıştır. EAH'nin bir dielektrik seviyesine kadar azalıp bu seviye geçildikten sonra sabit kaldığı belirtilmiştir [18].

Tripathy ve Tripathy (2016, 2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda H-11 kalıp çeliği üzerinde EEİ ile işleme ve gri ilişkisel analiz yöntemiyle parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada krom toz konsantrasyonu, I, T_{on} , görev döngüsü ve boşalım gerilimi değişken parametreler olarak alınıp en yüksek İİH, en düşük EAH ve R_a değerleri hedeflenmiştir. Toz karışımı dielektrik kullanımının R_a 'yı iyileştirdiği, yüzeyde çatlak oluşumunu azalttığı ve işleme boşluğunu arttırdığı tespit edilmiştir [19]. Boşalım geriliminin işlemeye etkisinin ihmal edilebileceği ancak diğer dört parametrenin çıktılar üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Optimizasyon sonrasında başlangıç parametreleriyle elde edilen sonuçlara göre iyileşme sağlanmıştır [20].

Mohal ve Kumar (2017) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada silisyum karbür karışımı alüminyum metal matrisli kompozit malzemenin toz karışımı EEİ ile işlenmesi incelenmiştir. Çalışmada I, T_{on} , görev döngüsü ve karbon nanotüp katkı konsantrasyonu değişken parametreler olarak alınmıştır. Maksimum İİH ve en düşük R_a için YYM ile optimizasyon yapılmıştır. Çalışmada karbon nanotüp katkının İİH'yi arttırıp ve R_a 'yı

azalttığı, her iki değer üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla I, toz konsantrasyonu, T_{on} ve görev döngüsü olduğu tespit edilmiştir [21].

Banh ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan çalışmada kalıp çelikleri üzerinde titanyum toz karışımı EEİ ile işleme gerçekleştirilmiş ve gri ilişkisel analiz yöntemiyle parametre optimizasyonu sağlanmıştır. Çalışmada değişken parametreler elektrot yükü, bakır ve grafit elektrot malzemesi, T_{on} , I, T_{off} ve toz konsantrasyonu olarak belirlenmiş; en yüksek İİH ve yüzey mikrosertliği, en düşük R_a ve EAH hedeflenmiştir. Deney sonucunda titanyum toz katkı kullanımının İİH'yi arttırdığı ve R_a 'yı azalttığı görülmüştür. Optimize edilen parametrelerle işleme yapıldığında başlangıç durumuna göre işlenen yüzeyde oluşan çatlakların sayısı ve boyu azalmış, ergiyip katılmış katman kalınlığı daha düzenli hale gelmiştir. Toz karışımı dielektrik kullanımının avantajlarına rağmen toz karıştırma ve talaş filtreleme sistemlerinin karmaşık olması nedeniyle toz karışımı EEİ sistemlerinin yaygın olarak kullanılabilmesi için bu alanda daha fazla çalışma yapılması gerektiği belirtilmiştir [22].

Mohanty ve arkadaşları (2018) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada silisyum karbür karışımı alüminyum metal matrisli kompozit malzemenin toz karışımı EEİ ile işlenmesinde YYM ile parametre optimizasyonu sağlanmıştır. Çalışmada I, T_{on} , T_{off} ve püskürtme basıncı değişken parametreler olarak alınmış; işlemler bakır elektrot ve alümina toz karışımı dielektrik kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Toz katkının dielektrik sıvının işleme boşluğunu arttırdığı, İİH'ye ve R_a 'ya olumlu etkide bulunduğu görülmüştür. Yöntemin yüzde hata oranının düşük olduğu aktarılmıştır [23].

Mondal ve arkadaşları (2018) tarafından yapılmış çalışmada EN19 alaşımlı çelik iş parçasının pirinç elektrot kullanılarak EEİ yöntemiyle işlenmesinde dielektrik sıvıya eklenen alüminyum, grafit, titanyum karbür ve karbon nanotüp toz katkıların etkisi incelenmiştir. En yüksek İİH, en yüksek EAH, en düşük R_a karbon nanotüp katkıyla elde edilmiştir. En düşük İİH, en düşük EAH ve en yüksek R_a ise alüminyum toz katkıyla elde edilmiştir. Alüminyum tozunun işlemeye etkisinin az olduğu belirtilmiştir [24].

Bains ve arkadaşları (2019) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada toz karışımı EEİ üzerindeki manyetik alan etkisi incelenmiştir. Çalışmada alüminyum silisyum karbür metal matrisli kompozit iş parçası bakır elektrot ve silisyum karbür toz karışımı dielektrik

kullanılarak işlenmiş, iş parçasının yanlarına yerleştirilen mıknatıslar yardımıyla işleme bölgesinde manyetik alan oluşturulmuştur. Farklı I , T_{on} ve T_{off} değerleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalara kıyasla İİH'de, mikrosertlikte ve R_a 'da kayda değer iyileşme görülmüştür. İİH üzerinde I 'nın etkili olduğu ancak diğer iki parametrenin ihmal edilebilir etkiye sahip olduğu; en düşük R_a 'nın yüksek T_{off} ve düşük I ile elde edildiği belirtilmiştir. Manyetik alanın ergiyip katılaşmış katman kalınlığını azalttığı fark edilmiştir. Yüzey sertliği üzerinde kayda değer etkisi olan tek parametrenin T_{on} olduğu ve T_{on} arttıkça sertliğin de arttığı sonucuna varılmıştır [25].

Dharmendra ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada Inconel 800 alaşımın bakır elektrot ve alüminyum toz karışımı dielektrik kullanılarak EEİ ile işlenmesinde I , T_{on} ve T_{off} parametrelerinin etkisi incelenmiş ve Taguchi yöntemi kullanılarak parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. En yüksek İİH ve en düşük R_a için kullanılması gereken parametreler farklı olduğu için isterlerin karşılanma oranını belirten yeni bir parametre tanımlanmış ve optimizasyon bu parametre üzerinden gerçekleştirilmiştir [26].

Jadam ve arkadaşları (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Inconel 718 süper alaşımın EEİ ile işleme performansına karbon nanotüp karışımı dielektriğin etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda karbon nanotüp katkısının her I değerinde İİH'yi arttırdığı; özellikle yüksek I değerlerinde EAH'yi, R_a 'yı, yüzeydeki ortalama krater çapını ve ergiyip katılaşmış katman kalınlığını azalttığı saptanmıştır. Ayrıca işleme yüzeyinde yüksek oranda karbon birikimi görülmüş ve bu durumun yüzey sertliğini arttırdığı belirtilmiştir [27].

Rouniyar ve Shandilya (2019, 2021) tarafından yapılmış çalışmalarda 6061 alüminyum alaşımı üzerine alüminyum toz karışımı EEİ ile işleme üzerindeki manyetik alan etkisi incelenmiştir. Deneylerde iş parçasının her iki yanına güçlü mıknatıslar yerleştirilmiş; farklı I , T_{on} , T_{off} , toz konsantrasyonu ve manyetik alan şiddetleriyle işlemler gerçekleştirilmiştir. I , T_{on} ve manyetik alan şiddeti artıp T_{off} azaldıkça İİH'nin ve EAH'nin de arttığı; toz konsantrasyonu arttıkça iki değer de bir seviyeye kadar iyileşip daha sonra kötüleştiği görülmüştür [28]. Devam eden çalışmada YYM ve ANOVA yöntemleriyle parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İİH ve EAH üzerinde en etkili parametrenin I olduğu görülmüş, elde edilen model işleme sonuçlarını yüksek doğruluk oranıyla tahmin etmiştir [29].

Sahu ve Datta (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Inconel 718 süper alaşımın EEİ ile işleme performansında grafit toz karışımlı dielektriğin etkisi araştırılmıştır. Grafit toz katkının İİH'yi arttırdığı, EAH'yi ve R_a 'yı düşürdüğü, çatlak oluşumunu azalttığı görülmüştür. Toz karışımlı EEİ ile işlenen parçada klasik EEİ yöntemiyle işlenen parçaya kıyasla daha az mikro sertleşme ve kalıntı gerilme tespit edilmiştir. I'yı arttırmanın her iki işlemede de İİH'yi ve R_a 'yı arttırdığı sonucuna varılmıştır [30].

Huu (2020) tarafından yapılan çalışmada kalıp çeliklerinin titanyum toz karışımlı EEİ ile işlenmesinde parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve çeşitli çok kriterli karar verme yöntemlerinin (Taguchi, TOPSIS, gri ilişkisel analiz, tercih indeksi) EEİ'ye uygunluğu kıyaslanmıştır. Performans kriterleri İİH, EAH, R_a , yüzey mikro sertliği ve ergiyip katılaşmış katman kalınlığı olarak belirlenmiştir. Tercih indeksi yöntemini uygulamanın diğer üç yönteme göre daha kolay olduğu belirtilmiş ancak Taguchi yöntemiyle belirlenen ideal işleme parametreleriyle en doğru işleme gerçekleştirildiği için bu yöntemin diğerlerine göre daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Elektrot malzemesi, toz konsantrasyonu ve I parametrelerinin işleme sonuçları üzerinde büyük oranda etkili olduğu görülmüştür [31].

Alhodaib ve arkadaşları (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Nimonic-90 süper alaşımın silisyum toz karışımlı EEİ ile işlenmesi incelenmiştir. Çalışmada toz konsantrasyonu, I, T_{on} ve T_{off} değişken parametreler olarak alınıp R_a ve ergiyip katılaşmış katman kalınlığı performans parametreleri olarak belirlenmiştir. Her iki çıktı üzerinde etkili parametrenin T_{on} olduğu ve T_{off} 'un etkisinin ihmal edilebilir olduğu görülmüştür. Düşük I, düşük T_{on} , yüksek toz konsantrasyonu ve yüksek T_{off} parametreleriyle düşük R_a ve düşük ergiyip katılaşmış katman kalınlığı elde edilmiştir. Gri ilişkisel analiz yöntemiyle parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve her iki çıktıda iyileşme sağlanmıştır [32].

Mughal ve arkadaşları (2021) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada Ti6Al4V alaşımdan imal edilmiş tıbbi implant yüzeyinin EEİ ile işlenmesinin canlı kemik hücresi tutunumuna etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada farklı silisyum karbür toz konsantrasyonu, I ve T_{on} değerleriyle işlemler gerçekleştirilmiştir. Toz karışımlı dielektrik kullanımının yüzeyde mikro çatlak oluşumunu ve R_a 'yı azalttığı, ergiyip katılaşmış katman kalınlığını ve yüzey mikro sertliğini arttırdığı görülmüştür. Yüzeyde kemik tutunumuna uygun

gözenekli yapı oluşturulmuştur. İşlenen yüzeyde toz katkı nedeniyle kalıntı silisyum ve dielektriğin yıkımı nedeniyle kalıntı karbon tespit edilmiştir [33].

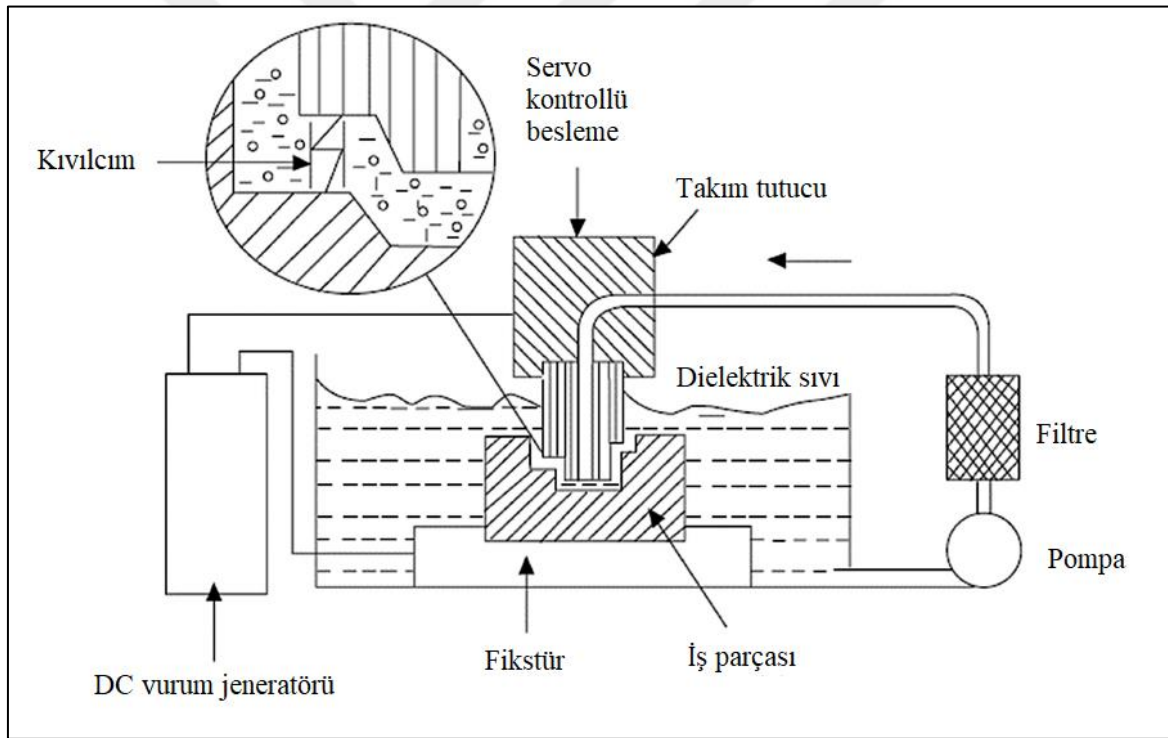
Ramesh ve Jenarathanan (2021) tarafından yapılan çalışmada Nimonic-75 nikel bazlı süper alaşımın toz karışımı EEİ ile işlenmesinde parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı konsantrasyonlarda grafit, silisyum ve manganez toz karışımı dielektrik kullanılmış; farklı I ve görev döngüsü değerleriyle işlemler gerçekleştirilmiştir. En yüksek İİH'ye grafit tozu, yüksek I ve düşük görev döngüsüyle ulaşılmıştır. En düşük EAH ve R_a silisyum tozu ve düşük I ile elde edilmiştir. Düşük EAH için yüksek görev döngüsü, düşük R_a için orta görev döngüsü daha iyi sonuç vermiştir. İİH ve EAH üzerinde en etkili parametrelerin I ve görev döngüsü, R_a üzerinde en etkili parametrelerin I ve toz konsantrasyonu olduğu tespit edilmiştir. Manganez tozunun İİH'ye etkisinin grafit tozundan çok, silisyum tozundan az olduğu görülmüştür [34].

Bu çalışmada nikel krom molibden dental alaşımının EEİ yöntemi kullanılarak yüksek İİH, düşük R_a , düşük EAH ile işlenmesi için optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi ve grafit toz karışımı dielektriğin işlemeye etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. EEİ'nin yüzey sertliği yüksek veya mekanik mukavemeti düşük malzemeleri işlemek için uygun olması nedeniyle yöntem olarak EEİ seçilmiştir.

Malzeme olarak Almanya merkezli Dentaurum firması tarafından üretilen "remanium® CSE" isimli nikel esaslı alaşım seçilmiştir. Malzemenin seçilme nedeni daha önce nikel krom molibden dental alaşımın EEİ yöntemi ile işlenebilirliğinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmemiş olmasıdır.

2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ)

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), iş parçası ve elektrot arasında gerçekleşen kontrollü yük boşalımları yardımıyla iş parçasından ergime ve buharlaşma yoluyla malzeme erozyonu gerçekleştirmek yoluyla iş parçasına istenilen şeklin verilmesi işlemidir. Basit bir EEİ tezgahı Şekil 2.1’de görüldüğü üzere elektrik yükünü sağlayan bir doğru akım (DC) vuruş jeneratörü, iş parçası, iş parçasını tezgaha bağlayan fikstür, elektrot olarak adlandırılan takım, elektrota istenilen ilerlemeyi veren bir servo kontrollü besleme motoru, işleme sırasında elektrot ve iş parçasının gömülü olduğu dielektrik sıvı, dielektrik sıvının sirkülasyonunu sağlayan bir pompa, işleme sırasında elektrot ve iş parçasından kopan talaşı süzen bir filtreden oluşur [35].



Şekil 2.1. Basit bir EEİ tezgahı [36]

2.1. EEİ Tarihçesi

EEİ tarihçesinin ilk olarak 1770 yılında İngiliz kimyager Joseph Priestly tarafından yük boşalımlarının aşındırıcı etkisinin keşfedilmesiyle başladığı kabul edilir. Ancak elektriksel yük boşalımları ilk kez 1943 yılında, Rusya’da, Boris ve Natalya Lazarenko tarafından

gerçekleştirilen çalışmalarda imalat amacıyla kullanılmıştır. Lazarenko, geliştirdiği rezistans-kapasitans devresini güç kaynağı olarak kullanmış, kontrollü yük boşalmalarıyla işlemesi güç metallerin yüzeyinden buharlaşma yoluyla malzeme erozyonu gerçekleştirmiştir. Bu devre daha sonra geliştirilen EEİ tezgahlarının tasarımında yol gösterici olmuştur [1].

Benzer tarihlerde Amerika'da Harold Stark, Victor Harding ve Jack Beaver tarafından alüminyum hidrolik valflerin imalatı sırasında kırılıp iş parçasına gömülü kalan matkap uçlarını çıkartmak amacıyla bir EEİ tezgahı geliştirilmiştir. İlk başta dielektrik olarak basınçlı hava kullanılmış ancak daha sonra havanın ergiyen malzemeyi soğutmakta ve ortamdan uzaklaştırmakta yetersiz olduğu görülmüş, dielektrik olarak su kullanılmaya başlanmıştır. Tezgah, metal kesim işlemlerinde kullanılmıştır [35].

1960'larda yapılan çalışmalarda EEİ ile işleme matematiksel olarak modellenmiştir. 1970'lerden bu yana daha güçlü jeneratörler, yeni geliştirilen elektrotlar, daha etkili dielektrik püskürtme yöntemleri gibi gelişmeler sayesinde işleme hızı yirmi kata kadar artmış, işleme maliyeti %30 azalmış, yüzey kalitesinde 15 kat iyileşme elde edilmiştir [37]

2.2. İşleme Mekanizması

EEİ adım adım şu şekilde gerçekleşir:

- 1- İş parçası tezgaha yerleştirilir ve dielektrik tankı iş parçasının seviyesini bir miktar geçene kadar dielektrik sıvıyla doldurulur.
- 2- Bir doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılarak genellikle iş parçası pozitif, elektrot negatif yüklerle yüklenir.
- 3- Elektrot iş parçasına yaklaştırılır.
- 4- Elektrot ve iş parçası arasında elektron akışı başlar.
- 5- Elektronlar dielektrik sıvı moleküllerine çarparak onları iyonlaştırır.
- 6- İyon konsantrasyonu artar ve plazma halde kıvılcım boşalma kanalı oluşur.
- 7- Plazma kanalının direnci çok düşük olduğu için dielektrik sıvı kısa süreliğine bölgesel olarak iletken hale gelir.
- 8- Dışarıdan kıvılcım şeklinde görülen güçlü bir yük boşalımı gerçekleşir.
- 9- Pozitif yüklü iyonlar elektrotta, elektronlar iş parçasına yüksek hızla çarparlar.

EEİ hızlı delik delme işleminde iş parçası üzerinde kısa sürede dar çaplı ve derin delikler açılabilir. Açılı delik açmak da mümkündür. Dielektrik olarak genelde deiyonize su kullanılır. Takım içinden dielektrik püskürtme yaygındır [35].

EEİ ile taşlama, EEİ ile frezeleme ve çok elektrotlu EEİ gibi bazı diğer EEİ yöntemleri de mevcuttur.

2.4. EEİ'nin Avantaj ve Dezavantajları

EEİ'nin diğer işleme yöntemlerine kıyasla çeşitli avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu yöntemin sunduğu avantajların bazıları şu şekildedir:

- Yüksek yüzey sertliği nedeniyle talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi zor metal, alaşım veya seramikler EEİ yöntemiyle işlenebilir.
- Elektrot ve iş parçası arasında temas gerçekleşmediği için mekanik kuvvet aktarımı yoktur. Bu nedenle hassas parçalar işlenebilir.
- Yöntem karmaşık yüzey şekillerinin elde edilmesi için uygundur. Dar çaplı ve derin delikler delinebilir, kaviteler veya eğimli yüzeyler elde edilebilir.
- EEİ işleme yüzeyinde çapak bırakmaz.
- İşleme doğruluğu yüksektir.
- Kullanılan elektrotların işlenebilirliği yüksektir. Elektrotlara kolayca istenilen geometri verilebilir.

Öte yandan EEİ'nin bazı dezavantajları da mevcuttur:

- Elektriksel iletkenliği düşük malzemelerin işlenebilirliği azdır.
- İş parçasında sert ergiyip yeniden katılaşmış katman ve mikro çatlak oluşumuyla karakterize edilen ısı etkilenmiş bölge oluşumu gözlenir. Eğer imal edilen ürünün yorulma dayanımının yüksek olması isteniyorsa ısı etkilenmiş bölgenin kaldırılması için ek işlem gerekir.
- Bu yöntemle keskin köşe ve kenar elde edilmez.
- Elektrot aşınması görülür. Enerji ve takım maliyeti yüksektir.
- İşleme hızı geleneksel yöntemlere kıyasla düşüktür [39].

2.5. EEİ Parametreleri

EEİ işleme parametreleri elektriksel ve elektriksel olmayan olarak ikiye ayrılır. Elektriksel işleme parametreleri vurum süresi, vurum aralığı, işleme boşluğu, boşalım akımı, boşalım gerilimi, elektrot yükü ve görev döngüsüdür. Elektriksel olmayan işleme parametreleri dielektrik sıvı, püskürtme basıncı, elektrot malzemesi, toz konsantrasyonu, elektrot dönme hızıdır [40]. EEİ işleme parametreleri ve performans ölçütleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

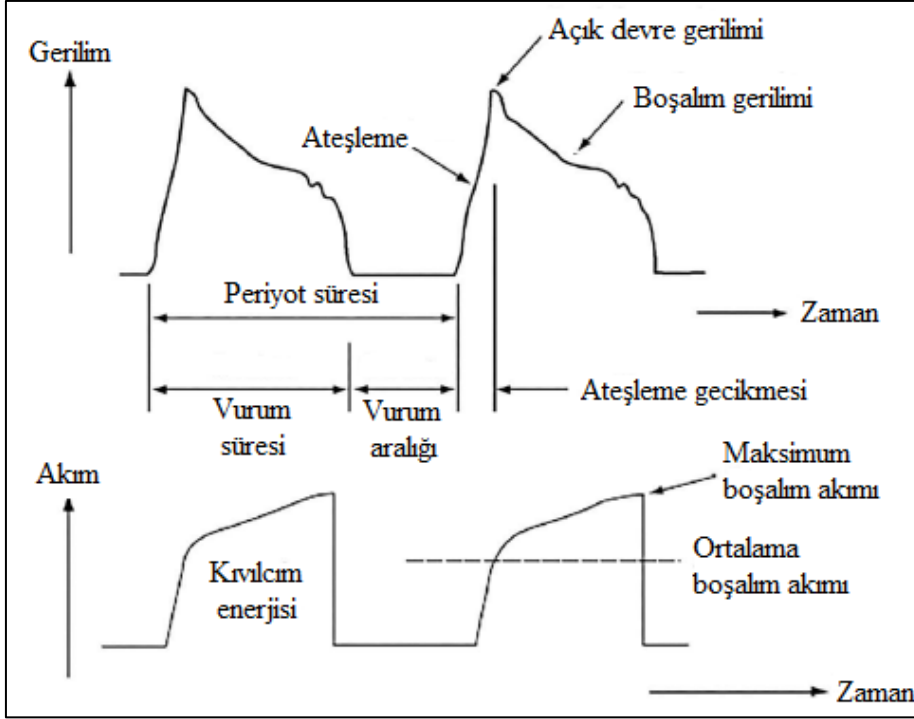
Çizelge 2.1. EEİ işleme parametreleri ve performans ölçütleri

Elektro Erozyonla İşleme		
İşleme Parametreleri		Performans Ölçütleri
Elektriksel	Elektriksel Olmayan	
Vurum süresi	Dielektrik sıvı	İş parçası işleme hızı
Vurum aralığı	Püskürtme basıncı	Yüzey pürüzlülüğü
İşleme boşluğu	Elektrot malzemesi	Boyutsal doğruluk
Boşalım akımı	Toz konsantrasyonu	Toplam işleme süresi
Boşalım gerilimi	Elektrot dönme hızı	
Elektrot yükü		
Görev döngüsü		
Vurum frekansı		

Elektriksel işleme parametreleri şu şekildedir:

- Vurum süresi (T_{on}): Yük boşalımı ve kıvılcım oluşumu görülen süredir. İşleme bu sırada gerçekleşir.
- Vurum aralığı (T_{off}): Yük boşalımı gerçekleşmeyen süredir. Bu sırada işleme gerçekleşmez.
- İşleme boşluğu: Yük boşalımı sırasında elektrot ve iş parçası arasında kalan mesafedir.
- Boşalım akımı (I): Yük boşalımı sırasında işleme boşluğundan geçen akım şiddetidir.
- Boşalım gerilimi: Yük boşalımı sırasında ölçülen gerilimdir. İşlemenin gerçekleştiği işleme boşluğunu belirler.
- Elektrot yükü: Elektrotun elektriksel yük işaretidir. Genellikle negatif (katot) olmakla beraber bazı iş parçası ve elektrot kombinasyonlarında pozitif (anot) olabilir.

