



**ELEKTRİKSEL EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ KULLANILARAK
DELİNEN DELİKLERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Merve EKİCİ

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2020

Merve EKİCİ tarafından hazırlanan “ELEKTRİKSEL EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ KULLANILARAK DELİNEN DELİKLERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

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

Başkan: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

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

Üye: Doç. Dr. Ulaş YAMAN

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

.....

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

Tez Savunma Tarihi: 22/04/2020

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

.....

Merve EKİCİ

22/04/2020

ELEKTRİKSEL EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ KULLANILARAK DELİNEN DELİKLERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Merve EKİCİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2020

ÖZET

Bu çalışmada, elektro erozyon ile işleme (EEİ) metodu kullanılarak 400 ve 500 µm çaplı, delikli dönel pirinç elektrotlar ile Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşım malzemelerinden imal edilmiş iş parçaları üzerinde farklı EEİ işleme parametreleri (akım, işleme süresi, bekleme süresi) ile mikro delikler imal edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, EEİ yöntemi kullanılarak delinen mikro deliklerde delik geometrisini incelemek, elde edilen en iyi geometrik özellikler ile en iyi geometrik özellikleri sağlayan işleme parametrelerini ve bu özellikler üzerinde en etkin işleme parametrelerini belirlemektir. Delik geometrisini incelemek amacıyla çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Her iki çap ölçüsü için Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen deliklerdeki çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin Inconel 718 malzemeye kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Ti-6Al-4V malzemede elde edilen en düşük çap büyümesi: %26,93, koniklik: % 0,38, yüzey pürüzlülüğü: 2,42 µm olarak gerçekleşmiştir. Inconel 718 malzemede elde edilen en düşük çap büyümesi: %70,53, koniklik: %0,59 ve yüzey pürüzlülüğü: 2,32 µm olarak gerçekleşmiştir. Her iki iş parçasında da en düşük çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü 500 µm çapta elde edilmiştir. Delik çapı küçüldükçe hem Ti-6Al-4V'den, hem de Inconel 718 alaşım malzemelerinden imal edilmiş iş parçalarında çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : EEİ, Elektro erozyon ile işleme, Mikro delik delme, Titanyum, Ti-6Al-4V, Inconel 718, Pirinç elektrot,
Sayfa Adedi : 89
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

INVESTIGATION OF GEOMETRIC PROPERTIES OF MICRO HOLES DRILLED BY
USING ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) METHOD

(M. Sc. Thesis)

Merve EKİCİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2020

ABSTRACT

In the present work; 400 and 500 μm micro holes were drilled by using electrical discharge machining (EDM) method with different machining parameters (current, pulse-on time and pulse-off time) on Ti-6Al-4V (titanium) and Inconel 718 work pieces material. Single channel, rotational brass electrodes were used to drill micro holes. The objective of this study is to investigate the geometric properties of micro holes drilled by using EDM method; specify the best geometric properties obtained, the machining parameters to achieve these properties and the most effecting machining parameters on each geometric property. For these purposes, overcut, taper and surface roughness were measured on each experiments. Overcut, taper and surface roughness values are lower on Ti-6Al-4V rather than Inconel 718. For Ti-6Al-4V work piece material, minimum overcut ratio: 26,93%, taper: 0,38%, surface roughness: 2,42 μm . For Inconel 718 work piece material, minimum overcut ratio: 70,53%, taper: 0,59%, surface roughness: 2,32 μm . For both work pieces, lower overcut, taper and surface roughness values were achieved on 500 μm holes. The smaller the diameter of the holes, the lower the overcut, taper and surface roughness values.

Science Code : 91438

Key Words : EDM, Electro discharge machining, Micro hole drilling, titanyum, Ti-6Al-4V, Inconel 718, Brass electrode

Page Number : 89

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Tezimin deneysel aşamasında ve yazımı esnasında yardım ve desteğiyle beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ' a ve deneysel çalışmalara katkılarından dolayı Doç. Dr. Kürşat GÖV' e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca manevi desteğiyle yanımda olan eşim Çağrı EKİCİ' ye, oğlum Sarp EKİCİ' ye ve bu zamana kadarki tüm destekleri için annem Müjgan ÖZCAN, babam Mahir ÖZCAN ve abim Murat ÖZCAN'a da teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Yapılan Çalışmalar.....	3
2.2. Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi.....	28
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	29
3.1. EEİ Tezgahı.....	29
3.2. Elektrot.....	30
3.3. Dielektrik Sıvı	30
3.4. İş parçaları	30
3.5. Ölçümler.....	31
3.6. Deney Tasarımı	34
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .	35
4.1. Deneysel Parametreler	35
4.2. Deneysel Bulguların Değerlendirilmesi	36
4.3. Deneysel Bulguların Yorumlanması	63

Sayfa

4.3.1. ap büyümesi.....	73
4.3.2. Koniklik	74
4.3.3. Yüzey pürüzlülüğü.....	75
5. SONUÇLAR VE �NER�LER	77
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	87



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. EEİ tezgahına ait teknik özellikler	30
Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemesine ait malzeme özellikleri.....	31
Çizelge 4.1. Ti-6Al-4V ve Inconel 718 iş parçalarının delinmesinde kullanılan işleme parametreleri	35
Çizelge 4.2.(a) Ti-6Al-4V iş parçası, 400µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları (1/2 parça).....	37
Çizelge 4.2.(b) Ti-6Al-4V iş parçası 400µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları (2/2 parça).....	37
Çizelge 4.2.(c) Ti-6Al-4V iş parçası 400µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçlarının ortalaması	38
Çizelge 4.3.(a) Ti-6Al-4V iş parçası 500µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları (1/2parça).....	38
Çizelge 4.3.(b) Ti-6Al-4V iş parçası 500µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(2/2parça).....	39
Çizelge 4.3.(c) Ti-6Al-4V iş parçası üzerinde 500µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçlarının ortalaması.....	39
Çizelge 4.4. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı çizelgesi (400 µm).....	40
Çizelge 4.5. İşleme parametreleri - ortalama çap büyümesi çizelgesi(400 µm)	40
Çizelge 4.6. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı çizelgesi (500 µm).....	41
Çizelge 4.7. İşleme parametreleri - ortalama çap büyümesi çizelgesi (500 µm)	42
Çizelge 4.8. İşleme parametreleri - koniklik sinyal-gürültü oranı çizelgesi (400 µm).....	43
Çizelge 4.9. İşleme parametreleri – ortalama koniklik çizelgesi (400 µm).....	44
Çizelge 4.10. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 µm).....	44
Çizelge 4.11. İşleme parametreleri – ortalama koniklik çizelgesi (500 µm).....	45

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.12. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı çizelgesi (400 μm).....	46
Çizelge 4.13. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelgesi (400 μm).....	47
Çizelge 4.14. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 μm).....	47
Çizelge 4.15. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelgesi (500 μm).....	48
Çizelge 4.16.(a) Inconel 718 iş parçası 400 μm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(1/2parça).....	50
Çizelge 4.16.(b) Inconel 718 iş parçası 400 μm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(2/2parça).....	50
Çizelge 4.16.(c) Inconel 718 iş parçası üzerinde 400 μm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçlarının ortalaması.....	51
Çizelge 4.17.(a) Inconel 718 iş parçası 500 μm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(1/2parça).....	51
Çizelge 4.17.(b) Inconel 718 iş parçası 500 μm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(2/2parça).....	52
Çizelge 4.17.(c) Inconel 718 iş parçası üzerinde 500 μm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçlarının ortalaması.....	52
Çizelge 4.18. İşleme parametreleri – çap büyümesi sinyal gürültü oranı çizelgesi (400 μm).....	53
Çizelge 4.19. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi çizelgesi (400 μm).....	54
Çizelge 4.20. İşleme parametreleri – çap büyümesi sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 μm).....	54
Çizelge 4.21. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi çizelgesi (500 μm).....	55
Çizelge 4.22. İşleme parametreleri –koniklik sinyal gürültü oranı çizelgesi (400 μm).....	56
Çizelge 4.23. İşleme parametreleri – ortalama koniklik çizelgesi (400 μm).....	57
Çizelge 4.24. İşleme parametreleri –koniklik sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 μm).....	58

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.25. İşleme parametreleri – ortalama koniklik çizelgesi (500 μm).....	59
Çizelge 4.26. İşleme parametreleri –yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı çizelgesi (400 μm).....	59
Çizelge 4.27. İşleme parametreleri –ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelgesi (400 μm).....	60
Çizelge 4.28. İşleme parametreleri –yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 μm).....	61
Çizelge 4.29. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelgesi (500 μm).....	62
Çizelge 4.30. İşleme parametrelerinin çap büyümesi üzerine etkisi	73
Çizelge 4.31. İşleme parametrelerinin koniklik üzerine etkisi	74
Çizelge 4.32. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi.....	75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Deneylerde kullanılan dielektrik sıvı uygulama yöntemleri a) Elektrot içinden püskürtme, b) Elektrot içinden emme, c) Statik, d) Yanal püskürtme (Ergün ve Çoğun, 2006: 435).	12
Şekil 2.2. İşleme haznesi titreşimli EEİ tezgahı şematik gösterimi (Özgedik ve Çoğun, 2011: 15).....	13
Şekil 2.3. Mikro EEİ'nin problem alanları (Pham ve diğ, 2004: 55).	15
Şekil 2.4. 500µm delik derinliğinde takıma yörüngesel hareket verilmeden ve 5µm, 7.5µm yörünge çaplı hareket verilerek delinen delik kesitleri (Bamberg ve Heamawatanachai, 2009: 1829).	16
Şekil 2.5. a) EEİ&Uİ yöntemiyle işlenmiş delik kesiti, b) aşındırıcı tane boyutu 3 µm kullanıldığında yüzey görünümü, c) aşındırıcı tane boyutu 1,2 µm kullanıldığında yüzey görünümü (Yan ve diğ, 2002: 1109).	17
Şekil 2.6. Değişik parametrelerle açılmış delik giriş ve kesit görüntüleri (Bigot ve diğ, 2006:196).....	17
Şekil 2.7. Mikro delik delme ve frezeleme sisteminin genel şematik görünümü (Zilonga, 2010: 132).....	18
Şekil 2.8. Mikro elektro erozyon frezeleme ile üretilmiş çelik çubuk ve üzerine açılmış 80 µm çapında delikler (Zilonga, 2010: 132).	19
Şekil 2.9. Frezeleme tekniği ile pirinç ve çelik malzemeden üretilmiş mikro çaplı profiller (Zilonga, 2010: 133).	20
Şekil 2.10. Titreşimli takımla işlemenin şematik gösterimi (Endo, 2008: 271).	21
Şekil 2.11. Titreşimli takım ile mikro işlemenin şematik görünümü ve üretilmiş kare kesitli iş parçası (Endo ve diğ, 2008: 272).	21
Şekil 2.12. Takım titreşimli EEİ ile pirinç plakaya açılan delikler (Chern ve Chuang, 2006: 155).	22
Şekil 2.13. Tel elektro erozyon taşlama ve mikro EEİ sisteminin şematik görünümü (Liu ve diğ, 2005: 425)	23
Şekil 2.14. Transistörlü mikro EEİ tezgahında WC malzemeye 300µm çaplı tungsten takımlarla delinmiş mikro deliklerin (a) giriş, (b) çıkış görüntüleri (Jahan, 2009: 1710).	24
Şekil 2.15. RC tip mikro EEİ tezgahında WC malzemeye 300µm çaplı tungsten	

Şekil	Sayfa
takımlarla delinmiş mikro deliklerin (a) giriş, (b) çıkış görüntüleri (Jahan, 2009: 1710).	24
Şekil 2.16. Dielektrik akışı (Znidarsic ve Junkar, 1996: 530).	25
Şekil 2.17. Farklı işleme enerjilerinde delinmiş mikro deliklerin optik kesit resimleri a) 0.74, b) 12.7, c) 123, d) 174, e) 217, f) 244 μ J. (Ekmekçi ve diğ, 2009).	26
Şekil 2.18. Deneylerde elde edilen mikro delik görüntüleri (Rajurkar ve Shen, 2002: 362).	27
Şekil 2.19. Dielektrik sıvı püskürtmenin delik oluşumları üzerindeki etkisi (Rajurkr ve Shen, 2002: 262).	27
Şekil 2.20. Mikro EEİ sonrası HFDG sistemi (Liu ve diğ, 2006: 86).	28
Şekil 4.1. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı grafiği (400 μ m)	40
Şekil 4.2. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi grafiği (400 μ m)	41
Şekil 4.3. İşleme parametreleri – çap büyümesi sinyal-gürültü oranı grafiği (500 μ m)	42
Şekil 4.4. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi grafiği (500 μ m)	42
Şekil 4.5. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı grafiği (400 μ m)	43
Şekil 4.6. İşleme parametreleri – ortalama koniklik grafiği (400 μ m)	44
Şekil 4.7. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı grafiği (500 μ m)	45
Şekil 4.8. İşleme parametreleri – ortalama koniklik grafiği (500 μ m)	45
Şekil 4.9. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı grafiği (400 μ m)	46
Şekil 4.10. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği (400 μ m)	47
Şekil 4.11. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı grafiği (500 μ m)	48
Şekil 4.12. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği (500 μ m)	49
Şekil 4.13. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı grafiği (400 μ m)	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. İşleme parametreleri – ortalama ϕ büyümesi grafiği (400 μ m)	54
Şekil 4.15. İşleme parametreleri - ϕ büyümesi sinyal-gürültü oranı grafiği (500 μ m).....	55
Şekil 4.16. İşleme parametreleri – ortalama ϕ büyümesi grafiği (500 μ m)	56
Şekil 4.17. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı grafiği (400 μ m).....	57
Şekil 4.18. İşleme parametreleri – ortalama koniklik grafiği (400 μ m)	57
Şekil 4.19. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı grafiği (500 μ m).....	58
Şekil 4.20. İşleme parametreleri – ortalama koniklik grafiği (500 μ m)	59
Şekil 4.21. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı grafiği (400 μ m).....	60
Şekil 4.22. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği (400 μ m).....	61
Şekil 4.23. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı grafiği (500 μ m).....	62
Şekil 4.24. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği (500 μ m).....	62
Şekil 4.25. Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 400 μ m ϕ apta delinen deliklere ait giriş ϕ apı görüntüleri	65
Şekil 4.26. Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 400 μ m ϕ apta delinen deliklere ait çıkış ϕ apı görüntüleri	66
Şekil 4.27. Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 500 μ m ϕ apta delinen deliklere ait giriş ϕ apı görüntüleri	67
Şekil 4.29. Inconel 718 malzeme üzerinde 400 μ m ϕ apta delinen deliklere ait giriş ϕ apı görüntüleri	69
Şekil 4.30. Inconel 718 malzeme üzerinde 400 μ m ϕ apta delinen deliklere ait çıkış ϕ apı görüntüleri	70
Şekil 4.31. Inconel 718 malzeme üzerinde 500 μ m ϕ apta delinen deliklere ait giriş ϕ apı görüntüleri	71
Şekil 4.32. Inconel 718 malzeme üzerinde 500 μ m ϕ apta delinen deliklere ait çıkış ϕ apı görüntüleri	72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. EEİ tezgahı ve şematik gösterimi	29
Resim 3.2. Ti-6Al-4V ve Inconel 718 iş parçaları.....	31
Resim 3.3. SEM cihazından alınan bir görüntü örneği	33
Resim 4.1 Yüzey kaplanmasının gösterimi	64



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
BA	Bağıl Aşınma
d	Dakika
EAH	Elektro Aşınma Hızı
ECM	Elektrokimyasal İşleme
EEİ	Elektro Erozyon İşleme
İİH	İş Parçası İşleme Hızı
mm	Milimetre
Ra	Yüzey Pürüzlülüğü
YP	Yüzey Pürüzlülüğü
vb	Ve Benzeri
°C	Santigrad Derece
µm	Mikron

1. GİRİŞ

Havacılık ve uzay sanayiinde kullanılan malzemeler, yüksek sertlik ve mukavemete sahip ve ısı iletkenlikleri düşük olduğundan bu malzemelerin konvansiyonel metotlarla (talaşlı imalat gibi) işlenebilirliği oldukça düşüktür. Bu nedenle, ısı enerjisinin kullanıldığı elektriksek erozyonla işleme (EEİ) yöntemi bu tür malzemelerin özellikle mikro boyutlarda işlenmesinde tercih edilen bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Ti-6AL-4V ve Inconel 718 alaşımları işlenmesi zor olarak değerlendirilen ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları nedeniyle uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılan süper alaşımlardandır.

Titanyum (Ti), çeliğe göre yaklaşık %56 daha düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen yüksek özgül dayanıma sahip bir elementtir. Titanyum ayrıca korozyona dayanımı ve biyouyumluluğu yüksek bir malzeme olarak tanımlanır. Titanyum alaşımları arasında, Ti-6Al-4V yaygın olarak kullanılan alaşımdır ve iyi performans gösterir. Ti-6Al-4V alaşımı, içerisinde ana element olarak yer alan Alüminyum ve Vanadyum sayesinde yüksek mukavemetli, düşük ağırlık oranı, düşük elastisite modülü, düşük ısı iletkenlik ve mükemmel korozyon direncine sahip bir alfa-beta titanyum alaşımıdır. Nikel-krom-molibden esaslı bir alaşım olan Inconel 718, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilen, yüksek korozyon direncine sahip ve kopma-kırılma direnci yüksek bir alaşım malzemesidir. Bu alaşımlardan üretilen parçalar otomotiv endüstrisinde, havacılık ve uzay sanayinde, elektrik santrali türbinlerinde ve gaz türbini motorlarında geniş bir alanda kullanılmaktadır.

EEİ konvansiyonel olmayan işleme metotları arasında değerlendirilen ve ısı enerjisini kullanarak malzeme kaldırma prensibiyle çalışan bir imalat yöntemidir. EEİ'nin en önemli kullanım alanlarından birisi de mikro delik delmede kullanılmasıdır. Elektro erozyon yöntemi, dielektrik sıvı ortamda elektriksel iletkenliği olan iş parçası ve tel elektrot arasında oluşan ardışık elektriksel deşarjlar (kıvılcımlar) ile talaşın malzemeden çıkarıldığı bir elektro-termal yöntemdir (Rajmohan v.d., 2012). İş parçası ve elektrot su içerisine daldırıldığında uygulanan voltaj vuruşları dielektrik sıvının seri halde bozulup yeniden oluşmasına neden olur. Sözü edilen darbelerin her biri akım deşarjı olarak adlandırılır (Kuppan vd., 2017). Elektriksel deşarj, bir voltaj darbesi uygulandığında dielektriğin

bozulmasıyla oluşur. Üretilen enerjinin bir bölümü elektrotta ve iş parçasına nakledilir, yüksek ısı ortaya çıkar. Isıtılmış yüzeyin sıcaklığı iş parçasının ya da elektrotun erime sıcaklığını aştığında, metal aşınma ufak parçalar şeklinde başlar. Buharlaştan ve/veya eriyen parçacıklar, kıvılcımın olduğu bölgeden sürekli akan dielektrik sıvı vasıtasıyla temizlenir.

EEİ'nin avantajları şöyle sıralanabilir; Proses karmaşık değildir, birden fazla delik aynı anda işlenebilir, açılı yüzeyler ve tok malzemeler EEİ ile işlenebilir. EEİ'de malzeme aşındırılması, mekanik etki yerine termal etki ile sağlanır. EEİ, mekanik etki olmaksızın malzeme aşındırılabilirliği sayesinde, fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle işlenebilirliği düşük malzemelerin delinmesinde avantaj sağlamaktadır. EEİ ile havacılık parçaları üzerinde uzun soğutma kanalları imal edilebilir. EEİ metodunun avantajlarıyla beraber bazı dezavantajları da vardır. İşlenecek malzeme elektriksel olarak iletken olmalıdır. İşleme hızı düşüktür. Takım aşınması üretim açısından problem yaratabilir. EEİ'de delik girişleri, yüksek yoğunluklu enerjiye maruz kaldığından çap büyümesi olmaktadır. EEİ ile delinen delikler koniktir. EEİ metodunda her bir vuruşta iş parçasında etkilenen yüzeyden parçacıklar koparılarak parça işlenmektedir. Bu yüzden işlenen yüzeyler kraterli yapıdadır.

Bu tez çalışmasının amacı, özellikle havacılık uygulamaları ve savunma sanayiinde kullanılan Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemeler üzerinde EEİ metodu kullanılarak imal edilen mikro deliklerde delik geometrisinin incelenmesidir. Bu amaçla, 400 ve 500 µm çaplı, delikli, dönel pirinç elektrotlar kullanılarak Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemelerde mikro delikler imal edilmiştir. Delinen deliklerde delik geometrisini incelemek amacıyla çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışma ile uzay ve havacılık malzemelerinde, mikron mertebesindeki deliklerin delinmesinde karşılaşılan temel sorunlardan birisi olan geometrik bozukluğa sebep olan EEİ parametrelerinin araştırılması ve uygun EEİ parametrelerinin belirlenmesi, işlenmesi zor malzemelerde mikro deliklerin delinebilirliğinin araştırılması hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde, tez çalışması ile ilgili literatür çalışmaları irdelenmiş ve ortaya koymuş oldukları bilimsel katkılar tartışılarak literatürdeki eksiklikler ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

Mohri ve arkadaşları (1996) yapmış oldukları çalışmada dalma ve tel erozyon yönteminden yararlanmıştır. Yardımcı elektrotlar ile yalıtkan seramiklerin işlendiği çalışmada EEİ için örneklerden ve işleme parametrelerinden bahsedilmiştir (Mohri ve diğ., 1996: 203). Mohri ve arkadaşları (2002) yapmış oldukları çalışmada oksit seramikleri ele almış, bunların işlenme performanslarını incelemiştir. Performansları ise silisyum bileşenli seramikler ile kıyaslamışlardır (Mohri ve diğ., 2002: 162). Muttamara ve arkadaşları (2003) yapmış oldukları çalışmada yalıtkan Si₃N₄ iş parçasını kullanmıştır. Bu iş parçası hem karbon hem de bakırdan elde edilen bir levha ile birleştirilmiştir. Hem silindir hem de tüp şekle sahip bakır ve tungsten elektrotlar ile EEİ mikro delik delme yöntemi uygulanmıştır. Bu uygulamada tüp şeklindeki elektrotların İİH açısından daha başarılı olduğu görülmüştür. EAH'nin ise oranının düşük olduğu görülmüştür (Muttumara ve diğ., 2003: 244).

Özerkan ve Çoğun (2005) yapmış oldukları çalışmada, SAE 1040 çeliğinin işlenmesini ele almıştır. Bu aşamada dielektrik sıvısı içine grafit ve H₃BO₃ eklenmiştir. Bu eklenen katkı maddelerinin yüzey pürüzlülüğüne, iş parçasının işlenme hızına ve elektrot aşınma hızına etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda mikro yapısı ve yüzey sertliğine olan etkiler de değerlendirilmiştir. H₃BO₃'ün yüzey sertliğine etkisi olumlu yönde olmuştur. Ancak, işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğüne bir etkisi olmamıştır. Grafitin yüzey pürüzlülüğüne olumlu bir etkisi olmuş, daha yüksek bir sertlik değeri yakalanmıştır (Özerkan ve Çoğun, 2005: 220).

Kansal ve arkadaşları (2005) yapmış oldukları çalışmada dielektrik sıvısının içine grafit tozu eklemiştir. Bu eklenen grafit tozunun takım aşınma hızına ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiş, değerlerde azalma olduğu görülmüştür (Kansal ve diğ., 2005: 3). Lauwers ve arkadaşları (2004) tel erozyon ve dalma erozyon yöntemlerini kullanmış,

seramik iş parçalarını ele almıştır. Yapılan deneylerin sonucunda ise soyulma mekanizması sayesinde malzemelerin işlenebildiği gözlemlenmiştir (Lauwers ve diğ, 2004: 350).

Küçüktürk ve Çoğun (2009) yapmış oldukları çalışmada EEİ tezgahı ve bağımlı sistemleri kullanmış, A1203, ZrO₂ ve Y203 katkılı seramiklerden yararlanmıştır. Seramikler ZrO₂, Sic ve TiO₂ olarak belirlenmiş, bu seramikler ile cam malzemeler delinmiştir. İşleme yapılacak olan yüzeyler iletken bir malzeme ile kaplanmıştır. Bağımlı sistemler içinde ise dielektrik sıvı ve grafit tozu bulunmaktadır. İşleme hızı ve işleme derinliği için ısı iletkenlik, ergime sıcaklığı ve elektriksel iletkenlik etkileri araştırılmıştır. EEİ yöntemi ile en zor işlenen seramik A1203 olarak tespit edilmiştir. Zor işlenmesinin nedeni ise kararsız boşalımlardır. Kararlı işleme aşamasında en pozitif olan seramik ise Y203 katkısına sahip olan ZrO₂ olduğu görülmüştür (Küçüktürk ve Çoğun, 2009: 10). Singh ve arkadaşları (2004) yapmış oldukları çalışmada 4 farklı elektrottan yararlanmıştır. Bu elektrotlar ise bakır, bakır-tungsten, pirinç ve alüminyumdur. En-31 takım çeliği iş parçası için işleme özellikleri incelenmiştir. Bakır ve alüminyum olan elektrotlar ile işleme hızı oldukça yüksek çıkmış, aynı zamanda dar bir kesme genişliği elde edilmiştir. Elektrotların aşınma sıralamasına bakıldığında en az aşınan elektrot bakırdır. Daha sonra bakır-tungsten, alüminyum ve pirinç elektrotları gelmektedir. Sonuca bakılacak olursa bakır elektrot diğer elektrotlara göre çok daha başarılı bir performansa sahiptir (Singh ve diğ, 2004: 275).

Singh ve Ghosh (1999) yapmış oldukları çalışmada EEİ işlemede öneme sahip olan elektrostatik kuvvetin hesaplanabilmesi için ısı-elektrik modelleme yapılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında elektrostatik kuvvet sayesinde oluşan boşalım bir gerilme oluşturmaktadır. Bu gerilme ise boşalım yüzeyinden malzeme içine doğru gitmektedir. Oluşturulan modelde kısa süreli darbeler ele alındığında malzeme kaldırma işlemi için elektrostatik kuvvetin daha büyük etkisi vardır. Aynı zamanda uzun süreli darbelerde ergimenin büyük bir etkisi bulunmaktadır (Singh ve Ghosh, 1999: 670). Lim ve arkadaşları (1991) yapmış oldukları çalışmada 5 farklı işleme çeliğini ele almış, bu çelikleri ise kaba, orta kaba ve bitirme işleme koşullarında değerlendirmiştir. İşlenmiş bir yüzeyde yeniden katılaştıran tabakaların mikro yapısı araştırılmıştır. EEİ yöntemi sonucunda oluşan 5 farklı katılaşmış tabaka, 3 farklı grup üzerinden incelenebilmektedir. Bunlar kalın ve çok katmanlı tabaka, orta kalınlığa sahip tek katmanlı tabaka, niteliksiz ve metalin yapısal karışımını yansıtan tabaka olarak kabul edilmektedir. Boşalım enerjisinin etkisi

incelendiğinde yeniden katılaşılan tabakanın kalınlığı ve tabakaların dağılımını etkilediği fark edilmiştir (Lim ve diğ, 1991: 242).

Çoğun ve Erden (1984) yapmış oldukları çalışmada bakır elektrot ile çelik iş parçasını kullanmıştır. Deneyde darbe süresi ve boşalım gücü değişkenlik göstermemiştir. Boşalımların arasında zaman diliminin darbe zincirini nasıl etkilediğine değinilmiştir. Bekleme süresinin artması, boşalımların gecikmesine, pasif darbe oluşumunun azalmasına neden olmaktadır. Uzun gecikmeye sahip olan boşalımların sayısının darbe bekleme süresi sayesinde artışa geçtiği görülmüştür (Çoğun ve Erden, 1984: 200). Erden (1983) yapmış olduğu çalışmada EEİ yönteminin elektrot ve iş parçası üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hem teorik hem de deneysel çalışmalarda fiziksel ve matematiksel modellerle kıvılcımın işlemesi için gereken işleme alanındaki bozunma, boşalım, aşındırma aşamalarına odaklanılmıştır. Bozunmanın ortaya çıkmasında dielektrik sıvısından arınamayan, yeniden katılaşılan elektrot malzemesi büyük etkiye sahiptir. Elektrotun ortaya çıkardığı buhar, iş parçasının ortaya çıkardığı buhar ve dielektrik sıvısının ortaya çıkardığı buhar, boşalmı etkilemektedir. Boşalım şartları, elektrotun ve iş parçasının sahip olduğu özellikler, dielektrik sıvısının uygulama şartları erozyonu direkt olarak etkilemektedir (Erden, 1983: 135).

Keskin ve arkadaşları (2006) yapmış olduğu çalışmada bakır elektrotlar kullanılmıştır. Güç seviyelerinde, darbe sürelerinde, bekleme sürelerinde çeşitliliğin sağlanmış olduğu çalışmada çelik iş parçası ele alınmış olup, çelik iş parçasının yüzey pürüzlülüğü takip edilmiştir. Darbe süresinin artış göstermesi yüzey pürüzlülüğünü direkt olarak etkilemektedir (Keskin ve diğ, 2006: 1119).

Çoğun ve Akaslan (2002) yapmış oldukları çalışmada bakır elektrot kullanılmış, elektrot özellikleri ise şu şekilde sıralanmıştır: 5 mm çap, dielektrik sıvı püskürtme deliğine sahip, bakır. Akımın artması ile birlikte İİH, EAH ve BA yani bağlı aşınmanın artışı söz konusudur. Darbe süresinin artması ile birlikte ise İİH, EAH değerlerinde artış görülmüştür. Darbe süresi belirli bir orana geldiği zaman ise EAH'de herhangi bir değişim söz konusu olmamıştır. Püskürtme basıncı değerindeki artış İİH ve EAH değerlerini arttırmıştır. Darbe süresi ile basınç artışı ise BA değerini direkt olarak azaltmıştır (Çoğun ve Akaslan, 2002: 49).

Wong ve arkadaşları (1995) yapmış oldukları çalışmada iki farklı iş parçası kullanılmıştır. İki farklı iş parçası üzerinde dielektrik sıvı hızlarının farklılığı sonucunda yeniden katılmış olan 3 farklı tip tabaka oluşmuştur. Tabakalardan birincisi 10 μm kalınlığa sahip olup tek katmanlı, ikincisi 10-20 μm kalınlıkta ve iki katmanlı, üçüncüsü ise 20 μm 'nin üzerinde kalınlıkta ve çok katmanlıdır. İki katmanlı olan seçenekte mikro çatlakların oldukça fazla olduğu, tek katmanlı olan seçenekte ise yeniden katılmış olan tabakanın ısı iletkenlik katsayısı daha az mikro çatlak oluşturma eğiliminde olduğu görülmüştür (Wong ve diğ., 1995: 302).

Lonardo ve Bruzzone (1999) yapmış oldukları çalışmada ortadan püskürtmeli kare kesitli bakır grafit elektrotlardan yararlanmıştır. Kaba bir işleme için elektrotların ön yüzeyinin büyümesi sonucunda EAH ve İİH değerlerinde bir artış olduğunu, son aşamada ise ortalama yüzey pürüzlülüğünün arttığını gözlemlemiştir. Bakırın grafitte göre çok daha iyi bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu anlaşılmıştır (Lonardo and Bruzzone, 1999: 125).

Chen ve arkadaşları (1999) yapmış oldukları çalışmada dielektrik sıvısı olarak gaz yağından ve saf sudan yararlanmıştır. Gaz yağı kullanıldığı zaman parça üzerinde oluşan karbür çok yüksek bir ergime ısısına sahiptir. Aynı zamanda boşalım itme kuvveti de yüksek düzeydedir. Daha yüksek bir boşalım enerjisi gereksinimi vardır. Katılan plaka kalınlığı göz önüne alındığında gaz yağı kullanılan plakadaki kalınlığın daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı zamanda mikro çatlakların azlığı fark edilmiştir. Su ile işleme işleminde ise işleme hızı çok daha yüksektir (Chen, vd., 1999: 107).

Kruth ve arkadaşları (1995) yapmış oldukları çalışmada üç adet iş parçası kullanmıştır. Gaz yağının etkilerinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında karbonun oluşturduğu karbürün, beyaz tabakadaki sertlik derecesinin, karbonun yüzdesinin değerleri incelenmiş, ana malzemedenden daha fazla değerde olduğu görülmüştür (Kruth, vd., 1995: 170).

Lee ve Li (2001) yapmış oldukları çalışmada bakır, bakır-tungsten ve grafit elektrotlar kullanmıştır. İİH değerlerindeki değişimin her bir elektrotta yükseldiği görülmüştür. Aynı zamanda yüksek bir akım aralığı söz konusu olduğunda BA değerleri incelendiğinde en yüksek değer bakır elektroda aittir. Düşük akım söz konusu olduğunda ise BA değerleri grafit elektrotunda çok daha düşüktür. Eğer ki elektrot eksi kutuplanırsa İİH değerinin daha yüksek olduğu, BA değerinin ise daha düşük olduğu görülmüştür (Lee and Li, 2001: 350).

Chen ve Mahdavian (1999), yapmış oldukları çalışmada HB 235 sertlik değeri olan bir çelik iş parçası kullanılmıştır. Bakır silindirik bir elektrottan yararlanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda küçük çapa sahip olan elektrotlar, akım artışından ortaya çıkan ısıdan çok daha fazla etkilenmektedir. Büyük çaplı elektrotlar ile kıyaslandığında aşınma yüzdelерinin de daha fazla olduğu görülmüştür. İşleme aralıkları İİH ve EAH değerlerine etki etmektedir. Bu değerler önce artmakta, ardından da azalmaktadır. Bu durumun nedeni ise boşalımın kararlılıklarındaki azalmadır (Chen and Mahdavian, 1999: 352).

Hocheng ve arkadaşları (1997), yapmış oldukları çalışmada Al-SiC metal ana yapı kompozit malzeme kullanmıştır. Elektriksel boşalım ve krater büyüklüğü incelenmiştir. Krater çapının artışı ile boşalım akımındaki yükseklik doğru orantılıdır (Hocheng, vd., 1997: 815).

Özgedik ve Coğun (2006) yapmış oldukları çalışmada silindirik bakır elektrot malzemesi ile SAE 1040 çeliğinin işlenmesini test etmek için deneyler yapılmış, elektrot ön yüzey açısı incelenmiştir. Akım arttıkça yüzey açısı önce artmış, ardından da azalmıştır (Özgedik ve Coğun, 2006: 491). Özgedik (2009) yapmış olduğu çalışmada EEİ işleme alanına ve iş parçasına titreşim gönderilmiştir. Çalışmada farklı frekanslardan yararlanılmıştır. EAH ve BA değerleri titreşimli deneylerde daha düşük değerlerdedir. Aynı zamanda İİH ve Ra değerlerine bakıldığında küçük artış ve azalışlar dikkat çekmektedir. Frekanslar arttırıldıkça İİH değeri artmış, EAH, BA ve Ra değerleri azalmıştır (Özgedik, 2009).

Erdem ve diğerleri (2016), EEİ yönteminde, daha iyi yüzey kalitesinde delikler elde etmek için döner merkez delikli pirinç elektrotlu hidrokarbon bazlı di-elektrikler yerine di-elektrikli sıvı olarak karbon ve nişasta toz katkılı ısıtılmış silikon yağı kullanılmıştır. Dönen ve dönmeyen elektrotlarda karbon tozu ile silikon yağı karışımlarında çok yüksek İİH değerleri, nişasta tozu ile silikon yağı karışımlarında düşük İİH değerleri elde edilmiştir. Karbon tozu katkılı di-elektrik nişasta tozu katkısı yüzey özelliklerini iyileştirir (Erdem, vd., 2016: 540).

Wang ve Yan (2000) yapmış oldukları çalışmada Al₂O₃/6061Al kompozit iş parçasını ele almıştır. EEİ işlemi sayesinde kör delik açma işlemine odaklanılmış, Taguchi tekniği

kullanılarak birbirine uyumlu hale gelmiştir. İİH, EAH ve YP değerlerinin performansını değerlendirebilmek adına 7 adet parametre incelenmiştir. Bunlar:

- Boşalma akımı,
- Darbe süresi,
- Voltaj,
- Elektrot dönme hızı,
- Elektrot kanal numarası,
- Basınç,
- Kutuplanmadır.

Deneylein sonucunda ise eksantrik delikli bakır elektrot ile yapılan çalışmalar optimum değerleri vermiştir (Wang and Yan, 2000: 97).

Wu ve arkadaşları (2005) yapmış oldukları çalışmada herhangi bir toz ilavesi kullanmamış, saf dielektrik sıvısının bulunduğu ortamda deneyler gerçekleştirmiştir. Yüzeylerde 5 µm ve 8 µm aralığında kalınlığa sahip artık tabakası oluşmuş olup, dielektrik sıvısına alüminyum tozlarının eklenmesi ile bu değerler 1 µm ve 2 µm aralığına çekilebilmektedir (Wu ve diğ., 2005: 1195).

Yirmibeş (2015) yapmış olduğu çalışmada Formadur 2738 malzemesini kullanmış, EEİ yöntemi ile mikro delikleri değerlendirmiştir. Boşalım akımındaki artış İİH ve EAH değerini yükseltmiş, dielektrik sıvı püskürtme basıncının artışı ise İİH ve EAH değerlerini azaltmıştır. Elektrot devir sayısının artışı, İİH ve EAH değerlerini yükseltmiş, ısıt işlemler ise İİH ve EAH değerine etki etmemiştir (Yirmibeş, 2015).

Soni ve Chakraverti (1993) yapmış oldukları çalışmada EEİ deneylerini gerçekleştirmiş, deney aşamasında titanyum bir iş parçası seçilmiş, dönel bakır tungsten elektrot ile işleme sağlanmıştır. Yüzey kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri incelenmiş, sonuç için ise sabit bir elektrot ile karşılaştırma yapılmıştır. Akımın artması her iki durum için de yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır (Soni ve Chakraverti, 1993: 220).

Leao (2005) yapmış olduğu çalışmada 2 adet farklı dielektrik sıvısından ve 2 adet farklı elektrot malzemesinden yararlanmıştır. Dielektrik sıvıları deiyonize su- su karışımı ve alkol-tuz karışımıdır. Elektrotlar ise bakır ve pirinç olarak seçilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda EAH değerin optimum değerin bakır elektrot ile tuz-alkol dielektrik sıvısı kullanımında ortaya çıktığı görülmüştür (Leao, 2005).

Petropoulos ve arkadaşları (2003) yapmış oldukları çalışmada işleme parametreleri ile yüzey kalitesi arasındaki ilişki ile ilgili bilgi alabilmek adına basit ve çoklu regresyon modelleri geliştirmişlerdir (Petropoulos ve diğ, 2003: 240).

Panda ve Bhoi (2006) yapmış oldukları çalışmada talaş kaldırma oranını öğrenebilmek adına ileri beslemeli yapay sinir ağ modeli kullanılmıştır. Kullanılan modelin, elektro erozyon yöntemi için en ideal seçenek olduğu görülmüştür (Panda ve Bhoi, 2006: 858). Wang ve arkadaşları (2003) yapmış oldukları çalışmada, elektro erozyon yönteminin modellenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Modelde, talaş kaldırma işleminin hata oranı %5.6 ve yüzey pürüzlülüğünün hata oranı %4.98 çıkmıştır (Wang ve diğ, 2003: 996). Tsai ve Wang (2001) yapmış oldukları çalışmada, talaş kaldırma oranını tahmin etmek için 6 adet değişik model kullanmıştır. Sonuçları karşılaştırdıklarında modelin hata oranı %16.33 çıkmış, aynı zamanda bu orandan daha düşük hata oranında tahminler verdiği de tespit edilmiştir (Tsai ve Wang, 2001: 120).

Yan ve arkadaşları (2001) yapmış oldukları çalışmada SKD – 61 malzemesinin EEİ ile işlenmesinde uygun tozların dielektrik sıvıya katılmasının, yüzey sertliğinin ve korozyon direncinin iyileştiğini fark etmiştir (Yan ve diğ, 2001: 2601).

Yahya ve Manning (2004) yapmış oldukları çalışmada, darbe süresi, akım, voltaj, boşalım frekansı ve malzeme özellikleri parametrelerini değiştirmiş, talaş kaldırma oranı adına boyutsal analiz yöntemi ile bir model oluşturmuştur. Deneysel değerler ve yeni oluşturulan model arasında hata oranının düşük olduğu ortaya çıkmıştır (Yahya ve Manning, 2004: 1469).

Puri ve Bhattacharya (2005) yapmış oldukları çalışmada yüzey metodu yöntemini kullanarak beyaz tabaka kalınlığını irdelemeye çalışmışlardır. Farklı parametreler

denenmiş ve en ideal kesme hızı 3 mm/dak olarak görülmüştür (Puri ve Bhattacharya, 2005: 305).

Kumagai ve ark. (2007), dar delik delme işleminin işleme parametrelerini, yalıtılmış kaplamalı tel elektrot kullanılarak optimize edilmiştir. Bu bağlamda uygulanan darbe süresinin optimum değerini, elektrot ucu ile kaplama ucu arasındaki uygun mesafe ve elektrot besleme servo kontrol sisteminin uygun titreşim genliği belirlenmiştir. Optimizasyon ile, daha önceki çalışmalarda yararlanılan parametrelerden yaklaşık %40 daha az elektrot aşınması ve yaklaşık %35 daha üst işlem hızı elde edilmiştir (Kumagai ve diğ, 2007: 312).

Okka (2011), Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşımlarının hızlı delik delme performansı üzerine EİE ile deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmalarda; iki tip elektrot malzemesinden (pirinç ve bakır) yararlanılarak İİH ve EAH gibi performans çıktıları incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, pirinç elektrot ile iki alaşımda da bakır elektrottan daha üst seviyede İİH değerleri saptanmıştır. Inconel 718 malzemesi pirinç elektrot ile delindiğinde bakır elektrottan daha az EAH değerine sahipken, ti-6al-4V malzemesinde daha yüksek EAH değerleri belirlenmiştir (Okka, 2011).

Ulutaş (2013) Inconel 718'de delikler ve kör delikler üzerinde bir araştırma gerçekleştirmiştir. Temel performans çıktıları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için iki farklı işleme parametresi rejimi(düşük ve yüksek akım, darbe ve darbe aralığı, kapasitans) ve iki farklı tip pirinç elektrot (tek ve çok kanallı) kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre; delinme süresi, yüzey niteliği ve boyutsal doğruluk bakımından en karlı şekilde delmek için yüksek seviyeli işleme parametrelerinin ve çok kanallı elektrotların kullanılması gerektiği bulunmuştur (Ulutaş, 2013).

Yılmaz (2013) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, mikro EEİ yöntemi ile farklı işleme parametreleri (deşarj akımı, darbe süresi, elektrot takım hızı, dielektrik püskürtme basıncı) ile 0.8 mm çaplı tek delikli boru tipi pirinç elektrotlar ile, AISI 1040 çelik ve Hadfield çelik delinmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en etkili işleme parametresinindeşarj akımı olduğu vedeşarj akımındaki artışın ortalama radyal açıklık, EAH, İİH, boyutsal hata ve yüzey pürüzlülüğü (ra) değerlerinin arttığını saptanmıştır. Darbe süresindeki artış ile beraber boyutsal hata, İİH, Ra ve ortalama radyal diyafram değerleri artmıştır. Artan

dielektrik püskürtme basıncı işlemenin devamlılığını sağlar; Artan dielektrik püskürtme basıncı ile İİH artmış, boyutsal hata ve RA değerleri azalmıştır. (Yılmaz, 2013).

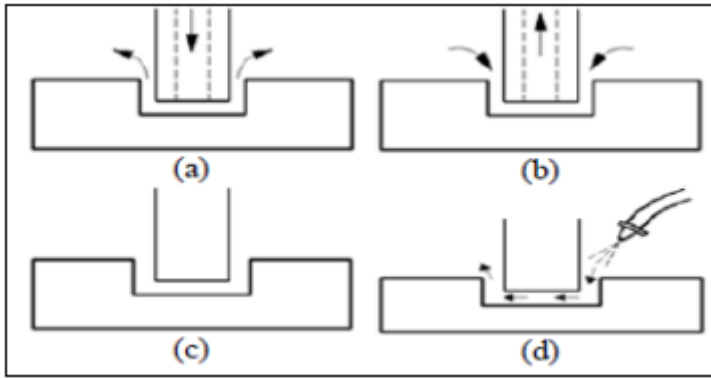
Havacılık, otomotiv, kalıp imalat endüstrisinde işlenmesi zor ve zaman alan üstün özellikli malzemeler ortaya çıkmaktadır. Bunlar aşınma, ısı dayanımı, korozyon dayanımı alanlarında başarı gösteren gelişmiş malzemeler olarak kabul edilmektedir. Bu tarz malzemeler makine imalatçıları açısından büyük önem teşkil etmekte, bu nedenle de sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, geleneksel yöntemler ile bu malzemeleri işlemek oldukça zordur. Gerek imalatçılar gerek ise araştırmacılar bu özel yeteneklere sahip olan malzemeleri işleyebilmek adına yeni imalat yöntemlerine odaklanmıştır. (Ozmerkan, 2010).

Yeni yöntemler arasında yer alan ve endüstride en sık kullanılan yöntemlerin başında elektro erozyon yöntemi gelmektedir. Bu yöntem sayesinde çok sert olan malzemeler kolay bir şekilde işlenebilmektedir. Elektro erozyon yöntemi sayesinde sert malzemelere istenen şekiller kolaylıkla verilebilmektedir. Sadece, işlenebilecek iş parçalarının mutlaka iletken olması gerekmektedir. İş parçasının sert ya da tok olması EEİ yöntemi için önemli bir konu değildir. Performans direkt olarak iş parçasının elektriksel iletken bir malzemedir oluşmasından etkilenmektedir. Kalıp imalat sanayisi söz konusu olduğunda EEİ yönteminin vazgeçilmez bir yöntem olduğunu söylemek gerekmektedir. Bu aşamada dalma elektro erozyon ile tel elektro erozyon yöntemleri iki farklı şekilde hizmet vermektedir. Pres döküm kalıpları, kesme ve ezme kalıpları için EEİ yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Aynı zamanda toz sıkıştırma kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, cıvata başı şişirme kalıpları da bu yöntemler ile oluşturulmaktadır. Küçük pompalar, motorlar, robotlar için gereken mekanik sistemler de yine bu yöntem ile elde edilmektedir (Pandey ve Shan, 1980: 90; Coğun ve diğ, 2004: 100).

Elektrot ile iş parçası bu yöntemde birbiri ile temas içinde değildir. Bu nedenle de kesme kuvveti ve onun olumsuz etkileri ortaya çıkmamaktadır. Kırılgan, narin, gevşek ve hassas parçalar EEİ yöntemi ile kolay bir şekilde işlenebilmektedir. EEİ yöntemleri ile geleneksel yöntemler karşılaştırıldığında ise EEİ yönteminin zaman ve maliyet açısından büyük avantaj sağladığı görülmektedir (Ergün ve Coğun, 2011: 17; Chow ve diğ, 2000: 96).

Elektro erozyon işleme yöntemi ile ilgili çalışmalara bakıldığında zaman genel olarak performans çıktılarına yönelim olduğu görülmektedir. İmalat sanayisi genel olarak minimum maliyet, minimum zaman ve maksimum kalite beklentisi içindedir. Bu nedenle yapılan çalışmalar bu beklentiyi karşılayabilmek adına yapılmaktadır. İİH, EAH ve BA ile Ra iyileşmeleri performans değerlendirmesi adına önemli bir konudur.

Ergün ve Çoğun (2006) senesinde yapmış oldukları çalışmada EEİ yöntemi ile yüzey karakteristiklerini incelemiştir. İİH, EAH, BA özellikleri ile krater geometrisi, Ra, mikro sertliği, mikro yapı özellikleri üzerinde durulan çalışmada, deney malzemesi prizmatik çelik olarak seçilmiştir. Dielektrik sıvı gazyağı olarak kararlaştırılmış, elektrot ise bakır olarak kullanılmıştır (Şekil 2.1).

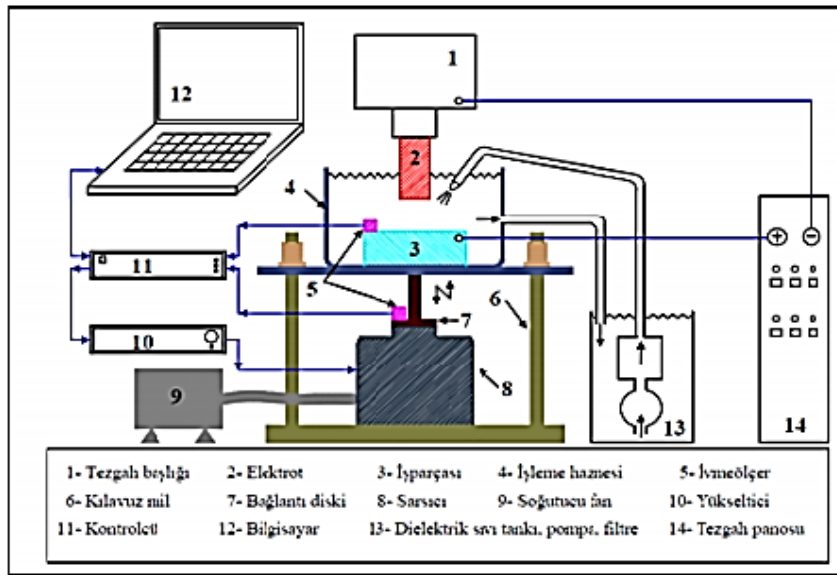


Şekil 2.1. Deneylerde kullanılan dielektrik sıvı uygulama yöntemleri a) Elektrot içinden püskürtme, b) Elektrot içinden emme, c) Statik, d) Yanal püskürtme (Ergün ve Çoğun, 2006: 435).

Yapılan deneyin sonucunda boşalım akımının artmasının yüzey pürüzlülük oranının kötüleşmesine neden olduğunu görülmüştür. Bunun nedeni ise artan boşalım akımları ile oluşan yüksek enerji direkt olarak yüzeye etki etmekte ve yüzeyin pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Emme uygulamaları yapıldığında boşalım akımları arttığı zaman yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmüştür. Darbe süresinin artması ile birlikte de yüzey pürüzlülüğünde artış fark edilmiştir. Boşalım akımı ve darbe süresi arttığında İİH ve EAH değerlerinde bir artış olduğu görülmüştür. Boşalım akımının değiştirildiği uygulamalarda EAH değerinin en yüksek olduğu uygulama püskürtme uygulamasıdır. Darbe süresi değiştirildiğinde ise EAH kısa darbe sürelerinde emme uygulamalarında, uzun darbe sürelerinde ise püskürtme uygulamalarında yüksek değerler elde edilmiştir. Boşalım akımının artması hem statik hem püskürtme hem de emme deneylerinde BA'yı arttırmıştır.

En düşük BA değeri ise emme uygulamalarında oluşmuştur. Darbe sürelerinin artışı ise İİH ve EAH daha hızlı bir şekilde artmış, bu durum BA'yı azaltmıştır (Ergün ve Coğun, 2006: 431).

Elektro erozyon yöntemi ile yapılan çalışmalarda iş parçası ve elektrot üzerinde boşalım nedeni ile partiküller bulunduğu gözlemlenmektedir. İş parçasına titreşim uygulandığı zaman ise bu partiküllerin iş parçasından uzaklaştırıldığı görülmektedir. İşleme hızının artırılması ile birlikte partiküllerin uzaklaştırılması amacı ile yapılan çalışmalarda farklı sonuçlar alınmıştır. Farklı frekanslar ile uygulanan titreşimlerin yüksek akım kullanılan deneylerde düşük, düşük akım kullanılan deneylerde ise yüksek İİH değerleri ortaya çıkardığı saptanmıştır. 6 A uygulanan deneylerde yüksek EAH değeri çıkarken 12 A uygulanan deneylerde düşük EAH değeri ortaya çıkmıştır. Çalışmanın sonucuna bakılacak olursa işleme haznesi ile iş parçası arasındaki titreşimin EAH ve BA değerini azalttığı, İİH değerini biraz artırdığı ve Ra değerini biraz azalttığı görülmüştür (Özgedik ve Coğun, 2011: 15) (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. İşleme haznesi titreşimli EEİ tezgahı şematik gösterimi (Özgedik ve Coğun, 2011: 15)

Elektrot aşınma hızı ile elektrot ön yüzey aşınmasının değerlendirildiği çalışma kapsamında çelik iş parçası ile bakır elektrot kullanılmıştır. Farklı dielektrik uygulamaları sağlanmış boşalım akımları ve darbe sürelerinin değişimi değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda boşalım akımının EAH'yı artırdığı görülmüştür. Aynı zamanda

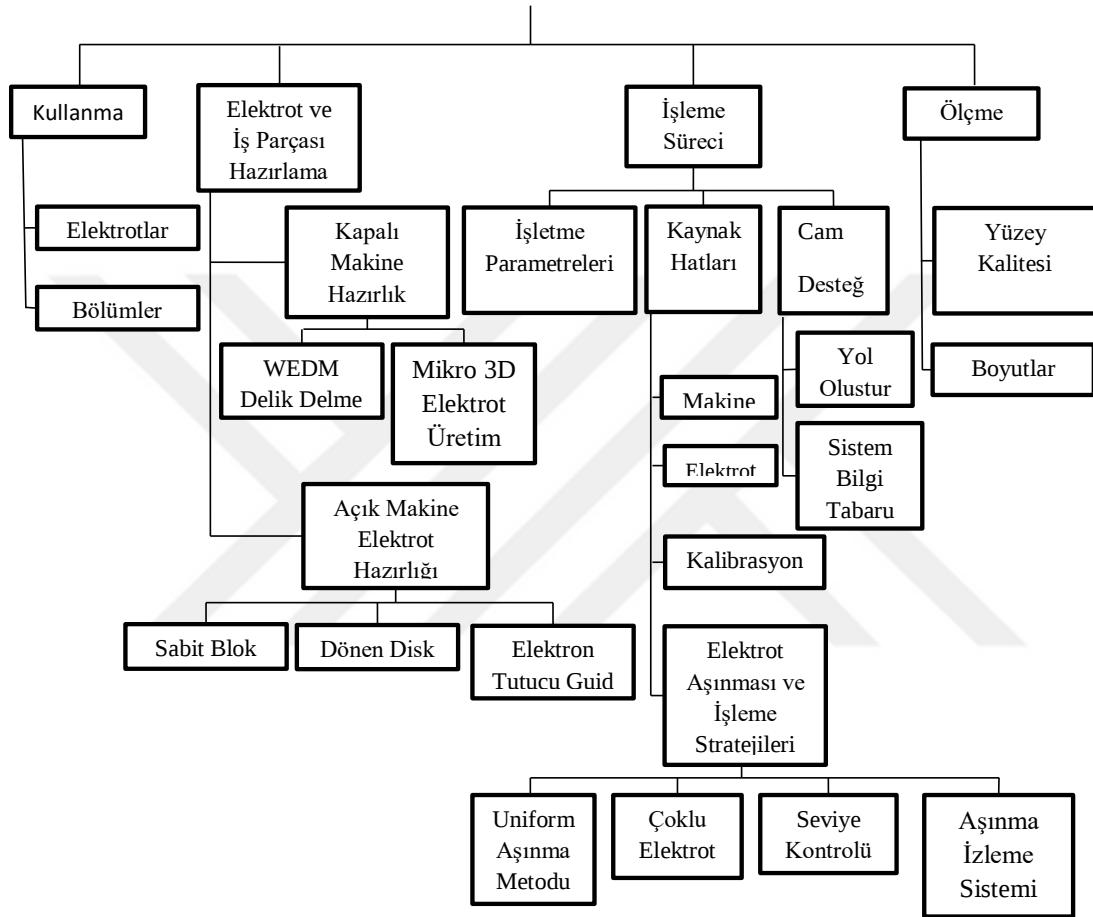
akımın artışı elektrot ön yüzey açısını ilk olarak arttırmış, sonrasında en yüksek değeri almış ve küçülmeye başlamıştır. Darbe süresinin 50 μ s'ye kadar artması sonucunda EAH değeri artmış, 50 μ s'den sonra ise EAH değeri azalmaya başlamıştır. Elektrot ön yüzey açısı ile dielektrik sıvının giriş yönünün alakalı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Özgedik ve Coğun, 2003: 22).