- Görev döngüsü: T_{on} süresinin $T_{on} + T_{off}$ şeklinde ifade edilen periyot süresine bölünmesiyle elde edilen değerdir. Periyot süresinin yüzde olarak ne kadarında yük boşalımı olduğunu gösterir.
- Vurum frekansı: Saniyede gerçekleşen vurum sayısıdır [35].



Şekil 2.3. EEİ ile işleme sırasında oluşan akım ve gerilim dalgaları [36]

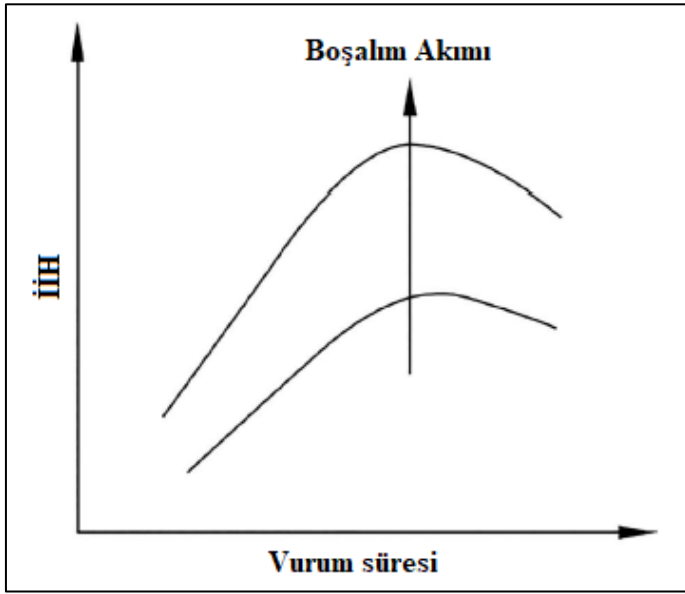
2.5.1. EEİ performans ölçütleri

EEİ performans ölçütleri iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk ve toplam işleme süresidir [40].

EEİ işleme sırasında hem elektrottan hem de iş parçasından malzeme erozyonu gerçekleşir. İİH, iş parçasının hacimce eksilmesinin toplam işleme süresine bölünmesiyle elde edilir. İşlemede İİH değerinin olabildiğince yüksek olması, bu sayede toplam işleme süresinin kısaltılması hedeflenir.

$$İİH = \frac{\text{iş parçasının hacmindeki değişim}}{\text{toplam işleme süresi}} \quad (2.1)$$

Boşalım akımı arttıkça İİH artar. Vurum süresi arttıkça İİH artar fakat vurum süresi fazla uzun tutulduğunda yeniden azalır. Bunun nedeni vurum süresi uzun tutulduğunda uzun süre devam eden kıvılcımların düştükleri yerdeki krater boyutlarını genişletmesi ancak yeni kıvılcımlar oluşmadığı için iş parçası yüzeyinde her yerin eşit işlenmemesidir. Oluşan kıvılcımların kesilip yeni kıvılcımların oluşması için yeterli bekleme süresi verilmelidir [36].

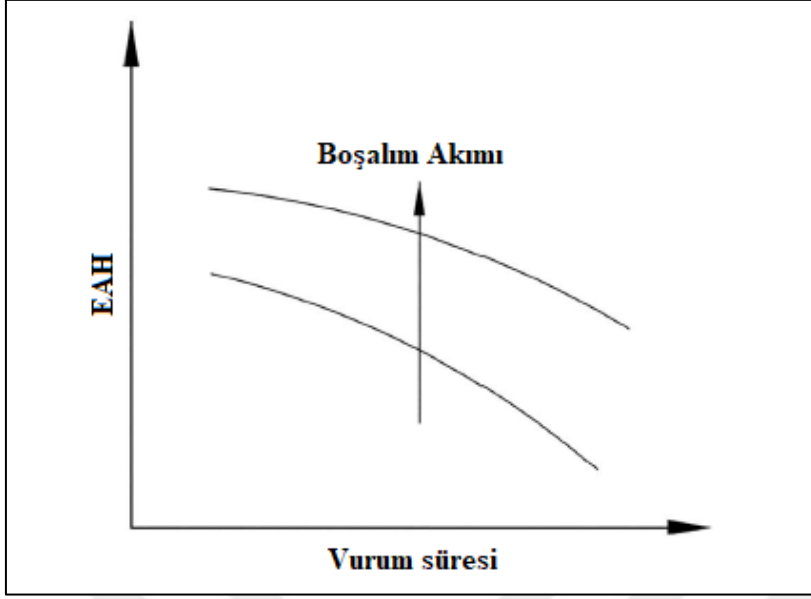


Şekil 2.4. İİH'nin vurum süresi ve boşalım akımına göre değişimi [36]

EAH, işleme süresi boyunca elektrotta görülen hacim değişiminin toplam işleme süresinde bölünmesiyle elde edilir. İşleme boyunca yüzey kalitesinin ve geometrik doğruluğun korunabilmesi için EAH'nin düşük olması amaçlanır. Aksi takdirde elektrotta gerçekleşen şekil değişimi iş parçasının yüzey kalitesini ve işlemenin geometrik doğruluğunu azaltacaktır.

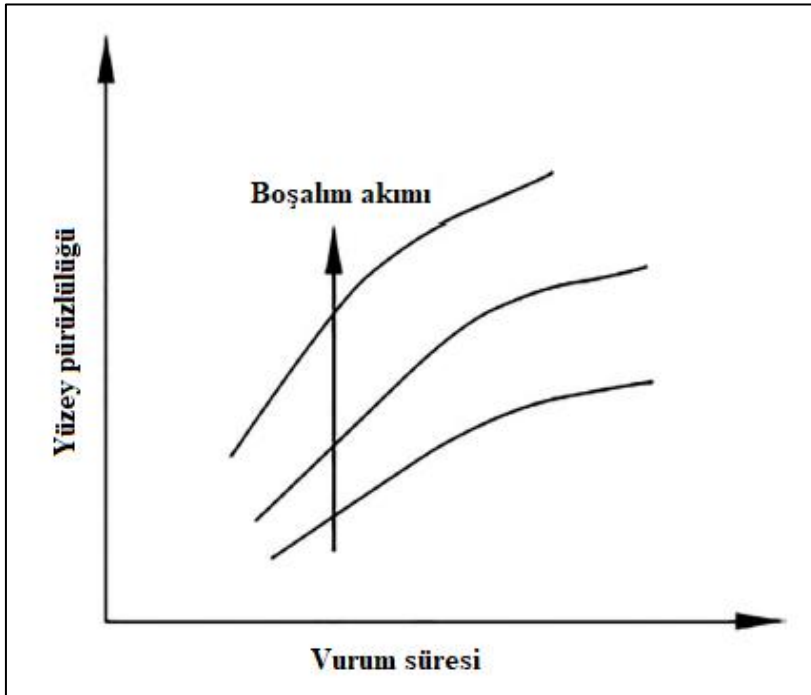
$$EAH = \frac{\text{takımın hacmindeki değişim}}{\text{toplam işleme süresi}} \quad (2.2)$$

EAH yüksek boşalım akımı ve düşük vurum süresiyle artmakta, görev döngüsü arttıkça azalmaktadır. Ayrıca yetersiz dielektrik püskürtmesi sonucu takımın aşırı ısınması da EAH'yi arttırmaktadır [36].



Şekil 2.5. EAH'nin vurum süresi ve boşalım akımına göre değişimi [36]

Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü için R_a , yani ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri kullanılmıştır. R_a değerinin bulunması için öncelikle yüzey üzerine çizginin altında ve üstünde kalan alanların birbirine eşit olacağı bir çizgi çekilir. Bu çizginin altında kalan yapılar çukur, üstünde kalan yapılar tepe olarak isimlendirilir. Tepe ve çukurların ortalama çizgisinden sapmalarının aritmetik ortalaması R_a değerini verir [41].



Şekil 2.6. Yüzey pürüzlülüğünün vurum süresi ve boşalım akımına göre değişimi [36]

Vurum süresinin ve boşalım akımının artması iş parçası yüzeyinde daha derin ve daha geniş yüzey kraterler oluşmasına neden olup pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Yetersiz dielektrik püskürtmesi sonucu iş parçasından kaldırılan talaşın ortamdaki uzaklaştırılmaması da yüzey kalitesini olumsuz etkiler. İİH ve R_a arasında doğrusal ilişki vardır [36].

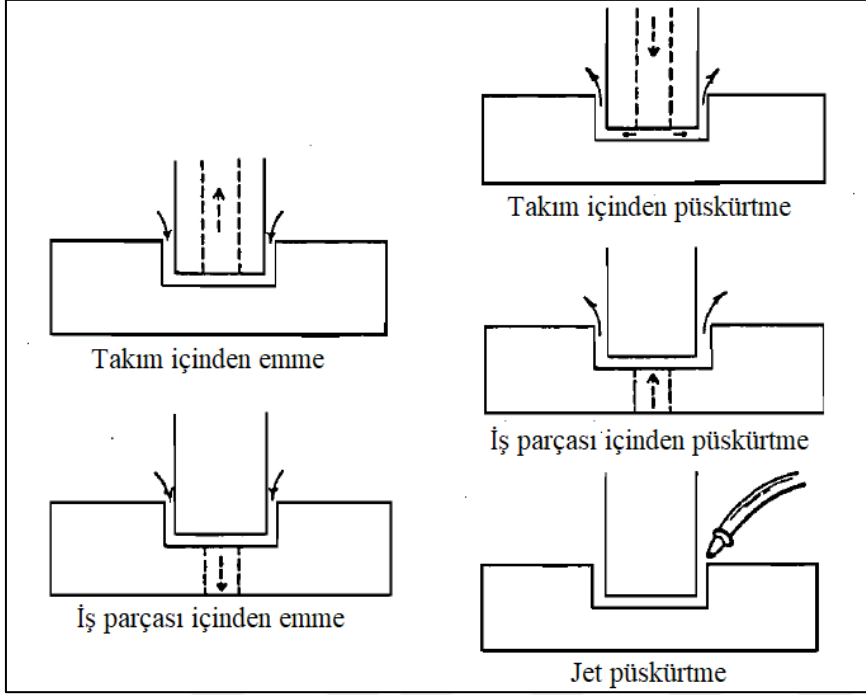
2.5.2. Dielektrik sıvı

EEİ dielektrik sıvısının içinde gerçekleşir. Dielektrik sıvı olarak saf (deiyonize) su veya gazyağı gibi iletken olmayan sıvılar kullanılır. Dielektrik sıvının işlevleri elektrot ve iş parçası arasında yalıtkan bir katman oluşturmak, iş parçası ve elektrottan ayrılan talaş ortamdaki uzaklaştırmak ve işleme sırasında açığa çıkan ısıyı uzaklaştırarak ortamı soğutmaktır [39].

İyi bir dielektrik sıvı püskürtme kolaylığı açısından düşük viskoziteye sahip olmalıdır. İşleme sırasında yüksek miktarda ısı açığa çıkmaktadır. Bu nedenle dielektrik sıvının parlama noktası yüksek olmalıdır. Dielektrik sıvının dielektrik dayanımı yeterli olmalıdır. İşleme sırasında hızlıca iyonize olup kıvılcım oluşumu için plazma kanal oluşturmalı ve sonra hızlıca yeniden deiyonize olup yalıtkan hale gelebilmelidir. Dielektrik sıvı ucuz, kimyasal etkilere karşı dayanıklı, sağlığa ve çevreye zararsız olmalıdır [42].

Farklı dielektrik püskürtme yöntemleri Şekil 2.7’de verilmiştir. Ergime ve buharlaşma yoluyla iş parçasından kaldırılan talaşın yeniden iş parçası üzerinde katılaşmaması için işleme yüzeyine dielektrik sıvı püskürtmesi yeterli olmalıdır [38].

Çeşitli çalışmalar dielektrik sıvıya karıştırılan toz katkıların işleme hızı, elektrot aşınması ve yüzey kalitesini iyileştirici etkisi olduğunu göstermiştir. EEİ’de kullanılan toz katkılardan bazıları alüminyum, grafit, krom, silisyum, nikel, silisyum karbür, titanyum, tungsten, alümina, bor karbür ve karbon nanotüptür. Kullanılan toz boyu genelde 10-25 μm ve toz konsantrasyonu 6 g/L civarındadır [43].



Şekil 2.7. Çeşitli dielektrik püskürtme yöntemleri [38]

2.5.3. Elektrot (takım)

EEİ'de kullanılan elektrotlar genelde iyi elektriksel iletkenliği ve yüksek ergime sıcaklığına sahip metallere imal edilir. Elektrot malzemesi iyi elektriksel ve ısı iletkenliğe, yüksek ergime ve buharlaşma noktasına, yüksek sertlik ve düşük hücre boyutuna sahip olmalıdır. Ayrıca ucuz ve kolayca işlenebilir olmalıdır. Elektrot ölçüleri ve geometrisi belirlenirken işleme sırasında gerçekleşecek yan yüzey aşınması da göz önünde bulundurulmalıdır [42].

Pirinç elektrotlarda düşük ergime sıcaklığı nedeniyle yüksek elektrot aşınması görülür. Genellikle dar deliklerin delinmesinde kullanılırlar. Bakırın ısı ve elektriksel iletkenliği yüksektir. Bakır elektrotlarla düşük elektrot aşınması, yüksek işleme hızı ve iyi yüzey kalitesi elde edilebilir. Tungsten elektrotlar malzemenin yüksek ergime sıcaklığından dolayı düşük elektrot aşınmasına sahiptir. Öte yandan tungsten pahalıdır ve işlenmesi zordur. Tungsten-bakır elektrotlar işleme kolaylığı ve aşınma oranı bakımından tungsten ve bakır arasındadır. Özellikle yetersiz dielektrik püskürtme durumunda diğer elektrotlara göre daha iyi performans gösterirler. Grafit yüksek ergime sıcaklığına sahip olup grafit elektrotlar düşük elektrot aşınması gösterirler. Grafit kolay işlenir fakat kırılabilir bir yapıya

sahiptir. Bakır-grafit elektrotlar grafit elektrolara göre elektriği daha iyi iletirler ancak kenar ve köşe aşınmaları fazladır [37].

Çizelge 2.2. Farklı malzemedan imal edilmiş elektrotların özellikleri

Elektrot malzemesi	EAH	İİH	Üretim kolaylığı	Maliyet
Bakır	düşük	yüksek	kolay	yüksek
Pirinç	yüksek	yüksek	kolay	düşük
Tungsten	düşük	düşük	zor	yüksek
Tungsten-bakır alaşım	düşük	düşük	zor	yüksek
Dökme demir	düşük	düşük	kolay	düşük
Çelik	yüksek	düşük	kolay	düşük
Çinko tabanlı alaşımlar	yüksek	yüksek	kolay	yüksek
Bakır-grafit	düşük	yüksek	zor	yüksek

Çizelge 2.3. Farklı iş parçası ve elektrot malzemeleri için kullanılan elektrot yükleri

Elektrot malzemesi	İş parçası malzemesi				
	Çelik	Tungsten karbür	Bakır	Alüminyum	Nikel bazlı alaşımlar
Grafit	+/-	-	-	+	+/-
Bakır	+	+/-	-	+	+
Bakır-tungsten	+	+/-	-	+	+
Çelik	+/-	+	-	-	-
Pirinç	-	-		+	-



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde deneyde kullanılan iş parçasının ve elektrotun özellikleri, hammaddeleri ve bu hammaddelerin seçilme nedenleri; deneyde ve ölçümlerde kullanılan tezgah ve ekipmanın özellikleri, deney tasarımı ve deney parametreleri verilmiştir.

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Tezgah Altyapısı

3.1.1. İş parçası

Çalışmada iş parçası malzemesi olarak Almanya merkezli Dentaurum firması tarafından üretilen “remanium® CSE” isimli nikel esaslı alaşım seçilmiştir (Resim 3.1). Diş protezi, köprü, implant ve metal seramik imalatında kullanılmaktadır. Döküm, lazer kaynağı ve seramik kaplama işlemlerinde kullanılmaya uygundur. Korozyon dayanımı ve mekanik mukavemeti yüksektir [44].



Resim 3.1. Çalışmada kullanılan numuneler

Çalışmada kullanılan numuneler 7,8 mm çapta ve 15 mm boyda olup silindirik şekildedirler. Numunelerin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de, mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir [45].

Çizelge 3.1. Alaşımın kimyasal bileşimi (kütlece yüzde)

Ni	Cr	Mo	Si	Fe
61,0	26,0	11,0	1,5	1,2

Çizelge 3.2. İş parçası mekanik özellikleri

Akma dayanımı (MPa)	340
Kopma dayanımı (MPa)	580
Sertlik (Vickers)	195
Kopma uzaması (%)	15
Elastisite modülü (GPa)	170
Özkütle (g/cm ³)	8,2
Erime sıcaklığı (°C)	1350

3.1.2. Elektrot

Elektrot malzemesinde olması beklenen özellikler iyi elektriksel iletkenlik, iyi ısı iletkenlik, yüksek ısı kapasite ve yüksek ergime sıcaklığıdır. Elektrotun düşük maliyetli ve kolay bulunabilir olması da önem arz eder. Yüksek elektriksel ve ısı iletkenliğe sahip olmasından dolayı çalışmada bakır elektrot kullanılmıştır [46].



Resim 3.2. Çalışmada kullanılan elektrotlar

Çalışmada kullanılan bakır elektrot 100 mm boyunda ve 8 mm çapında olup iş parçasına temas edecek yüzeyleri düzeltilip parlatılmıştır. Bu sayede işleme sırasında elektrot yüzeyinin iş parçasına tam temas etmesi ve işlemenin temas yüzeyinin tamamında homojen bir şekilde gerçekleşmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 3.3. Elektrot özellikleri

Malzeme	Bakır (%99 saflıkta)
Akma dayanımı (MPa)	125-145
Çekme dayanımı (MPa)	275-350
Kopma uzaması (%)	22
Sertlik (Vickers)	87
Elektriksel direnç (Ω .cm)	2,66
Erime sıcaklığı ($^{\circ}$ C)	0,00000598
Termal iletkenlik (W/mK)	117
Özgül ısı (J/g $^{\circ}$ C)	0,900
Özkütle (g/cm 3)	8,96

3.1.3. EEİ tezgahı

Deneysel çalışmalar Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan tezgah Furkan Kompak 1 Z-NC model elektro erozyon tezgahıdır. Tezgahın teknik özellikleri EK-1'de verilmiştir.



Resim 3.3. Çalışmada kullanılan EEİ tezgahı

Çalışmada dielektrik sıvı olarak gazyağı kullanılmış, toz karışımlı deneylerde dielektrik sıvıya 12,5 g/L grafit tozu karıştırılmıştır. Toz katkı olarak grafit kullanılma nedenleri

önceki çalışmalarda işleme hızına ve yüzey kalitesine olumlu katkıda bulunduğu görülmüştür ve dielektrik sıvı içinde askıda kaldığı için iyi karışmasıdır [16].

3.1.4. Toz karışımı EEİ deney seti

Grafit toz karışımı dielektrik sıvı kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde kullanılmak amacıyla bir toz karışımı EEİ deney seti tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deney seti; dielektrik tankı, sirkülasyon pompası, iki adet vana ve iki adet püskürtme hortumundan oluşmaktadır. Dielektrik tankı kimyasal aşınmaya dirençli olması için polipropilen malzemeden imal edilmiş ve grafit tozunun tankın tabanına çökmesini engellemek amacıyla tankın yan yüzeyleri eğimli olup ters konik şekilde tasarlanmıştır. Sirkülasyon pompası dielektrik sıvının çevrimini sağlamaktadır. Vanalardan biri deney sonrasında tankta bulunan dielektrik sıvının tahliye edilmesi için sistemin en alçak noktasına monte edilmiştir. Diğer vana pompa ve püskürtme hortumları arasına yerleştirilmiş olup dielektrik püskürtme basıncı bu vana kullanılarak ayarlanmıştır. Dielektrik püskürtme hortumlarının biri tankın içindeki dielektrik sirkülasyonunu sağlamak için, diğeri grafit toz karışımı dielektrik sıvıyı işleme yüzeyine ulaştırmak için kullanılmıştır.



Resim 3.4. Toz karışımı EEİ deney seti



Resim 3.5. Toz karışımı EEİ deney setinin tezgah üzerine yerleştirilmesi

3.2. Deney Tasarımı

Bu bölümde deneylerde gerçekleştirilen işlemler, bu işlemlerde kullanılan değişken ve sabit parametreler, deney sırasında ve sonrasında kullanılan ölçme yöntemleri anlatılmıştır.