İşleme parametrelerinin iş parçasının Ra değerine olan etkilerinin değerlendirildiği bir çalışma kapsamında, boşalım akımı arttıkça Ra değerinin arttığı, düşük dielektrik sıvı nedeni ile boşalım akımının düşmesi ile birlikte Ra'nın değişmediği gözlemlenmiştir. Yüksek dielektrik sıvı basınçları nedeni ile Ra değeri darbe süresi ile birlikte artış göstermiştir (Coğun ve diğ, 2004: 100).

EEİ yöntemi ile ilgili pek çok çalışma yapılmış, bunun sonucunda beklentiler oluşmuş ve bu beklentiler de hızlı delik delme elektro erozyon tezgahlarının gelişimini sağlamıştır. Bu yöntem sayesinde havacılık, diş ve cerrahi gibi alanlarda işlenmesi çok zor olan malzemelerin işlenmesi sağlanmıştır. Burada genel olarak küçük çaplı boru tipi elektrotlar kullanılmakta ve bu elektrotlar da belirli bir hızda döndürülmektedir. İşleme aralığına püskürtülen bir dielektrik sıvı vardır ve bu sıvı sayesinde işleme bölgesindeki küçük artıklar uzaklaştırılmaktadır. Kullanılan elektrotun çapından az daha büyük deliklerin oluşturulması da bu sayede mümkün olmaktadır. Bu yöntem sayesinde iletken olan her türlü malzemede delikler kolay bir şekilde açılabilmektedir. Yöntem ile delinen deliklerin mikro ve makro yapıda olabilmesi, yüksek ve üstün kalite sunması, yüzey pürüzlülüğünün minimumda tutulması önemli özellikler arasında yer almaktadır. İmalat sanayisinde bu yöntemin benimsenmesinin en önemli nedenlerinden biri geleneksel yöntemler ile üstün özelliklere sahip olan malzemelerin işlenemiyor olmasıdır. Bu yöntem ile hem küçük hem de derin deliklerin oluşturulabilmesi mümkündür (Leao, 2005; Asokan ve diğ, 2000: 162).

Kullanılan EEİ yöntemleri ile üstün özelliklere sahip olan malzemelerin üzerine derin ve küçük deliklerin açılması oldukça kolay olmaktadır. Bu kapsamda Pham ve arkadaşları (2004) yapmış oldukları çalışma kapsamında mikro EEİ yönteminin küçük parçalarda, mikro birleşenlerde oldukça önemli bir yere sahip olduğunu görmüştür. Mikro EEİ yöntemi sayesinde iyi bir yüzey kalitesi elde etmek mümkündür. Mikro EEİ yöntemi aracılığı ile mikro üretim teknolojisinde birçok geliştirme yapılabileceğini belirten Pham ve arkadaşları mikro EEİ yöntemi sayesinde tel, delme ve diğer teknikleri rahatlıkla

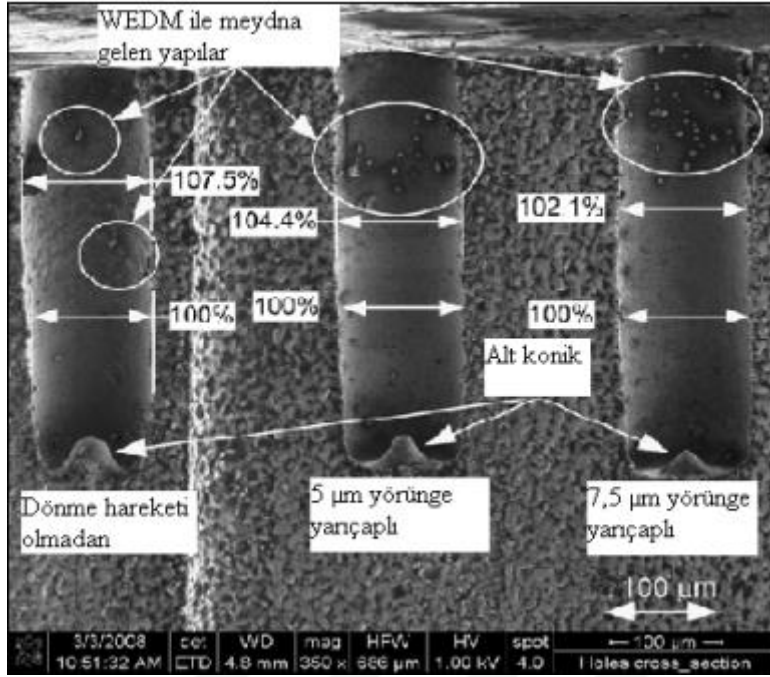
uygulayabileceklerini söylemiştir. Yapmış oldukları çalışma ile aşınma problemlerine odaklanan Pham ve arkadaşları, elektrot aşınmasına odaklanan yaklaşımları değerlendirmiştir. Pek çok mikro EEİ alanı sunulmuştur (Pham ve diğ, 2004: 55) (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Mikro EEİ'nin problem alanları (Pham ve diğ, 2004: 55).

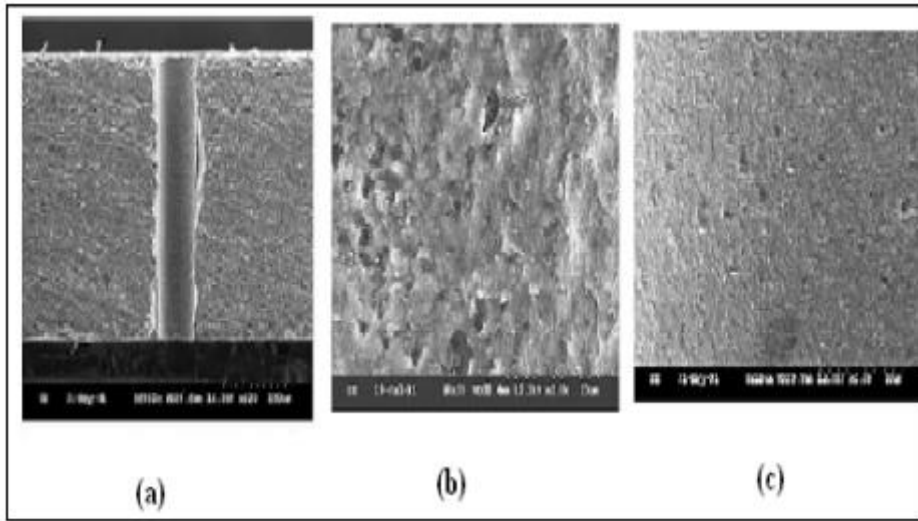
Bamberg ve Heamawatanachai (2009) senesinde yapmış oldukları çalışma kapsamında silindirik takım kullanılmış, bu takıma hem x hem de y düzleminde hareket uygulanmıştır. Paslanmaz çelik iş parçası üzerinde delikler açılmıştır. Dönme hareketi verilmemiş olan takımlar aracılığı ile açılan deliklerin daha düzgün bir geometriye sahip olduğu, delik yüzeylerinde ise daha az pürüzlülük bulunduğu gözlemlenmiştir. Yörüngesel işlemlerde ise yanal işleme boşluğunun arttığı, bu nedenle de yanal püskürtme işleminin daha kolay hareket ettiği belirtilmiştir. Bu durumun oluşmasının işleme atıklarını kolaylıkla

uzaklaştırıldığı görülmüştür. İİH'nin arttığı, delik konikliğinin ise azaldığı fark edilmiştir. Hareket verilen ve verilmeyen işlemlerde deliklerin görünüşleri sunulmuştur (Bamberg ve Heamawatanachai, 2009: 1828) (Şekil 2.4).



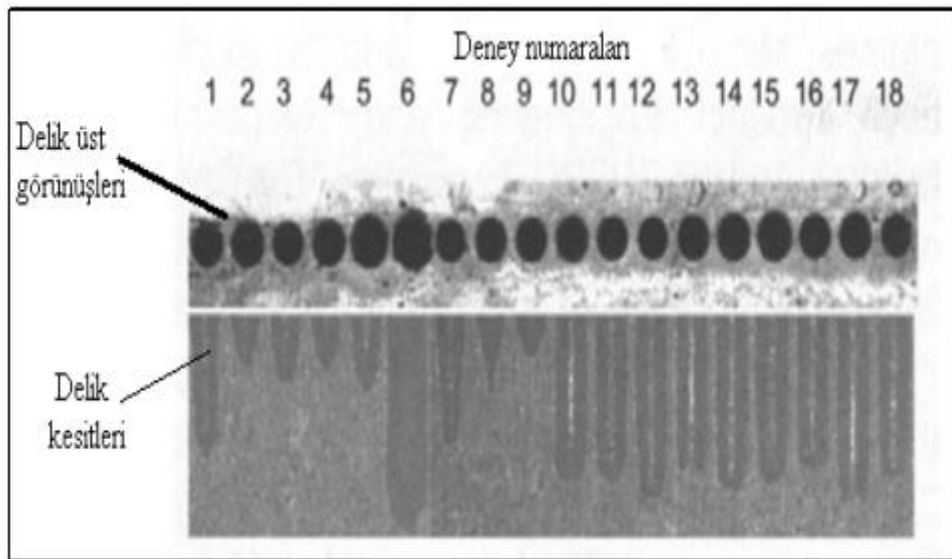
Şekil 2.4. 500µm delik derinliğinde takıma yörüngesel hareket verilmeden ve 5µm, 7.5µm yörünge çaplı hareket verilerek delinen delik kesitleri (Bamberg ve Heamawatanachai, 2009: 1829).

Yan ve arkadaşları (2002) yapmış oldukları çalışmada EEİ yöntemi ile ultrasonik işleme tekniğini bir arada kullanmış, 0,33 mm çapa sahip olan tungsten takımdan yararlanmıştır. Bu deneyde boronsilikat cam malzeme üzerinde delikler açılmıştır. Takım üzerinde kıvılcım boşalım etkisi oluşmuştur. Bu etki ile birlikte ultrasonik titreşim hareketi meydana getirilmiş, aşındırıcı sert parçalar gazyağı ile yüzeye çarptırılmıştır. Bu çarpma sonrasında uygun parametreler seçildiğinde delik giriş ve çıkış çapları arasında 2 µm'ye yakın bir fark olduğu görülmüştür. Bu sayede 150 µm çapında ve 500 µm derinliğinde bir delik delindiği fark edilmiştir. Takımın dönme hareketi yapması ile birlikte ise konikliğin azaldığı görülmüştür (Yan ve diğ, 2002: 1109) (Şekil 2.5).



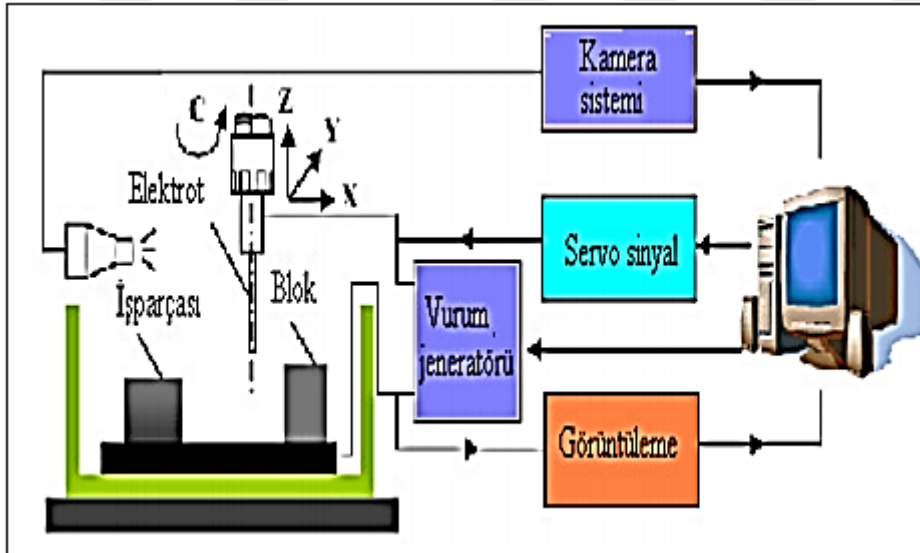
Şekil 2.5. a) EEİ&Uİ yöntemiyle işlenmiş delik kesiti, b) aşındırıcı tane boyutu 3 µm kullanıldığında yüzey görünümü, c) aşındırıcı tane boyutu 1,2 µm kullanıldığında yüzey görünümü (Yan ve diğ, 2002: 1109).

Bigot ve arkadaşlarının (2006) yapmış olduğu çalışmada çelik bir malzemenin ne kadar delinebileceği araştırılmıştır. 0,17 mm çapında seçilen bir tungsten karbür elektrot ile farklı işleme parametreleri altında delikler açmıştır. Takımın “+”, iş parçasının “-“ kutuplaşmaya sahip olduğu durumlarda İİH artmış, delik yüzey pürüzlülüğü değeri ise azalmıştır. Bu sistem uygulandığında EAH değeri biraz artmış, takım döndürüldüğünde daha derin ve hızlı işlenebilirlik olduğu görülmüştür (Bigot ve diğ, 2006: 196) (Şekil 2.6).



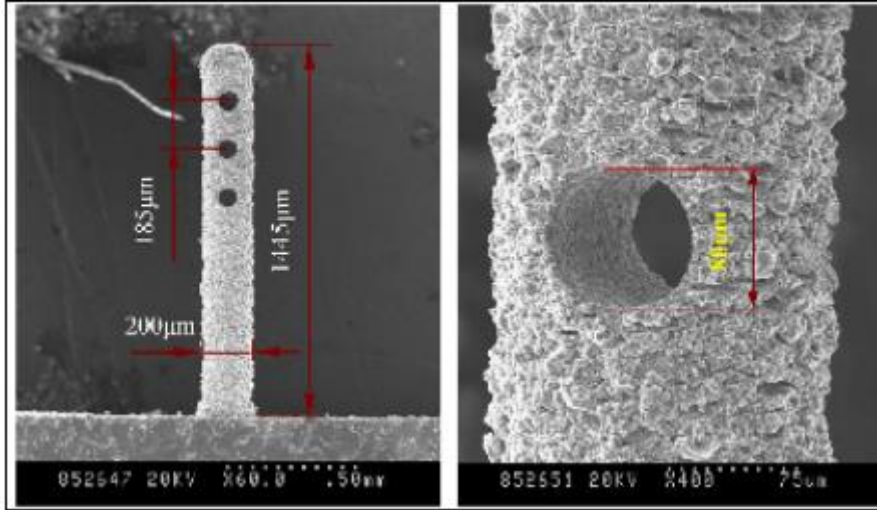
Şekil 2.6. Değişik parametrelerle açılmış delik giriş ve kesit görüntüleri (Bigot ve diğ, 2006:196)

Zilonga ve arkadaşları (2010) yapmış oldukları çalışmada tersine mikro EEİ yönteminden yararlanılmış ve yüksek hız çeliği iş parçasını tercih etmiştir. Çalışmada delinebilirlik deneyleri yapılmıştır. Ters kutuplama yönteminden yararlanılmış, 0,2 mm çapında pirinç ve çelik takımlar tercih edilmiştir. Mikro EEİ tezgahlarında dönme hareketi oluşturulmuş, devire deneyi yapan kişi karar vermiştir. Aynı zamanda hem x hem y hem de z eksenlerinde hareket sağlanmıştır. Bilgisayar destekli olarak vurum jeneratörleri ile takım ve iş parçasına zıt kutuplama uygulanmıştır. Takımlar ayrı bir DA motoru sayesinde 1000-20000 dev/dak arasında farklı hızlar ile dönmüştür. Halojen ışık kaynağı, ölçekli mikroskop lensleri ve hassas kamera sayesinde işleme anı görüntülenmiştir (Zilonga, 2010: 131) (Şekil 2.7).



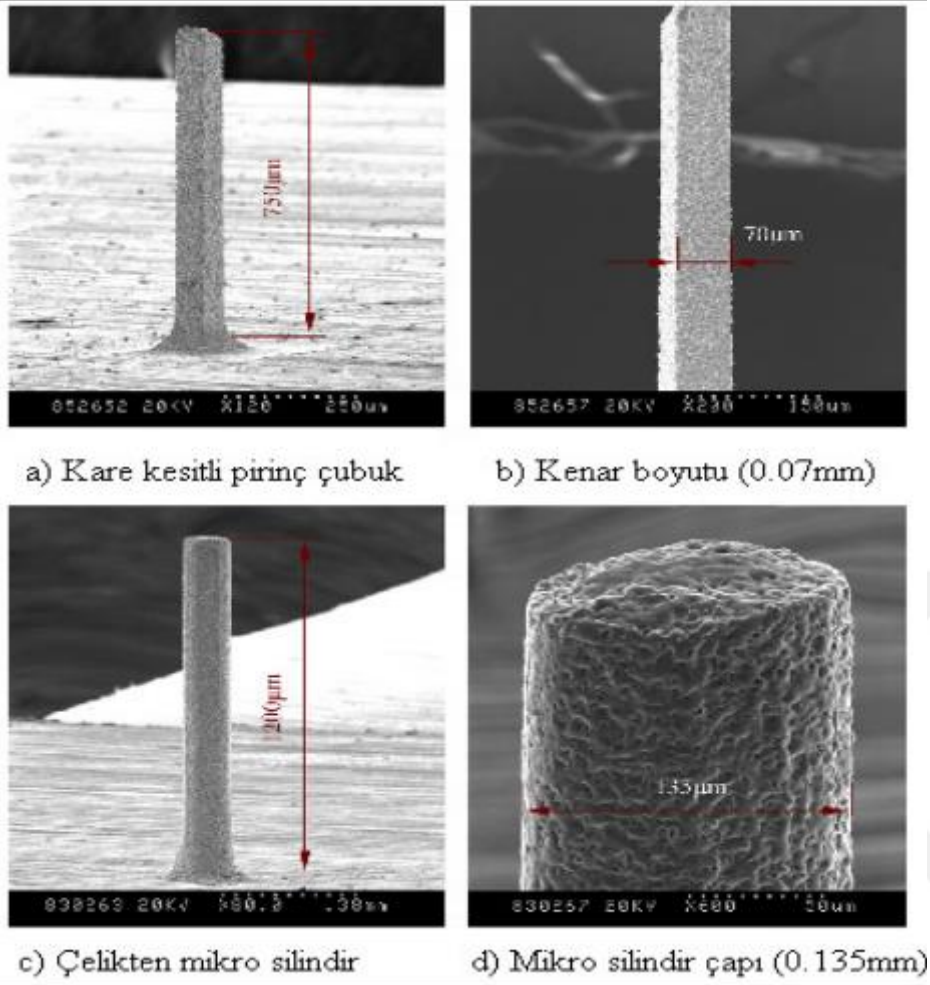
Şekil 2.7. Mikro delik delme ve frezeleme sisteminin genel şematik görünümü (Zilonga, 2010: 132).

Mikro EEİ yönteminin kullanıldığı deneylerde frezeleme tekniğinden de yararlanılmış, 80 μ m çapında delikler açılmıştır (Şekil 2.8).



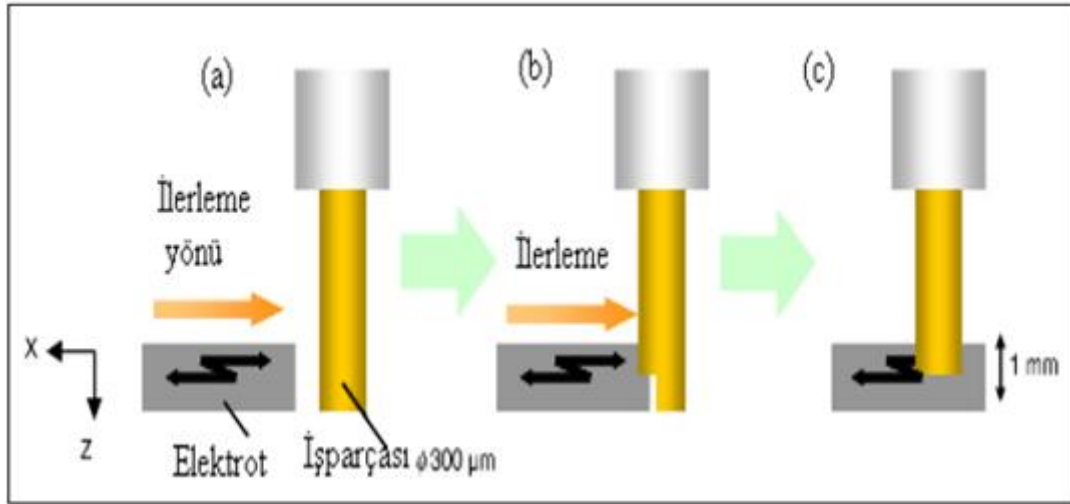
Şekil 2.8. Mikro elektro erozyon frezeleme ile üretilmiş çelik çubuk ve üzerine açılmış 80 μm çapında delikler (Zilonga, 2010: 132).

Çalışma kapsamında ters kutuplanmalı frezeleme yöntemi sayesinde 70 μm kenar uzunluğunda, 750 μm boyunda pirinç çubuk oluşturulmuştur. Aynı zamanda 135 μm çapında, 1445 μm yüksekliğinde dairesel mikro silindir elde edilmiştir. Hassas boyuta sahip olan bu parçaların üretiminde düşük akım, darbe süresi ve ters kutuplanma önemli bir yere sahiptir. Aynı zamanda frezeleme yöntemi sayesinde takımlara dönme hareketi kazandırılmış, bu durum işleme boşluğunun daha kolay temizlenmesini sağlamıştır (Zilonga, 2010: 133) (Şekil 2.9).



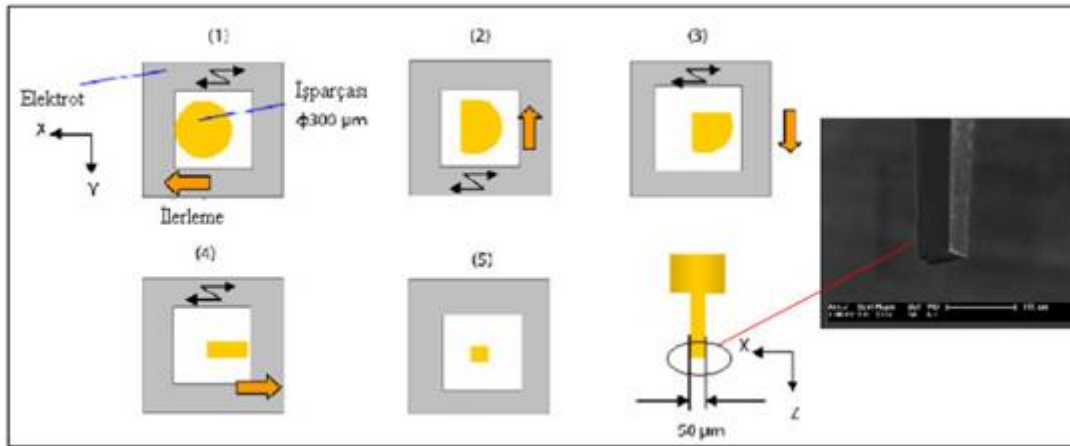
Şekil 2.9. Frezeleme tekniği ile pirinç ve çelik malzemeden üretilmiş mikro çaplı profiller (Zilonga, 2010: 133).

Endo ve arkadaşları (2008) yapmış oldukları çalışmada çelik plakalardan yararlanmış ve farklı frekanslarda titreşimli ve titreşimsiz işlemler yapılmıştır. Titreşimli olan işlemlerde Ra değerinin daha düşük olduğu, işleme süresinin kısaldığı, İİH'nin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Titreşimli takım ile işlemenin şematik gösterimi (Endo, 2008: 271).

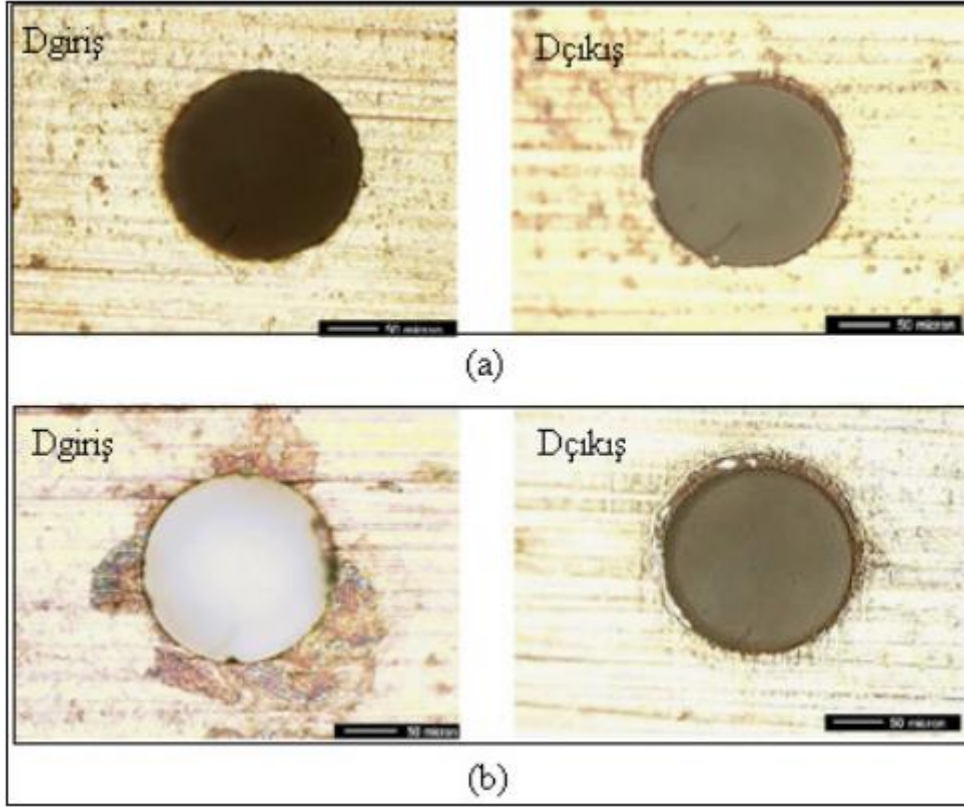
İşleme bu yöntem ile çok daha başarılı olmuş, titreşimden ötürü takım ve iş parçası arasındaki artıkların azaldığı görülmüş, herhangi bir temas bulunmadığı belirtilmiştir. 1,2 mm kalınlığında, 3x3 mm boyutlarında ve ortası 1x1 mm boyutlarında boşaltılmış gümüş-tungsten takım kullanılmıştır. 300 µm çapında silindirik bir iş parçası pirinç olarak tercih edilmiştir. Bu pirinç iş parçası takım boşluğuna yerleştirilmiş, 50x50 µm kare kesiti formu almıştır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Titreşimli takım ile mikro işlemenin şematik görünümü ve üretilmiş kare kesitli iş parçası (Endo ve diğ., 2008: 272).

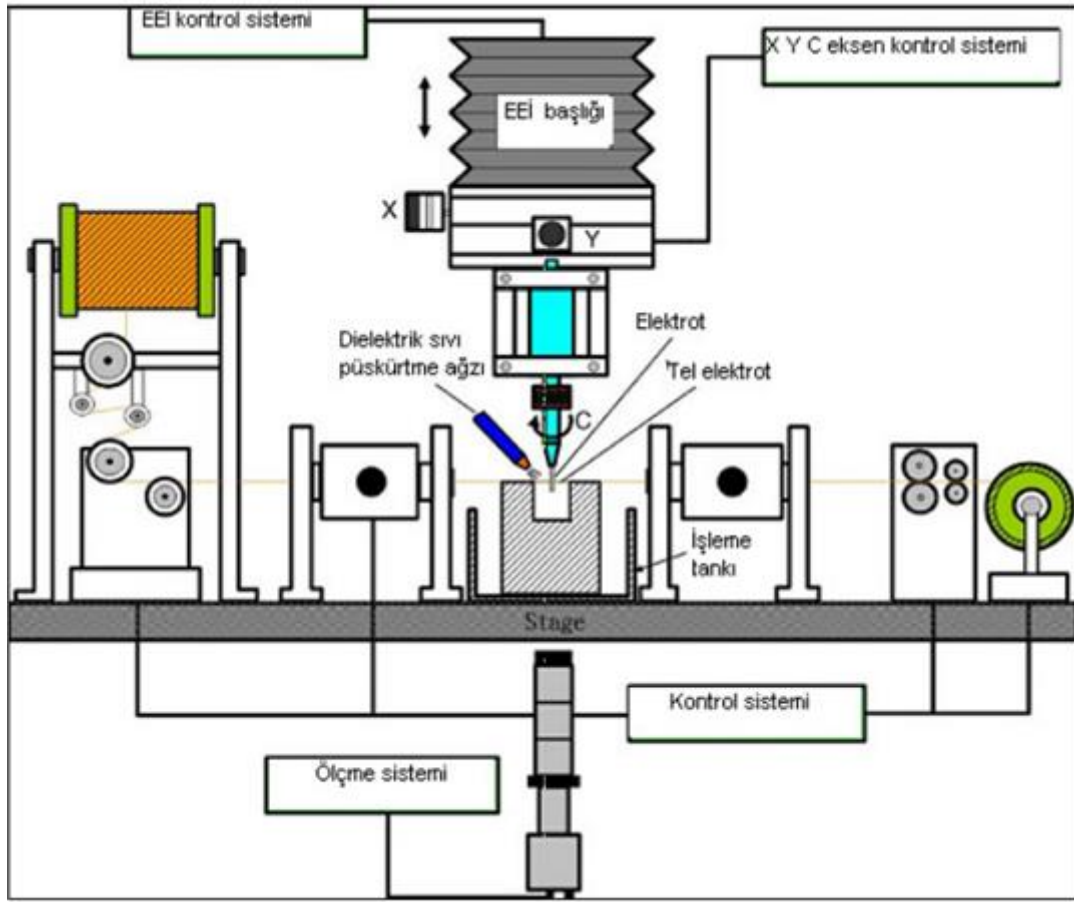
Chern ve Chuang (2006) tarafından yapılan çalışma kapsamında titreşimli EEİ yöntemi ile birlikte pirinç plaka üzerine delikler açılmıştır. Bu çalışmada İİH değeri artmış, Ra değeri her zamankinden daha olumlu yanıt vermiştir. Sürekli olarak sağlanan titreşim sayesinde kıvılcım boşalmaları meydana gelmiş, işleme aralıksız bir şekilde devam etmiştir. Bu

sayede 200 μm çapındaki deliklerin hem paslanmaz çelik plakaya hem de pirinç plakaya kolay bir şekilde açıldığı görülmüştür Chern ve Chuang, 2006: 155) (Şekil 2.12).



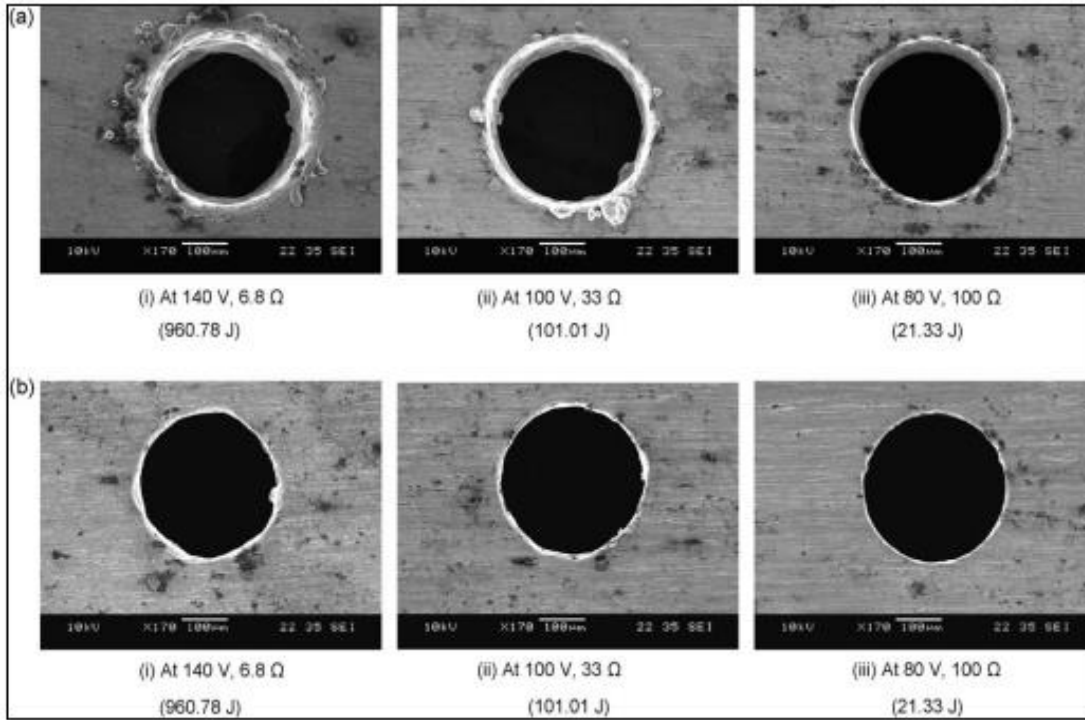
Şekil 2.12. Takım titreşimli EEİ ile pirinç plakaya açılan delikler (Chern ve Chuang, 2006: 155).

Liu ve arkadaşları (2005) yapmış oldukları çalışmada mikro EEİ yöntemini kullanmış, yüksek alaşımlı nikel mikro delikler üzerinde değerlendirme yapmıştır. Yüksek alaşımlı nikel malzemenin çok yüksek manyetik geçirgen olduğu görülmüş, geleneksel yöntemler ile de işlenmesinin zor olduğu vurgulanmıştır. Deney aşamasında silindirik elektrotlar yüksek sertlikte seçilmiş ve takıma iki aşamalı bir şekilde yerleştirilmiştir. 1.aşamada takım büyük çapta çalıştırılmış, 2.aşamada ise WEDG yani tel elektro erozyon ile taşlama yöntemi sayesinde daha küçük çapta çalıştırılmıştır. 1.aşama takımında elektrot düzlem üzerinde mikro delik delme işlemini gerçekleştirmiştir. Mikro deliklerin Ra değerinin iyileştirilebilmesi adına 2.aşama takımında silisyum karbür partiküllü taşlama işlemi kullanılmıştır. EEİ sistemlerinde optimizasyon çalışması sağlanmıştır. 500 μA 'lık işleme akımı ve 4 μs darbe süresi sayesinde en iyi delik giriş ve çıkış çapları ayarlanmıştır. Bu değerler sayesinde İİH ve EAH'de en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Ra değerinde ise 0,85 μm 'lik bir iyileşme görülmüştür (Liu ve diğ, 2005: 425) (Şekil 2.13).

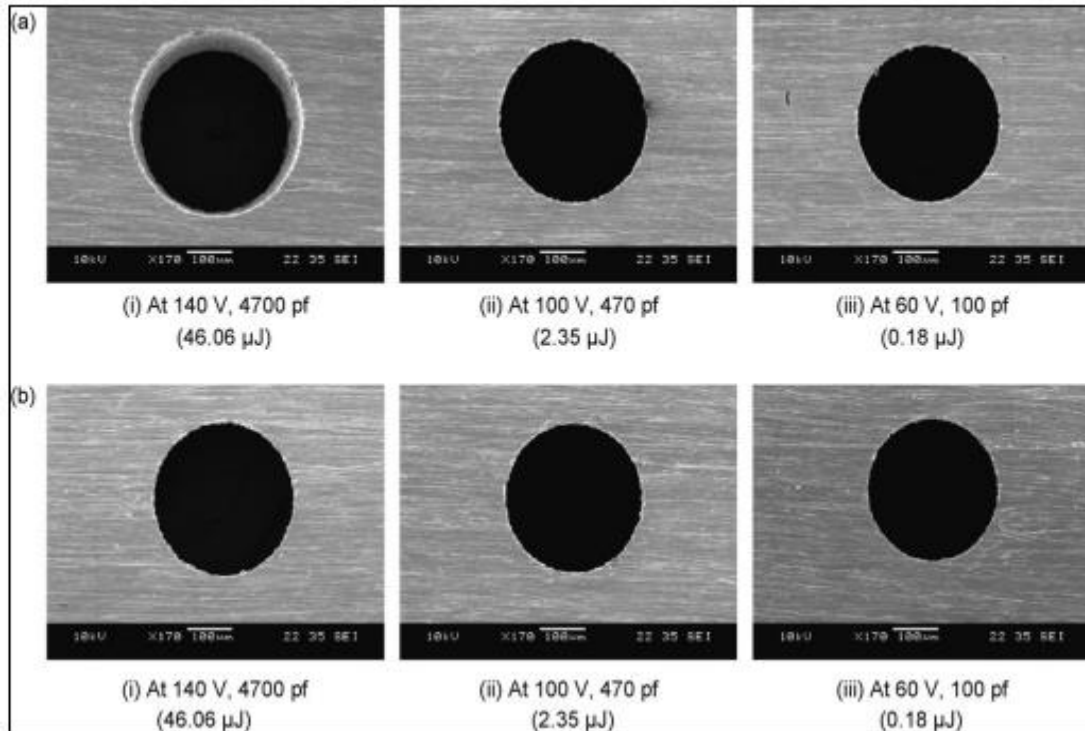


Şekil 2.13. Tel elektro erozyon taşlama ve mikro EEİ sisteminin şematik görünümü (Liu ve diğ, 2005: 425)

Jahan ve arkadaşları (2009) yapmış oldukları çalışmada transistör ve RC tip darbe jeneratörü kullanmış, mikro EEİ yöntemi ile WC iş parçasına mikro delikler açılmıştır. WC kuvvetli ve korozyon direnci yüksek olan bir iş parçasıdır ve bu nedenle işlenmesi de hayli zordur. Mikro EEİ yöntemi sayesinde kuvvetli özelliklere sahip olan iş parçalarının işlenebileceğinin vurgulanmış olduğu bu çalışmada, mikro EEİ yönteminin darbe jeneratöründen büyük bir enerji desteği aldığı söylenmiştir. İlk olarak çalışmaya başlamadan önce transistör ve RC tip darbe jeneratörü ile WC üzerinde mikro delikler açılabilmesi için gerekli olan parametreler elde edilmiştir. Çalışmanın amacı WC malzemesinde açılan deliklerin kaliteli, küçük, iyi boyutsal doğruluk sonuçlarına ulaşmaktır. Mikro EEİ işlemi için minimum darbe enerjisi gereklidir ve bu enerji de RC jeneratörü sayesinde elde edilebilmiştir. RC tip darbe jeneratörünün kullanılması daha küçük kopmalar oluşturmuş, kopan parçalar ise anında uzaklaştırılmıştır. WC malzemenin mikro deliklerinin düzgün açılabilmesi için RC tip darbe jeneratörü ve mikro EEİ yöntemi ideal seçeneklerdir (Jahan ve diğ, 2009: 1710) (Şekil 2.14).

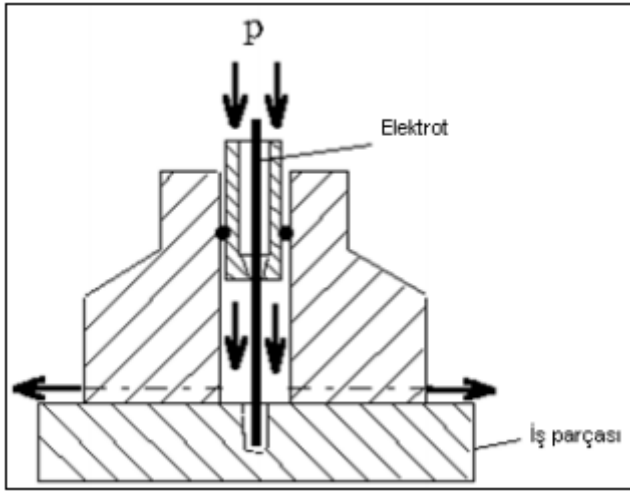


Şekil 2.14. Transistörlü mikro EEİ tezgahında WC malzemeye 300μm çaplı tungsten takımlarla delinmiş mikro deliklerin (a) giriş, (b) çıkış görüntüleri (Jahan, 2009: 1710).



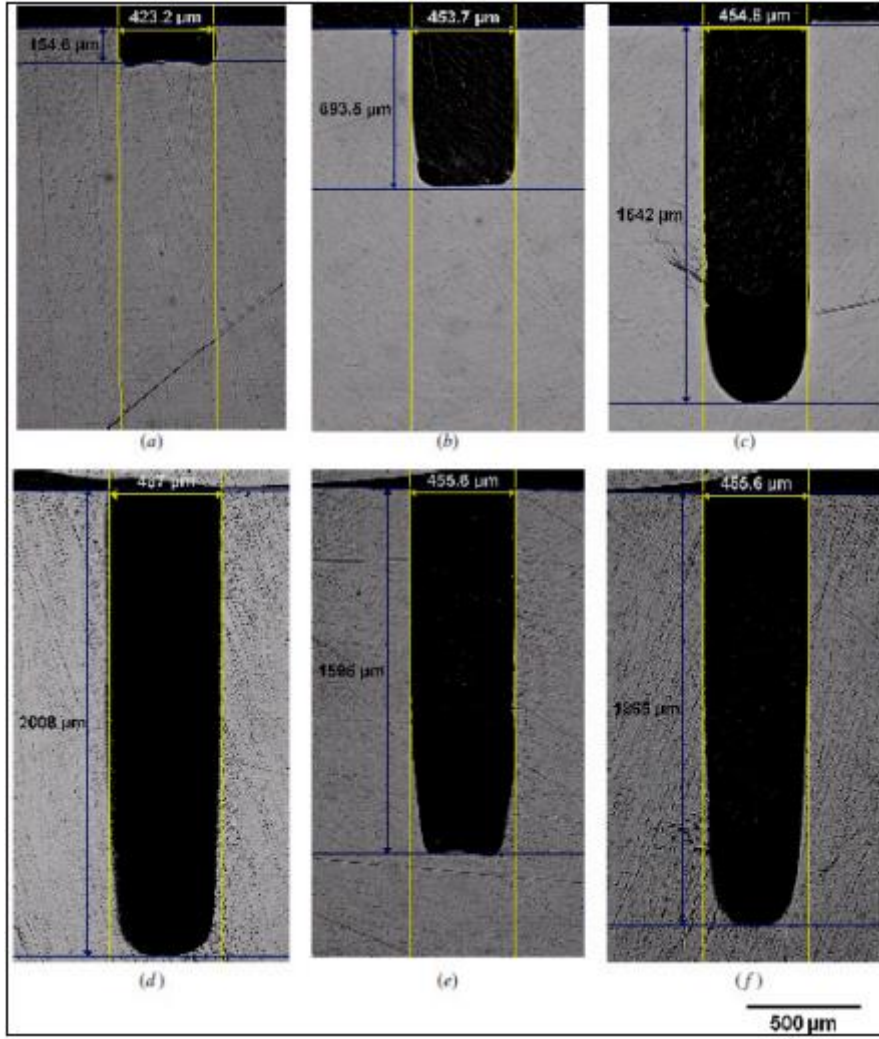
Şekil 2.15. RC tip mikro EEİ tezgahında WC malzemeye 300μm çaplı tungsten takımlarla delinmiş mikro deliklerin (a) giriş, (b) çıkış görüntüleri (Jahan, 2009: 1710).

Znidarsic ve Junkar (1996) yapmış oldukları çalışmada derin ve küçük delik delmek için gerekli optimum seçenekleri incelemiştir. En ve boy oranları 10 olan deliklerin delinmesi değerlendirilmiştir. Teknolojik anlamda başarılı sonuçlar elde edebilmek ve buharlaşma şartlarını iyileştirmek amacı ile yüksek basınçlı dielektrik sıvının önemi araştırılmış, delik karakteristiği ve darbe parametreleri incelenmiştir. Yüksek frekansa sahip ve bilgisayara bağlı olan osiloskop sayesinde darbe seviyeleri belirlenmiştir. Geliştirilen yeni bir cihaz ile birlikte dielektrik basıncı bölgesel olarak yükseltilmiştir. EEİ sırasında voltaj, akım ve darbe süresi önemli parametreler olarak kabul edilmiştir. Dielektrik akışı ve boşluk uzaklıklarının kontrolünün yapılabilmesi için veri tabanı oluşturulmuştur (Znidarsic ve Junkar, 1996: 530) (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Dielektrik akışı (Znidarsic ve Junkar, 1996: 530).

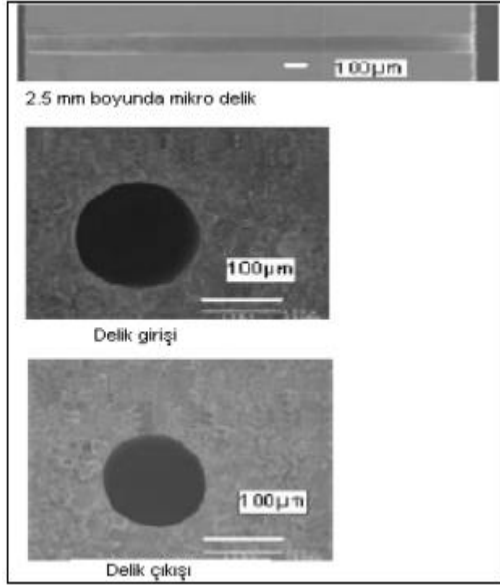
Ekmekçi ve arkadaşları (2009) yapmış oldukları çalışmada mikro EEİ yöntemi ile mikro deliklerin delinmesi sırasında yüzey hasarını incelemiştir. Dielektrik sıvı olarak hidrokarbon, elektrot olarak tungsten karbür ve iş parçası olarak da kalıp çeliği tercih edilmiştir. Farklı darbe enerjileri sayesinde mikro delikler açılmıştır. Sonuca ulaşabilmek adına mikro deliklerin derinlikleri, giriş ve çıkış çapları, geometrileri ölçülmüştür. Isı hasar segmentleri 3 aşamalı olarak oluşmuştur. Deliklerin derinlikleri katmanlar üzerinde değişikliğe neden olmuştur. Mikro deliklerin bazı bölümlerinde çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Çatlakların meydana gelmelerinin nedeni ise düşük darbe enerjileri olarak fark edilmiştir (Ekmekçi ve diğ, 2009) (Şekil 2.17).



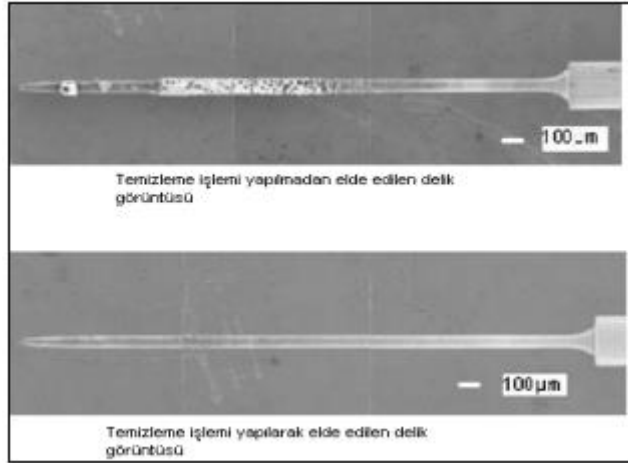
Şekil 2.17. Farklı işleme enerjilerinde delinmiş mikro deliklerin optik kesit resimleri a) 0.74, b) 12.7, c) 123, d) 174, e) 217, f) 244 μJ . (Ekmekçi ve diğ, 2009).

Rajurkar ve Shen (2002) yapmış oldukları çalışmada mikro EEİ yöntemi ile delikler açmış, yüksek en ve boy oranlarından yararlanmıştır. Mikro EEİ yöntemi ile en ve boy oranı yüksek olan deliklerin açılmasının çok zor olduğu gözlemlenmiştir. Zorluğun en önemli nedenlerinden biri dar deşarj alanı olarak kabul edilmiştir. Dar deşarj alanları söz konusu olduğunda iş parçasından kopan kırıntılar işleme alanında uzaklaştırılmamış ve aynı zamanda düşük işleme hızı ile işlem yapılmış, bu durum ise elektrotun aşınmasına neden olmuştur. Mikro EEİ yöntemlerinde elektrot ölçülerinin küçük olması, iş parçasından kopan parçaların da küçük boyutlu olmasına neden olmuştur. Sonuca bakılarak dönme hareketine sahip olan etkili bir püskürtme sağlanmış, bu yöntem ile 18 en-boy oranında delikler açılmıştır. Bu yöntem sayesinde aynı zamanda keskin kenarlar ve köşeler aracılığı ile dairesel olmayan kör mikro deliklerin oluşturulabileceği gözlemlenmiştir (Rajurkar ve

Shen, 2002: 362) (Şekil 2.18). Dielektrik püskürtme yöntemi sayesinde iki farklı delik elde edilmiştir.



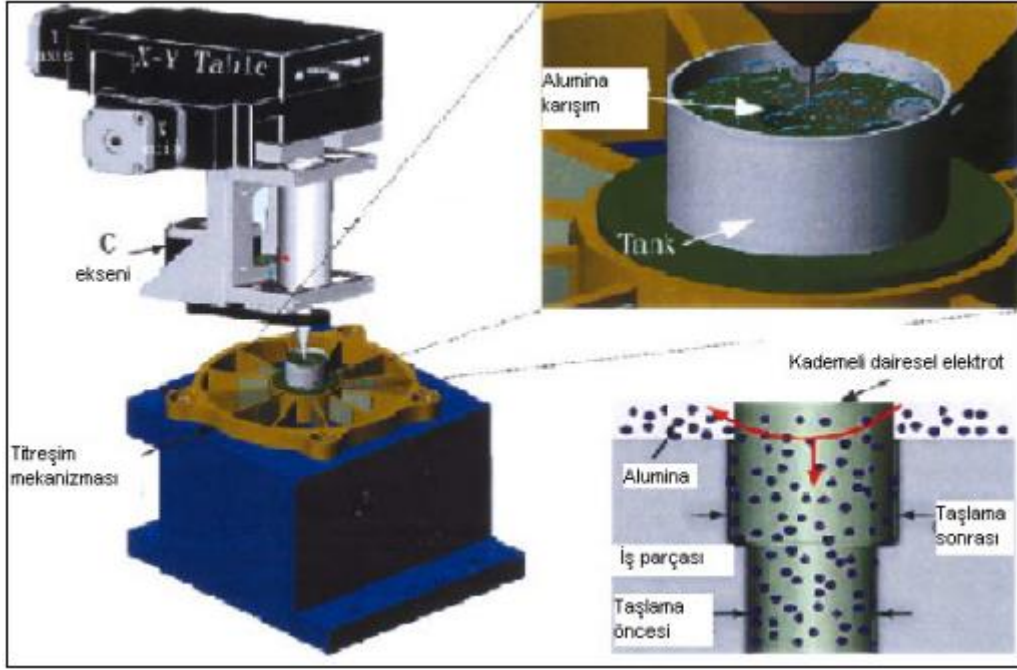
Şekil 2.18. Deneylerde elde edilen mikro delik görüntüleri (Rajurkar ve Shen, 2002: 362).



Şekil 2.19. Dielektrik sıvı püskürtmenin delik oluşumları üzerindeki etkisi (Rajurkar ve Shen, 2002: 262).

Liu ve arkadaşları (2006) yapmış oldukları çalışmada yüksek frekanslı titreşimli taşlama ile mikro EEİ yöntemini kullanarak delik delmişlerdir. Burada amaç bu iki yöntem aracılığı ile deliklerin yüzey pürüzlülüklerini geliştirmektir. EEİ yöntemi sayesinde sert ya da tok olan malzemelere 100 µm çapından küçük deliklerin delinmesi oldukça kolaydır. Ancak, EEİ yöntemi ile µm çapından küçük deliklerin delinmesi sonrasında yüzeyde oluşan çatlakların çok olduğu görülmüş, bu çatlakların ise deliğin geometrisini ve çapını

direkt olarak etkilediği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında yüksek alaşımlı nikellerden yararlanılmış, HFDG yöntemi sayesinde yüzey pürüzlülüğünde iyileştirmeye gidilmiştir. Bu sayede R_{max} değeri $2,12 \mu m$ 'den $0,85 \mu m$ 'ye düşmüştür. 40 V HFDG ve 500 mA zayıf akım tercih edilmiş, mikro delikler 8 dakikaya kadar işlenmiştir. Bu işlemlerin sonucunda istenen yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir (Liu ve diğ, 2006: 86) (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Mikro EEİ sonrası HFDG sistemi (Liu ve diğ, 2006: 86).

2.2. Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi

Elektro erozyon yöntemi ile ilgili çalışmaların kapsamına bakıldığında yöntemin gün geçtikçe kendini geliştirdiği görülmektedir. Geleneksel yöntemler ile kıyaslandığı zaman karmaşık şekilleri ve çok sert malzemeleri işleyebiliyor olması gerek imalat gerek ise metalürji mühendislerinin önünü açmaktadır. Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde, EDM ile ilgili araştırmaların ağırlıklı olarak MRR, TWR vb. gibi işleme parametrelerinin incelenmesi üzerine yoğunlaştığı fakat imal edilen deliklerde delik performansını artırmaya geometrik özelliklerin (boyutsal doğruluk, koniklik gibi) incelendiği çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Yapılacak tez çalışmasının havacılık uygulamalarında kullanılan Inconel 718 ve Ti-4Al-6V malzemeler üzerinde EDM ile imal edilen mikro deliklerde delik performansının iyileştirilmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, Ti-6Al-4V ve Inconel 718 iş parçaları üzerinde farklı işleme parametreleri (akım, işleme zamanı ve bekleme zamanı) kullanılarak EEİ metodu ile 400 ve 500 μm çaplarında delikler imal edilmiştir. Deney sayısını belirlemek ve işleme parametrelerinin deneysel çıktılara etkisini incelemek amacıyla Minitab 19 yazılımı kullanılarak Taguchi analizinden yararlanılmıştır. Her bir malzeme ve çap ölçüsü için dokuz adet olmak üzere toplamda 36 adet delik imal edilmiştir. Deneyler, Gaziantep Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yenilik Merkezinde bulunan JS EDM marka, AD-20A tipi delik delme elektro erozyon tezgahında yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda elektrot malzemesi olarak 400 ve 500 μm çaplarında, tek delikli pirinç elektrotlar; dielektrik sıvı olarak saf su kullanılmıştır. İmal edilen delikler üzerinde çap büyümesi ve koniklik ölçümleri, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, SEM Laboratuvarında bulunan, Jeol JEM 6060 LV model taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Çap ölçümleri, üç adet giriş ve çıkış çap ölçümlerinin ortalaması kullanılarak; yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ise Mitutoyo marka, SJ 401 model cihaz ile yapılmıştır.