3.2.1. Deney parametreleri

Deneylerde değişken parametreler olarak I , T_{on} , T_{off} ve toz konsantrasyonu seçilmiştir. İşleme derinliği 2 mm, açık devre gerilimi 130 V, boşalım gerilimi 70 V, çalışma süresi 2 s, geri çekme mesafesi 2 mm seçilmiş ve bu ayarlar tüm deneylerde sabit bırakılmıştır. Tüm deneylerde iş parçası pozitif, elektrot negatif kutuplanmıştır. Deneylerde kullanılan I değerleri 3, 6, ve 12,5 A; T_{on} değerleri 24, 48 ve 99 μ s; T_{off} değerleri 6, 12 ve 24 μ s olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.5'te verilen parametrelerle toplam 18 deney gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.4. Deney parametreleri

Dielektrik	Grafit toz karışımı gazyacağı
Elektrot	Bakır elektrot (8 mm çapta ve 100 mm boyda, silindir şeklinde)

Çizelge 3.4. (devam) Deney parametreleri

İşleme derinliği (mm)	2		
Açık devre gerilimi	130		
Boşalım gerilimi	70		
Çalışma süresi (s)	2		
Geri çekme mesafesi (mm)	2		
Toz konsantrasyonu (g/L)	0	12,5	
Akım, I (A)	3	6	12,5
Vurum süresi, T_{on} (μ s)	24	48	99
Vurum aralığı, T_{off} (μ s)	6	12	24

Çizelge 3.5. Deney tasarımı

Deney no	Toz konsantrasyonu (g/L)	I (A)	T_{on} (μ s)	T_{off} (μ s)
1	0	3	24	6
2	0	3	48	12
3	0	3	99	24
4	0	6	24	12
5	0	6	48	24
6	0	6	99	6
7	0	12,5	24	24
8	0	12,5	48	6
9	0	12,5	99	12
10	12,5	3	24	6
11	12,5	3	48	12
12	12,5	3	99	24
13	12,5	6	24	12
14	12,5	6	48	24
15	12,5	6	99	6
16	12,5	12,5	24	24
17	12,5	12,5	48	6
18	12,5	12,5	99	12

3.2.2. Numunelerin işlenmesi

İşlemeleri gerçekleştirmek için öncelikle toz karışımı EEİ deney seti tabla üzerine yerleştirilmiştir. Sonrasında mengene dielektrik tankının üzerine yerleştirilmiş ve bir takoz yardımıyla sabitlenmiştir. Daha sonra iş parçası mengeneyle sabitlenmiş, su terazisi

yardımıyla zeminle paralelliği sağlanmıştır. Bir sonraki adım olarak elektrot tezgaha bağlanmış, gönye kullanılarak elektrotun alt yüzeyinin iş parçasının üst yüzeyine paralelliği sağlanmıştır. Bu sayede elektrot ve iş parçası arasında tam temas gerçekleşmiştir. İki ucu timsah ağızlı bakır kablo EEİ tezgahının tablasına ve toz karışımı deney setinin mengenesine bağlanarak iş parçası kutuplanmıştır. Püskürtme hortulardan biri işleme sırasında iş parçasından kopan talaşı uzaklaştırmak ve grafit tozunu işleme yüzeyine ulaştırmak amacıyla iş parçası üzerinde işleme yapılacak bölgeye doğrultulmuştur. Diğer püskürtme hortumu tankın tabanına doğrultularak eğer varsa tankın tabanında biriken grafit tozunun çevrimi sağlanmıştır. Pompa ve püskürtme hortumları arasına yerleştirilmiş vana kullanılarak dielektrik püskürtme basıncı ayarlanmıştır. Tezgah üzerinde yapılacak ayarlara geçmeden önce dielektrik tankı iş parçasının seviyesini geçecek kadar dielektrik sıvı ile doldurulmuştur.

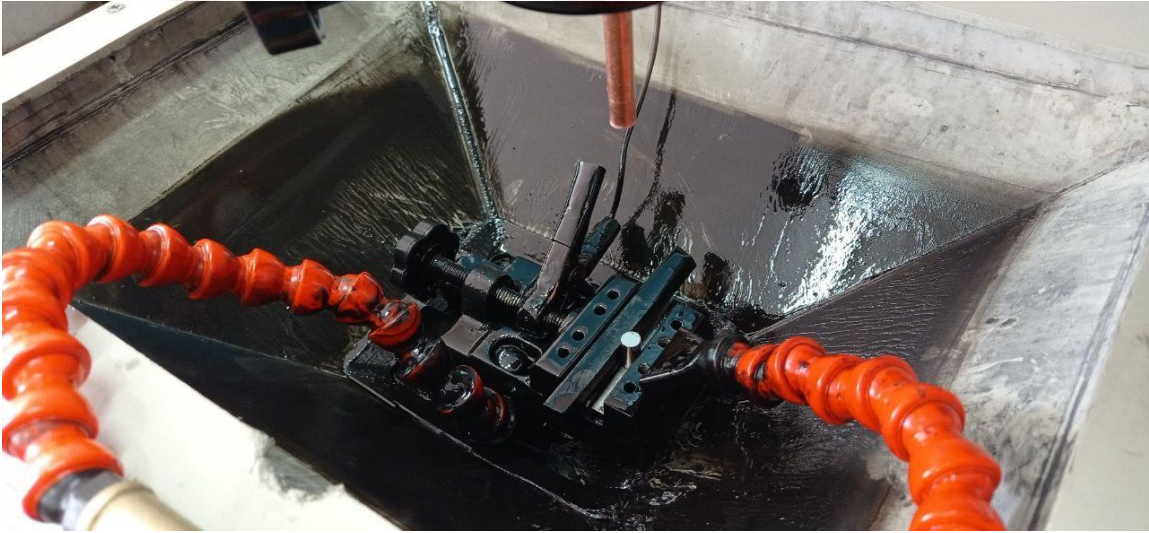
Tezgahın kontrol panelinden kıvılcım ayarı ile sıfırlama ayarı yapılarak elektrotun z eksenindeki konumu sıfırlanmıştır. Sonrasında tezgah kontrol panelinden işleme parametreleri (I, T_{on}, T_{off}) ayarlanmış, dielektrik sirkülasyonu deney setindeki pompa tarafından gerçekleştirileceği için EEİ tezgahının püskürtme ayarı kapatılmıştır. Son olarak işleme derinliği girilerek ve işlemler yapılmıştır.



Resim 3.6. Tezgah kontrol paneli



Resim 3.7. Toz karışımı işleme



Resim 3.8. İşleme sonrası dielektrik tankının boşaltılması

3.2.3. İİH ve EAH hesaplanması

Her deneyden önce ve sonra kullanılan iş parçası ve elektrot 0,005 g hassasiyetli hassas teraziyile tartılmıştır. İşleme sonrasında üstlerinde kalan dielektrik sıvının ve varsa grafit tozunun tartım sonuçlarını etkilememesi için tartım işlemi öncesinde iş parçası ve elektrot özenle temizlenip kurulanmıştır. Sonrasında işlem öncesi ve sonrasındaki kütleler malzemelerin özkütlelerine bölünerek başlangıç hacmi ve son hacim bulunmuş, bulunan değerlerin farkı alınarak hacimsel eksilme değeri elde edilmiştir. Hacimsel eksilmenin işleme süresine bölünmesiyle İİH ve EAH değerleri hesaplanmıştır.

3.2.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Deney sonrasında işlenen her numunenin yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo SurfTest SJ-310 yüzey pürüzlülük test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm cihazında standart ISO 1997, profil R, kesme değerleri $\lambda_c=0,8\mu\text{m}$ ve $\lambda_s=2,5\mu\text{m}$, örnekleme uzunluğu 5 mm, çapraz hız 0,5 mm/s, aralık otomatik olarak ayarlanmıştır. Deney numunelerinin hafif olması nedeniyle ölçüm sırasında ölçüm cihazının iğnesi tarafından hareket ettirilmelerini önlemek amacıyla polikarbonat levhaya lazer kesim makinesi kullanılarak numunenin sıkı geçeceği delikler delinmiş, ölçüm sırasında numuneler bu deliklere yerleştirilip polikarbonat levha üzerine ağırlık koyulmuştur (Resim 3.9). R_a değerleri sinyal gürültü oranlarıyla ölçmüştür, ölçümlerin doğruluğunu arttırmak amacıyla her ölçüm üçer kez tekrarlanıp ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.



Resim 3.9. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü (solda), yakın çekim (sağda)



4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

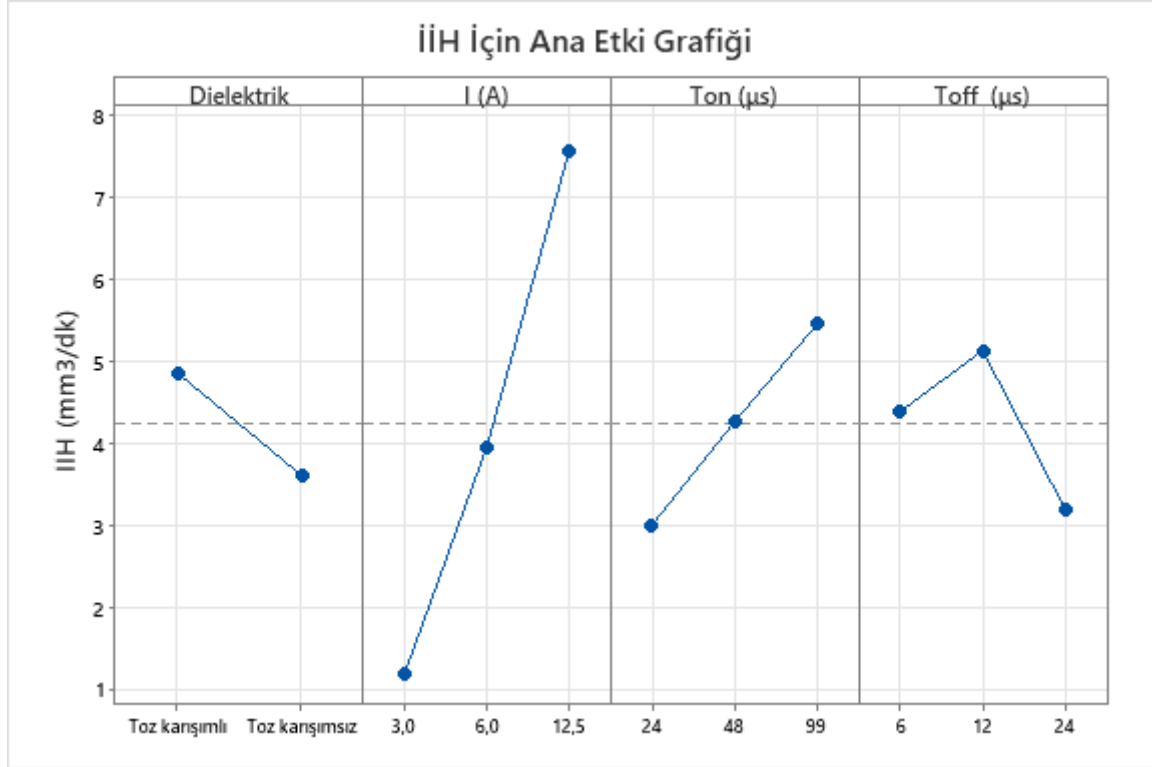
Bu bölümde deney sonuçları tablo ve grafikler halinde verilmiş; I, T_{on}, T_{off} parametrelerinin ve grafit toz karışımli dielektrik kullanımının İİH, EAH ve R_a üzerindeki etkileri incelenmiş, bu etkilerin nedenleri yorumlanmış ve açıklanmıştır. Daha sonra parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve işleme modellenmiş, elde edilen modelin tahminleri doğrulama deneyinin sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarının yorumlanmasında “Minitab Statistical Software” isimli yazılım kullanılmıştır. Ana etki grafikleri yazılımın “ANOVA” modülüyle hazırlanmış, matematiksel modelleme ve parametre optimizasyonu yazılımın “Response Surface” modülüyle gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney sonuçları

Deney no	Toz konsantrasyonu (g/L)	I (A)	T _{on} (µs)	T _{off} (µs)	İİH (mm ³ /dk)	EAH (mm ³ /dk)	R _a (µm)
1	0	3	24	6	0,922	0,00545	3,234
2	0	3	48	12	1,259	0,00768	3,312
3	0	3	99	24	1,254	0,00726	3,882
4	0	6	24	12	3,733	0,04380	5,265
5	0	6	48	24	3,106	0,01947	6,952
6	0	6	99	6	3,381	0,02049	6,013
7	0	12,5	24	24	3,380	0,86097	5,829
8	0	12,5	48	6	6,898	0,14766	6,829
9	0	12,5	99	12	8,643	0,04098	8,931
10	12,5	3	24	6	1,251	0,00962	3,294
11	12,5	3	48	12	1,347	0,00963	3,696
12	12,5	3	99	24	1,185	0,00798	3,599
13	12,5	6	24	12	3,196	0,06051	4,736
14	12,5	6	48	24	4,721	0,02842	5,699
15	12,5	6	99	6	5,660	0,03431	4,795
16	12,5	12,5	24	24	5,544	0,59260	4,251
17	12,5	12,5	48	6	8,256	0,10350	6,778
18	12,5	12,5	99	12	12,667	0,07627	7,047

EEİ işleminin performansının değerlendirilmesinde önemli parametrelerden biri İİH olup bu parametre birim zamanda kaldırılan talaş miktarını göstermektedir. İİH ana etki

grafisinde (Şekil 4.1.) I arttıkça $\dot{I}H$ 'nin de arttığı görülmektedir. Benzer şekilde T_{on} 'daki artışın ve toz karışumlu dielektrik kullanımının da $\dot{I}H$ 'yi arttırdığı görülmüştür. En yüksek $\dot{I}H$ değeri $I=12,5A$, $T_{on}=99\mu s$, $T_{off}=12\mu s$ ve toz karışumlu dielektrik ile $12,667 \text{ mm}^3/dk$; en düşük $\dot{I}H$ $I=3A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=6\mu s$ ve toz karışumsuz dielektrik ile $0,922 \text{ mm}^3/dk$ olarak hesaplanmıştır.

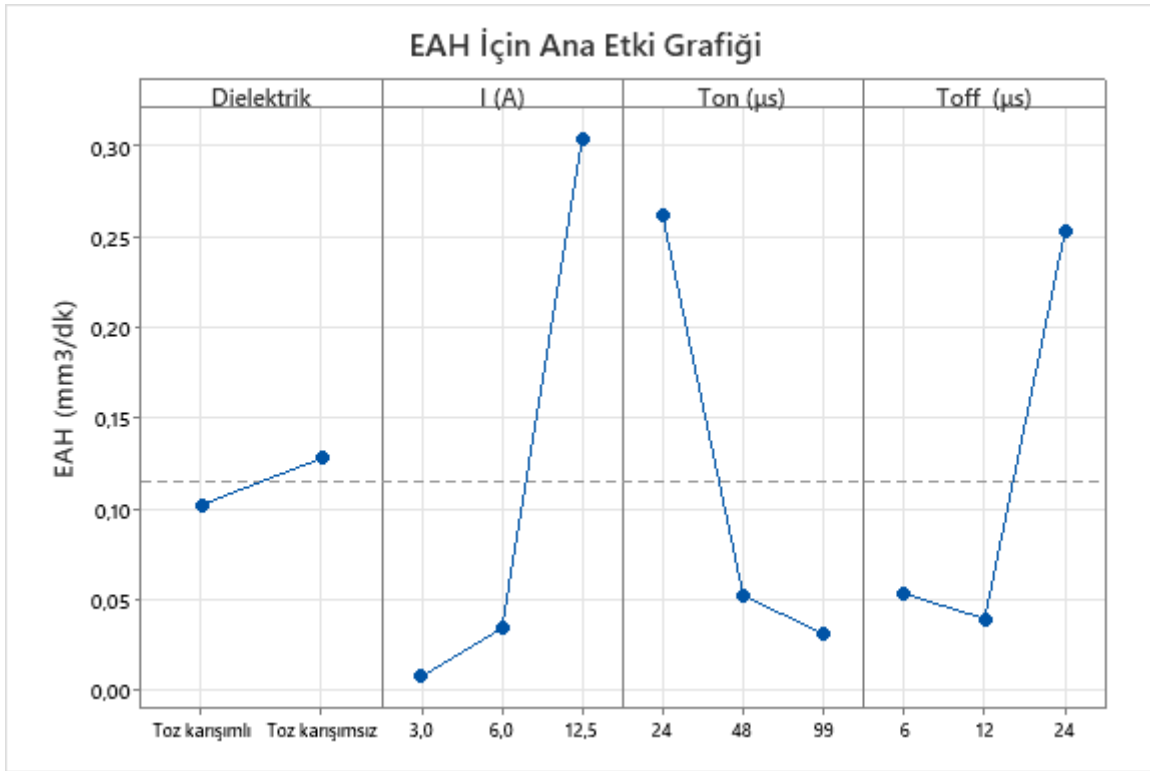


Şekil 4.1. $\dot{I}H$ ana etki grafiği

I arttıkça yük boşalımının enerjisi de artmakta, oluşan her kıvılcım iş parçası üzerinden daha büyük hacimde talaş kaldırmaktadır [36]. Bu nedenle $\dot{I}H$ değerinde artış görülmektedir. T_{on} arttıkça kıvılcımların oluşmalarından sönmelerine kadar geçen süre artmış olup bu durum da $\dot{I}H$ değerini yükseltmiştir. $T_{off}=12\mu s$ olana kadar erozyona uğrayan malzemenin ortamdan uzaklaşması ve bu bölgeye yeni grafit tozu taşınması sayesinde $\dot{I}H$ artmıştır. Ancak T_{off} daha fazla uzatıldığında işleme gerçekleşmeden geçen süre uzadığı için $\dot{I}H$ azalmıştır. Toz karışumlu dielektrik kullanımı yük boşalımını kolaylaştırıp ateşleme gecikmesini kısaltarak $\dot{I}H$ 'ye olumlu etkide bulunmuştur.

EEİ ile işleme gerçekleştirilirken yalnızca iş parçasından değil elektrottan da malzeme erozyonu gerçekleşmektedir. Elektrotun sonraki işlemlerde kullanılabilmesi ve uzun süren

işlemlerde elektrotun geometrik şekli ile yüzey kalitesi korunarak işlemin bozulmaması için EAH değerinin düşük olması önemlidir. EAH ana etki grafiğinde (Şekil 4.2.) I'nın artmasının EAH'yi arttırdığı, T_{on} 'un artmasının ve toz karışumlu dielektrik kullanımının EAH'yi azalttığı görülmektedir. EAH, $T_{off}=12\mu s$ olana kadar azalır bu değerden sonra artışa geçmiştir. En yüksek EAH değeri $I=12,5A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=24\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile $0,86097\text{ mm}^3/dk$; en düşük EAH değeri $I=3A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=6\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile $0,00545\text{ mm}^3/dk$ olarak hesaplanmıştır.

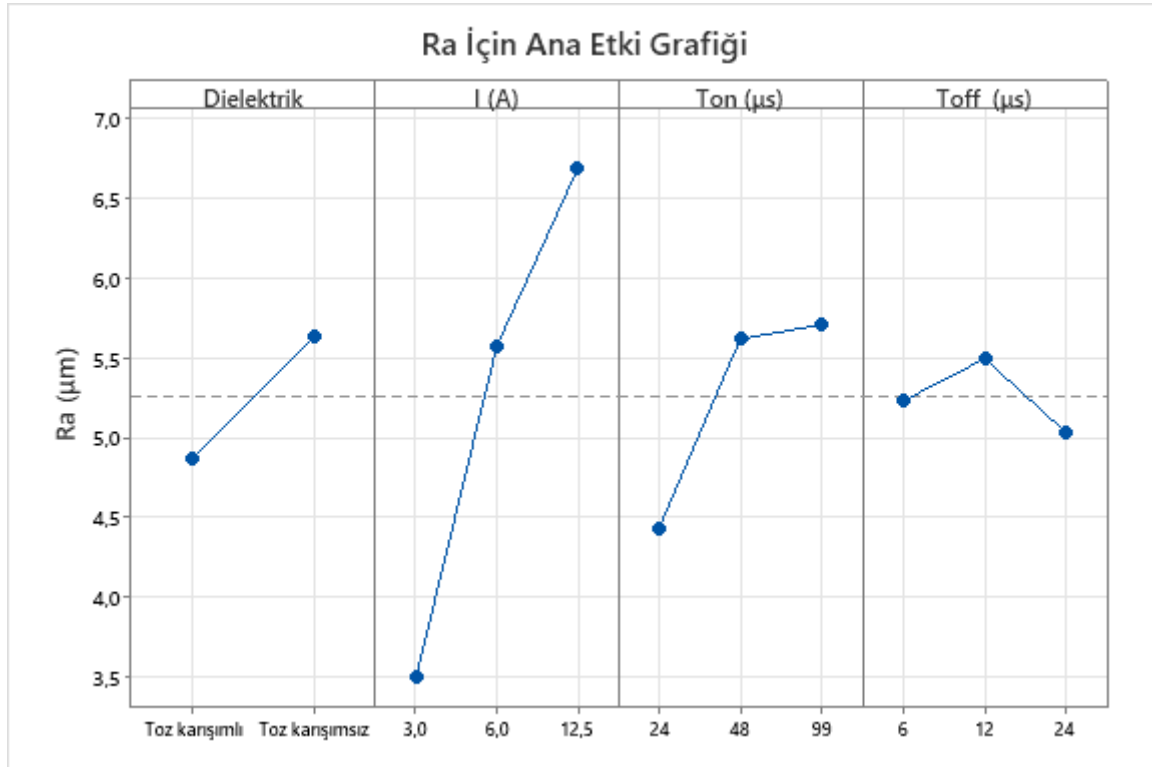


Şekil 4.2. EAH ana etki grafiği

I arttıkça oluşan boşalımların güçlenmesi iş parçasından olduğu gibi elektrottan da daha fazla malzeme erozyonu gerçekleşmesine neden olmaktadır. T_{on} kısa tutulduğunda ısı, elektrotun tamamına yayılmayıp yalnızca kıvılcım bölgesinde kalırken T_{on} uzun tutulduğunda bakırın iyi ısı iletkenliği sayesinde ısı elektrotun tamamına yayılmakta, bu sayede iş parçasına temas eden yüzeyde biriken ısı azalmaktadır. Ayrıca daha uzun T_{on} değerlerinde bir yük boşalımıyla daha fazla malzeme erozyonu gerçekleştiği için işleme sırasında gerçekleşen toplam yük boşalımı sayısı daha azdır. Bu iki durum birlikte T_{on} arttıkça EAH değerinin azalmasına yol açmaktadır [36]. Toz karışumlu dielektrik kullanımının düşük I değerlerinde EAH üzerinde güçlü bir etkisi yokken yüksek I

değerlerinde EAH'yi azalttığı görülmüştür.

İşlemede hedeflenen çıktılardan biri de en yüksek yüzey kalitesinin elde edilmesidir. En düşük R_a $I=3A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=6\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile $3,234 \mu m$ olarak; en yüksek R_a ise $I=12,5A$, $T_{on}=99\mu s$, $T_{off}=12\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile $8,931 \mu m$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.3. R_a ana etki grafiği

I ve T_{on} arttıkça R_a 'nın arttığı gözlenmiştir. I ve T_{on} arttıkça işleme yüzeyinde oluşan kraterlerin çapı ve derinliği artmakta, bu da yüzey kalitesini düşürmektedir [36]. Ayrıca R_a 'nın $T_{off}=12\mu s$ olana kadar artıp bu değerden sonra yeniden azaldığı, toz karışimli dielektrik kullanımının özellikle yüksek I değerlerinde yüzey kalitesini iyileştirdiği görülmüştür.

4.1. YYM Analizi ve Parametre Optimizasyonu

Deney sonuçlarının matematiksel modellenmesi ve optimizasyonunda Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (YYM) kullanılmıştır. YYM; süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize

etmek için kullanılan istatistiksel ve matematiksel bir yöntemdir [47]. En kapsamlı YYM uygulama alanlarından biri birden fazla değişken girdinin performans çıktıları üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. YYM deneysel çalışmalar aracılığıyla bağımsız değişkenleri tanımlamak, verim ile süreç değişkenleri arasında uygun bir ilişki kurmak, ampirik istatistiksel modelleme yapmak ve süreç değişkenlerinin değerlerini belirlemek için optimizasyon yöntemlerini kullanmayı kapsamaktadır [48].

4.1.1. İİH için YYM analizi

İlk olarak İİH çıktısı için Matlab Statistical Software yazılımında grafit toz konsantrasyonu, I, T_{on} ve T_{off} girdileri ile YYM analizi gerçekleştirilmiştir. Grafit toz konsantrasyonu girdisi kategorik, diğer üç girdi sürekli seçilmiştir. Modelin performans çıktıları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. İİH için oluşturulan modelin performans çıktıları

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,706344	98,59%	95,21%	77,25%

Çizelge 4.2’de S değeri deney sonuçlarıyla modelin elde ettiği değerler arasındaki farkın standart sapması olup bu değer birimi yanıtın birimiyle aynıdır (İİH için mm³/dk). R-sq veya R² değeri model tarafından hesaplanan değer varyasyon yüzdesini ifade etmektedir. R-sq(adj) değeri düzeltilmiş R² değeri olup model tarafından elde edilen sonuçların varyasyon yüzdesinin denklemdaki bağımsız değişken sayısına göre ayarlanmış versiyonudur. Bu parametre bağımsız değişken sayısı yüksek regresyon denklemlerinin güvenilirliğini göstermekte R²’den daha etkilidir. R-sq(pred) yani öngörülen R² değeri modelin programa tanımlanan sonuçlardan farklı sonuçları tahmin etmekte ne kadar iyi olduğunu göstermektedir. S değerinin düşük; R-sq, R-sq(adj) ve R-sq(pred) değerlerinin %100’e yakın olması modelin güvenilirliğinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir [49].

Girdilerin sonuç üzerindeki etkisinin büyüklüğünü görmek amacıyla varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3’te varyans analizi sonuçları görülmektedir. Çizelgede F değeri parametrenin sonuç üzerindeki etkisini göstermekte olup bu değer daha büyük olması parametrenin sonuç üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. P değeri parametrenin istatistiksel olarak anlamlılığını göstermektedir. Bu değer 0 olduğu

parametreler en anlamlı parametreler olup bu parametreler regresyon denkleminde mutlaka yer almalıdırlar. P değeri 0,05'ten büyük olan parametrelerin regresyon denklemi üzerindeki etkisi düşük olup bu parametreler ihmal edilebilirler [50].

Çizelge 4.3. İİH için oluşturulan modelin varyans analizi sonuçları

Terim	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri
Model	12	174,606	14,550	29,160	0,001
Doğrusal Etki	4	137,739	34,435	69,020	0,000
I	1	122,305	122,305	245,140	0,000
T _{on}	1	8,789	8,789	17,620	0,009
T _{off}	1	0,178	0,178	0,360	0,576
Dielektrik	1	9,265	9,265	18,570	0,008
Karelerin Etkisi	3	2,209	0,736	1,480	0,328
I ²	1	2,176	2,176	4,360	0,091
T _{on} ²	1	0,016	0,016	0,030	0,865
T _{off} ²	1	0,019	0,019	0,040	0,853
İkili Etkileşim	5	15,773	3,155	6,320	0,032
I*T _{on}	1	9,238	9,238	18,520	0,008
I*T _{off}	1	1,269	1,269	2,540	0,172
I*Dielektrik	1	4,301	4,301	8,620	0,032
T _{on} *Dielektrik	1	1,638	1,638	3,280	0,130
T _{off} *Dielektrik	1	0,003	0,003	0,010	0,940
Hata	5	2,495	0,499		
Toplam	17	177,100			

Modelin güvenilirliğini arttırmak amacıyla P değeri yüksek olan “T_{on}²”, “T_{off}²”, “T_{off}*Dielektrik” terimleri ve hesaplanamadığı için yazılım tarafından otomatik olarak denklemden çıkartılan “T_{on}*T_{off}” terimi çıkartılarak yeniden modelleme yapılmıştır. “T_{off}” terimi P-değeri yüksek olmasına rağmen modelden çıkartılmamıştır. Bunun nedeni bu terimin doğrudan deney parametresi olmasıdır. Yeni modelin performans çıktıları Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. İİH için oluşturulan düzeltilmiş modelin performans çıktıları

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,562513	98,57%	96,96%	90,45%

Yeni modelin S değeri 0,706344'ten 0,562513'e düşmüş, R-sq(adj) değeri %95,21'den %96,96'ya ve R-sq(pred) değeri %77,25'ten %90,45'e yükselmiştir. Yani modelin doğruluğu artmıştır. Yeni modelin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. İİH için oluşturulan düzeltilmiş modelin varyans analizi sonuçları

Terim	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri
Model	9	174,569	19,397	61,300	0,000
Doğrusal Etki	4	142,680	35,670	112,730	0,000
I	1	124,608	124,608	393,800	0,000
T _{on}	1	11,149	11,149	35,240	0,000
T _{off}	1	0,173	0,173	0,550	0,480
Dielektrik	1	9,469	9,469	29,920	0,001
Karelerin Etkisi	1	2,176	2,176	6,880	0,031
I ²	1	2,176	2,176	6,880	0,031
İkili Etkileşim	4	21,649	5,412	17,100	0,001
I*T _{on}	1	14,371	14,371	45,420	0,000
I*T _{off}	1	2,137	2,137	6,750	0,032
I*Dielektrik	1	4,301	4,301	13,590	0,006
T _{on} *Dielektrik	1	1,638	1,638	5,180	0,052
Hata	8	2,531	0,316		
Toplam	17	177,100			

Çizelge 4.5'te F değerlerinin gösterdiği üzere İİH üzerindeki en etkili parametre I olup bu parametreyi sırasıyla T_{on} ve grafit toz konsantrasyonu takip etmektedir. T_{off} parametresinin İİH üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeydedir.

Biri toz karışımı, diğeri toz karışimsız dielektrik için olmak üzere iki adet regresyon denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan denklemler Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'de verilmiştir.

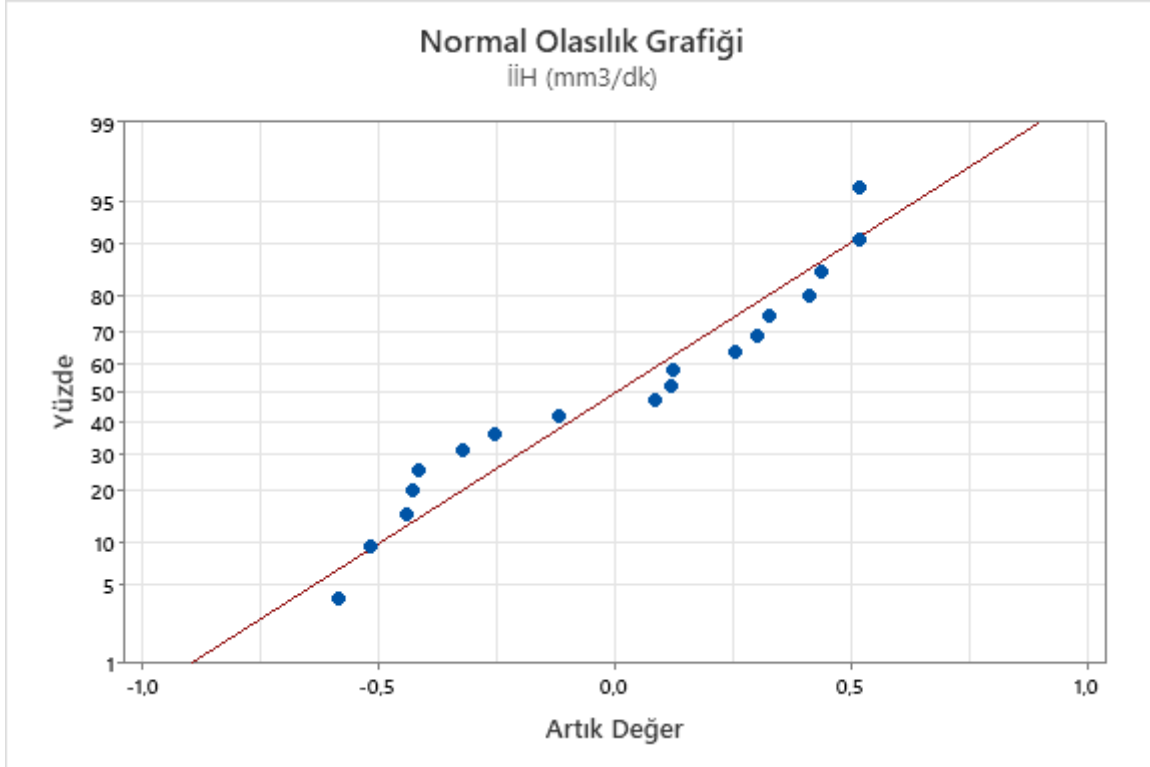
Toz karışımı İİH (mm³/dk)

$$\begin{aligned}
 &= -2,28 + 1,101 I - 0,0263 T_{on} + 0,0902 T_{off} - 0,0387 I^2 \\
 &+ 0,00845 I \times T_{on} - 0,01362 I \times T_{off}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Toz karışimsız İİH (mm^3/dk)

$$= -0,66 + 0,855 I - 0,0456 T_{on} + 0,0902 T_{off} - 0,0387 I^2 + 0,00845 I \times T_{on} - 0,01362 I \times T_{off} \quad (4.2)$$

Şekil 4.4'te İİH için oluşturulan modelin normal olasılık grafiği verilmiştir. Bu grafikte kırmızı çizgi regresyon denklemini, mavi noktalar deney sonuçlarını göstermekte olup grafik denklemin deney sonuçlarıyla uyumunu göstermektedir. Yatay eksen modelin hesapladığı değerle deneysel verinin farkını, dikey eksen yüzde dağılımını ifade etmektedir.



Şekil 4.4. İİH için normal olasılık grafiği

4.1.2. EAH için YYM analizi

Daha sonra aynı girdilerle EAH değeri için YYM analizi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modelin performans çıktıları ve varyans analizi sonuçları sırasıyla Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. EAH için oluşturulan modelin performans çıktıları

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0528133	98,45%	94,74%	72,86%

Çizelge 4.7. EAH için oluşturulan modelin varyans analizi sonuçları

Terim	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri
Model	12	0,887699	0,073975	26,520	0,001
Doğrusal Etki	4	0,323038	0,080760	28,950	0,001
I	1	0,248695	0,248695	89,160	0,000
T _{on}	1	0,017389	0,017389	6,230	0,055
T _{off}	1	0,041306	0,041306	14,810	0,012
Dielektrik	1	0,004237	0,004237	1,520	0,273
Karelerin Etkisi	3	0,019525	0,006508	2,330	0,191
I ²	1	0,017089	0,017089	6,130	0,056
T _{on} ²	1	0,000973	0,000973	0,350	0,580
T _{off} ²	1	0,001372	0,001372	0,490	0,514
İkili Etkileşim	5	0,197684	0,039537	14,170	0,006
I*T _{on}	1	0,087164	0,087164	31,250	0,003
I*T _{off}	1	0,110369	0,110369	39,570	0,001
I*Dielektrik	1	0,008524	0,008524	3,060	0,141
T _{on} *Dielektrik	1	0,006333	0,006333	2,270	0,192
T _{off} *Dielektrik	1	0,006129	0,006129	2,200	0,198
Hata	5	0,013946	0,002789		
Toplam	17	0,901645			

Modelin güvenilirliğini arttırmak amacıyla P değeri yüksek olan “T_{on}²”, “T_{off}²” terimleri ve hesaplanamadığı için yazılım tarafından otomatik olarak denklemden çıkartılan “T_{on}*T_{off}” terimi çıkartılarak yeniden modelleme yapılmıştır. Yeni modelin performans çıktıları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. EAH için oluşturulan düzeltilmiş modelin performans çıktıları

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0483767	98,18%	95,59%	75,47%

Yeni modelin S değeri 0,0528133'ten 0,0483767'ye düşmüş, R-sq(adj) değeri %94,74'ten %95,59'a ve R-sq(pred) değeri %72,86'dan %75,47'ye çıkmış; modelin doğruluğu artmıştır. Yeni modelin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. EAH için oluşturulan düzeltilmiş modelin varyans analizi sonuçları

Terim	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri
Model	10	0,885263	0,088526	37,830	0,000
Doğrusal Etki	4	0,331618	0,082905	35,420	0,000
I	1	0,260068	0,260068	111,130	0,000
T _{on}	1	0,017195	0,017195	7,350	0,030
T _{off}	1	0,045603	0,045603	19,490	0,003
Dielektrik	1	0,004237	0,004237	1,810	0,220
Karelerin Etkisi	1	0,017089	0,017089	7,300	0,031
I ²	1	0,017089	0,017089	7,300	0,031
İkili Etkileşim	5	0,290436	0,058087	24,820	0,000
I*T _{on}	1	0,112103	0,112103	47,900	0,000
I*T _{off}	1	0,178579	0,178579	76,310	0,000
I*Dielektrik	1	0,008524	0,008524	3,640	0,098
T _{on} *Dielektrik	1	0,006333	0,006333	2,710	0,144
T _{off} *Dielektrik	1	0,006129	0,006129	2,620	0,150
Hata	7	0,016382	0,002340		
Toplam	17	0,901645			

Çizelge 4.9'da F değerleri incelendiğinde EAH üzerinde en etkili parametrenin I, ikinci en etkili parametrenin T_{off}, üçüncü en etkili parametrenin T_{on} olduğu ve toz konsantrasyonunun EAH üzerindeki etkisinin az olduğu görülmektedir.

EAH için de biri toz karışımlı, diğeri toz karışısız dielektrik için olmak üzere iki adet regresyon denklemi oluşturulup oluşturulan denklemler Eş. 4.3 ve Eş. 4.4'de verilmiştir.

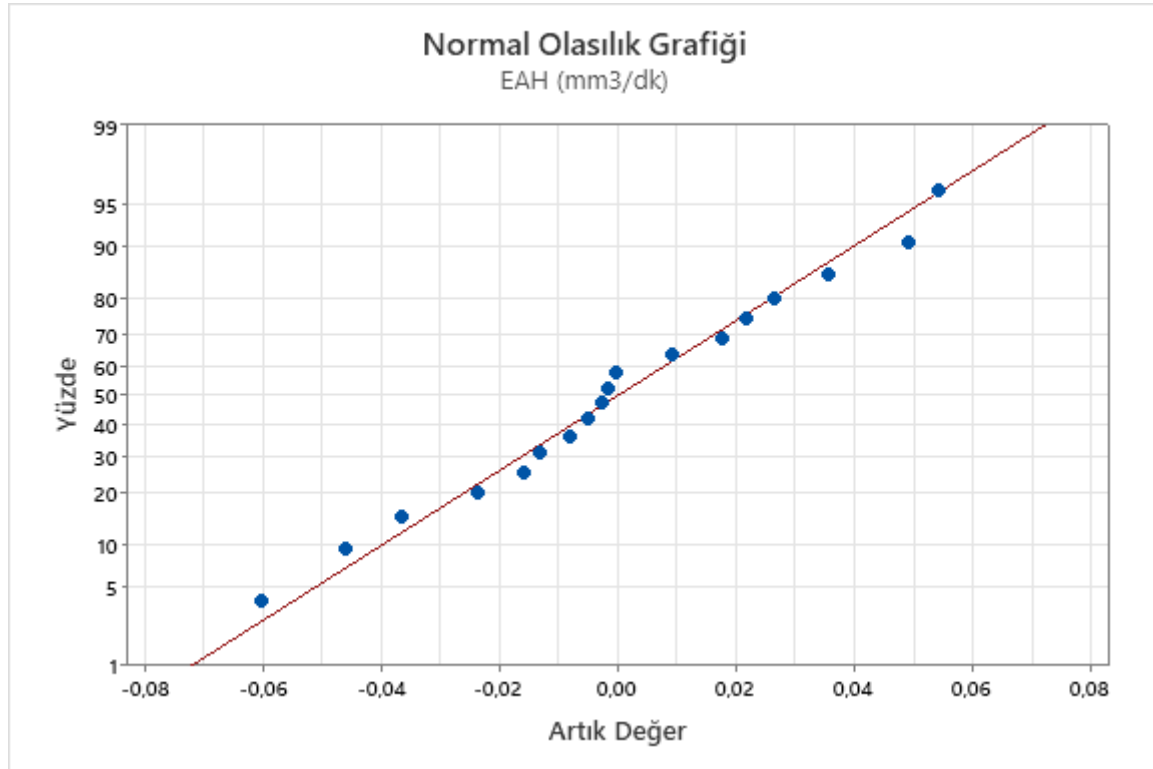
Toz karışımlı EAH (mm³/dk)

$$\begin{aligned}
 &= 0,1229 - 0,0401 I + 0,005224 T_{on} - 0,02508 T_{off} + 0,00343 I^2 \\
 &- 0,000747 I \times T_{on} + 0,003938 I \times T_{off}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Toz karışimsız EAH (mm^3/dk)

$$= 0,0692 - 0,0291 I + 0,004025 T_{on} - 0,02015 T_{off} + 0,00343 I^2 - 0,000747 I \times T_{on} + 0,003938 I \times T_{off} \quad (4.4)$$

Şekil 4.5'te EAH için oluşturulan modelin normal olasılık grafiği verilmiştir.



Şekil 4.5. EAH için normal olasılık grafiği

4.1.3. R_a için YYM analizi

Son olarak aynı girdilerle R_a değeri için YYM analizi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modelin performans çıktıları ve varyans analizi sonuçları sırasıyla Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. R_a için oluşturulan modelin performans çıktıları

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,389697	98,40%	94,55%	76,78%

Çizelge 4.11. R_a için oluşturulan modelin varyans analizi sonuçları

Terim	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri
Model	12	46,635	3,886	25,590	0,001
Doğrusal Etki	4	34,305	8,576	56,470	0,000
I	1	30,550	30,550	201,170	0,000
T _{on}	1	1,669	1,669	10,990	0,021
T _{off}	1	0,256	0,256	1,680	0,251
Dielektrik	1	3,371	3,371	22,190	0,005
Karelerin Etkisi	3	5,148	1,716	11,300	0,012
I ²	1	4,370	4,370	28,780	0,003
T _{on} ²	1	0,442	0,442	2,910	0,149
T _{off} ²	1	0,307	0,307	2,020	0,215
İkili Etkileşim	5	5,990	1,198	7,890	0,020
I*T _{on}	1	3,720	3,720	24,500	0,004
I*T _{off}	1	1,092	1,092	7,190	0,044
I*Dielektrik	1	1,187	1,187	7,810	0,038
T _{on} *Dielektrik	1	0,220	0,220	1,450	0,282
T _{off} *Dielektrik	1	0,188	0,188	1,240	0,316
Hata	5	0,759	0,152		
Toplam	17	47,394			

Önceki modellerde olduğu gibi modelin güvenilirliğini arttırmak amacıyla P değeri yüksek olan “T_{off}*Dielektrik” terimi ve hesaplanamadığı için yazılım tarafından otomatik olarak denklemden çıkartılan “T_{on}*T_{off}” terimi çıkartılarak yeniden modelleme yapılmıştır. Yeni modelin performans çıktıları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. R_a için oluşturulan düzeltilmiş modelin performans çıktıları

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,397422	98,00%	94,33%	84,09%

Yeni oluşturulan modelde R-sq ve R-sq(adj) değerlerinde küçük bir düşüş ve S değerinde küçük bir artış meydana gelmiş ancak R-sq(pred) değeri %76,78’den %84,09’a yükselerek kayda değer şekilde artış göstermiştir. Yeni modelin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.13’te verilmiştir.

Çizelge 4.13. R_a için oluşturulan düzeltilmiş modelin varyans analizi sonuçları

Terim	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri
Model	11	46,447	4,222	26,730	0,000
Doğrusal Etki	4	34,156	8,539	54,060	0,000
I	1	30,550	30,550	193,420	0,000
T _{on}	1	1,669	1,669	10,560	0,017
T _{off}	1	0,256	0,256	1,620	0,250
Dielektrik	1	3,221	3,221	20,390	0,004
Karelerin Etkisi	3	5,148	1,716	10,860	0,008
I ²	1	4,370	4,370	27,670	0,002
T _{on} ²	1	0,442	0,442	2,800	0,146
T _{off} ²	1	0,307	0,307	1,940	0,213
İkili Etkileşim	4	5,801	1,450	9,180	0,010
I*T _{on}	1	3,720	3,720	23,550	0,003
I*T _{off}	1	1,092	1,092	6,910	0,039
I*Dielektrik	1	1,187	1,187	7,510	0,034
T _{on} *Dielektrik	1	0,220	0,220	1,390	0,282
Hata	6	0,948	0,158		
Toplam	17	47,394			

Çizelge 4.13'te F değerlerinden anlaşıldığı üzere R_a üzerinde en etkili parametre I olup bu parametreyi sırasıyla toz konsantrasyonu ve T_{on} parametrelerin takip etmektedir. T_{off}'un R_a üzerindeki etkisi sınırlıdır.

R_a değeri için de biri toz karışımı, diğeri toz karışimsız dielektrik için iki adet regresyon denklemi oluşturulmuştur. Denklemler Eş. 4.5 ve Eş. 4.6'da verilmiştir.