3.1. EEİ Tezgahı

Deneysel çalışmalarda JS EDM marka, AD-20A tipi elektro erozyon tezgahı (Resim 3.1) kullanılmıştır. Tezgaha ait teknik özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1. EEİ tezgahı ve şematik gösterimi

Çizelge 3.1. EEİ tezgahına ait teknik özellikler

Çalışma Tablası Boyutları 460x210 mm	Elektrot Çapı 0.2 - 0.3 mm
İşlenebilir Maksimum Parça Boyutları 630x420 mm	İşlenebilir Maksimum Parça Ağırlığı 80 kg
Tabla Hareket Mesafesi 300x200 mm	Dielektirik Su
Z Ekseninde Hareket Mesafesi 350 mm	Dielektirik Kapasitesi 20 litre
Ram Servo Hareket Mesafesi 330 mm	Makine Ağırlığı (NW / GW) 500 / 650 kg
Maksimum Elektrot Uzunluğu 400 mm	Ambalaj Boyutu 1240x1210x2240 mm

3.2. Elektrot

Deneyisel çalışmalarda 400 ve 500 µm çaplarında, tek delikli pirinç elektrotlar kullanılmıştır. Elektrotun bir ucu EEİ tezgahına mandrel ile bağlanmış diğer ucu ise boyutsal sapmaları engellemek amacıyla kılavuzdan geçirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

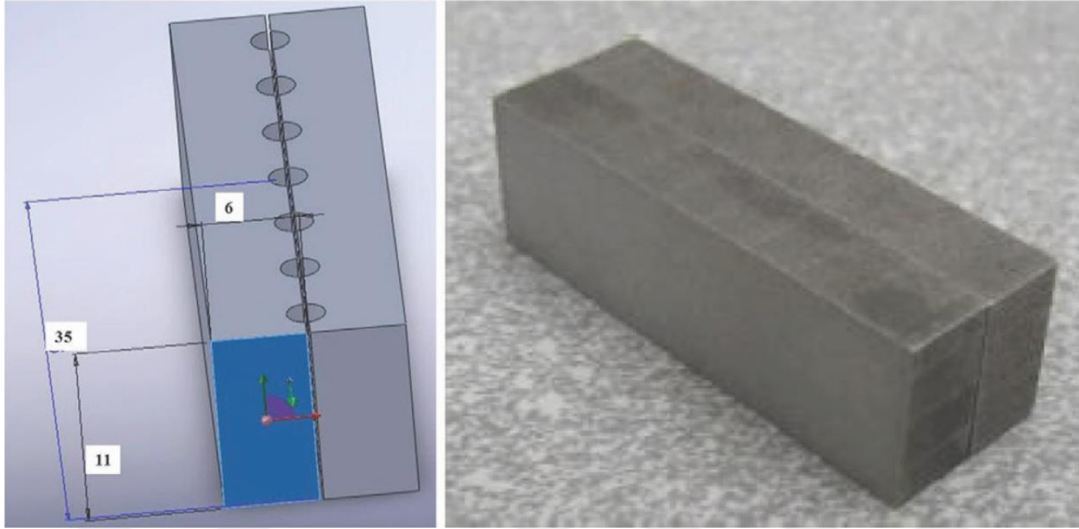
3.3. Dielektrik Sıvı

Deneyisel çalışmalarda dielektrik sıvı olarak saf su tercih edilmiştir. Dielektrik sıvı basınçlandırılarak elektrot içinden geçirilerek kullanılmıştır.

3.4. İş parçaları

Deneylerde iş parçası olarak uzay ve havacılıkta sıklıkla kullanılan Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzeme kullanılmıştır. Numuneler 6mm x11mm x 35mm ebatlarında kesilmiştir. İş parçası malzemelerine ait mekanik özellikler Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilmektedir.

Her bir iş parçası malzemesinden 2 adet parça birbiriyle eşleştirilerek set oluşturulmuştur. Bir setin içindeki 2 parça, parça1 ve parça2 olarak adlandırılmıştır. Setlerin her biri elektro erozyon tezgahına bağlanarak tam orta noktadan delinmiştir. Bu sayede, delme işlemi tamamlandıktan sonra set iki parçaya ayrılarak delik yüzeylerinin incelenmesinde kolaylık sağlanmıştır.



Resim 3.2. Ti-6Al-4V ve Inconel 718 iş parçaları

Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemesine ait malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	Ti-6Al-4V	Inconel 718
Yoğunluk (kg/cm ³)	4,430	8,220
Elektriksel direnç($\mu\Omega$ mm)	1,780	1,210
Ergime noktası(°C)	1,604	1,210–1,344
Elastik modülü (GPa)	113.8	208
Çekme dayanımı (MPa)	950	1,407
%0.2 Akma dayanımı (MPa)	880	1,172
Isıl iletkenlik (W/m °K)	7.2	11.4
Özgül ısı kapasitesi (J/g-°C)	0.5263	0.435

3.5. Ölçümler

Deneyisel çalışmalarda delinen deliklerde çap büyümesi (ÇB), koniklik ve yüzey pürüzlülüğü (YP) ölçümleri yapılmıştır. Giriş ve çıkış çapı ölçümlerinde Jeol JEM 6060 LV model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Giriş ve çıkış çapları, her bir setin iki parçasında, üç farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalaması alınarak ölçülmüştür. SEM ile yapılan giriş ve çıkış çapı ölçümleri Ek-1’de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.25. – 4.28.

arasında Ti-6Al-4V, Şekil 4.29. – 4.32. arasında ise Inconel 718 iş parçası üzerinde delinen deliklerde SEM görüntüleri üzerinden alınan giriş ve çıkış çapı ölçümlerine yer verilmiştir.

Çap büyümesi, SEM (taramalı elektron mikroskobu) üzerinden her bir setin iki parçası üzerinden alınan giriş çaplarının ortalamasının teorik delik çapına oranla boyutsal sapması hesaplanarak elde edilmiştir. Çap büyümesi(ÇB) aşağıdaki formül kullanılarak % cinsinden ifade edilmiştir.

$$\text{ÇB}(\%) = \frac{D_g - D_0}{D_0} \times 100$$

D_g : Ortalama giriş çapı

D_0 : Teorik delik çapı

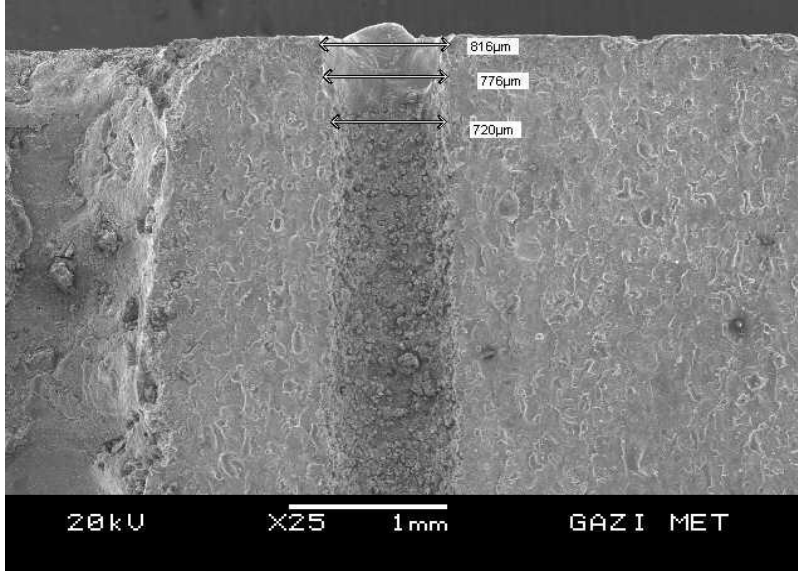
Koniklik ölçümü, SEM üzerinden her bir setin iki parçası üzerinden alınan giriş ve çıkış çapı ölçümlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Koniklik aşağıdaki formül kullanılarak % cinsinden ifade edilmiştir.

$$\text{Koniklik}(\%) = \frac{D_g - D_{\phi}}{2L} \times 100$$

D_g : Ortalama giriş çapı

D_{ϕ} : Ortalama çıkış çapı

L: Delik boyu



Resim 3.3. SEM cihazından alınan bir görüntü örneği

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mitutoyo marka, SJ 401 model cihaz ile yapılmıştır. YP ölçüm cihazına ait teknik bilgi Ek-2’de verilmiştir. YP ölçümlerinde Ra değeri μm cinsinden ölçülmüştür.

Delik performansına etkileri araştırılacak parametrelerden akımın (I), çap büyümesine, konikliğe ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin en fazla olacağı öngörülmektedir. Uygulanan akımın artmasıyla işlenecek yüzeye birim zamanda nüfus edecek enerji yoğunluğu artacaktır. Bunun sonucunda işleme hızı artmakla birlikte çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğünün akım artışından olumsuz etkilenmesi beklenmektedir. İşleme zamanı (T_{on}) parametresinin delik performansına etkisi ise, akımın uygulanma süresi şeklinde olmaktadır. Bu sebeple, delik geometrisinin değerlendirilmesinde akım ve T_{on} parametrelerinin etkisinin bir arada ele alınmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Bekleme zamanında (T_{off}) ise dielektrik sıvı yardımıyla ortamdan çapaklar uzaklaştırılıp ortam soğutulur. Bekleme zamanının uzaması işlenecek yüzeyden çapakların daha iyi uzaklaştırılması ve işlenecek yüzeyin daha iyi soğutulması anlamına gelebilir. Akım, işleme zamanı ve bekleme zamanı parametrelerinin delik performansı açısından optimum değerleri olduğu düşünülmektedir.

3.6. Deney Tasarımı

Deneyisel çalışmada delik performansına etki eden en önemli üç parametrenin I (akım), T_{on} (işleme zamanı) ve T_{off} (bekleme zamanı) olduğu literatür çalışmalarından bilinmektedir. Bu nedenle, kutuplama, işleme boşluğu, dielektrik sıvı basıncı, dielektrik sıvı cinsi, elektrot dönme devir sayısı ve elektrot malzemesi gibi parametreler deneyisel çalışmalarda sabit tutulmuştur.

Deney tasarımı yapabilmek için çok sayıda ön deney yapılmıştır. Yapılan ön deneyler sonucunda her bir işleme parametresi I , T_{on} ve T_{off} için 3 farklı seviye belirlenmiştir. Üç farklı işleme parametresi ve üç farklı seviye ile yapılması gereken deney sayısı Minitab® yazılımı kullanılarak Taguchi metodu ile belirlenmiştir. $L_9 (3^3)$ ortogonal array ile deney tasarımı yapılarak her bir iş parçası ve çap ölçüsü için yapılması gereken deney sayısı dokuz (9) olmak üzere toplam 36 adet delik imal edilerek incelemeye alınmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Deneysel Parametreler

Ti-6Al-4V ve Inconel 718 iş parçalarının delinmesinde kullanılan işleme parametreleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ti-6Al-4V ve Inconel 718 iş parçalarının delinmesinde kullanılan işleme parametreleri

Deney No	I (A)	T _{on} (ms)	T _{off} (ms)
1	8,2	27	16
2	8,2	35	20
3	8,2	44	26
4	10,2	27	20
5	10,2	35	26
6	10,2	44	16
7	12	27	26
8	12	35	16
9	12	44	20

4.2. Deneysel Bulguların Değerlendirilmesi

İş parçaları üzerinde, belirlenen deneysel parametreler ile 400 ve 500 µm çapında delikler imal edilmiştir. Her bir iş parçası malzemesine ait numune parçalarında çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Tablo 4.2- 4.29 arasında deneysel çıktıların işleme parametrelerine bağlı değişimi gösterilmektedir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulguların işleme parametrelerine bağlı değişimi her bir iş parçası malzemesi ve çap ölçüsü için kendi arasında değerlendirilmiştir. Deneysel bulguların değerlendirilmesinde Taguchi analizinden yararlanılmıştır. Her bir iş parçası malzemesi ve çap ölçüsü için deneysel çıktıların ortalaması alınmış ve sonuçlar Taguchi metoduyla yapılan deney tasarımına aktarılmıştır. İşleme parametreleri ile deneysel çıktılar arasındaki ilişki, sinyal gürültü oranı ve ortalama değer tablo ve grafikleri ile ortaya koyulmuştur. Sinyal/gürültü oranını maksimize eden, ortalama deney çıktıların ise minimize eden değerler delik performansını artırdığı için her bir iş parçası malzemesi ve çap ölçüsü için bu değerler tespit edilerek bu değerlerdeki delik performansını veren işleme parametreleri ortaya konmuştur.

4.2.1. Ti-6Al-4V malzemesine ait sonuçlar

Ti-6Al-4V iş parçası üzerine imal edilmiş 400 ve 500 µm çapta imal edilen deliklere ait çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları Tablo 4.2(a) – 4.3(c) arasında verilmiştir. Elde edilen deneysel çıktılar Minitab yazılı kullanılarak Taguchi metoduyla analiz edilmiş olup Tablo 4.4- 4.15 ve Şekil 4.1. – 4.12’de Taguchi analizinden elde edilen tablo ve grafikler verilmiştir.

Çizelge 4.2. (a) Ti-6Al-4V iş parçası, 400µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları (1/2 parça)

Deney No	I (A)	Ton (ms)	Toff (ms)	Giriş Çapı (µm)			Çıkış çapı (µm)			ÇB1 (%)	KONİKLİK_1 (%)
				G1	G2	G3	C1	C2	C3		
1	8,2	27	16	576	568	616	576	560	576	46,67%	0,08%
2	8,2	35	20	544	592	536	200	250	70	39,33%	1,92%
3	8,2	44	26	672	824	992	584	576	584	107,33%	1,24%
4	10,2	27	20	472	576	800	512	504	568	54,00%	0,44%
5	10,2	35	26	544	512	672	450	515	349	44,00%	0,69%
6	10,2	44	16	608	752	912	632	632	632	89,33%	0,63%
7	12	27	26	592	608	640	504	552	552	53,33%	0,39%
8	12	35	16	680	632	648	480	560	592	63,33%	0,55%
9	12	44	20	544	576	544	430	405	223	38,67%	1,01%

Çizelge 4.2. (b) Ti-6Al-4V iş parçası 400µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları (2/2 parça)

Deney No	I (A)	Ton (ms)	Toff (ms)	Giriş Çapı (µm)			Çıkış çapı (µm)			ÇB2 (%)	KONİKLİK_2 (%)
				G1	G2	G3	C1	C2	C3		
1	8,2	27	16	1720	992	672	712	656	648	182,00%	2,28%
2	8,2	35	20	704	680	672	632	688	688	71,33%	0,08%
3	8,2	44	26	840	728	664	656	672	664	86,00%	0,40%
4	10,2	27	20	1010	648	648	632	624	584	92,17%	0,78%
5	10,2	35	26	936	624	608	656	696	688	80,67%	0,21%
6	10,2	44	16	1140	728	712	696	672	688	115,00%	0,87%
7	12	27	26	1170	608	608	576	568	568	98,83%	1,12%
8	12	35	16	1060	680	688	632	608	576	102,33%	1,02%
9	12	44	20	1220	624	624	664	688	688	105,67%	0,71%

Çizelge 4.2.(c) Ti-6Al-4V iş parçası 400 μ m çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçlarının ortalaması

Deney no	I(A)	T _{on} (ms)	T _{off} (ms)	ÇB(%)	Koniklik(%)	Yüzey Pürüzlülüğü R _a (μ m)
1	8,2	27	16	114,33%	1,18%	2,50
2	8,2	35	20	55,33%	1,00%	3,56
3	8,2	44	26	96,67%	0,82%	2,67
4	10,2	27	20	73,08%	0,61%	3,83
5	10,2	35	26	62,33%	0,45%	4,30
6	10,2	44	16	102,17%	0,75%	3,87
7	12	27	26	76,08%	0,76%	3,97
8	12	35	16	82,83%	0,78%	3,40
9	12	44	20	72,17%	0,86%	3,19

Çizelge 4.3.(a) Ti-6Al-4V iş parçası 500 μ m çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları (1/2parça)

Deney no	I (A)	Ton (ms)	Toff (ms)	Giriş Çapı (μ m)			Çıkış çapı (μ m)			ÇB1 (%)	KONİKLİK_1 (%)
				G1	G2	G3	C1	C2	C3		
1	8,2	27	16	816	776	720	1020	1020	1250	119,33%	-1,63%
2	8,2	35	20	1460	1130	1030	712	712	712	42,40%	2,47%
3	8,2	44	26	1330	1140	1110	728	784	736	49,87%	2,22%
4	10,2	27	20	1590	1340	1230	824	736	752	54,13%	3,08%
5	10,2	35	26	1150	928	896	680	680	688	36,53%	1,54%
6	10,2	44	16	1180	869	888	712	712	736	44,00%	1,30%
7	12	27	26	1020	920	896	712	696	728	42,40%	1,17%
8	12	35	16	904	880	840	768	728	744	49,33%	0,64%
9	12	44	20	1030	768	720	704	712	752	44,53%	0,58%

Çizelge 4.3.(b) Ti-6Al-4V iş parçası 500µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(2/2parça)

Deney no	I(A)	Ton (ms)	Toff (ms)	Giriş Çapı(µm)			Çıkış çapı(µm)			ÇB2(%)	KONİKLİK2 (%)
				G1	G2	G3	C1	C2	C3		
1	8,2	27	16	728	816	808	250	220	304	110,53%	2,63%
2	8,2	35	20	976	992	904	760	688	728	45,07%	1,16%
3	8,2	44	26	1120	1100	1440	696	664	744	40,27%	2,59%
4	10,2	27	20	1150	1220	1570	688	672	736	39,73%	3,07%
5	10,2	35	26	792	816	1010	616	584	560	17,33%	1,43%
6	10,2	44	16	864	928	1020	728	744	712	45,60%	1,05%
7	12	27	26	944	944	1100	736	744	744	48,27%	1,27%
8	12	35	16	880	936	1030	784	728	736	49,87%	1,00%
9	12	44	20	728	720	808	736	704	712	43,47%	0,17%

Çizelge 4.3.(c) Ti-6Al-4V iş parçası üzerinde 500µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçlarının ortalaması

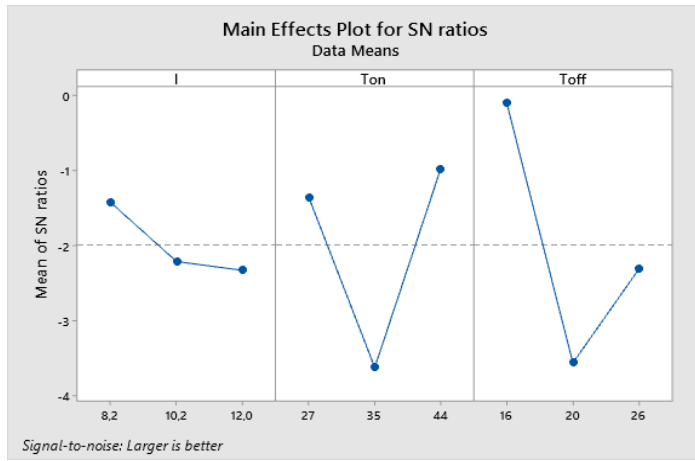
Deney no	I(A)	T _{on} (ms)	T _{off} (ms)	ÇB(%)	Koniklik(%)	Yüzey Pürüzlülüğü R _a (µm)
1	8,2	27	16	114,93%	0,50%	3,63
2	8,2	35	20	43,73%	1,82%	5,53
3	8,2	44	26	45,07%	2,41%	3,18
4	10,2	27	20	46,93%	3,08%	2,79
5	10,2	35	26	26,93%	1,49%	3,94
6	10,2	44	16	44,80%	1,17%	4,12
7	12	27	26	45,33%	1,22%	5,87
8	12	35	16	49,60%	0,82%	3,46
9	12	44	20	44,00%	0,38%	2,42

Çap büyümesinin deney parametrelerine bağlı değişimi

Ti-6Al-4V iş parçası üzerinde delinen deliklerde çap büyümesinin deney parametrelerine bağlı değişimi Tablo 4.4. – 4.7. ve Şekil 4.1. - 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı çizelgesi (400 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	-1,42376	-1,31146	-0,09542
2	-2,21435	-3,62725	-3,56572
3	-2,28112	-0,98052	-2,25809
Delta	0,85737	2,64674	3,47030
Rank	3	2	1



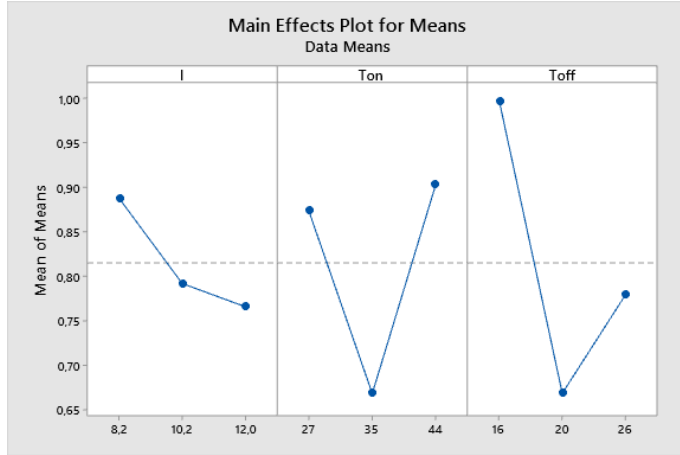
Şekil 4.1. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı grafiği (400 μm)

Çizelge 4.4'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür. Şekil 4.1'den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde $I=8,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=44\text{ms}$, $T_{\text{off}}=16\text{ms}$ değerlerinde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.5. İşleme parametreleri - ortalama çap büyümesi çizelgesi (400 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	0,8878	0,8783	0,9978
2	0,7919	0,6683	0,6686
3	0,7703	0,9033	0,7836
Delta	0,1175	0,2350	0,3292
Rank	3	2	1

Çizelge 4.5'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde ortalama çap büyümesi değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.



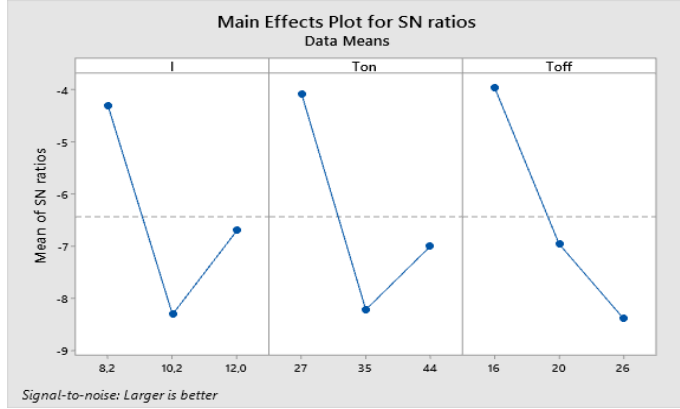
Şekil 4.2. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi grafiği (400 µm)

Şekil 4.2'den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde $I=12A$, $T_{on}=35ms$, $T_{off}=20ms$ değerlerinde ortalama çap büyümesinin en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.6. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı çizelgesi (500 µm)

Level	I	Ton	Toff
1	-4,299	-4,078	-3,952
2	-8,313	-8,223	-6,962
3	-6,698	-7,009	-8,396
Delta	4,014	4,145	4,444
Rank	3	2	1

Çizelge 4.6'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.



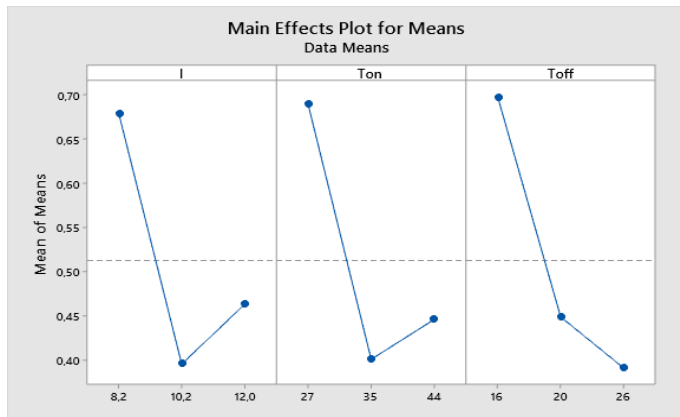
Şekil 4.3. İşleme parametreleri – çap büyümesi sinyal-gürültü oranı grafiği (500 μm)

Şekil 4.3'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde $I=8,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=27\text{ms}$, $T_{\text{off}}=16\text{ms}$ değerlerinde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.7. İşleme parametreleri - ortalama çap büyümesi çizelgesi (500 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	0,6791	0,6907	0,6978
2	0,3956	0,4009	0,4489
3	0,4631	0,4462	0,3911
Delta	0,2836	0,2898	0,3067
Rank	3	2	1

Çizelge 4.7'den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde ortalama çap büyümesi değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi grafiği (500 μm)

Şekil 4.4'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde $I=10,2A$, $T_{on}=35ms$, $T_{off}=26ms$ değerlerinde ortalama çap büyümesinin en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

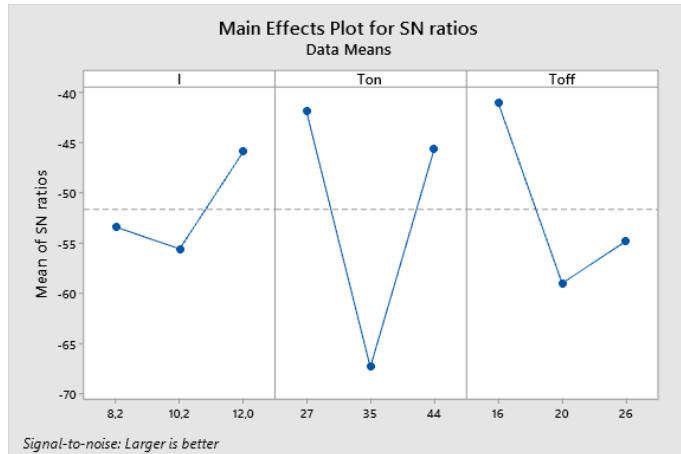
Konikliğin deney parametrelerine bağlı değişimi

Ti-6Al-4V (titanyum) iş parçası üzerinde delinen deliklerde konikliğin deney parametrelerine bağlı değişimi Çizelge 4.8. – 4.11. ve Şekil 4.5. - 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. İşleme parametreleri - koniklik sinyal-gürültü oranı çizelgesi (400 µm)

Level	I	Ton	Toff
1	-53,43	-41,77	-41,06
2	-55,61	-67,37	-59,03
3	-45,78	-45,66	-54,72
Delta	9,83	25,60	17,97
Rank	3	1	2

Çizelge 4.8'den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin T_{on} olduğu görülmüştür.



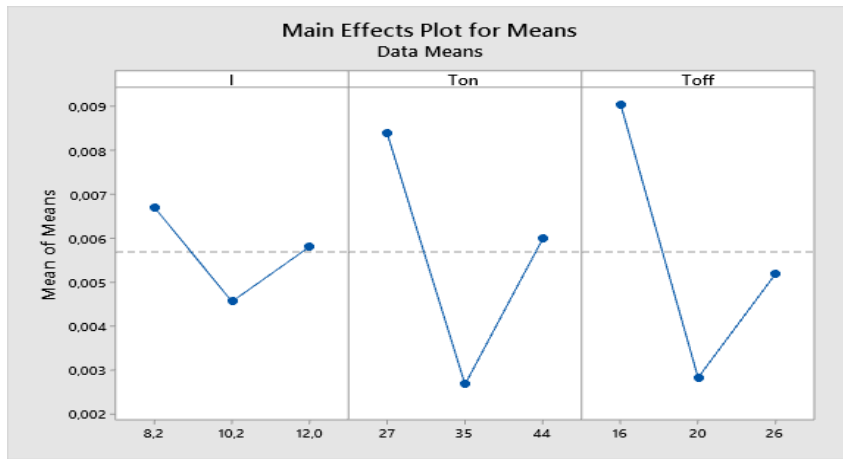
Şekil 4.5. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı grafiği (400 µm)

Şekil 4.5'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde $I=12A$, $T_{on}=27ms$, $T_{off}=16ms$ değerlerinde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.9. İşleme parametreleri – ortalama koniklik çizelgesi (400 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	0,006700	0,008478	0,009044
2	0,004561	0,002678	0,002828
3	0,005894	0,006000	0,005283
Delta	0,002139	0,005800	0,006217
Rank	3	2	1

Çizelge 4.9'dan Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde ortalama koniklik değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.

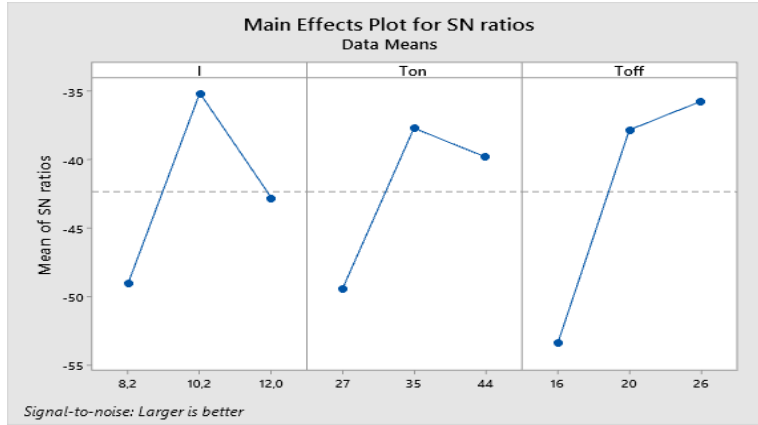
Şekil 4.6. İşleme parametreleri – ortalama koniklik grafiği (400 μm)

Şekil 4.6'dan Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde $I=10,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=35\text{ms}$, $T_{\text{off}}=20\text{ms}$ değerlerinde ortalama konikliğin en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.10. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	-49,06	-49,50	-53,46
2	-35,14	-37,70	-37,83
3	-42,82	-39,81	-35,73
Delta	13,92	11,80	17,72
Rank	2	3	1

Çizelge 4.10'dan Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde koniklik sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.