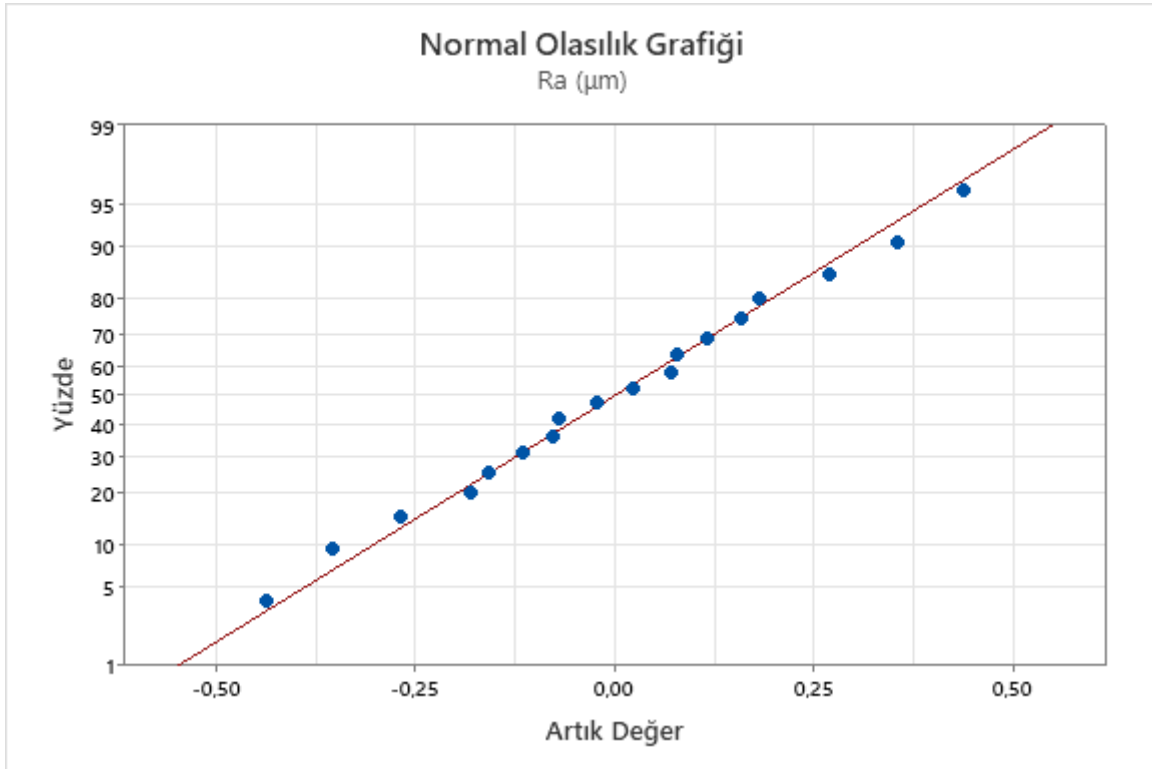
Toz karışımı R_a (μm)

$$\begin{aligned}
&= 0,60 + 0,988 I + 0,0105 T_{on} - 0,032 T_{off} - 0,0548 I^2 \\
&- 0,000336 T_{on}^2 + 0,00475 T_{off}^2 + 0,00522 I \times T_{on} \\
&- 0,01182 I \times T_{off}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Toz karışımsız R_a (μm)

$$\begin{aligned}
 &= 0,03 + 1,117 I + 0,0175 T_{on} - 0,032 T_{off} - 0,0548 I^2 \\
 &- 0,000336 T_{on}^2 + 0,00475 T_{off}^2 + 0,00522 I \times T_{on} \\
 &- 0,01182 I \times T_{off}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

R_a için oluşturulan modelin normal olasılık grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. R_a için normal olasılık grafiği

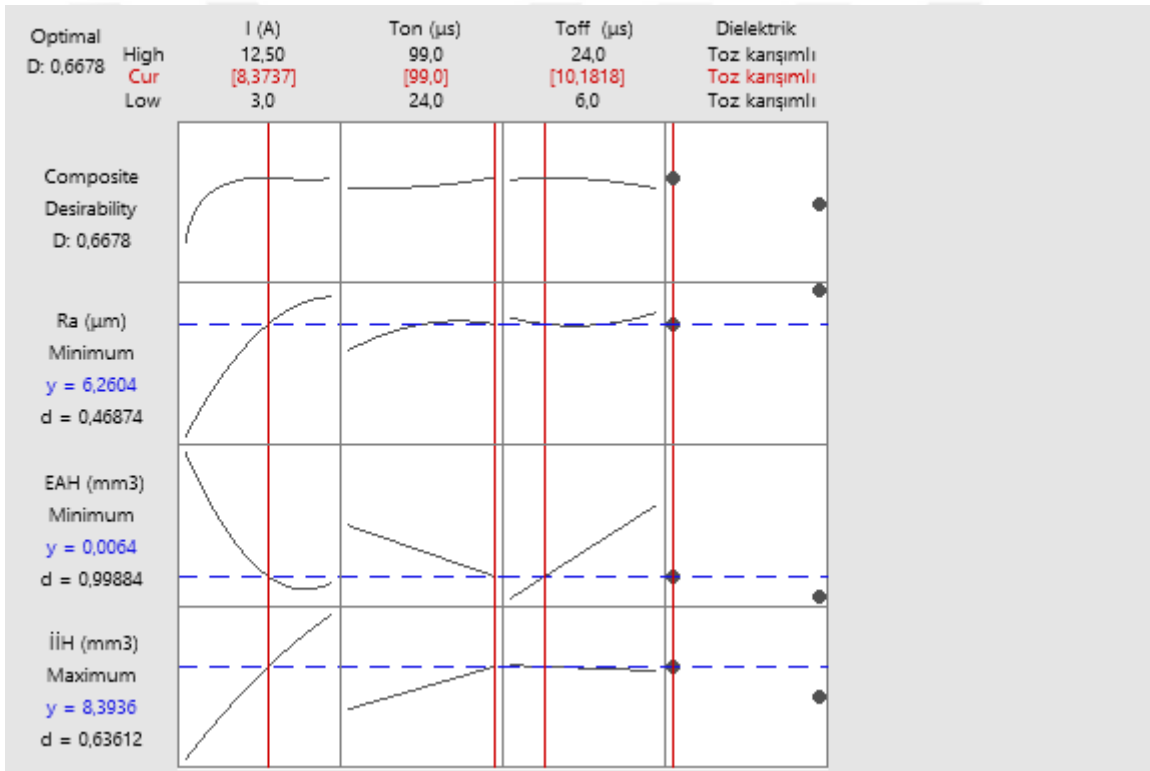
4.1.4. Deney sonuçlarının optimizasyonu

Her üç performans çıktısı için regresyon denklemleri elde edildikten sonra yazılımın “Response Optimizer” komutu kullanılarak parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İdeal işleme performansı yaklaşımı olarak minimum R_a , minimum EAH ve maksimum İİH belirlenmiş; tüm hedeflerin ağırlığı ve önemi bir alınmıştır (Çizelge 4.14).

Çizelge 4.14. Optimizasyon parametreleri

Yanıt	Hedef	En Düşük Değer	Hedeflenen Değer	En Yüksek Değer	Ağırlık	Önem
R _a (μm)	Minimum		3,2337	8,931	1	1
EAH (mm ³ /dk)	Minimum		0,0054	0,86097	1	1
İİH (mm ³ /dk)	Maksimum	0,92237	12,6674		1	1

Çizelge 4.14'teki parametrelerle gerçekleştirilen optimizasyonun sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Optimizasyon sonuçları

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere en yüksek İİH, en düşük EAH ve en düşük R_a için ideal işleme parametreleri I=8,3737A, T_{on}=99μs, T_{off}=10,1818μs ve toz karışımı dielektrik olarak bulunmuştur. Seçilen parametreler minimum R_a şartını %46,874 oranında, minimum EAH şartını %99,884 oranında, maksimum İİH şartını %63,612 oranında sağlamıştır. Ortalama arzu edilebilirlik oranı %66,78 olarak bulunmuştur. Düşük R_a ve yüksek İİH şartlarının sağlanma oranı düşük çıkmıştır, bunun nedeni İİH ve R_a arasında doğru orantı olmasıdır [36].

Deneilerin gerçekleştirildiği tezgahta belirli I, T_{on} veya T_{off} değerleri seçilebilmektedir. Bu nedenle doğrulama deneyinin işleme parametreleri tezgahta mevcut olan en yakın değerlere yuvarlanmıştır. Sonuç olarak işleme parametreleri I=9A, T_{on}=99µs, T_{off}=12µs ve toz karışımı dielektrik olarak belirlenmiştir. Belirlenen parametreler doğrultusunda yazılımın “Predict” komutu ile model tarafından tahmin edilen değerler elde edilmiştir. Buna göre, model İİH değerini 9,04071 mm³/dk, EAH değerini 0,016305 mm³/dk, R_a değerini 6,47121 µm olarak öngörmüştür (Çizelge 4.15).

Çizelge 4.15. Model tarafından öngörülen doğrulama deneyi sonuçları

Yanıt Türü	Tahmini Değer	Standart Hata	%95 Güven Aralığı	%95 Öngörü Aralığı
İİH (mm ³ /dk)	9,04071	0,413867	(8,08634; 9,99509)	(7,43029; 10,6511)
EAH (mm ³ /dk)	0,0163046	0,0357231	(-0,0681671; 0,100776)	(-0,125896; 0,158506)
R _a (µm)	6,47121	0,317979	(5,69315; 7,24928)	(5,22580; 7,71663)

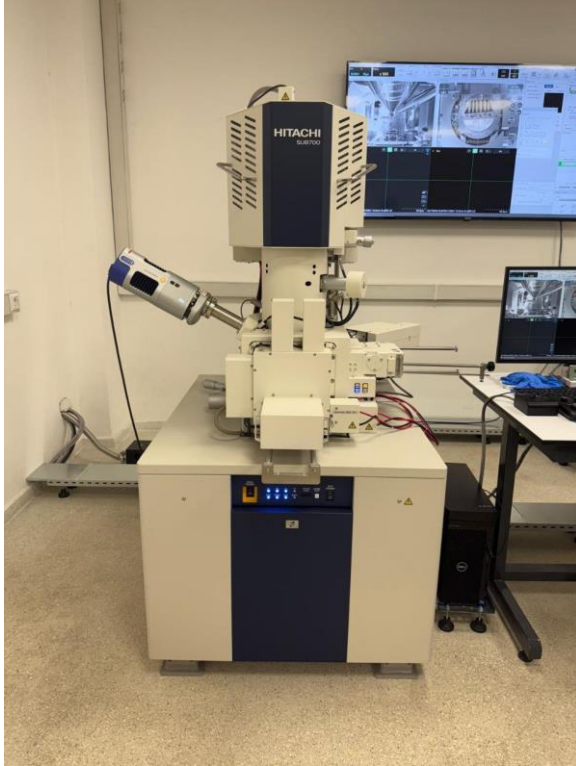
Doğrulama deneyinin İİH değeri 8,06939 mm³/dk, EAH değeri 0,0188632 mm³/dk ve R_a değeri 6,805 µm olarak bulunmuştur. Buna göre geliştirilen model İİH’yi -0,971318 mm³/dk sapma ve %12,04 hatayla, EAH’yi 0,0025586 mm³/dk sapma ve 13,56% hatayla, R_a’yı 0,33412 sapma ve %4,91 hatayla tahmin etmiştir (Çizelge 4.16). EAH ve R_a modelin %95 güven aralığı içindeyken İİH %95 öngörü aralığı içindedir ancak %95 güven aralığının dışındadır. Her üç performans kriteri için de modelin öngörülleri gerçek sonuçlara göre daha iyimserdir.

Çizelge 4.16. Model tarafından öngörülen sonuçlarla gerçek sonuçların kıyaslanması

Yanıt Türü	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Sapma	Yüzde Hata (%)
İİH (mm ³ /dk)	8,06939	9,04071	-0,97131	12,04%
EAH (mm ³ /dk)	0,0188632	0,0163046	0,0025586	13,56%
R _a (µm)	6,805	6,47121	0,33412	4,91%

4.2. Yüzey Görüntüleme ve Kimyasal Analiz Sonuçları

Deneylemler sonrasında numuneler taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile görüntülenmiş, numunelerin kimyasal bileşimini tayin etmek amacıyla enerji dağılım X-ışını spektrometresi (EDS) analizi gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.1. SEM/EDS analizlerinin gerçekleştirildiği cihaz

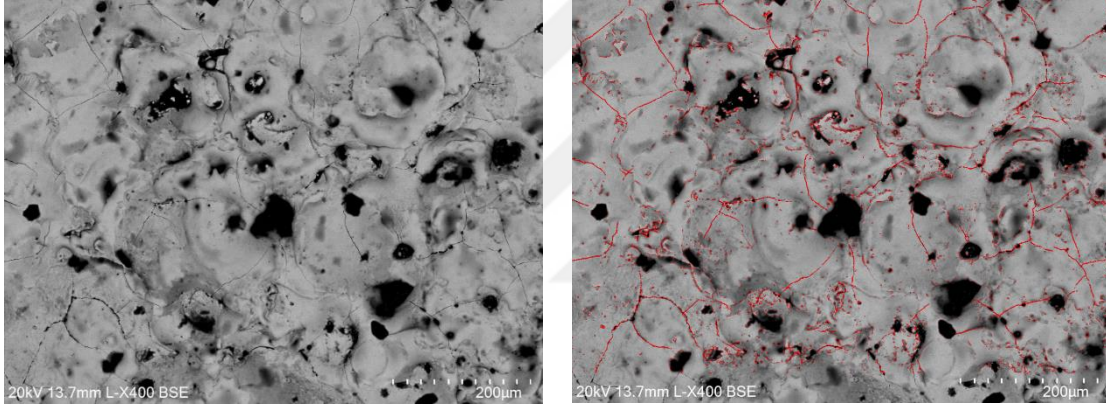
4.2.1. SEM görüntülerinin değerlendirilmesi

Numunelerin işlenmiş yüzeylerine ait SEM görüntüleri 400x büyütmeyle elde edilmiştir. Sonrasında bu görüntüler incelenerek numunelerin çatlak oranları hesaplanmıştır. Bu amaçla Python programlama dili kullanılarak görüntülerdeki mikro çatlakları tespit eden, işaretleyen ve çatlak oranını hesaplayan bir algoritma geliştirilmiştir (Ek-3).

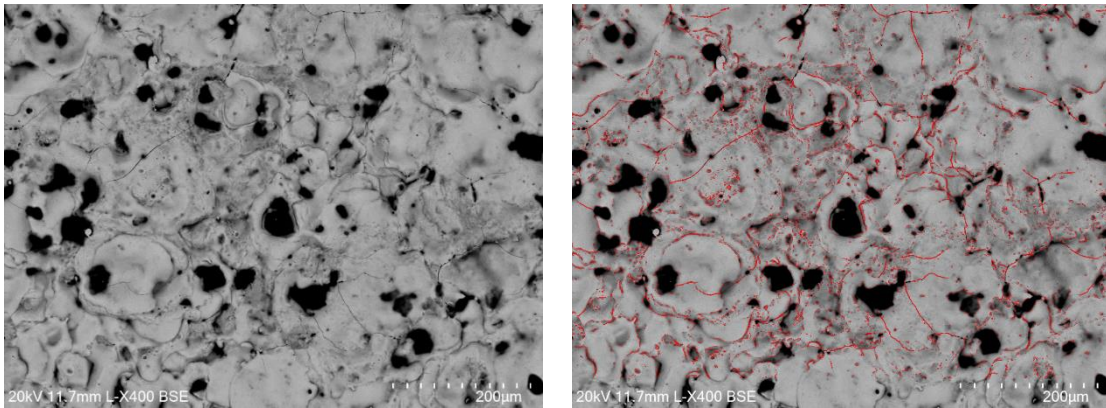
Algoritma, ilk olarak yüklenen görüntüyü siyah-beyaz tona çevirir. Siyah-beyaz görüntüde ani renk tonu geçişi olan bölgeleri kenar olarak tespit eder. Daha sonra görüntüyü iskelet biçimine getirir, yani görüntü üzerindeki detayları bir piksel kalınlıkta çizgiler halinde gösterir. Görüntülerde yuvarlak hatlı, sınırları belirsiz, büyük siyah lekeler şeklinde

görülen yapılar mikro çatlak olmayıp karbon kalıntılarıdır. Algoritma; ince, uzun ve dallı yapıda siyah çizgiler şeklinde görülen çatlaklarla karbon kalıntılarını ayırt etmek amacıyla birbirine temas eden beş pikselden daha büyük siyah bölgeleri tespit eder. Bu bölgelere doğrudan temas eden beyaz pikselleri siyaha boyar. Sonraki adımda kalan beyaz pikselleri kırmızıya boyar ve son görüntüde kırmızı renk pikselleri orijinal görüntünün üzerine ekler. Bu sayede mikro çatlak olduğu tahmin edilen siyah lekeler kırmızıyla işaretlenirken karbon kalıntısı olduğu tahmin edilen siyah lekeler işaretlenmez. Son olarak kırmızı piksellerin sayısını tüm piksellerin sayısına bölerek çatlak oranını hesaplar.

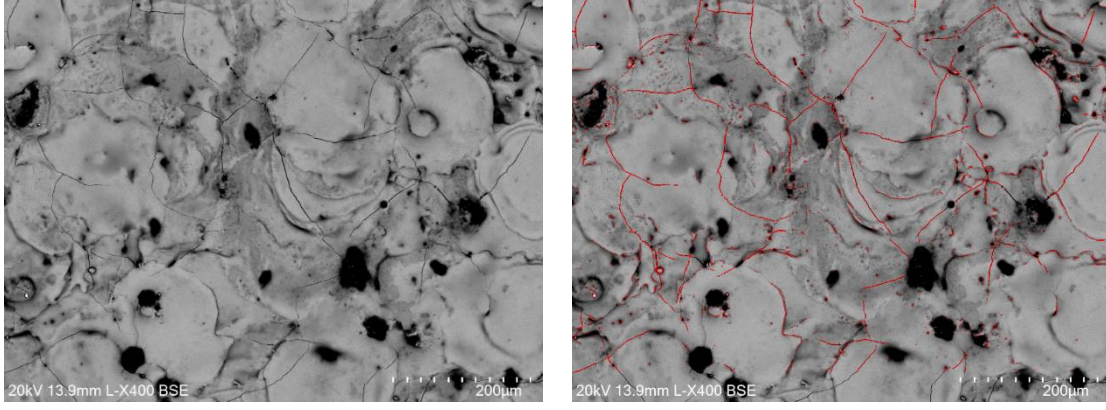
Resim 4.2-4.19'da SEM görüntülerinin asılları ve geliştirilen algoritma kullanılarak mikro çatlakları kırmızıyla işaretlenmiş versiyonları verilmiştir.



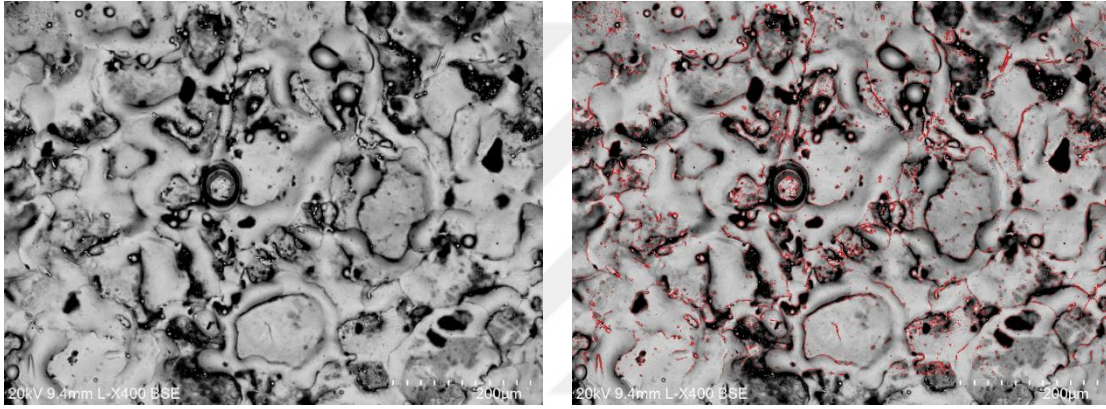
Resim 4.2. 1 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



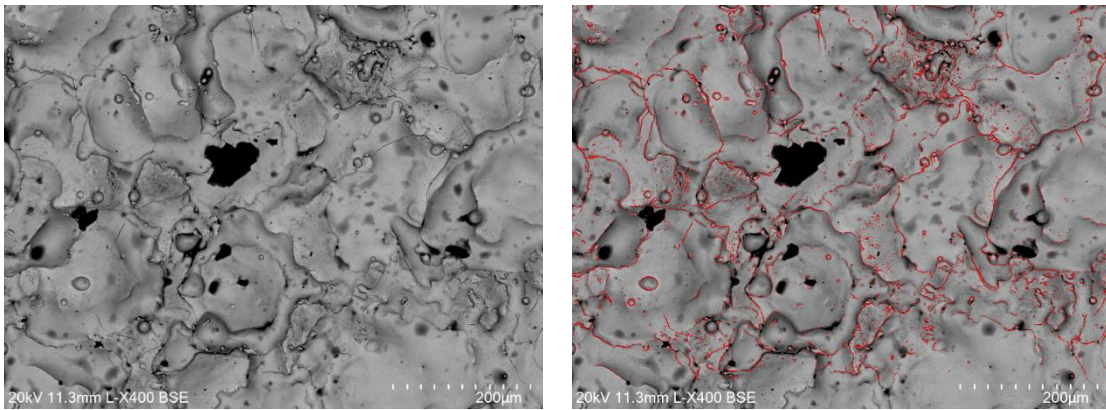
Resim 4.3. 2 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



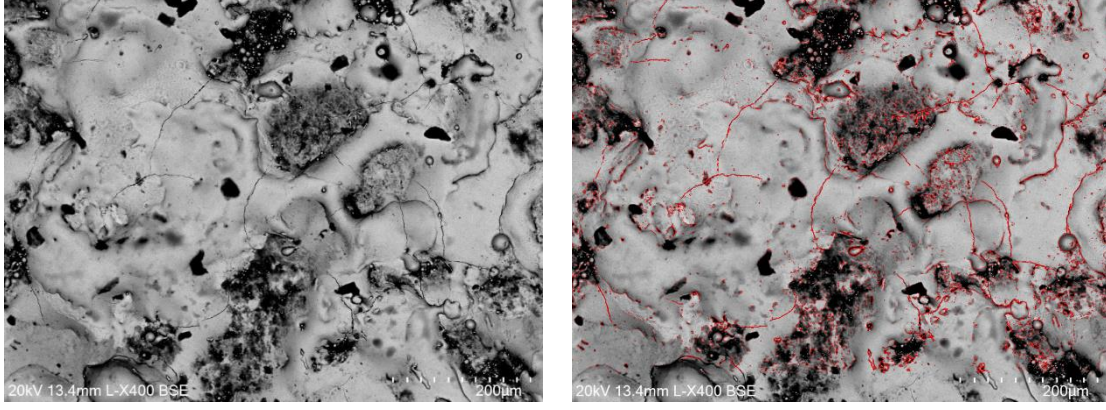
Resim 4.4. 3 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



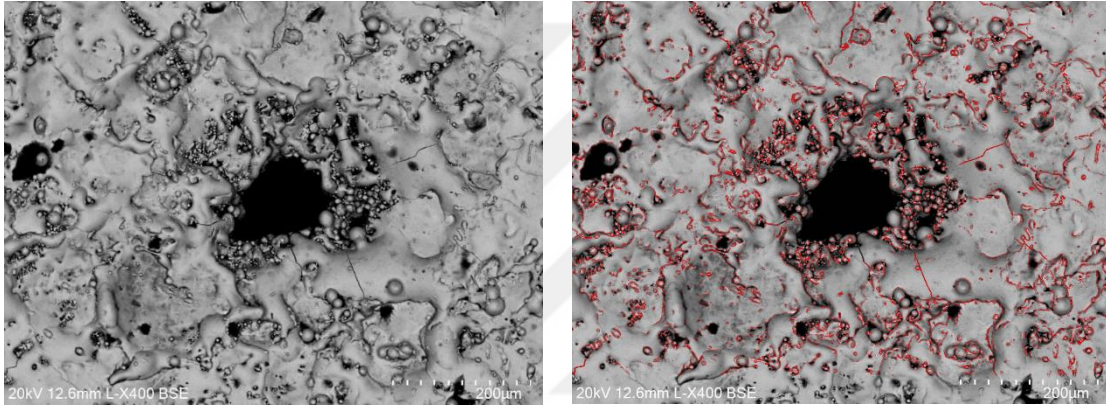
Resim 4.5. 4 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



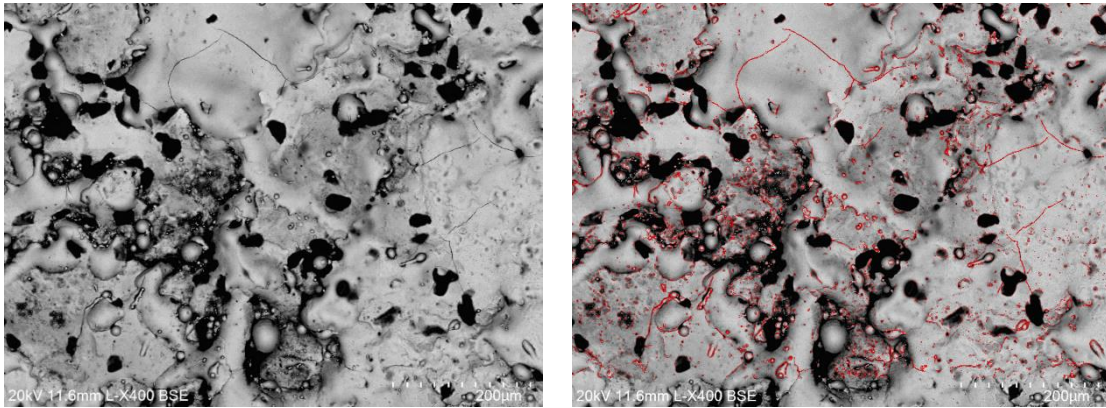
Resim 4.6. 5 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



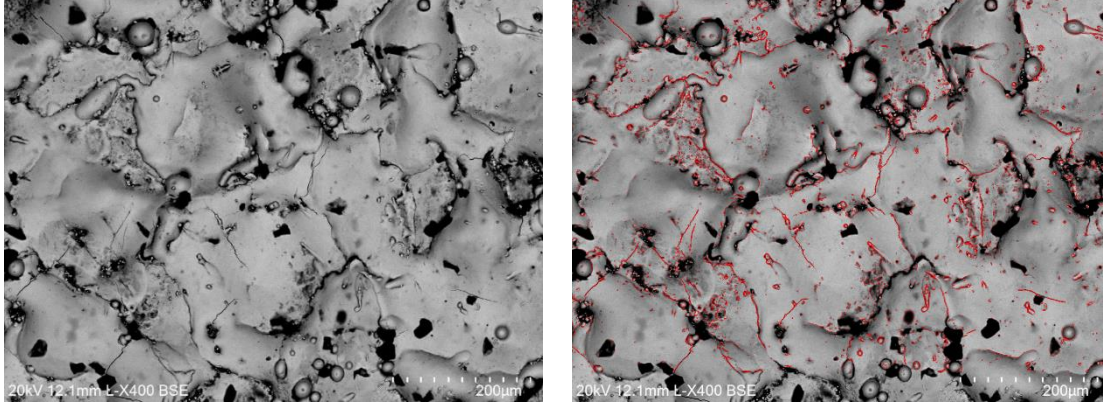
Resim 4.7. 6 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



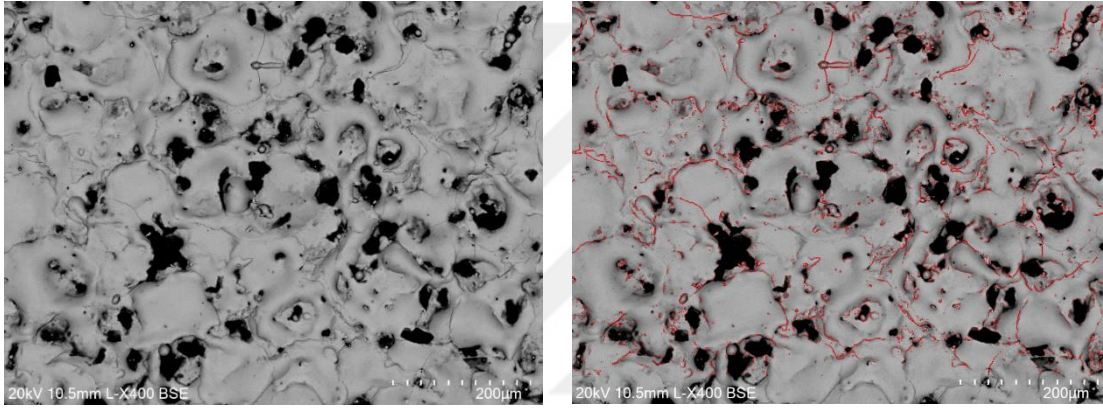
Resim 4.8. 7 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



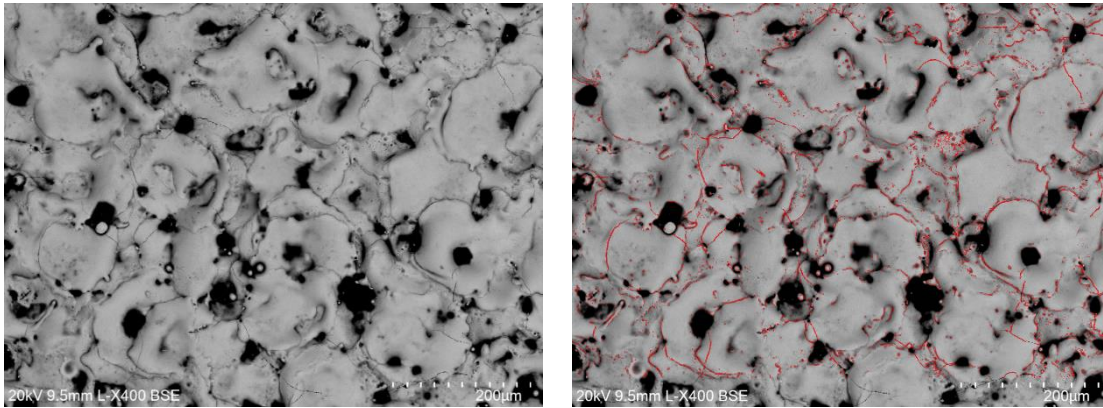
Resim 4.9. 8 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



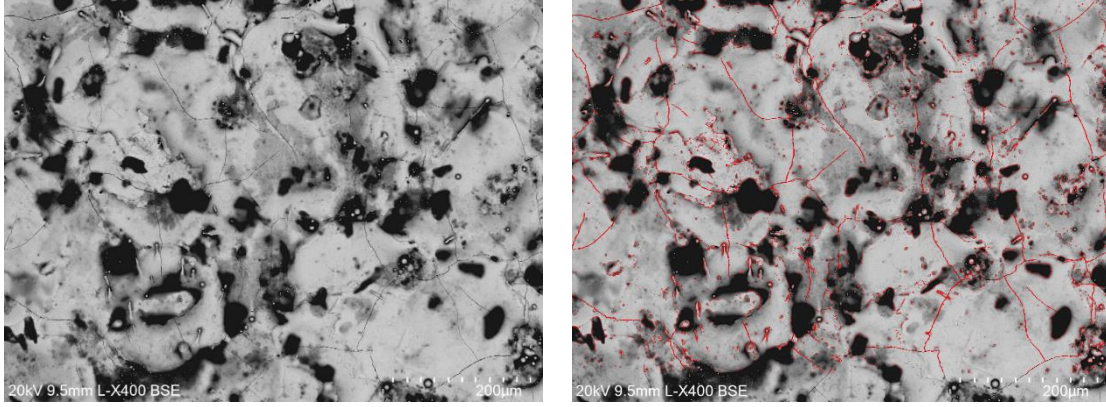
Resim 4.10. 9 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



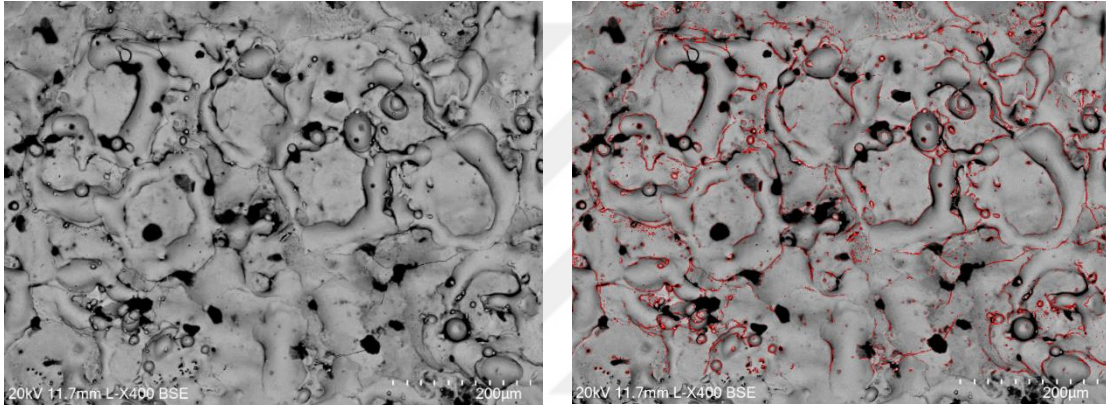
Resim 4.11. 10 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



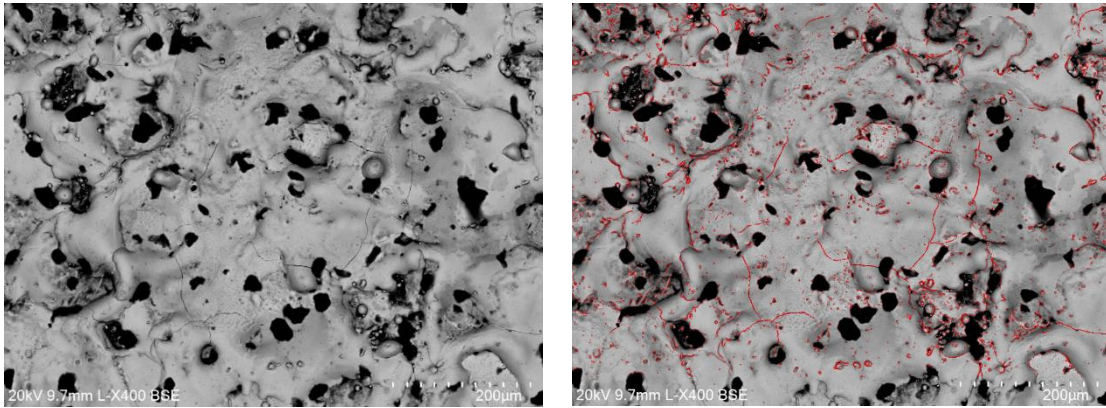
Resim 4.12. 11 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



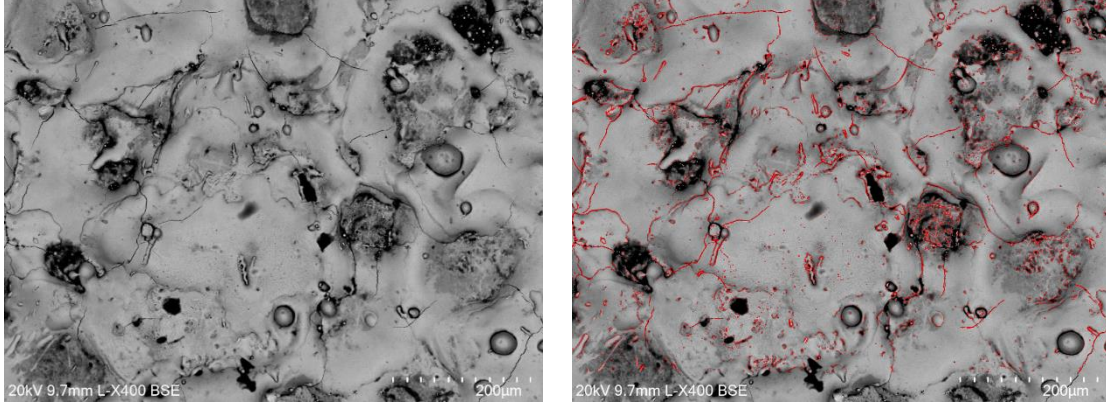
Resim 4.13. 12 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



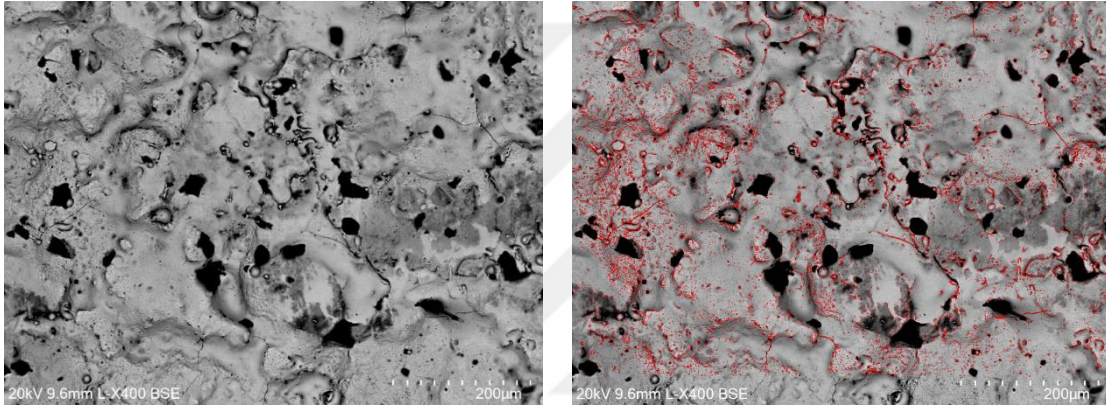
Resim 4.14. 13 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



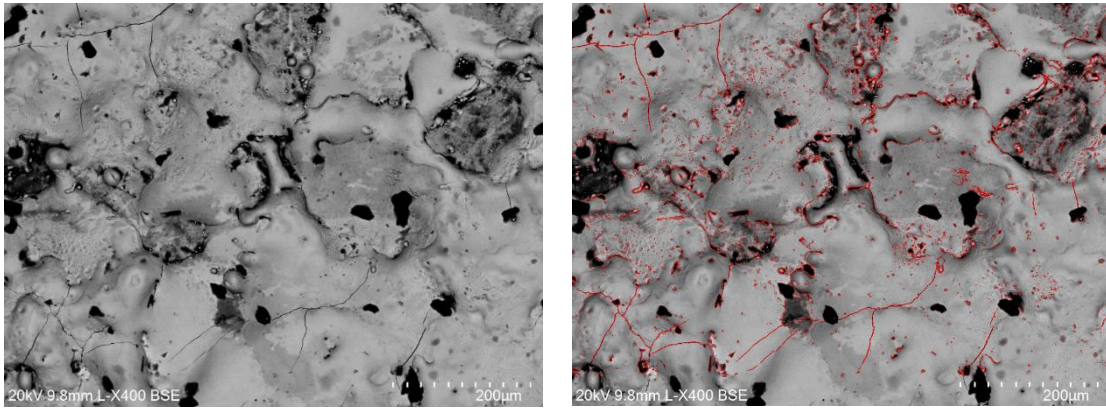
Resim 4.15. 14 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



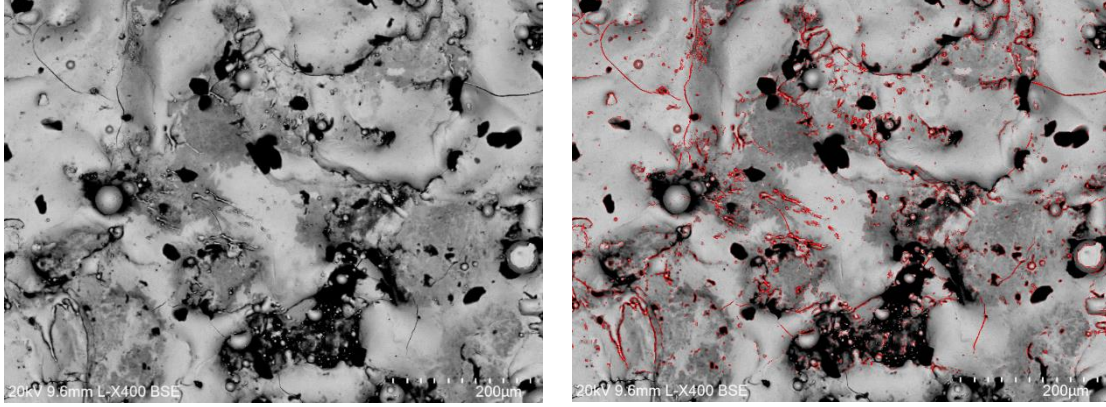
Resim 4.16. 15 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



Resim 4.17. 16 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



Resim 4.18. 17 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri



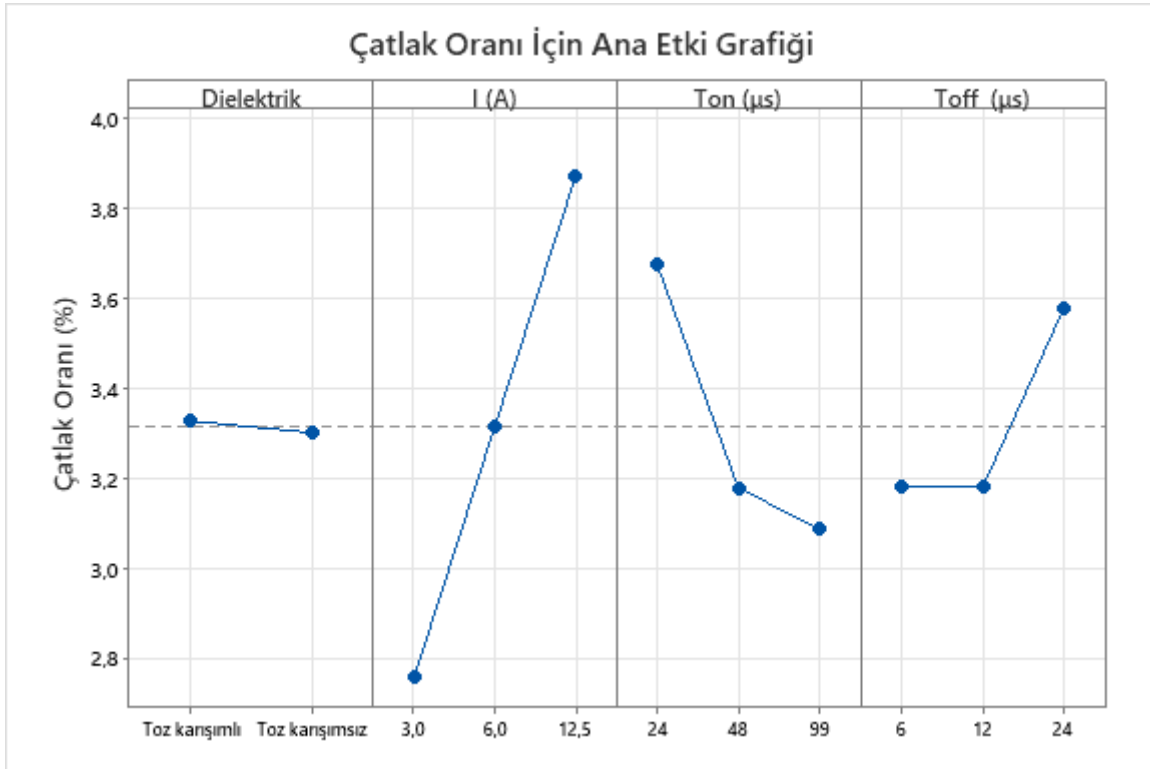
Resim 4.19. 18 no.lu numunenin asıl (solda) ve işlenmiş (sağda) SEM görüntüleri

Çizelge 4.17’de her deneyde kullanılan parametreler ve bu parametrelerle işlenen numunelerin çatlak oranları verilmiştir.

Çizelge 4.17. Numunelerin çatlak oranları

Deney no	Toz konsantrasyonu (g/L)	I (A)	T _{on} (µs)	T _{off} (µs)	Çatlak yoğunluğu (%)
1	0	3	24	6	2,81
2	0	3	48	12	3,44
3	0	3	99	24	1,81
4	0	6	24	12	3,23
5	0	6	48	24	3,20
6	0	6	99	6	3,84
7	0	12,5	24	24	4,85
8	0	12,5	48	6	3,51
9	0	12,5	99	12	3,03
10	12,5	3	24	6	2,59
11	12,5	3	48	12	2,71
12	12,5	3	99	24	3,19
13	12,5	6	24	12	3,27
14	12,5	6	48	24	3,11
15	12,5	6	99	6	3,25
16	12,5	12,5	24	24	5,32
17	12,5	12,5	48	6	3,11
18	12,5	12,5	99	12	3,41

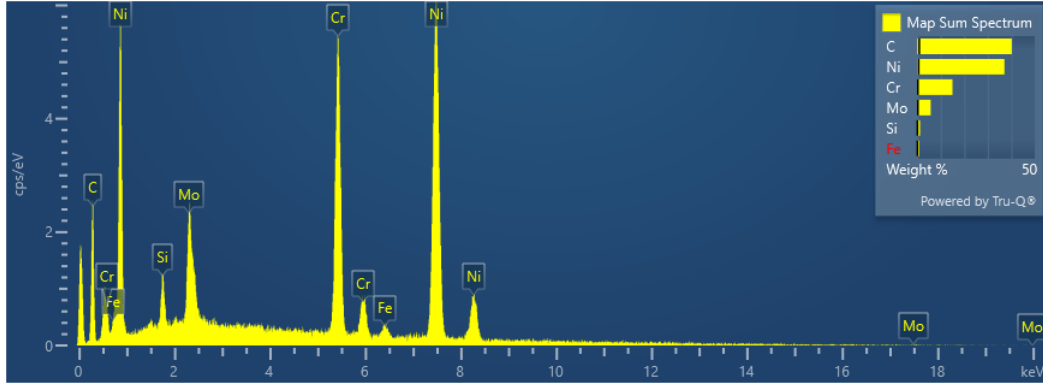
Şekil 4.8’de I , T_{on} , T_{off} ve toz konsantrasyonu parametrelerinin çatlak oranı üzerindeki etkilerini gösteren ana etki grafiği verilmiştir. En yüksek çatlak oranı $I=12,5A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=24\mu s$ ve toz karışımı dielektrik ile %5,32; en düşük çatlak oranı $I=3A$, $T_{on}=99\mu s$, $T_{off}=24\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile %1,81 olarak bulunmuştur. I ve T_{off} arttıkça çatlak oranı artmış, T_{on} arttıkça çatlak oranı azalmıştır. Toz karışımı dielektrik kullanımı çatlak oranını az miktarda arttırmıştır.



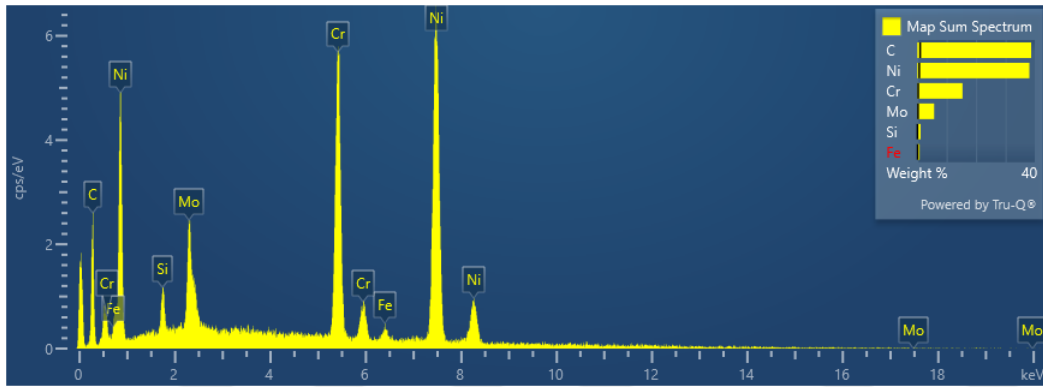
Şekil 4.8. Çatlak oranı ana etki grafiği

4.2.2. EDS analizi sonuçlarının değerlendirilmesi

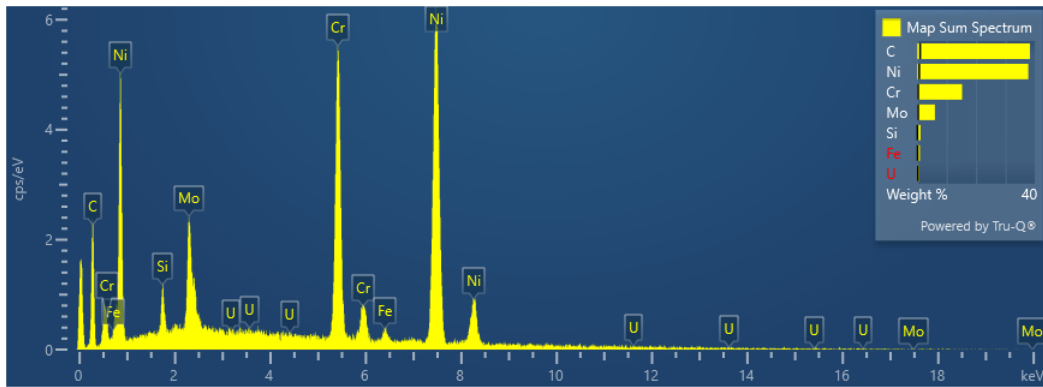
Enerji dağılım X-ışını spektrometresi (EDS) testi bir numuneyi meydana getiren elementlerin türünü ve miktarını tayin etmekte kullanılan bir testtir. Bu yöntemde kimyasal bileşimi tespit edilmek istenen numuneye elektron ışını gönderilerek numuneyi meydana getiren atomlardan elektron kopartılır. Kopan elektronun yerine bağlanan elektron alt enerji seviyesine geçerken X-ışını şeklinde ışınım yapar. Bu ışınımın enerjisi elemente özgü karakteristik bir özellik olup X-ışını enerjisinin ölçümü yoluyla numuneyi meydana getiren elementlerin türü ve kütlece yüzdesi tespit edilir [51]. Numunelerin EDS analizi sonuçları Resim 4.20-4.37’de gösterilmiştir.