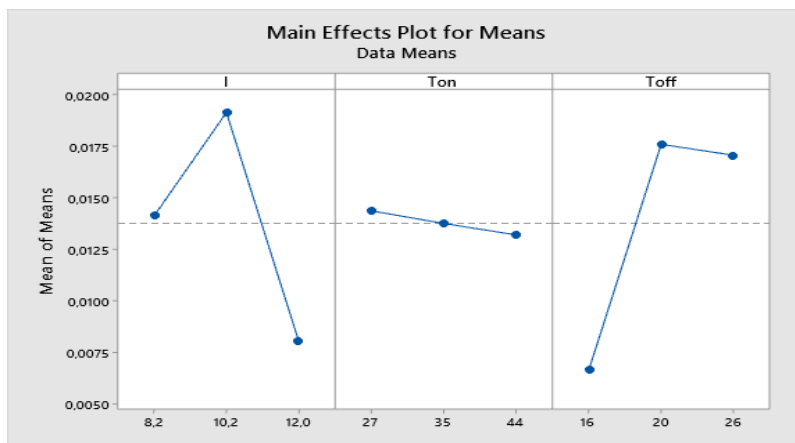
Şekil 4.7 İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı grafiği (500 μm)

Şekil 4.7’den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde $I=10,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=35\text{ms}$, $T_{\text{off}}=26\text{ms}$ değerlerinde koniklik sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.11. İşleme parametreleri – ortalama koniklik çizelgesi (500 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	0,014111	0,014356	0,006664
2	0,019114	0,013739	0,017572
3	0,008056	0,013186	0,017044
Delta	0,011058	0,001169	0,010908
Rank	1	3	2

Çizelge 4.11’den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde ortalama koniklik değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



Şekil 4.8. İşleme parametreleri – ortalama koniklik grafiği (500 μm)

Şekil 4.8'den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde $I=12A$, $T_{on}=44ms$, $T_{off}=16ms$ değerlerinde ortalama konikliğin en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

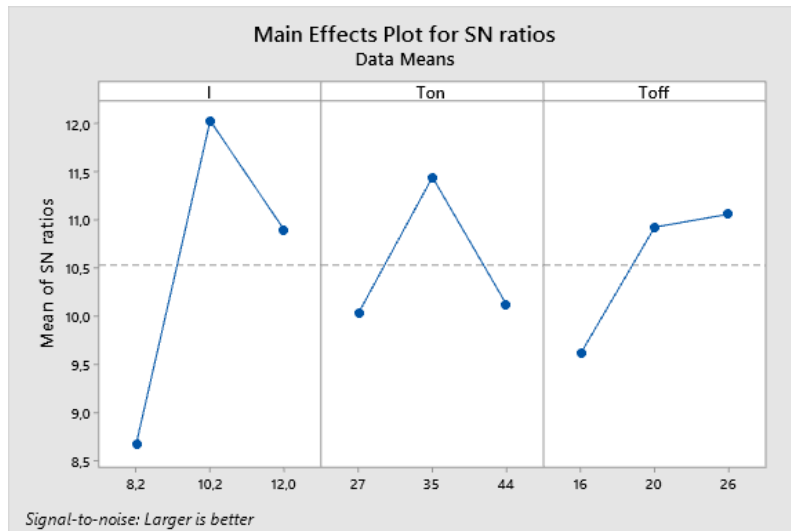
Yüzey pürüzlülüğünün deney parametrelerine bağlı değişimi

Ti-6Al-4V (titanyum) iş parçası üzerinde delinen deliklerde yüzey pürüzlülüğünün deney parametrelerine bağlı değişimi Çizelge 4.12. – 4.15. ve Şekil 4.9. - 4.12.'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı çizelgesi (400 µm)

Level	I	Ton	Toff
1	8,668	10,028	9,609
2	12,029	11,443	10,923
3	10,894	10,120	11,058
Delta	3,361	1,415	1,449
Rank	1	3	2

Çizelge 4.12'den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde yüzey pürüzlülüğü sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



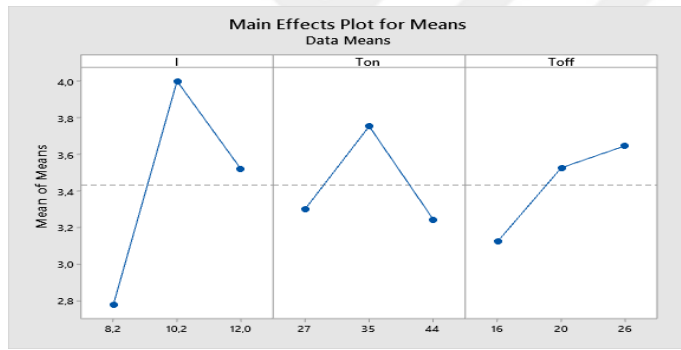
Şekil 4.9. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı grafiği (400 µm)

Şekil 4.9'dan Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde $I=10,2A$, $T_{on}=35ms$, $T_{off}=26ms$ değerlerinde yüzey pürüzlülüğü sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.13. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelgesi (400 µm)

Level	I	Ton	Toff
1	2,777	3,300	3,123
2	4,000	3,753	3,527
3	3,520	3,243	3,647
Delta	1,223	0,510	0,523
Rank	1	3	2

Çizelge 4.13'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde ortalama yüzey pürüzlülüğü değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



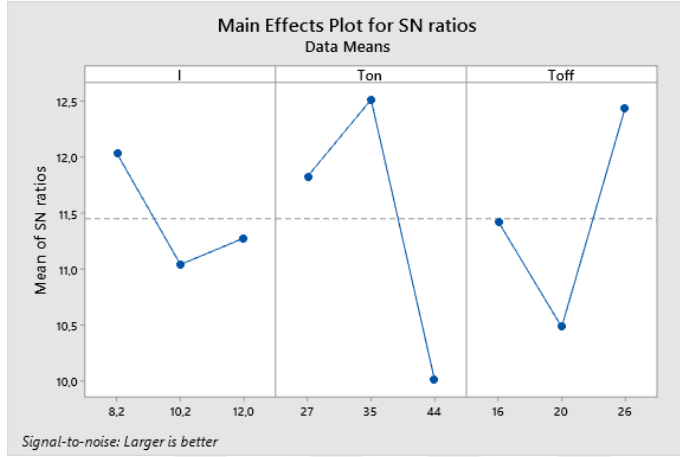
Şekil 4.10. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği (400 µm)

Şekil 4.10'dan Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde $I=8,2A$, $T_{on}=44ms$, $T_{off}=16ms$ değerlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.14. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 µm)

Level	I	Ton	Toff
1	12,03	11,83	11,43
2	11,04	12,52	10,48
3	11,28	10,01	12,44
Delta	0,99	2,51	1,96
Rank	3	1	2

Çizelge 4.14'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde yüzey pürüzlülüğü sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin T_{on} olduğu görülmüştür.



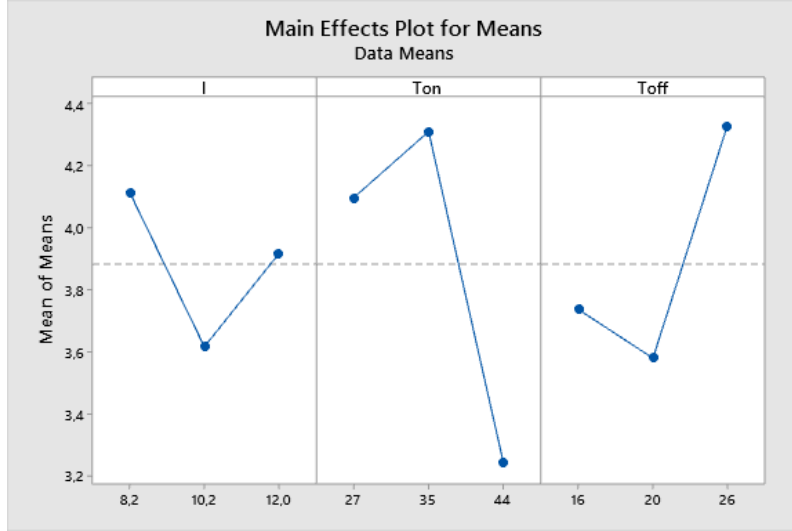
Şekil 4.11. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı grafiği (500 µm)

Şekil 4.11'den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde $I=8,2A$, $T_{on}=35ms$, $T_{off}=26ms$ değerlerinde yüzey pürüzlülüğü sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.15. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelgesi (500 µm)

Level	I	T_{on}	T_{off}
1	4,113	4,097	3,737
2	3,617	4,310	3,580
3	3,917	3,240	4,330
Delta	0,497	1,070	0,750
Rank	3	1	2

Çizelge 4.15'ten Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde ortalama yüzey pürüzlülüğü değişiminde en etkili parametrenin T_{on} olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği (500 μm)

Şekil 4.12’den Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde $I=10,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=44\text{ms}$, $T_{\text{off}}=20\text{ms}$ değerlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

4.2.2. Inconel 718 malzemesine ait sonuçlar

Inconel 718 iş parçası üzerine imal edilmiş 400 ve 500 μm çapta imal edilen deliklere ait çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları Çizelge 4.16(a) – 4.17(c) arasında verilmiştir. Elde edilen deneysel çıktılar Minitab yazılı kullanılarak Taguchi metoduyla analiz edilmiş olup Çizelge 4.16- 4.29 ve Şekil 4.13. – 4.24’de Taguchi analizinden elde edilen Çizelge ve grafikler verilmiştir.

Çizelge 4.16.(a) Inconel 718 iş parçası 400µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(1/2parça)

Deney No	I (A)	Ton (ms)	Toff (ms)	Giriş Çapı (µm)			Çıkış çapı (µm)			ÇB1 (%)	KONİKLİK1 (%)
				G1	G2	G3	C1	C2	C3		
1	8,2	27	16	784	864	904	736	680	696	112,67%	0,73%
2	8,2	35	20	696	728	776	656	616	624	83,33%	0,51%
3	8,2	44	26	672	696	880	520	536	496	87,33%	1,16%
4	10,2	27	20	688	776	1030	640	560	584	107,83%	1,18%
5	10,2	35	26	712	736	1060	672	584	544	109,00%	1,18%
6	10,2	44	16	760	760	1050	560	592	592	114,17%	1,38%
7	12	27	26	656	712	1050	608	688	680	101,50%	0,74%
8	12	35	16	704	704	792	624	656	656	83,33%	0,44%
9	12	44	20	784	800	984	664	624	648	114,00%	1,05%

Çizelge 4.16.(b) Inconel 718 iş parçası 400µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(2/2parça)

Dene y No	I (A)	Ton (ms)	Toff (ms)	Giriş Çapı (µm)			Çıkış çapı (µm)			ÇB2 (%)	KONİKLİK 2 (%)
				G1	G2	G3	C1	C2	C3		
1	8,2	27	16	1380	656	736	592	592	568	113,33%	0,85%
2	8,2	35	20	1020	680	664	584	528	528	131,00%	1,70%
3	8,2	44	26	1040	640	620	570	560	550	97,00%	1,21%
4	10,2	27	20	1090	760	680	560	560	544	110,83%	1,44%
5	10,2	35	26	1130	752	712	608	608	584	116,17%	1,32%
6	10,2	44	16	968	840	760	624	600	608	114,00%	1,23%
7	12	27	26	944	632	760	672	592	632	94,67%	0,73%
8	12	35	16	1180	744	768	616	624	616	124,33%	1,39%
9	12	44	20	1070	800	744	628	648	656	117,83%	1,14%

Çizelge 4.16.(c) Inconel 718 iş parçası üzerinde 400µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçlarının ortalaması

Deney No	I (A)	T _{on} (ms)	T _{off} (ms)	ÇB (%)	Koniklik (%)	Yüzey Pürüzlülüğü R _a (µm)
1	8,2	27	16	113,00%	0,79%	3,09
2	8,2	35	20	107,17%	1,10%	3,71
3	8,2	44	26	92,17%	1,18%	3,78
4	10,2	27	20	109,33%	1,31%	3,07
5	10,2	35	26	112,58%	1,25%	3,33
6	10,2	44	16	114,08%	1,30%	4,04
7	12	27	26	98,08%	0,74%	2,71
8	12	35	16	103,83%	0,92%	3,00
9	12	44	20	115,92%	1,10%	4,70

Çizelge 4.17.(a) Inconel 718 iş parçası 500µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(1/2parça)

Deney No	I (A)	Ton (ms)	Toff (ms)	Giriş Çapı (µm)			Çıkış çapı (µm)			ÇB1 (%)	KONİKLİK1 (%)
				G1	G2	G3	C1	C2	C3		
1	8,2	27	16	800	816	1290	656	688	696	93,73%	1,44%
2	8,2	35	20	768	840	864	680	712	752	64,80%	0,55%
3	8,2	44	26	800	816	968	776	744	776	72,27%	0,48%
4	10,2	27	20	768	1220	1810	776	824	824	153,20%	2,29%
5	10,2	35	26	768	776	1020	712	744	728	70,93%	0,63%
6	10,2	44	16	784	904	1180	744	720	752	91,20%	1,09%
7	12	27	26	768	768	840	752	744	704	58,40%	0,29%
8	12	35	16	776	824	992	736	728	784	72,80%	0,57%
9	12	44	20	808	816	848	760	704	744	64,80%	0,44%

Çizelge 4.17.(b) Inconel 718 iş parçası 500µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçları(2/2parça)

Deney No	I (A)	Ton (ms)	Toff (ms)	Giriş Çapı (µm)			Çıkış çapı (µm)			ÇB2 (%)	KONİKLİK2 (%)
				G1	G2	G3	C1	C2	C3		
1	8,2	27	16	840	792	824	696	680	672	63,73%	0,68%
2	8,2	35	20	928	896	864	744	736	752	79,20%	0,76%
3	8,2	44	26	1130	840	800	808	752	792	84,67%	0,70%
4	10,2	27	20	1330	800	848	832	816	816	98,53%	0,86%
5	10,2	35	26	1100	832	824	752	736	736	83,73%	0,89%
6	10,2	44	16	1070	896	808	776	728	752	84,93%	0,86%
7	12	27	26	1100	808	832	736	736	712	82,67%	0,93%
8	12	35	16	1060	928	848	768	736	752	89,07%	0,97%
9	12	44	20	1110	912	888	736	768	832	94,00%	0,96%

Çizelge 4.17.(c) Inconel 718 iş parçası üzerinde 500µm çapta imal edilen deliklere ait deney sonuçlarının ortalaması

Deney No	I (A)	T _{on} (ms)	T _{off} (ms)	ÇB (%)	Koniklik (%)	Yüzey Pürüzlülüğü R _a (µm)
1	8,2	27	16	78,73%	1,06%	5,83
2	8,2	35	20	72,00%	0,65%	3,04
3	8,2	44	26	78,47%	0,59%	2,32
4	10,2	27	20	125,87%	1,57%	3,78
5	10,2	35	26	77,33%	0,76%	4,56
6	10,2	44	16	88,07%	0,98%	5,66
7	12	27	26	70,53%	0,61%	4,01
8	12	35	16	80,93%	0,77%	4,94
9	12	44	20	79,40%	0,70%	5,59

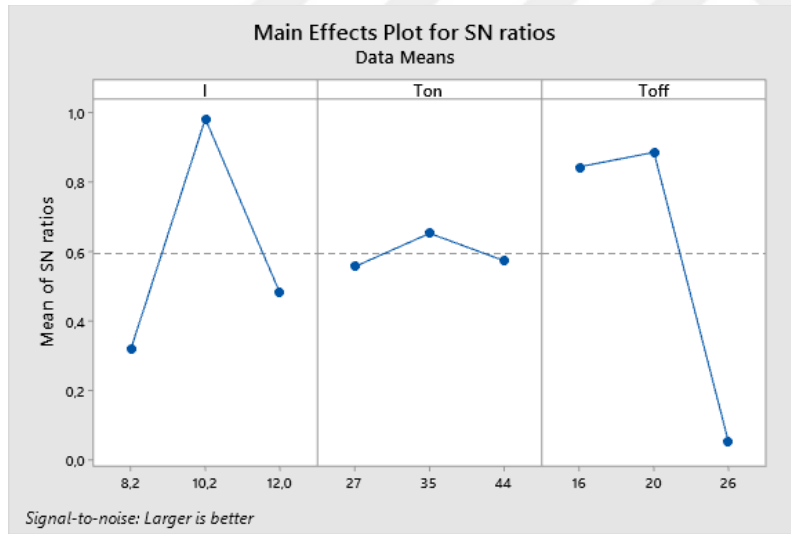
Çap büyümesinin deney parametrelerine bağlı değişimi

Inconel 718 iş parçası üzerinde delinen deliklerde çap büyümesinin deney parametrelerine bağlı değişimi Çizelge 4.18. – 4.21. ve Şekil 4.13. - 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.18. İşleme parametreleri – çap büyümesi sinyal gürültü oranı çizelgesi (400 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	0,31808	0,55617	0,84425
2	0,98299	0,65247	0,88639
3	0,48052	0,57295	0,05095
Delta	0,66491	0,09630	0,83543
Rank	2	3	1

Çizelge 4.18’den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.

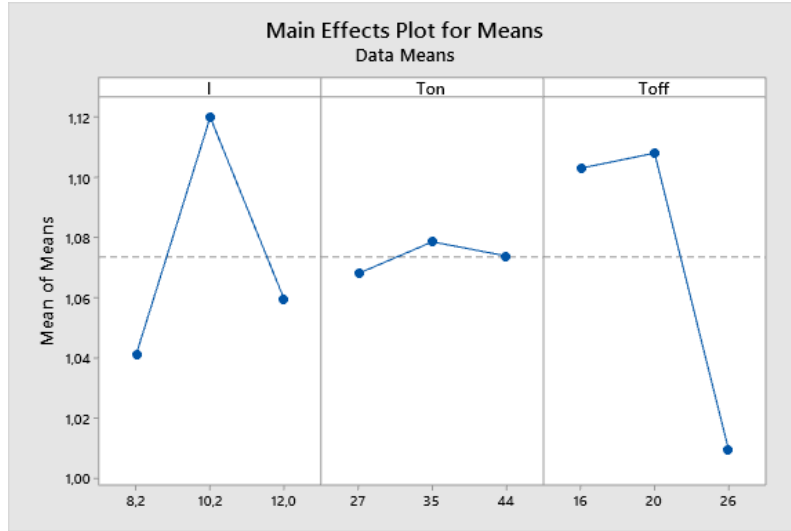


Şekil 4.13. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı grafiği (400 μm)

Şekil 4.13’ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde $I=10,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=35\text{ms}$, $T_{\text{off}}=20\text{ms}$ değerlerinde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.19. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi çizelgesi (400 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	1,041	1,068	1,103
2	1,120	1,079	1,108
3	1,059	1,074	1,009
Delta	0,079	0,011	0,099
Rank	2	3	1

Şekil 4.14. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi grafiği (400 μm)

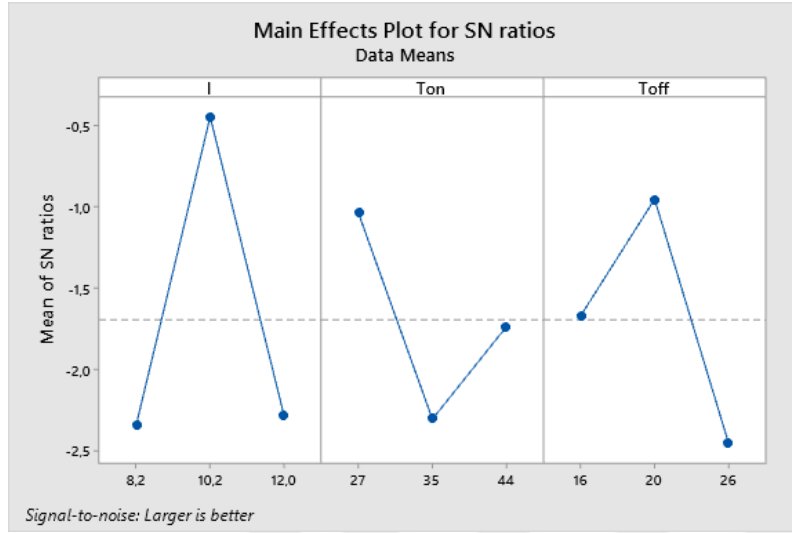
Çizelge 4.19'dan Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde ortalama çap büyümesi değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.

Şekil 4.14'ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde $I=8,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=27\text{ms}$, $T_{\text{off}}=26\text{ms}$ değerlerinde ortalama çap büyümesinin en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.20. İşleme parametreleri – çap büyümesi sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	-2,3455	-1,0369	-1,6727
2	-0,4461	-2,3078	-0,9529
3	-2,2911	-1,7379	-2,4570
Delta	1,8994	1,2709	1,5041
Rank	1	3	2

Çizelge 4.20'den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



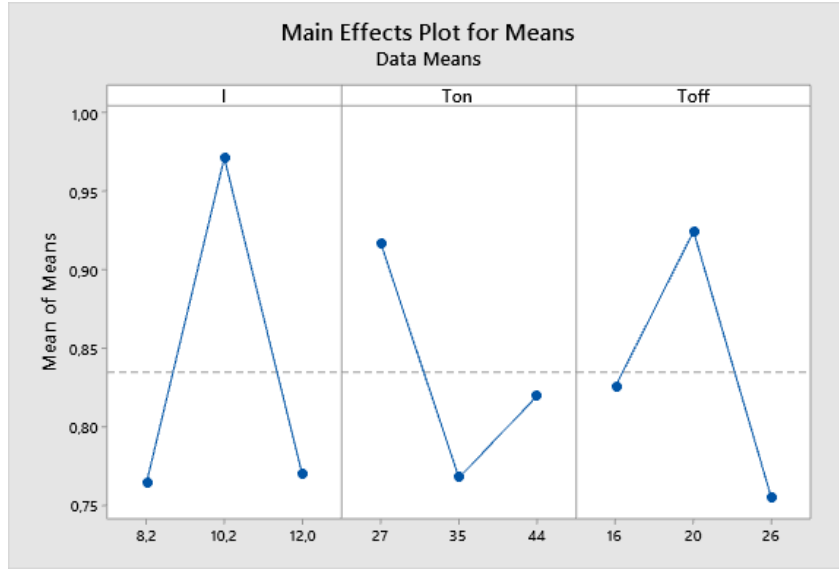
Şekil 4.15. İşleme parametreleri - çap büyümesi sinyal-gürültü oranı grafiği (500 μm)

Şekil 4.15'ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde $I=10,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=27\text{ms}$, $T_{\text{off}}=20\text{ms}$ değerlerinde çap büyümesi sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.21. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi çizelgesi (500 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	0,7640	0,9171	0,8258
2	0,9709	0,7676	0,9242
3	0,7696	0,8198	0,7544
Delta	0,2069	0,1496	0,1698
Rank	1	3	2

Çizelge 4.21'den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde ortalama çap büyümesi değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16. İşleme parametreleri – ortalama çap büyümesi grafiği (500 µm)

Şekil 4.16'dan Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde $I=8,2A$, $T_{on}=35ms$, $T_{off}=26ms$ değerlerinde ortalama çap büyümesinin en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

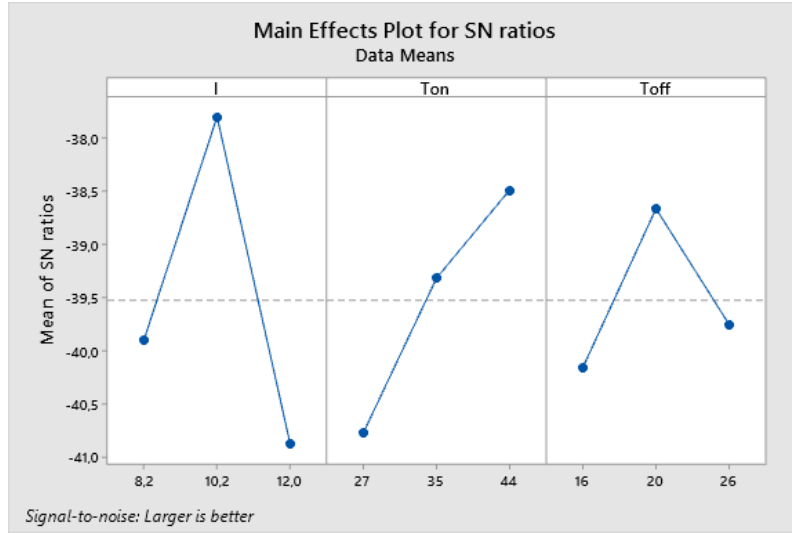
Konikliğin deney parametrelerine bağlı değişimi

Inconel 718 iş parçası üzerinde delinen deliklerde konikliğin deney parametrelerine bağlı değişimi Çizelge 4.22. – 4.25. ve Şekil 4.17. - 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.22. İşleme parametreleri –koniklik sinyal gürültü oranı çizelgesi (400 µm)

Level	I	Ton	Toff
1	-39,90	-40,77	-40,16
2	-37,80	-39,32	-38,66
3	-40,88	-38,49	-39,75
Delta	3,08	2,29	1,50
Rank	1	2	3

Çizelge 4.22'den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde koniklik sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



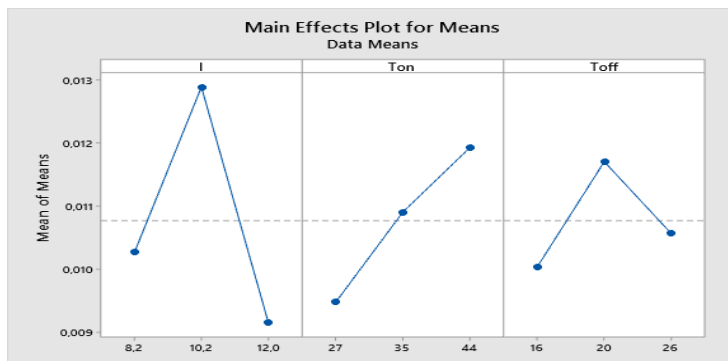
Şekil 4.17. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı grafiği (400 μm)

Şekil 4.17’den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde $I=10,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=44\text{ms}$, $T_{\text{off}}=20\text{ms}$ değerlerinde koniklik sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.23. İşleme parametreleri – ortalama koniklik çizelgesi (400 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	0,010267	0,009472	0,010039
2	0,012889	0,010906	0,011706
3	0,009156	0,011933	0,010567
Delta	0,003733	0,002461	0,001667
Rank	1	2	3

Çizelge 4.23’ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde ortalama koniklik değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



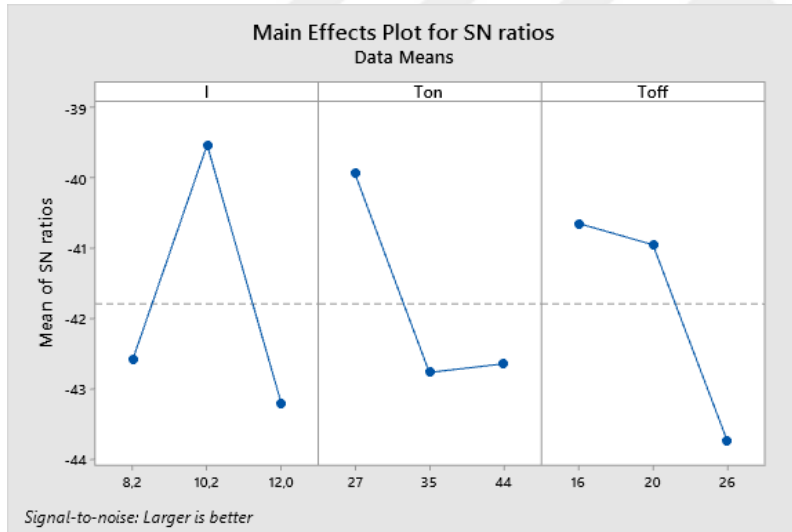
Şekil 4.18. İşleme parametreleri – ortalama koniklik grafiği (400 μm)

Şekil 4.18'den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 µm çaplı deliklerde $I=12A$, $T_{on}=27ms$, $T_{off}=16ms$ değerlerinde ortalama konikliğin en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.24. İşleme parametreleri –koniklik sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 µm)

Level	I	Ton	Toff
1	-42,60	-39,95	-40,66
2	-39,56	-42,78	-40,96
3	-43,23	-42,65	-43,76
Delta	3,67	2,84	3,10
Rank	1	3	2

Çizelge 4.24'ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde koniklik sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



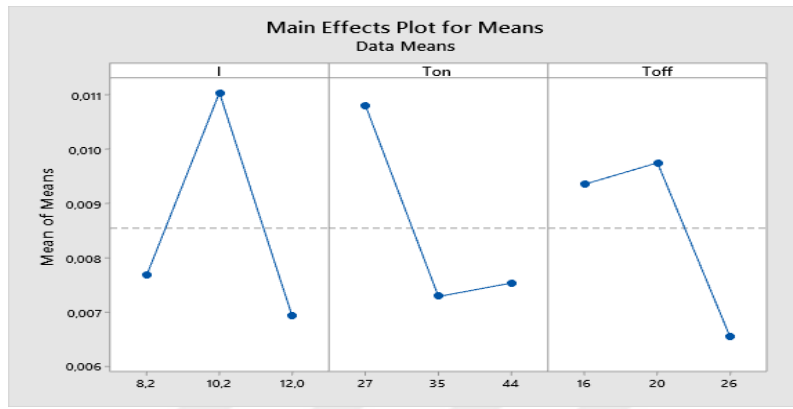
Şekil 4.19. İşleme parametreleri – koniklik sinyal gürültü oranı grafiği (500 µm)

Şekil 4.19'dan Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde $I=10,2A$, $T_{on}=27ms$, $T_{off}=16ms$ değerlerinde koniklik sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.25. İşleme parametreleri – ortalama koniklik çizelgesi (500 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	0,007678	0,010817	0,009356
2	0,011028	0,007278	0,009750
3	0,006928	0,007539	0,006528
Delta	0,004100	0,003539	0,003222
Rank	1	2	3

Çizelge 4.25'ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde ortalama koniklik değişiminde en etkili parametrenin I olduğu görülmüştür.