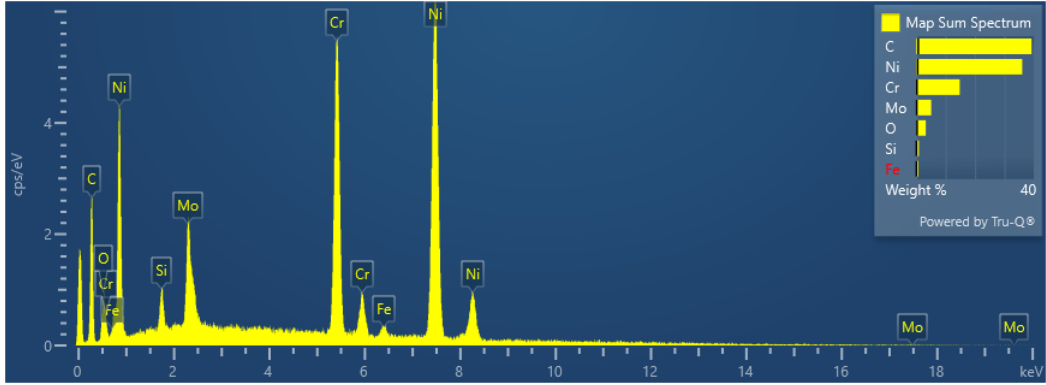
Resim 4.20. 1 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



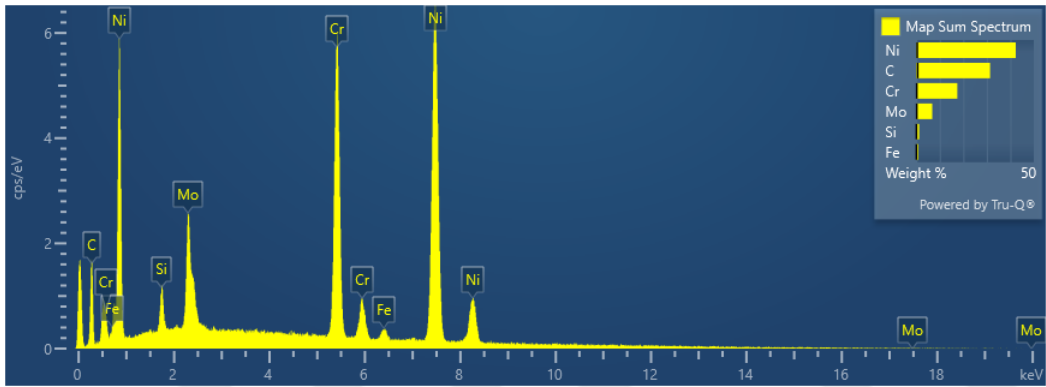
Resim 4.21. 2 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



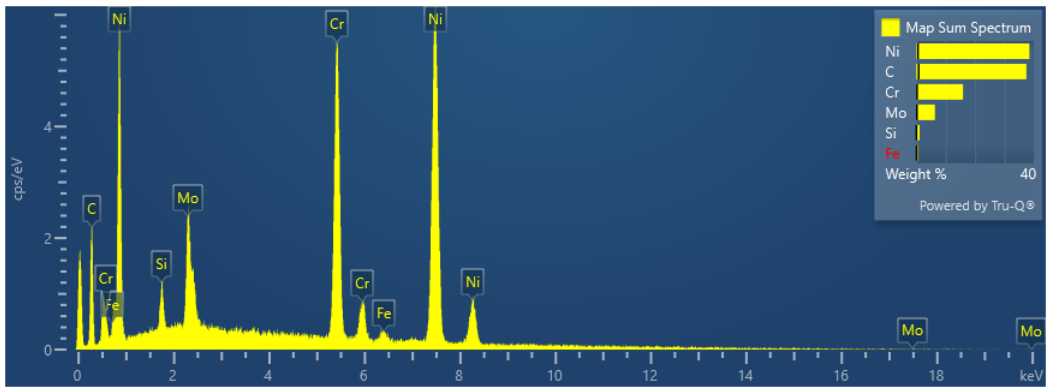
Resim 4.22. 3 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



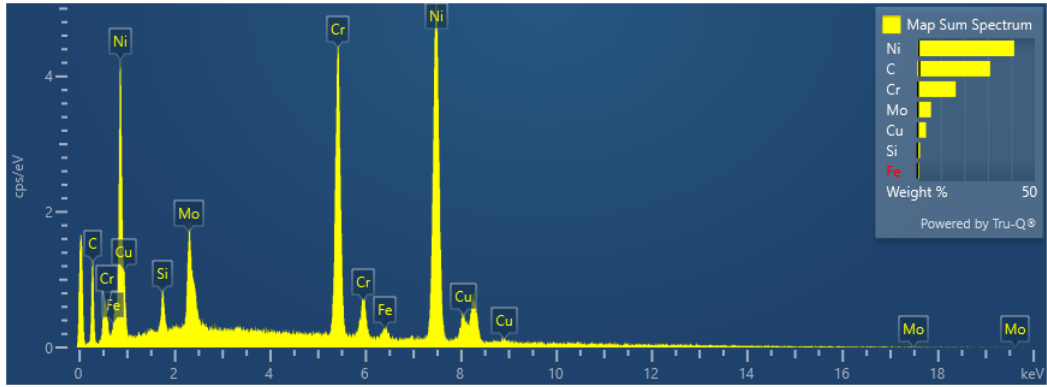
Resim 4.23. 4 no.lu numuneninin EDS analizi sonucu



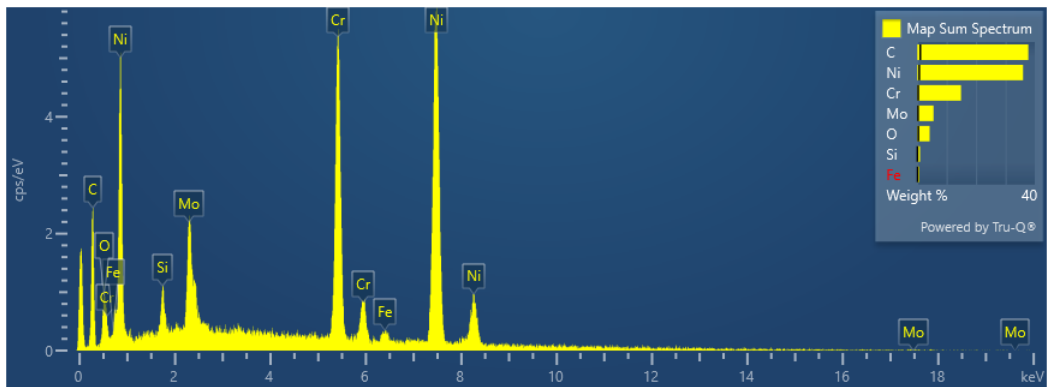
Resim 4.24. 5 no.lu numuneninin EDS analizi sonucu



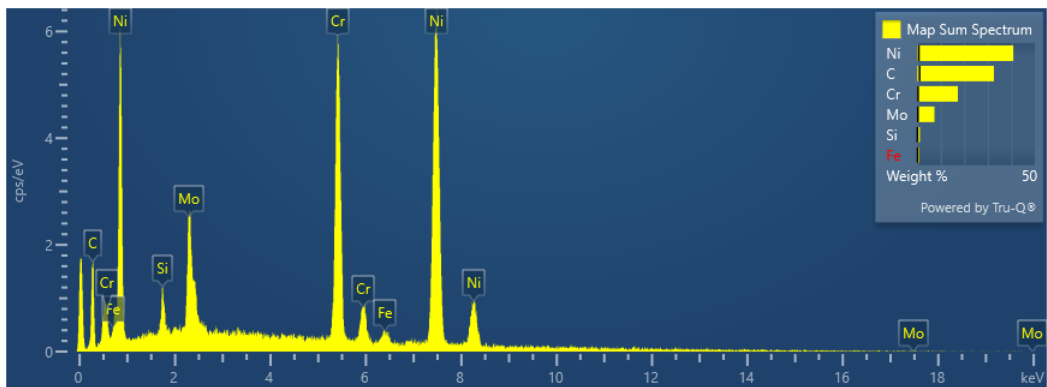
Resim 4.25. 6 no.lu numuneninin EDS analizi sonucu



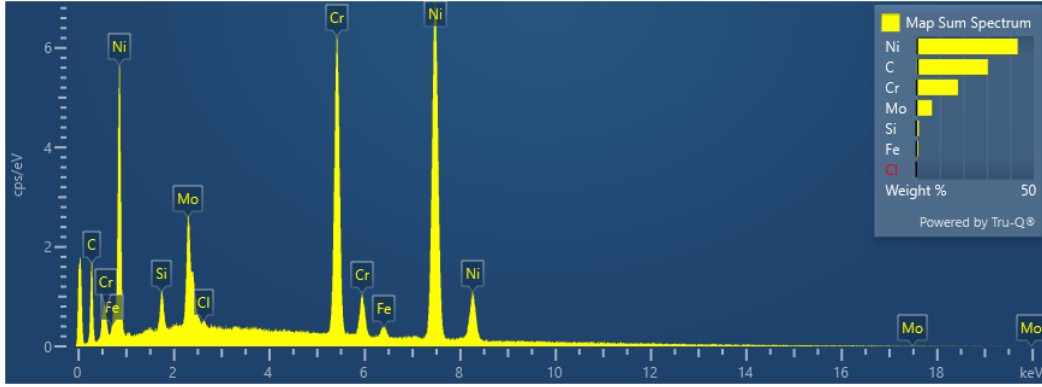
Resim 4.26. 7 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



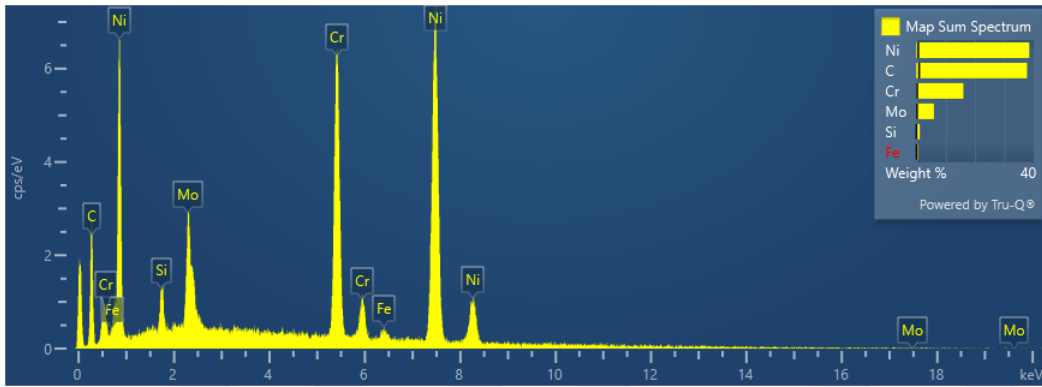
Resim 4.27. 8 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



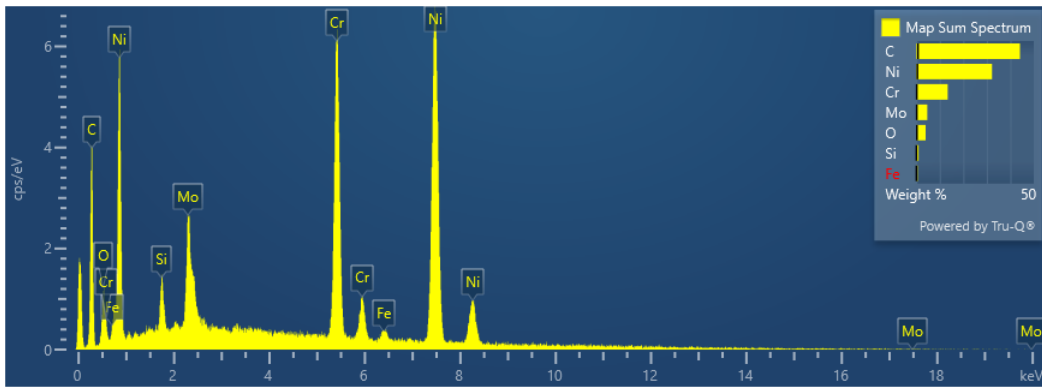
Resim 4.28. 9 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



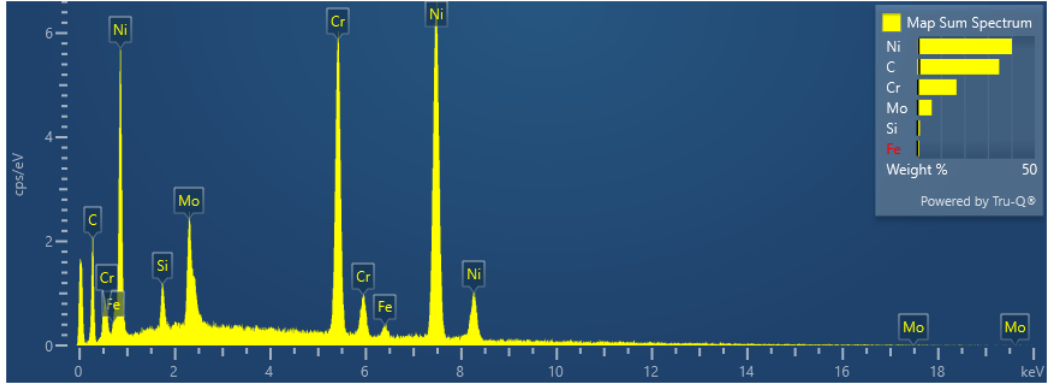
Resim 4.29. 10 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



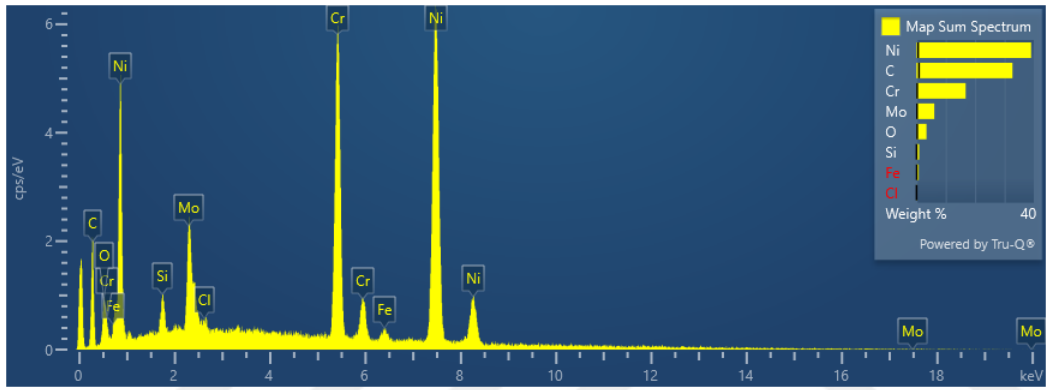
Resim 4.30. 11 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



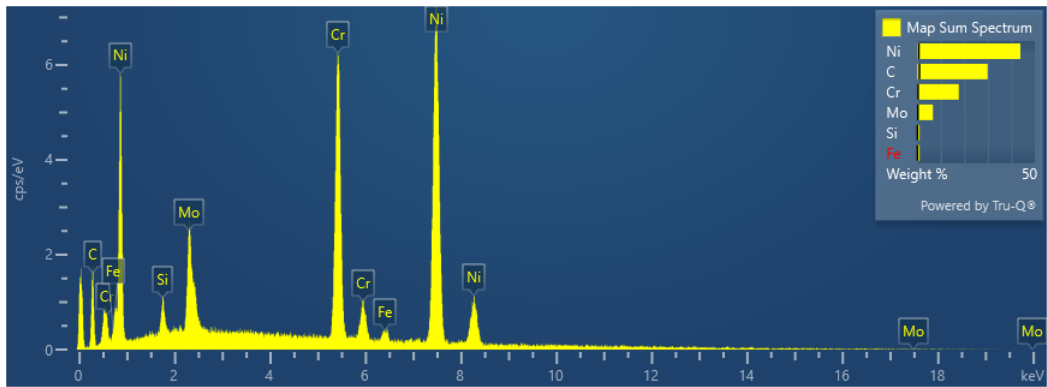
Resim 4.31. 12 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



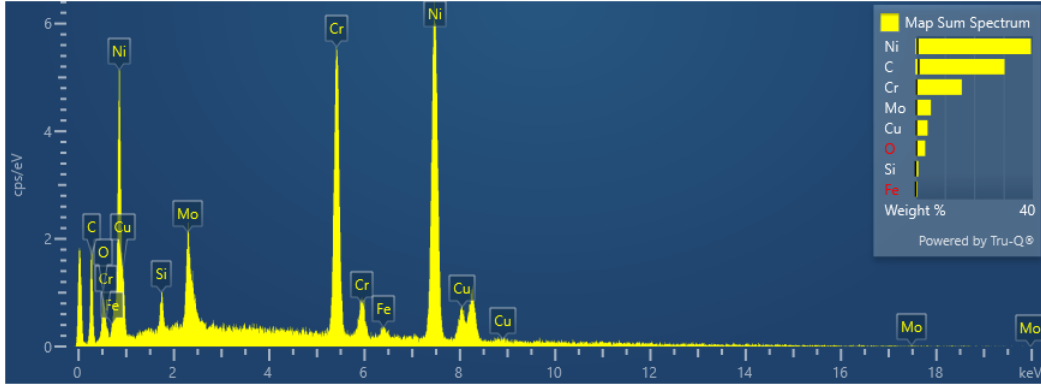
Resim 4.32. 13 no.lu numuneninin EDS analizi sonucu



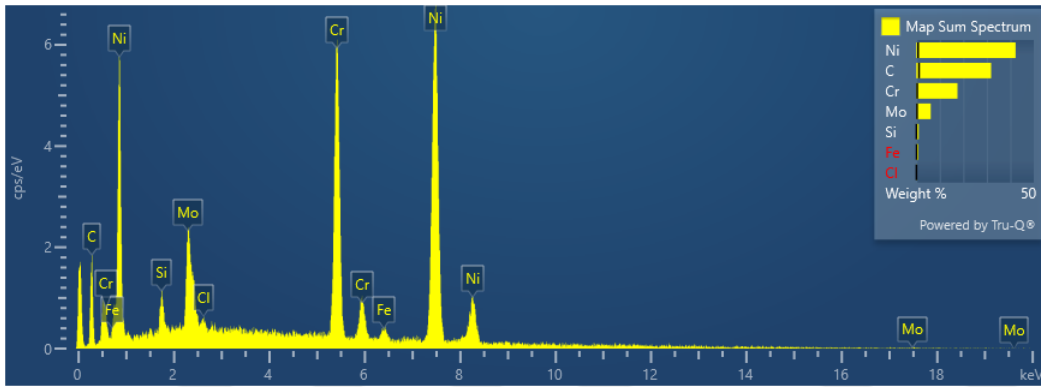
Resim 4.33. 14 no.lu numuneninin EDS analizi sonucu



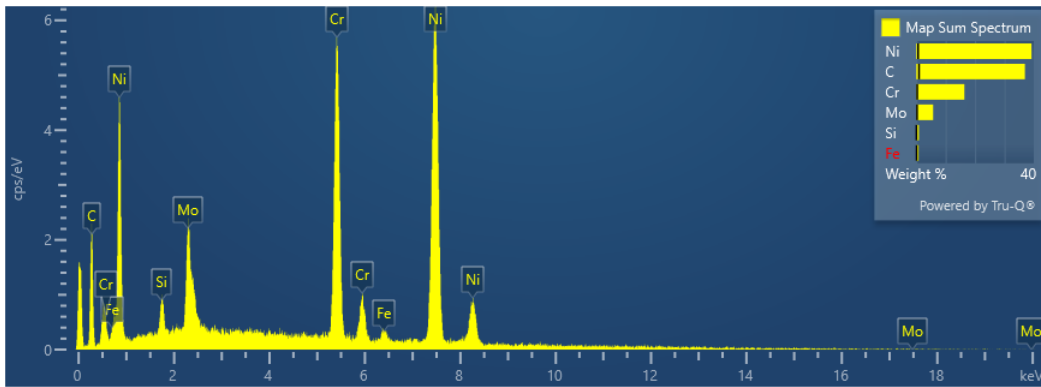
Resim 4.34. 15 no.lu numuneninin EDS analizi sonucu



Resim 4.35. 16 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



Resim 4.36. 17 no.lu numunenin EDS analizi sonucu



Resim 4.37. 18 no.lu numunenin EDS analiz sonucu

EDS analizi sonuçları Çizelge 4.18’de tablo halinde verilmiştir. Tabloda tüm numunelerde bulunan Ni, Cr, Mo, Si, Fe, C elementlerinin kütlece oranları ayrı ayrı verilmişken bazı numunelerde düşük miktarda tespit edilen oksijen, bakır, uranyum ve klor elementleri “diğer” olarak verilmiştir. Önceki çalışmalar EEİ ile işlenen parçalar üzerindeki kalıntı karbonun işlemede kullanılan hidrokarbon bazlı dielektriğin yıkımı sonucunda ortaya

çıkıldığını belirtmiştir [33]. Bununla beraber grafit toz karışımı dielektrikle işlenen numunelerle toz karışimsız dielektrikle işlenen numunelerde tespit edilen karbon oranları arasında kayda değer fark saptanmamıştır. Yalnızca yüksek EAH görülen 7 no.lu ve 16 no.lu numunelerde bakır elementi tespit edilmiştir. İş parçası yüzeyinde tespit edilen bakırın kullanılan bakır elektrottan geçtiği düşünülmektedir. Numunelerin karbon ve diğer elementler hariç element oranları Çizelge 3.1’de verilen element oranlarıyla paralellik göstermektedir.