Şekil 4.20. İşleme parametreleri – ortalama koniklik grafiği (500 μm)

Şekil 4.20'den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde $I=12\text{A}$, $T_{\text{on}}=35\text{ms}$, $T_{\text{off}}=26\text{ms}$ değerlerinde ortalama konikliğin en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Yüzey pürüzlülüğünün deney parametrelerine bağlı değişimi

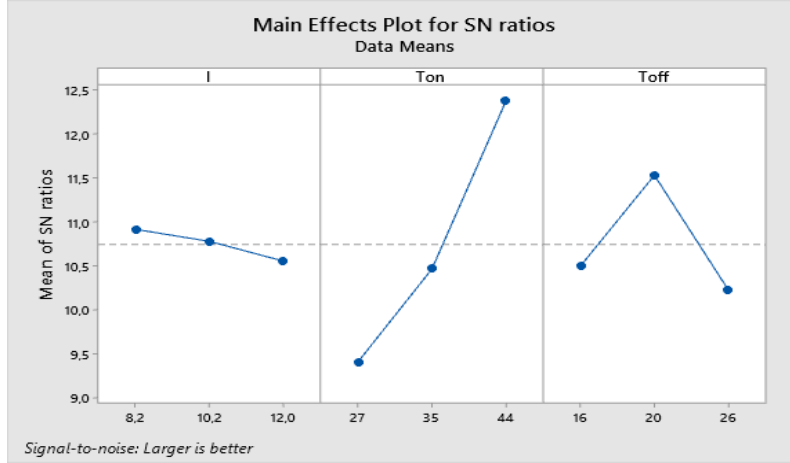
Inconel 718 iş parçası üzerinde delinen deliklerde konikliğin deney parametrelerine bağlı değişimi Çizelge 4.26. – 4.29. ve Şekil 4.21. - 4.24'te verilmiştir.

Çizelge 4.26. İşleme parametreleri –yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı çizelgesi (400 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	10,910	9,400	10,490
2	10,773	10,460	11,524
3	10,548	12,371	10,217
Delta	0,362	2,970	1,307

Rank	3	1	2
------	---	---	---

Çizelge 4.26'ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde yüzey pürüzlülüğü sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin T_{on} olduğu görülmüştür.



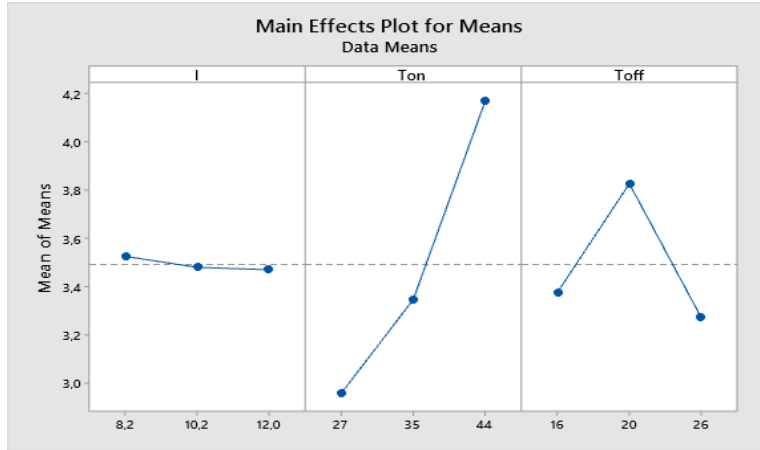
Şekil 4.21. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı grafiği (400 μm)

Şekil 4.21'den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde $I=8,2\text{A}$, $T_{\text{on}}=44\text{ms}$, $T_{\text{off}}=20\text{ms}$ değerlerinde yüzey pürüzlülüğü sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.27. İşleme parametreleri –ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelgesi (400 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	3,526	2,957	3,377
2	3,480	3,347	3,827
3	3,470	4,172	3,272
Delta	0,056	1,216	0,554
Rank	3	1	2

Çizelge 4.27'den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde ortalama yüzey pürüzlülüğü değişiminde en etkili parametrenin T_{on} olduğu görülmüştür.



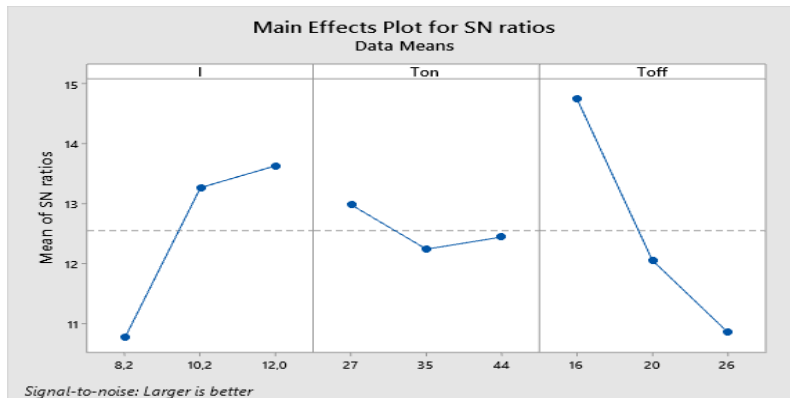
Şekil 4.22. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği (400 μm)

Şekil 4.22’den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 400 μm çaplı deliklerde $I=12\text{A}$, $T_{\text{on}}=27\text{ms}$, $T_{\text{off}}=26\text{ms}$ değerlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.28. İşleme parametreleri –yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı çizelgesi (500 μm)

Level	I	Ton	Toff
1	10,76	12,98	14,75
2	13,26	12,24	12,05
3	13,63	12,44	10,85
Delta	2,87	0,74	3,90
Rank	2	3	1

Çizelge 4.28’den Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 μm çaplı deliklerde yüzey pürüzlülüğü sinyal-gürültü oranının değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.



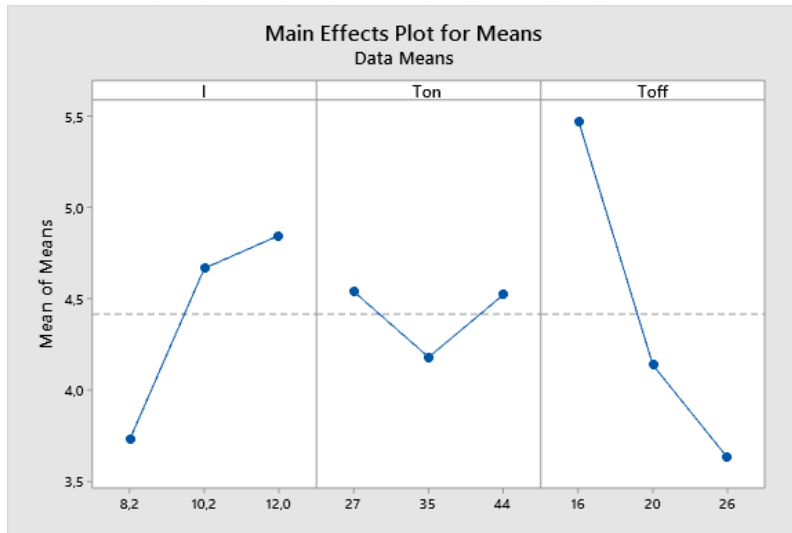
Şekil 4.23. İşleme parametreleri – yüzey pürüzlülüğü sinyal gürültü oranı grafiği (500 µm)

Şekil 4.23'ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde $I=12A$, $T_{on}=27ms$, $T_{off}=16ms$ değerlerinde yüzey pürüzlülüğü sinyal-gürültü oranının en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

Çizelge 4.29. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelgesi (500 µm)

Level	I	Ton	Toff
1	3,730	4,540	5,477
2	4,667	4,180	4,137
3	4,847	4,523	3,630
Delta	1,117	0,360	1,847
Rank	2	3	1

Çizelge 4.29'dan Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde ortalama yüzey pürüzlülüğü değişiminde en etkili parametrenin T_{off} olduğu görülmüştür.



Şekil 4.24. İşleme parametreleri – ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği (500 µm)

Şekil 4.24'ten Inconel 718 iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen 500 µm çaplı deliklerde $I=8,2A$, $T_{on}=35ms$, $T_{off}=26ms$ değerlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük seviyede gerçekleştiği görülmüştür.

4.3. Deneysel Bulguların Yorumlanması

Çizelge 4.30. – 4.32.’de deneysel çalışma sonucu elde edilen en iyi delik performansları ve delik performansı üzerinde en etkin işleme parametreleri ile delik kalitesinin artmasını sağlayacak işleme parametreleri kombinasyonunu gösteren tablolar verilmiştir. Elde edilen veriler çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü yönünden ele alınmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan giriş ve çıkış çap ölçümlerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.25.- 4.32. arasında verilmiştir.

Ti-6Al-4V iş parçasında, Inconel 718 iş parçasına kıyasla hem 400 hem de 500 μm çapta delinen deliklerde çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü daha iyidir. Bu durumun nedeni Inconel 718 malzemenin Ti-6Al-4V malzemeye kıyasla ısı ve elektriksel iletkenliğinin daha yüksek, ergime sıcaklığının daha düşük olması olabilir. Bu durumun nedeni şöyle açıklanabilir;

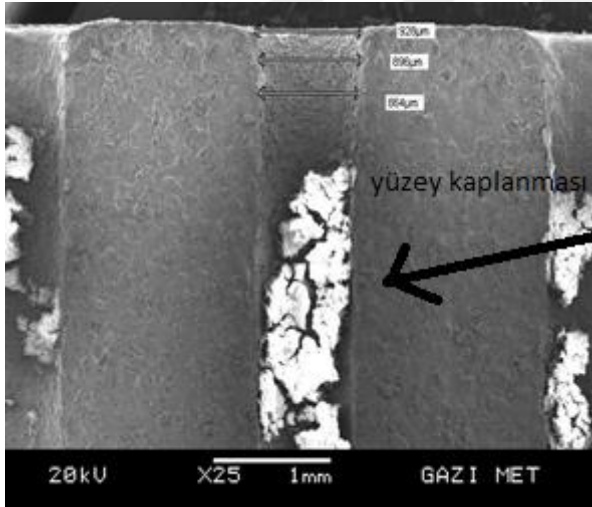
Isıl iletkenliği daha fazla olan malzeme deşarj enerjisini daha fazla tutar. Bu nedenle aşınma daha fazla olur. Ti-6Al-4V malzemenin ısı iletkenliği ($7,2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$), Inconel 718 malzemenin ısı iletkenliğine ($11,4 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$) kıyasla daha düşük olduğundan aynı deşarj enerjisine maruz kaldıklarında Inconel 718 malzeme deşarj enerjisini daha fazla tutarak daha çok aşınacaktır.

Elektriksel direnci daha düşük olan malzeme daha düşük deşarj enerjisi ile işlenebilir. Ti-6Al-4V malzemenin elektriksel direnci ($1,780 \mu\Omega \text{ mm}$), Inconel 718 malzemenin elektriksel direncine ($1,210 \mu\Omega \text{ mm}$) kıyasla daha yüksek olduğundan aynı deşarj enerjisine maruz kaldıklarında Inconel 718 malzemenin elektriksel iletkenliği daha fazla olduğundan daha çok aşınacaktır.

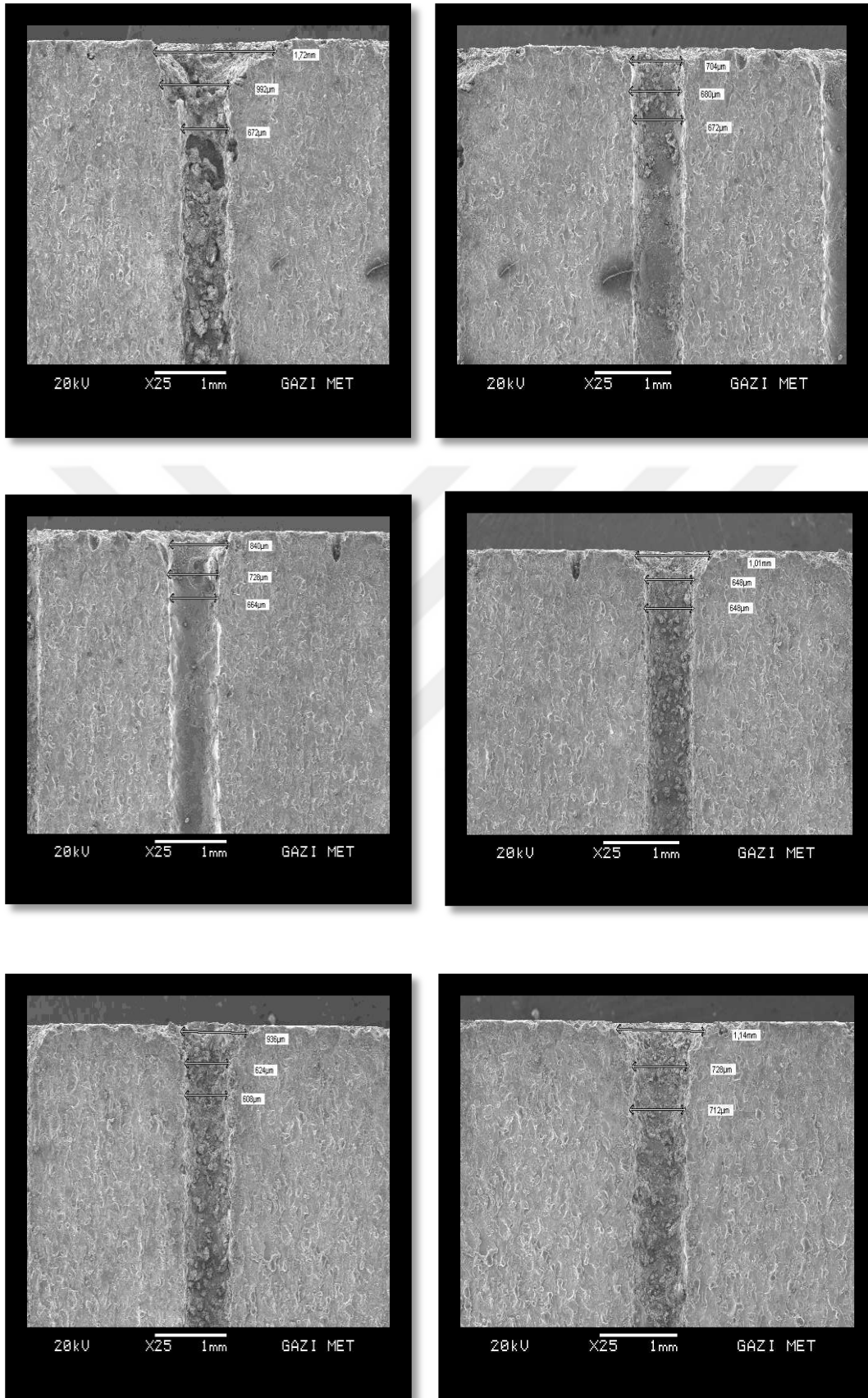
Ergime sıcaklığı daha düşük olan malzeme aynı deşarj enerjisi ile daha kolay işlenebilir dolayısıyla daha kolay aşınır. Ti-6Al-4V malzemenin ergime sıcaklığı (1604°C), Inconel 718 malzemenin ergime sıcaklığından ($1,210\text{--}1,344^\circ\text{C}$) daha yüksek olduğundan aynı deşarj enerjisine maruz kaldıklarında Inconel 718 daha kolay aşınır.

Şekil 4.29.-4.32. arasında, Inconel 718 iş parçası üzerinde 400 ve 500 μm çapta delinen deliklerde yüzey kaplanması olduğu görülmektedir. Şekil 4.1’de Inconel 718 malzeme üzerinde delinen deliklerde meydana gelen yüzey kaplanmasına ilişkin bir örnek gösterilmiştir. Yüzey kaplanması, aşındırılan iş parçası yüzeyinden kopan parçacıkların bekleme süresi boyunca ortamdaki uzaklaştırılamaması ve tekrar yüzeye yapışması sonucu meydana gelir. Ti-6Al-4V iş parçasına kıyasla Inconel 718 iş parçası üzerinde delinen deliklerde yüzey kaplanmasının daha fazla görülmesinin nedeni Inconel 718’in termal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak aşındırmanın daha fazla olması ve oluşan çapakların ortamdaki uzaklaştırılamamasıdır.

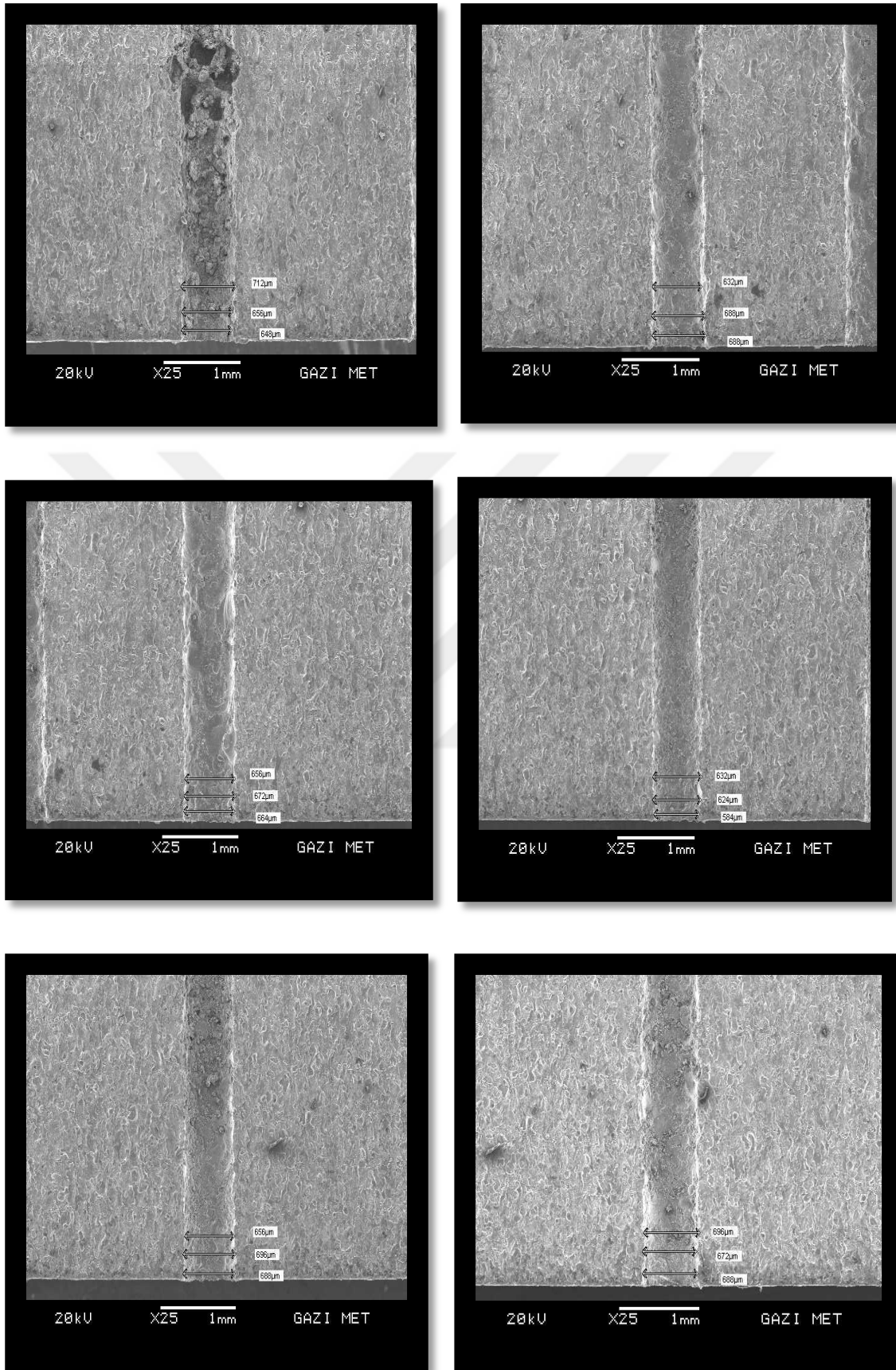
Inconel 718 malzemenin ısı iletkenliği Ti-6Al-4V malzemeye kıyasla daha fazla, elektriksel direnci ve ergime noktası daha düşük olduğundan Inconel 718 daha çok aşınır. Meydana gelen çapakların bekleme süresi boyunca ortamdaki uzaklaştırılması zorlaşır ve yüzey kaplanması oluşur.



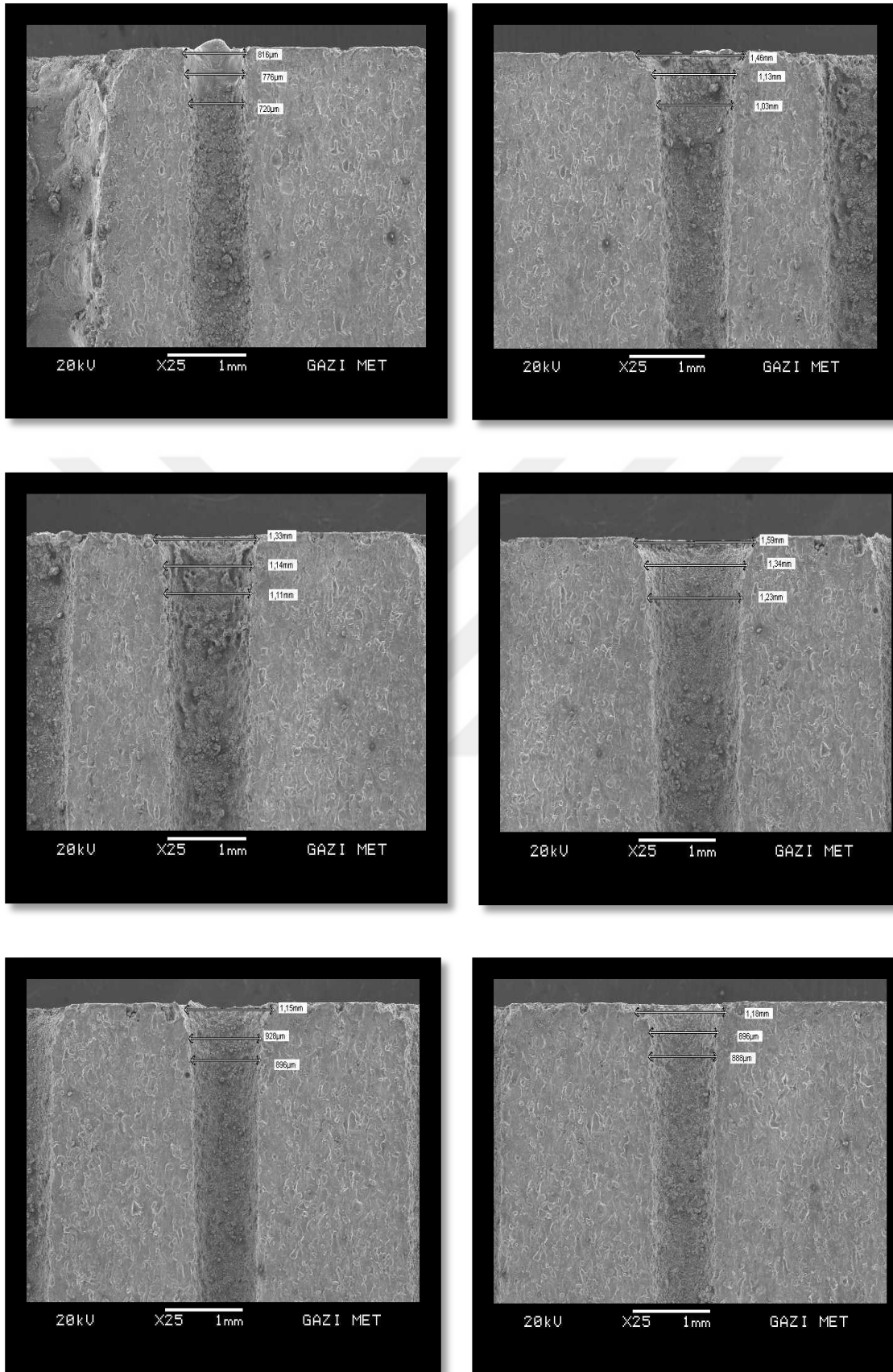
Resim 4.1 Yüzey kaplanmasının gösterimi



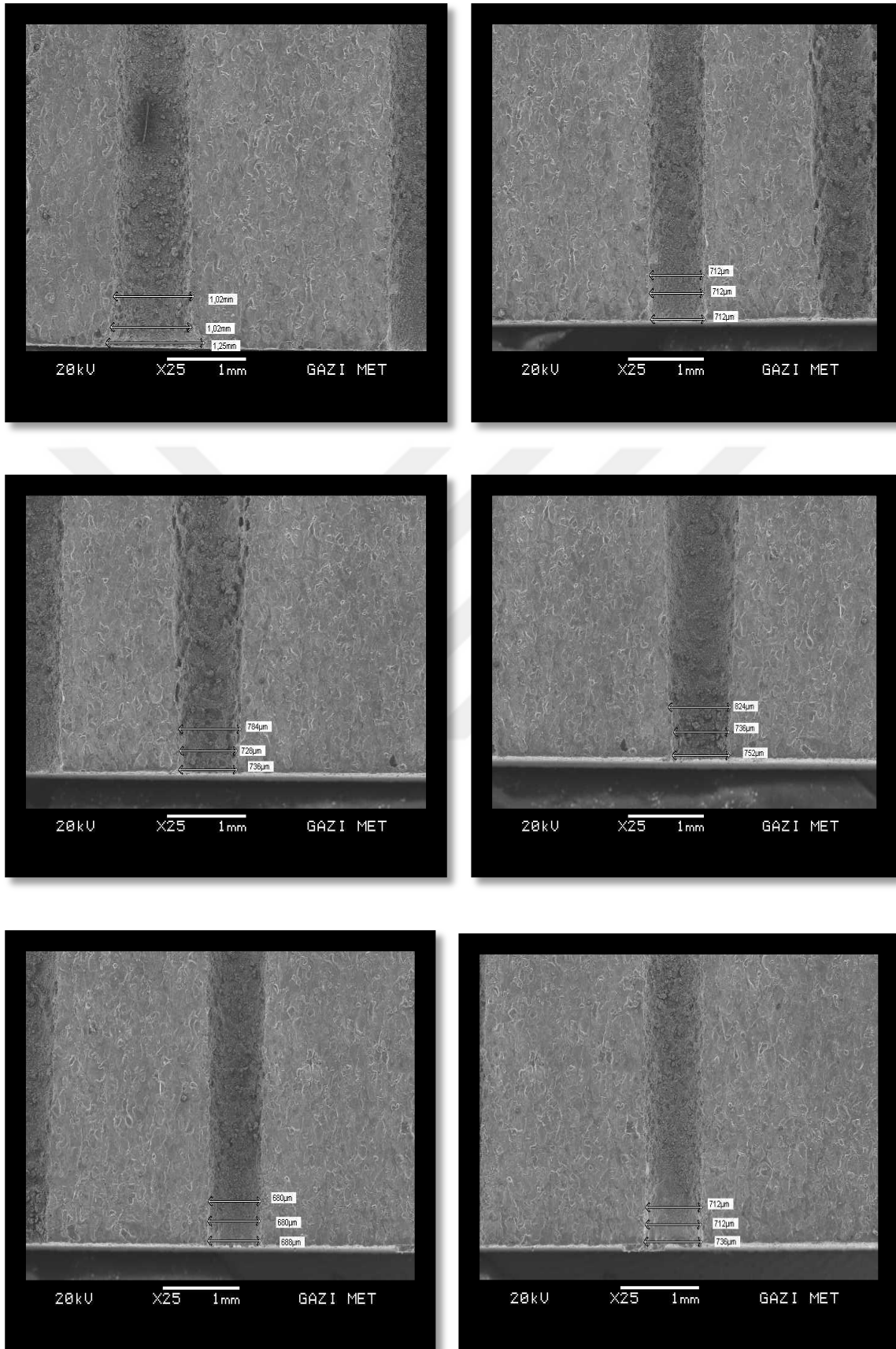
Şekil 4.25. Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 400 µm çapta delinen deliklere ait giriş çapı görüntüleri