Çizelge 4.18. Tüm numunelerin EDS analizi sonuçları

Deneý no	Toz konsantrasyonu (g/L)	I (A)	T _{on} (µs)	T _{off} (µs)	Kütlece element oranı (%)						
					Ni	Cr	Mo	Si	Fe	C	Diğer
1	0	3	24	6	36	15	6	2	1	40	0
2	0	3	48	12	37	15	6	2	1	39	0
3	0	3	99	24	36	15	7	2	1	38	1
4	0	6	24	12	36	15	5	1	1	39	3
5	0	6	48	24	42	18	7	1	1	31	0
6	0	6	99	6	38	16	7	1	1	37	0
7	0	12,5	24	24	40	17	6	2	1	30	4
8	0	12,5	48	6	36	15	6	1	1	38	3
9	0	12,5	99	12	40	17	7	2	1	33	0
10	12,5	3	24	6	43	18	7	1	1	30	0
11	12,5	3	48	12	38	16	6	2	1	37	0
12	12,5	3	99	24	33	13	4	2	1	44	3
13	12,5	6	24	12	40	17	6	2	1	34	0
14	12,5	6	48	24	39	16	6	2	1	32	4
15	12,5	6	99	6	43	18	7	2	1	29	0
16	12,5	12,5	24	24	39	16	5	1	1	30	8
17	12,5	12,5	48	6	42	18	6	1	1	32	0
18	12,5	12,5	99	12	39	17	6	1	0	37	0
Ortalama					39	16	6	2	1	35	1
Karbon ve diğer elementler hariç					61	26	10	2	1		

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada nikel-krom alaşımın EEİ ile işlenmesinde I , T_{on} , T_{off} ve grafit toz konsantrasyonu parametrelerinin İİH, EAH, R_a ve mikro çatlak oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle bir toz karışımlı EEİ deney seti tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneylede kullanılan I değerleri 3, 6, ve 12,5 A; T_{on} değerleri 24, 48 ve 99 μs ; T_{off} değerleri 6, 12 ve 24 μs olarak belirlenmiştir. 2 mm işleme derinliğiyle toplam 18 deney gerçekleştirilmiştir. Daha sonra işleme YYM ile modellenmiş ve parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonrasında model tarafından öngörülen sonuçlarla doğrulama deneyi sonuçları kıyaslanmış, modelin güvenilirliği test edilmiştir. Son olarak SEM/EDS analizi gerçekleştirilmiş, numunelerin işlenen yüzeylerindeki mikro çatlak oranları ve element oranları hesaplanmıştır.

En yüksek İİH değeri $I=12,5A$, $T_{on}=99\mu s$, $T_{off}=12\mu s$ ve toz karışımlı dielektrik ile 12,667 mm^3/dk ; en düşük İİH $I=3A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=6\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile 0,922 mm^3/dk olarak hesaplanmıştır. İİH'nin I ve T_{on} arttıkça arttığı, T_{off} değeri 12 μs olana kadar artıp bu değerden sonra azaldığı, toz katkı kullanımının İİH'ye olumlu etkisi olduğu görülmüştür. İİH üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla I , T_{on} ve toz konsantrasyonu olduğu, T_{off} 'un İİH üzerinde az etkili olduğu tespit edilmiştir.

En yüksek İİH değeri $I=12,5A$, $T_{on}=99\mu s$, $T_{off}=12\mu s$ ve toz karışımlı dielektrik ile 12,667 mm^3/dk ; en düşük İİH $I=3A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=6\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile 0,922 mm^3/dk olarak hesaplanmıştır. EAH'nin I arttıkça artıp T_{on} arttıkça azaldığı görülmüştür. EAH, T_{off} değeri 12 μs olana kadar azalıp daha sonra artmıştır. Toz karışımlı dielektrik kullanımı özellikle yüksek I ile gerçekleştirilen işlemlerde EAH'de iyileşme sağlamıştır. EAH üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla I , T_{off} ve T_{on} olduğu, toz konsantrasyonunun bu çıktı üzerinde etkisinin zayıf olduğu tespit edilmiştir.

En düşük R_a $I=3A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=6\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile 3,234 μm olarak; en yüksek R_a ise $I=12,5A$, $T_{on}=99\mu s$, $T_{off}=12\mu s$ ve toz karışimsız dielektrik ile 8,931 μm olarak ölçülmüştür. R_a 'nın I ve T_{on} arttıkça arttığı görülmüştür. R_a , T_{off} değeri 12 μs olana kadar artıp daha sonra azalmıştır. Toz karışımlı dielektrik kullanımı özellikle yüksek I ile yapılan işlemlerde R_a 'da düşüşe neden olmuştur. Diğer iki çıktıda olduğu gibi R_a için de en etkili parametre I olarak bulunmuştur. Diğer etkili parametreler sırasıyla toz

konsantrasyonu ve T_{on} olup T_{off} 'un R_a üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu tespit edilmiştir.

Geliştirilen model kullanılarak en yüksek İİH, en düşük EAH ve en düşük R_a hedef çıktılarıyla parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İdeal işleme parametreleri model tarafından $I=9A$, $T_{on}=99\mu s$, $T_{off}=12\mu s$ ve toz karışumlu dielektrik olarak belirlenmiştir. Model; doğrulama deneyi sonuçlarından İİH'yi %12,04, EAH'yi %13,56, R_a 'yı %4,91 hatayla tahmin etmiştir.

Tüm numunelerde mikro çatlak oluşumu görülmüştür. En yüksek çatlak oranı $I=12,5A$, $T_{on}=24\mu s$, $T_{off}=24\mu s$ ve toz karışumlu dielektrik ile %5,32; en düşük çatlak oranı $I=3A$, $T_{on}=99\mu s$, $T_{off}=24\mu s$ ve toz karışumsuz dielektrik ile %1,81 olarak bulunmuştur. Çatlak oranının I ve T_{off} arttıkça artıp T_{on} arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Toz karışumlu dielektrik kullanımı çatlak oranını arttırmıştır.

Tüm numunelerin yüzeyinde dielektrik yıkımı sonucu karbon birikmesi görülmüştür. Toz karışumlu ve toz karışumsuz dielektrikle işlenen numunelerdeki karbon oranlarında anlamlı fark saptanmamıştır. Özellikle yüksek EAH görülen işlemlerde elektrottan iş parçasına malzeme aktarımı olduğu tespit edilmiştir.

Geliştirilen modelin ideal T_{on} değeri olarak belirlemiş olduğu 99 μs deney parametrelerinde üst sınırdır. Bu değer üstüne çıkıldığında işlemin nasıl etkileneceğinin anlaşılması için ileride yapılacak çalışmalarda T_{on} parametresinin üst sınırının daha yüksek belirlenmesi tavsiye edilir. Ek olarak, sonraki çalışmalarda farklı grafit toz konsantrasyonlarının işleme üzerindeki etkisi incelenip ideal toz konsantrasyonu tespit edilebilir veya işleme parametrelerinin yüzey sertleşmesi üzerindeki etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Ho, K. H. ve Newman, S. T. (2003). State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13), 1287-1300.
2. Prakash, C., Kansal, H. K., Pabla, B. S. ve Puri, S. (2016). Multi-objective optimization of powder mixed electric discharge machining parameters for fabrication of biocompatible layer on β -Ti alloy using NSGA-II coupled with Taguchi based response surface methodology. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(9), 4195-4204.
3. Jeswani, M. L. (1981). Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. *Wear*, 70(2), 133-139.
4. Kansal, H. K., Singh, S. ve Kumar, P. (2005). Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(3), 427-436.
5. Kung, K.-Y., Horng, J.-T. ve Chiang, K.-T. (2009). Material removal rate and electrode wear ratio study on the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bonded tungsten carbide. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1-2), 95-104.
6. Ntasi, A., Mueller, W. D., Eliades, G. ve Zinelis, S. (2010). The effect of Electro Discharge Machining (EDM) on the corrosion resistance of dental alloys. *Dental Materials*, 26(12), e237-e245.
7. Kumar, H. ve Davim, J. P. (2011). Role of Powder in the Machining of Al-10%SiCp Metal Matrix Composites by Powder Mixed Electric Discharge Machining. *Journal of Composite Materials*, 45(2), 133-151.
8. Bhattacharya, A., Batish, A., Singh, G. ve Singla, V. K. (2012). Optimal parameter settings for rough and finish machining of die steels in powder-mixed EDM. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5-8), 537-548.
9. Singh, S. ve Yeh, M. F. (2012). Optimization of Abrasive Powder Mixed EDM of Aluminum Matrix Composites with Multiple Responses Using Gray Relational Analysis. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(4), 481-491.
10. Assarzadeh, S. ve Ghoreishi, M. (2013). A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al₂O₃ powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9-12), 1459-1477.
11. Bhattacharya, A., Batish, A. ve Kumar, N. (2013). Surface characterization and material migration during surface modification of die steels with silicon, graphite and tungsten powder in EDM process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(1), 133-140.
12. Jabbaripour, B., Sadeghi, M. H., Shabgard, M. R. ve Faraji, H. (2013). Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(1), 56-68.

13. Kolli, M. ve Kumar, A. (2017). Surfactant and graphite powder–assisted electrical discharge machining of titanium alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(4), 641-657.
14. Singh, A. K., Kumar, S. ve Singh, V. P. (2015). Effect of the addition of conductive powder in dielectric on the surface properties of superalloy Super Co 605 by EDM process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1-4), 99-106. z
15. Talla, G., Sahoo, D. K., Gangopadhyay, S. ve Biswas, C. K. (2015). Modeling and multi-objective optimization of powder mixed electric discharge machining process of aluminum/alumina metal matrix composite. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(3), 369-373.
16. Unses, E. ve Cogun, C. (2015). Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 61(6), 409-418.
17. Long, B. T., Phan, N. H., Cuong, N. ve Jatti, V. S. (2016). Optimization of PMEDM process parameter for maximizing material removal rate by Taguchi's method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5-8), 1929-1939.
18. Singh, J. ve Sharma, R. K. (2016). Assessing the effects of different dielectrics on environmentally conscious powder-mixed EDM of difficult-to-machine material (WC-Co). *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11(4), 374-387.
19. Tripathy, S. ve Tripathy, D. K. (2017). Multi-response optimization of machining process parameters for powder mixed electro-discharge machining of H-11 die steel using grey relational analysis and TOPSIS. *Machining Science and Technology*, 21(3), 362-384.
20. Tripathy, S. ve Tripathy, D. K. (2016). Multi-attribute optimization of machining process parameters in powder mixed electro-discharge machining using TOPSIS and grey relational analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 62-70.
21. Mohal, S. ve Kumar, H. (2017). Parametric optimization of multiwalled carbon nanotube-assisted electric discharge machining of Al-10%SiCp metal matrix composite by response surface methodology. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(3), 263-273.
22. Banh, T.-L., Nguyen, H.-P., Ngo, C. ve Nguyen, D.-T. (2018). Characteristics optimization of powder mixed electric discharge machining using titanium powder for die steel materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 232(3), 281-298.
23. Mohanty, S., Mishra, A., Nanda, B. K. ve Routara, B. C. (2018). Multi-objective parametric optimization of nano powder mixed electrical discharge machining of AlSiCp using response surface methodology and particle swarm optimization. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 609-619.

24. Mondal, G., Surekha, B. ve Dev Choudhury, S. (2018). Investigation on the influence of different powder mixed dielectric in electric discharge machining. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18281-18286.
25. Bains, P. S., Sidhu, S. S., Payal, H. S. ve Kaur, S. (2019). Magnetic field influence on surface modifications in powder mixed EDM. *Silicon*, 11(1), 415-423.
26. Dharmendra, B. V., Kodali, S. P. ve Nageswara Rao, B. (2019). A simple and reliable Taguchi approach for multi-objective optimization to identify optimal process parameters in nano-powder-mixed electrical discharge machining of INCONEL800 with copper electrode. *Heliyon*, 5(8), e02326.
27. Jadam, T., Sahu, S. K., Datta, S. ve Masanta, M. (2019). EDM performance of Inconel 718 superalloy: Application of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) added dielectric media. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(8), 305.
28. Rouniyar, A. K. ve Shandilya, P. (2019). Fabrication and experimental investigation of magnetic field assisted powder mixed electrical discharge machining on machining of aluminum 6061 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(12), 2283-2291.
29. Rouniyar, A. K. ve Shandilya, P. (2021). Optimization of process parameters in magnetic field assisted powder mixed EDM of aluminium 6061 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(16), 2998-3014.
30. Sahu, S. K. ve Datta, S. (2019). Experimental studies on graphite powder-mixed electro-discharge machining of Inconel 718 super alloys: Comparison with conventional electro-discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(2), 384-402.
31. Huu, P.-N. (2020). Multi-objective optimization in titanium powder mixed electrical discharge machining process parameters for die steels. *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4063-4079.
32. Alhodaib, A., Shandilya, P., Rouniyar, A. K. ve Bisaria, H. (2021). Experimental investigation on silicon powder mixed-EDM of Nimonic-90 superalloy. *Metals*, 11(11), 1673.
33. Mughal, M. P., et al. (2021). Surface modification for osseointegration of Ti6Al4V ELI using powder mixed sinking EDM. *Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 113, 104145.
34. Ramesh, S. ve Jenarathanan, M. (2021). Optimizing the powder mixed EDM process of nickel based super alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 235(4), 1092-1103.
35. Jameson, E. C. (2001). *Electrical discharge machining*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, Machining Technology Association.

36. El-Hofy, H. (2019). *Fundamentals of machining processes: Conventional and nonconventional processes* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group.
37. El-Hofy, H. (2005). *Advanced machining processes: Nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill.
38. Benedict, G. F. (1987). Nontraditional manufacturing processes. In *Manufacturing engineering and materials processing, No. 19*. New York: M. Dekker.
39. Youseff, H. ve El-Hofy, H. (2021). *Non-traditional and advanced machining technologies* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
40. Sanghani, C. R. ve Acharya, D. G. D. (2014). A review of research on improvement and optimization of performance measures for electrical discharge machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 4(1), 433-450.
41. Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology* (2nd ed.). In *Tribology series*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley.
42. Kibria, G. (2019). *Micro-Electrical Discharge Machining Processes: Technologies and Applications*. In *Materials Forming, Machining and Tribology Series*. Singapore: Springer Singapore Pte. Limited.
43. Abdudeen, A., Abu Qudeiri, J. E., Kareem, A., Ahammed, T. ve Ziout, A. (2020). Recent advances and perceptive insights into powder-mixed dielectric fluid of EDM. *Micromachines*, 11(8), 754.
44. İnternet: Dentaurem. (2025). *NiCr alloys*. URL: <https://www.dentaurem.de/eng/nicr-alloys-32560.aspx> Son Eriřim Tarihi: 25.03.2025
45. İnternet: Dentaurem. (2025). *989-339-00_2024-10.pdf*. URL: https://www.dentaurem.de/files/989-339-00_2024-10.pdf Son Eriřim Tarihi: 25.03.2025
46. Işık, A. T. (2022). *Semente Karbürün Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
47. Myers, R. H., Montgomery, D. C. ve Anderson-Cook, C. M. (2011). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons.
48. Carley, K. M., Kamneva, N. Y. ve Reminga, J. (2004). Response Surface Methodology. *CASOS Tech. Rep.*, 31.
49. Ayhan, E. (2023). *Elektrokimyasal Delme İşleminde Delik Kalitesinin İyileştirilmesi Üzerine Bir Çalışma*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
50. Kul, S. (2014). Interpretation of statistical results: What is p value and confidence interval? *Plevra Bulletin*, 8(1), 11-13.
51. Hodoroaba, V.-D. (2020). Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). In *Characterization of Nanoparticles*, Elsevier, 397-417.

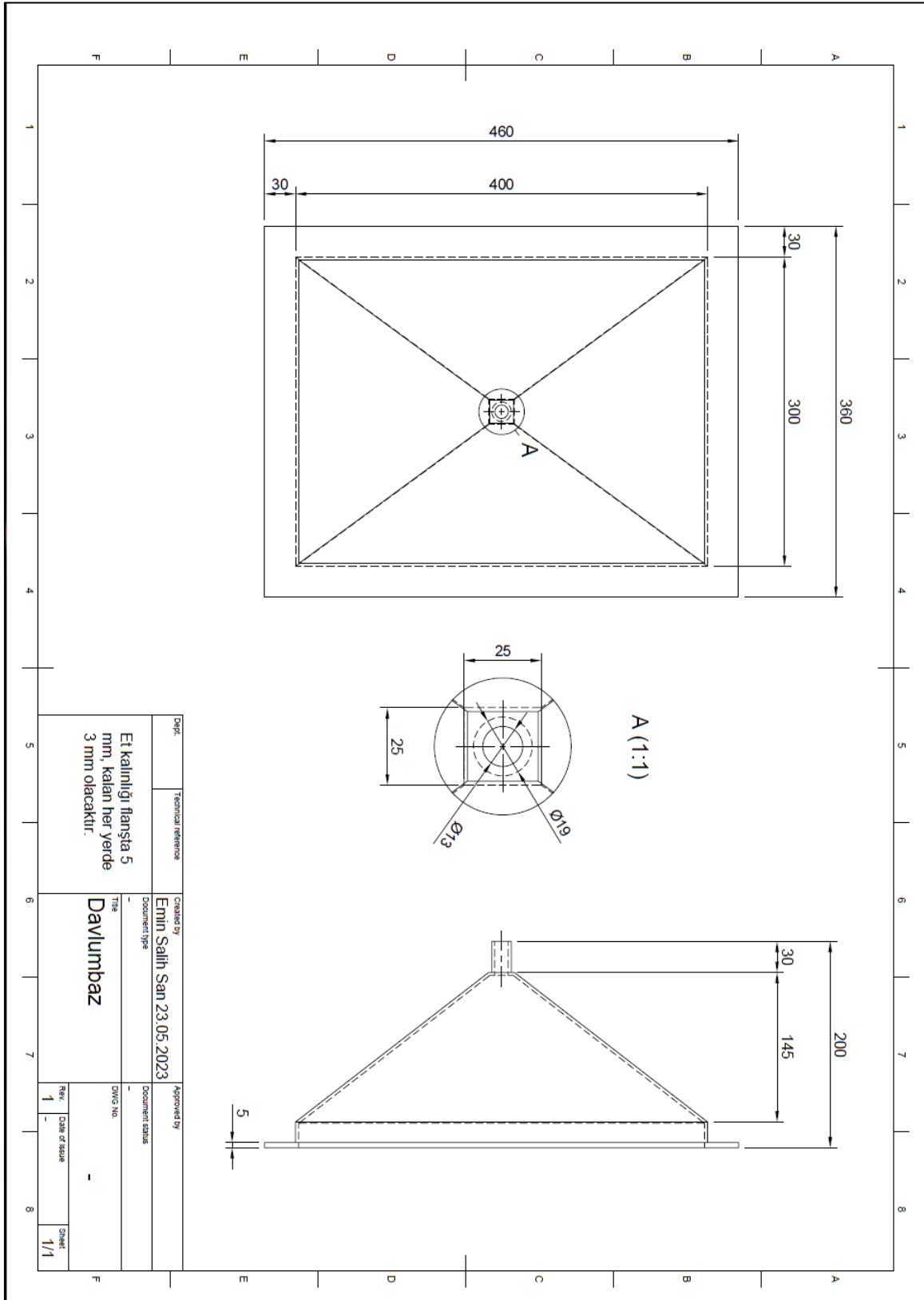


EKLER

EK-1. EEİ tezgahının teknik özellikleri

No :	Specification (Özellik)	Sub (Alt)		Unit (birim)
1	Machine dimensions (Ölçüler)	(X) Width (En)	1170	mm
		(Y) Depth (Derinlik)	1200	mm
		(Z) Height (Yükseklik)	2100	mm
		Weight (Ağırlık)	600	kg
2	Maximum work piece dimensions (Maksimum iş parçası ölçüleri)	(X) Width (En)	660	mm
		(Y) Depth (Derinlik)	410	mm
		(Z) Height (Yükseklik)	360	mm
		Weight (Ağırlık)	600	kg
3	Work table dimensions (İş tablası boyutları)	(X) Width (En)	550	mm
		(Y) Depth (Derinlik)	250	mm
4	Movements (Hareketler)	X axis	300	mm
		Y axis	200	mm
	Ram (Başlık)	Z axis	330	mm
	Head (Kalıp yükseklik)	W axis	300	mm
5	Spindle rotating rate (Spindle dönüş hızı)	C axis	150~190	rpm
6	Electrodes (Kullanılabilen elektrodlar)	Diameter	0,3~3	mm
		Lenght	200, 400, 600	mm
7	Water pressure (Su basıncı)		20~120	bar
8	Maximum power consumption (Maksimum güç tüketimi)		3,5	kVA
9	Line Voltage (Şebeke gerilimi)		3x220/380	VAC
10	Power Levels (Güç seviyeleri)		1/16 to 1	10 levels
11	On time levels (Ark süreleri)		4 to 200 µSec	12 levels
12	Off time levels (Ark aralığı süreleri)		4 to 200 µSec	12 levels
13	Gap voltage (Gap voltajı değeri)		20 to 80 volts	adjustable
14	Maximum machining current (Maksimum işleme akımı)		30	A
15	Capacitor bank (Kondansatör kutusu)	0.22F, 0.47µF, 1µF, 2µF, 3µF, 4µF	6 levels	µF

EK-2. Toz karışımı EEİ deney setinde kullanılan polipropilen dielektrik tankının teknik resmi



EK-3. Çatlak oranı tespit algoritması

```

import numpy as np
from skimage import io, filters, morphology, img_as_ubyte
from scipy.ndimage import label, binary_dilation
import matplotlib.pyplot as plt

def catlak_orani(dosya_konumu):
    goruntu = io.imread(dosya_konumu)
    gri_goruntu = img_as_ubyte(goruntu)
    goruntu_kenar = filters.sobel(gri_goruntu)
    limit = filters.threshold_otsu(goruntu_kenar)
    goruntu_2 = goruntu_kenar > limit
    iskelet = morphology.skeletonize(goruntu_2)
    siyah_limiti = 50
    siyah = gri_goruntu < siyah_limiti
    siyah_2, num_features = label(siyah)
    siyah_3 = np.zeros_like(siyah, dtype=bool)
    for region_label in range(1, num_features + 1):
        alan = siyah_2 == region_label
        if np.sum(alan) > 5: #bu değerden daha fazla pikselden oluşan siyah lekeler çatlak
sayılmaz#
            siyah_3 |= alan
    siyah_4 = binary_dilation(siyah_3)
    siyah_bolgeye_temas_eden = siyah_4 & iskelet
    iskelet_2 = iskelet.copy()
    iskelet_2 [siyah_bolgeye_temas_eden] = False
    iskelet_2_rgb = np.zeros((iskelet_2.shape[0],
iskelet_2.shape[1], 3), dtype=np.uint8)
    iskelet_2_rgb[iskelet_2 == True] = [255, 0, 0]
    goruntu_3 = np.stack([goruntu] * 3, axis=-1)
    yukseklik, genislik = iskelet_2_rgb.shape[:2]
    for i in range(yukseklik - 70):
        for j in range(genislik):

```

EK-3. (devam) Çatlak oranı tespit algoritması

```
    if np.array_equal(iskelet_2_rgb[i, j], [255, 0, 0]):
        goruntu_3[i, j] = [255, 0, 0]
    kirmizi_piksel = np.sum(np.all(goruntu_3 == [255, 0, 0], axis=-1))
    toplam_piksel = goruntu_3.shape[0] * goruntu_3.shape[1]
    catlak = kirmizi_piksel / toplam_piksel
    return goruntu_3, catlak

dosya_konumu = '/content/1(x400)_0001.jpg' #dosya konumu#

goruntu_3, catlak = catlak_orani(dosya_konumu)
plt.figure(figsize=(20, 10))
plt.imshow(goruntu_3)
plt.axis('off')
plt.show()

print(f"Çatlak Oranı: %{catlak * 100:.2f}")
```



Gazili olmak ayrıcalıktır