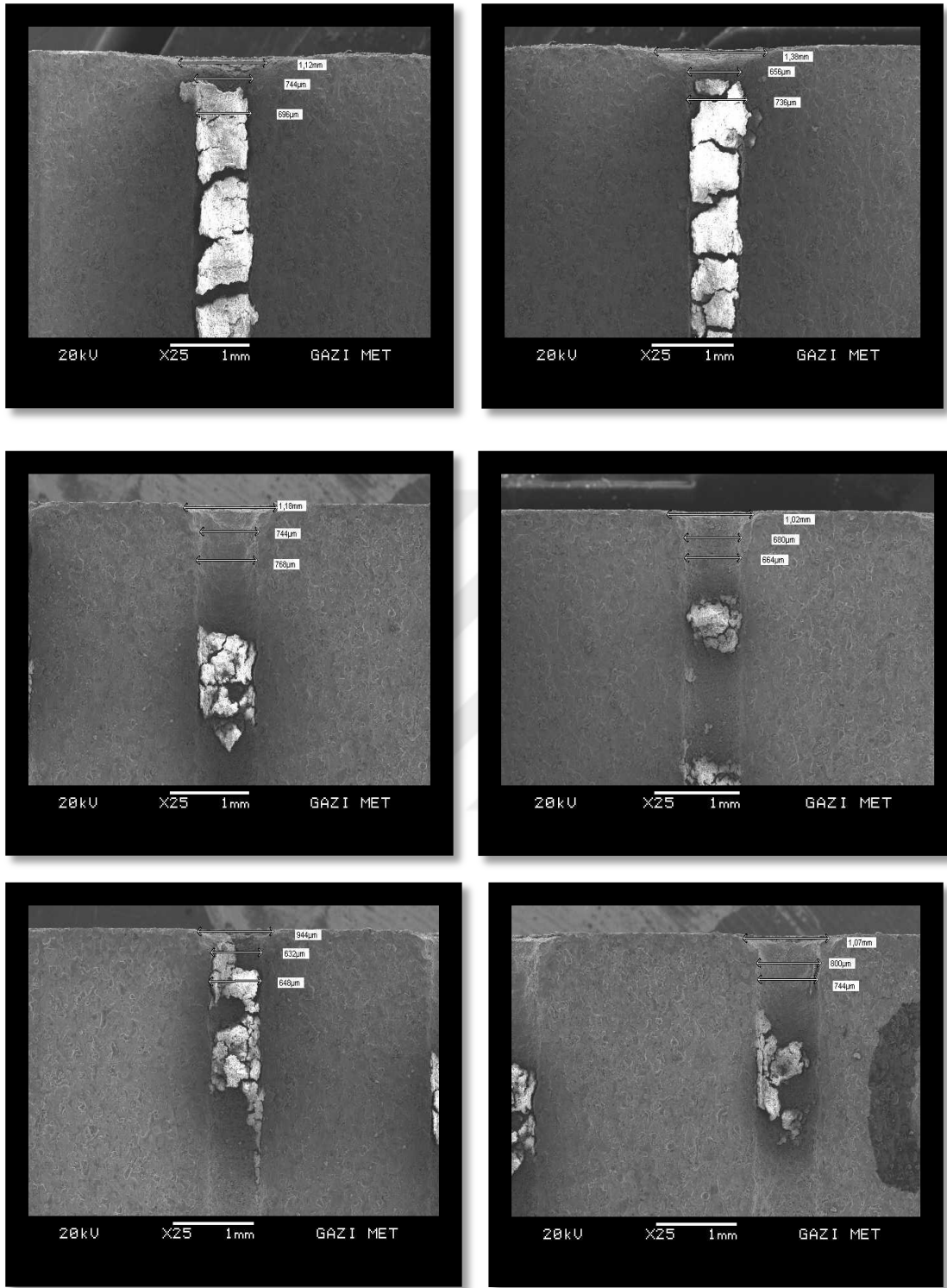
Şekil 4.26. Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 400 µm çapta delinen deliklere ait çıkış çapı görüntüleri



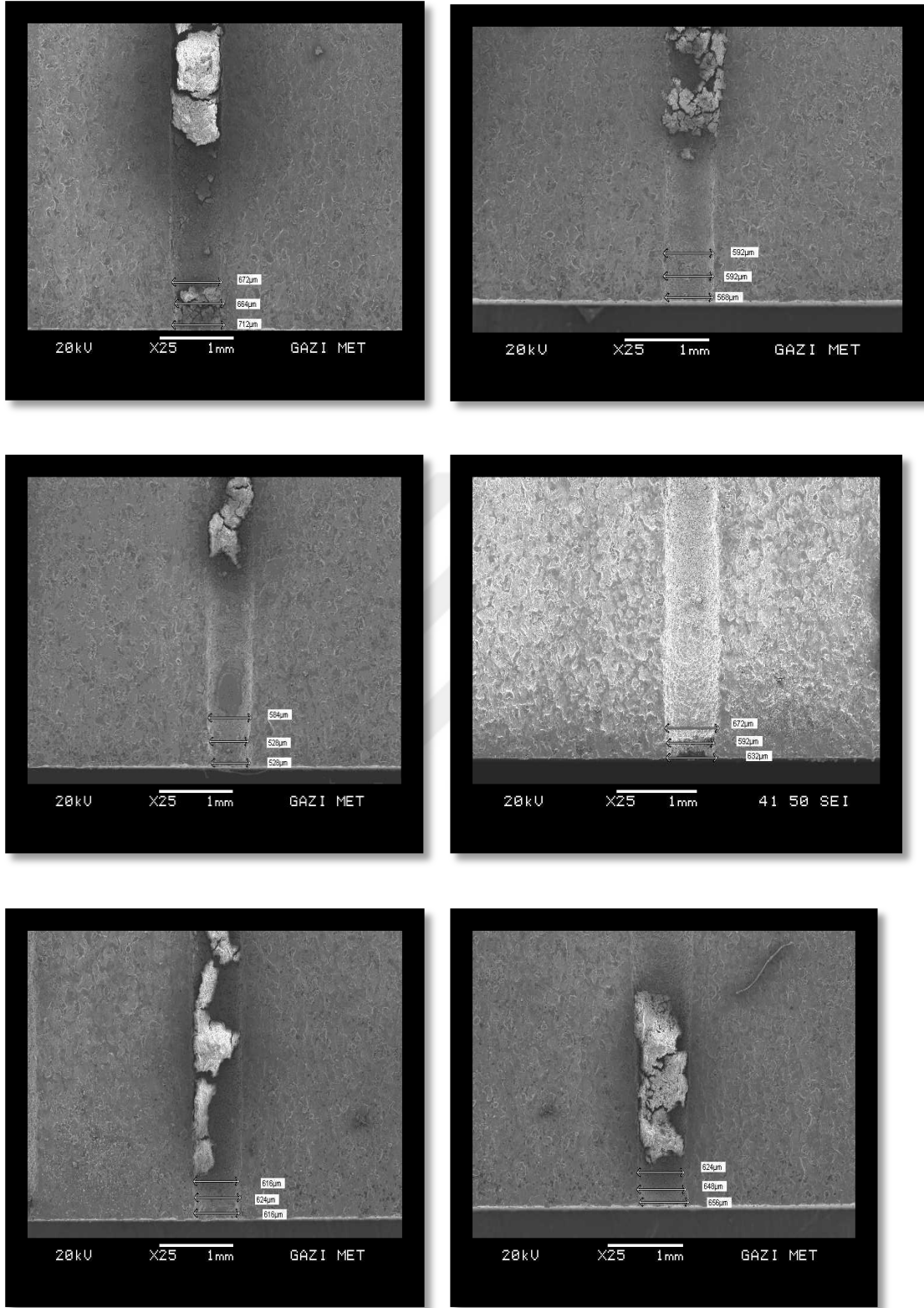
Şekil 4.27. Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 500 µm çapta delinen deliklere ait giriş çapı görüntüleri



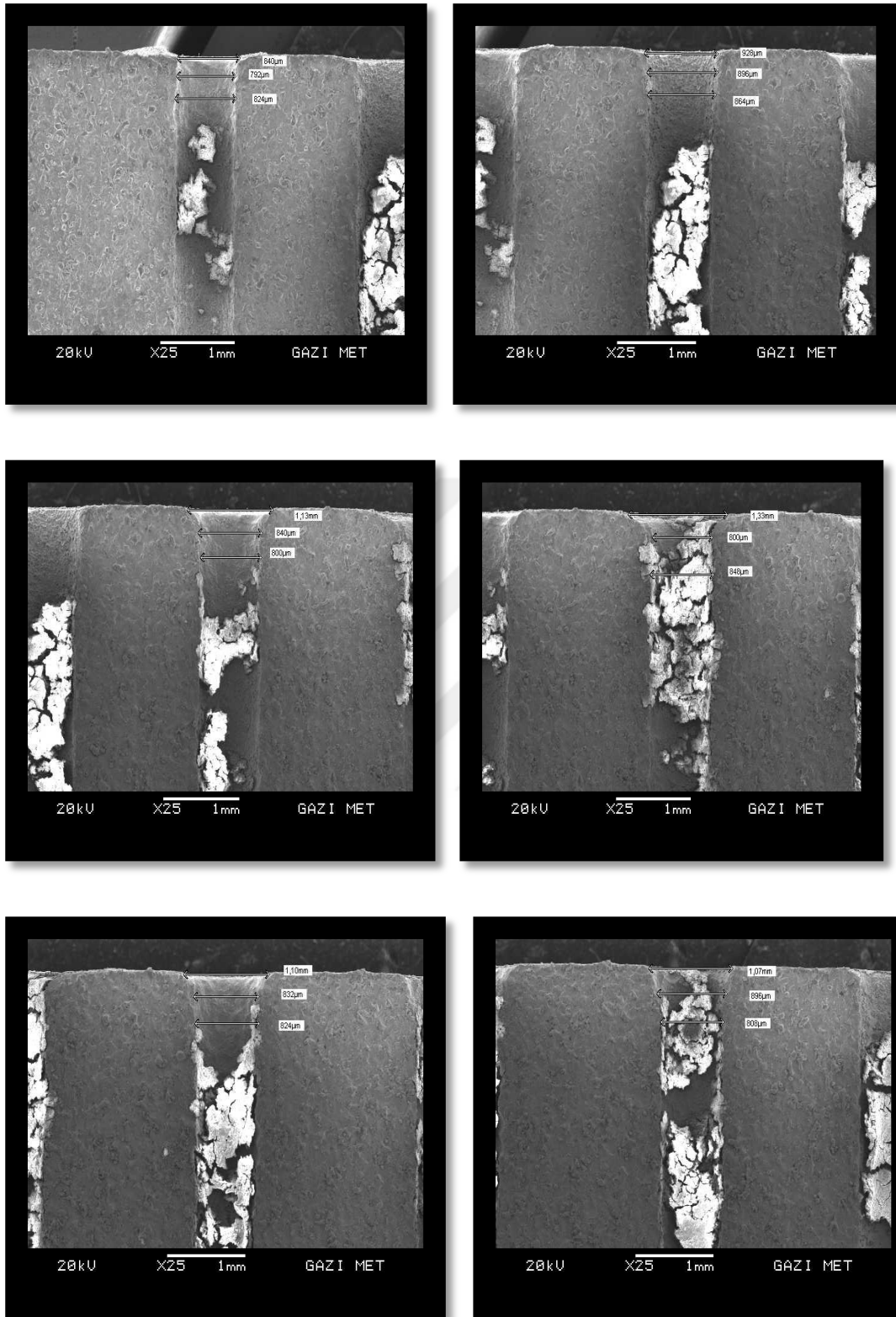
Şekil 4.28. Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 500 µm çapta delinen deliklere ait çıkış çapı görüntüleri



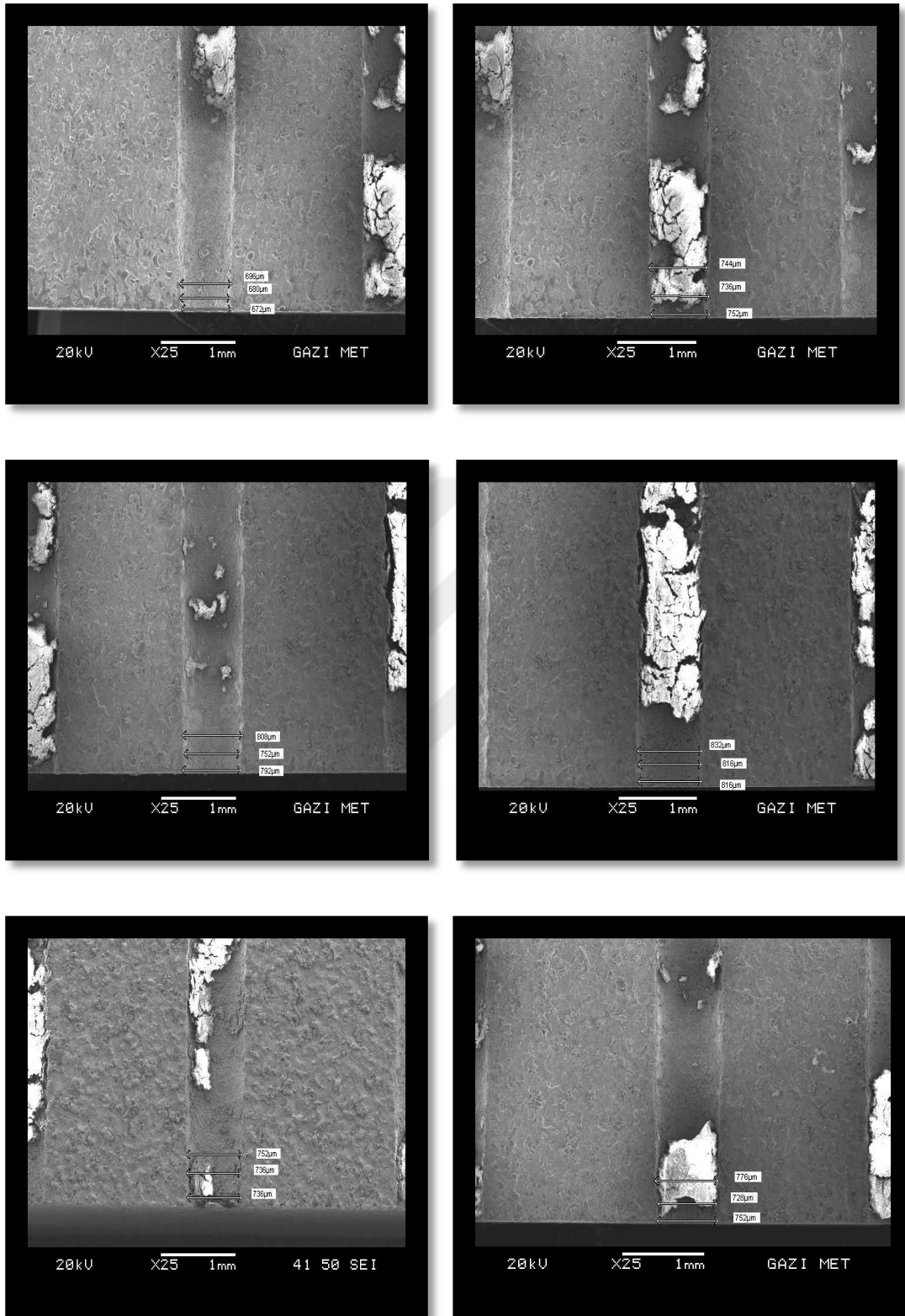
Şekil 4.29. Inconel 718 malzeme üzerinde 400 µm çapta delinen deliklere ait giriş çapı görüntüleri



Şekil 4.30. Inconel 718 malzeme üzerinde 400 μm çapta delinen deliklere ait çıkış çapı görüntüleri



Şekil 4.31. Inconel 718 malzeme üzerinde 500 µm çapta delinen deliklere ait giriş çapı görüntüleri



Şekil 4.32. Inconel 718 malzeme üzerinde 500 μm çapta delinen deliklere ait çıkış çapı görüntüleri

4.3.1. Çap büyümesi

Çizelge 4.30. İşleme parametrelerinin çap büyümesi üzerine etkisi

ÇAP BÜYÜMESİ			S/N				MEAN			
İş parçası malzemesi	Çap	En düşük çap büyümesi (%)	En etkin işleme parametresi	En yüksek S/N yi sağlayan işleme parametreleri			En etkin işleme parametresi	En iyi deneysel çıktıları veren işleme parametreleri		
				I(A)	Ton(ms)	Toff(ms)		I(A)	Ton(ms)	Toff(ms)
Ti-6Al-4V	400	55,33%	Toff	8,2	44	16	Toff	12	35	20
	500	26,93%	Toff	8,2	27	16	Toff	10,2	35	26
Inconel 718	400	92,17%	Toff	10,2	35	20	Toff	8,2	27	26
	500	70,53%	I	10,2	27	20	I	8,2	35	26

EEİ ile imal edilen deliklerin çapları, kullanılan elektrot çapından her zaman daha büyüktür. Hassasiyetin önemli olduğu uygulamalarda çap büyümesinin kontrolü önem arz etmektedir. Çap büyümesi, elektrotun sadece uç kısmından değil aynı zamanda yan yüzeyleriyle de imal edilmek istenen deliğin yan duvarlarını aşındırmasından kaynaklanmaktadır.

Çap büyümesi üzerinde en etkin işleme parametresi T_{off} olarak gerçekleşmiştir. Bekleme zamanında, işleme yüzeyi soğutulur ve işleme yüzeyinden çapaklar uzaklaştırılır. İşleme yüzeyinin soğutulması, işleme zamanı boyunca iş parçasından koparılan krater büyüklüğünü azaltır ve koparılan kraterlerin uzaklaştırılarak istenmeyen deşarjların azalmasını sağlar bu sayede elektrot aşınması da azalır.

T_{off} 'un krater büyüklüğü, istenmeyen deşarjlar ve elektrot aşınması üzerinde diğer iki işleme parametresine kıyasla daha etkili olduğu bu sayede çap büyümesi üzerindeki etkisinin de verilen deney seti içerisinde en fazla olduğu düşünülmektedir. Hem Ti-6Al-4V hem de Inconel 718 iş parçasında delik çapı küçüldükçe çap büyümesinin arttığı görülmüştür. Bu durumun nedeninin çap küçüldükçe elektrot dayanımının azalması olduğu söylenebilir. Ti-6Al-4V iş parçasında, Inconel 718 iş parçasına kıyasla hem 400 hem de 500 μm çapta delinen deliklerde çap büyümesi daha iyidir. Bu durumun nedeni Inconel 718 malzemenin Ti-6Al-4V malzemeye kıyasla ısı ve elektriksel iletkenliğinin daha yüksek, ergime sıcaklığının daha düşük olması olabilir.

4.3.2. Koniklik

Çizelge 4.31. İşleme parametrelerinin koniklik üzerine etkisi

KONİKLİK			S/N				MEAN			
İş parçası malzemesi	Çap	En düşük koniklik (%)	En etkin işleme parametresi	En yüksek S/N yi sağlayan işleme parametreleri			En etkin işleme parametresi	En iyi deneysel çıktıları veren işleme parametreleri		
				I(A)	Ton(ms)	Toff(ms)		I(A)	Ton(ms)	Toff(ms)
Ti-6Al-4V	400	0,45%	Ton	12	27	16	Toff	10,2	35	20
	500	0,38%	Toff	10,2	35	26	I	12	44	16
Inconel 718	400	0,74%	I	10,2	44	20	I	12	27	16
	500	0,59%	I	10,2	27	16	I	12	35	26

EEİ metodunda işlenmiş deliklerde çıkış çapı giriş çapından daha küçüktür. Bu durum koniklik olarak adlandırılmaktadır. EEİ ile işlenen deliklerin konik olmasının sebebi, işleme bölgesinde meydana gelen boşalımın elektrotun uç bölgesinde yoğunlaşması, bunun sonucunda elektrotun uç kısmının konikleşmesi ve çalışma ortamından uzaklaştırılamayan çapaklar ile elektrot yüzeyi arasında meydana gelen istenmeyen boşalımlardır.

Koniklik üzerinde en etkin işleme parametresi akım olarak gerçekleşmiştir. Akımın işleme bölgesinde enerji yoğunluğu üzerinde daha etkili olduğu bu sayede koniklik üzerindeki etkisinin de verilen deney seti içerisinde en fazla olduğu düşünülmektedir.

Hem Ti-6Al-4V hem de Inconel 718 iş parçasında delik çapı küçüldükçe konikliğin arttığı görülmüştür. Bu durumun nedeninin çap küçüldükçe elektrot dayanımının azalması ve elektrotun aşınması olduğu söylenebilir. Ti-6Al-4V iş parçasında, Inconel 718 iş parçasına kıyasla hem 400 hem de 500 µm çapta delinen deliklerde koniklik daha iyidir. Bu durumun nedeni Inconel 718 malzemenin Ti-6Al-4V malzemeye kıyasla ısı ve elektriksel iletkenliğinin daha yüksek, ergime sıcaklığının daha düşük olması olabilir.

4.3.3. Yüzey pürüzlülüğü

Çizelge 4.32. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi

YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ			S/N				MEAN			
İş parçası malzemesi	Çap	En düşük yüzey pürüzlülüğü (µm)	En etkin işleme parametresi	En yüksek S/N yi sağlayan işleme parametreleri			En etkin işleme parametresi	En iyi deneysel çıktıları veren işleme parametreleri		
				I(A)	Ton(ms)	Toff(ms)		I(A)	Ton(ms)	Toff(ms)
Ti-6Al-4V	400	2,50	I	10,2	35	26	I	8,2	44	16
	500	2,42	Ton	8,2	35	26	Ton	10,2	44	20
Inconel 718	400	2,71	Ton	8,2	44	20	Ton	12	27	26
	500	2,32	Toff	12	27	16	Toff	8,2	35	26

EEİ metodunda iş parçasından koparılan malzeme krater yapısındadır. Bu nedenle, EEİ ile mal edilen deliklerin yüzey yapıları çukur ve tümseklidir. EEİ metodunda kullanılan işleme parametreleri, iş parçası yüzeyinden koparılan krater büyüklüğünü etkileyerek yüzey pürüzlülüğünü değiştirmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü, tüm deney setlerinde birbirlerine çok yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Ti-6Al-4V iş parçası üzerinde 400 µm çapta delinen deliklerde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkin parametre akım, 500 µm çaplı deliklerde T_{on} ; Inconel 718 iş parçası üzerinde 400 µm çapta delinen deliklerde en etkin parametre T_{on} , 500 µm çaplı deliklerde T_{off} olarak gerçekleşmiştir.

Hem Ti-6Al-4V hem de Inconel 718 iş parçasında delik çapı küçüldükçe yüzey pürüzlülüğünde minimal bir artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durumun nedeninin çap küçüldükçe elektrot dayanımının azalması ve elektrotun aşınması olduğu söylenebilir. Ti-6Al-4V iş parçasında, Inconel 718 iş parçasına kıyasla hem 400 hem de 500 µm çapta delinen deliklerde yüzey pürüzlülüğü bir miktar daha iyidir. Bu durumun nedeni Inconel 718 malzemenin Ti-6Al-4V malzemeye kıyasla ısı ve elektriksel iletkenliğinin daha yüksek, ergime sıcaklığının daha düşük olması olabilir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 400 ve 500 μm çaplarında tek delikli pirinç elektrotlar kullanılarak Ti-6Al-4V ve Inconel 718 iş parçaları üzerinde mikro delikler imal edilerek deliklerin geometrik özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, deliklerde elde edilen en düşük çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. Ayrıca bu değerleri sağlayan işleme parametreleri ve en yüksek sinyal gürültü oranını veren işleme parametreleri de belirlenmiştir.

En düşük çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri her iki iş parçasında da 500 μm çapta elde edilmiştir. Delik çapı küçüldükçe her iki iş parçasında da çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri artmıştır. Çap küçüldükçe elektrot dayanımının düşer ve buna bağlı olarak elektrot aşınması artar.

Her iki çap ölçüsü için Ti-6Al-4V iş parçası malzemesi üzerinde imal edilen deliklerdeki çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin Inconel 718 malzemeye kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Inconel 718 malzeme üzerinde delinen deliklerde yüzey kaplanması meydana gelmiştir. Ti-6Al-4V malzeme üzerinde delinen deliklerde yüzey kaplanması görülmemiştir.

Ti-6Al-4V malzemede elde edilen en düşük çap büyümesi : 26,93 %; koniklik : 0,38 %; yüzey pürüzlülüğü : 2,42 μm 'dir. 400 μm çapta; en etkin işleme parametresi, çap büyümesinde ve koniklikte T_{off} , yüzey pürüzlülüğünde I olarak gerçekleşmiştir. 500 μm çapta; en etkin işleme parametresi, çap büyümesinde T_{off} , koniklikte I, yüzey pürüzlülüğünde T_{on} olarak gerçekleşmiştir.

Inconel 718 malzemede elde edilen en düşük çap büyümesi : 70,53 %; koniklik : 0,59%; yüzey pürüzlülüğü : 2,32 μm 'dir. 400 μm çapta; en etkin işleme parametresi, çap büyümesinde T_{off} , koniklikte I, yüzey pürüzlülüğünde T_{on} olarak gerçekleşmiştir. 500 μm çapta; en etkin işleme parametresi, çap büyümesinde ve koniklikte I, yüzey pürüzlülüğünde T_{off} olarak gerçekleşmiştir.

EEİ metoduyla mikro delik delinmesi işlemlerinde 400 µm çaplarda çap büyümesi, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri genel itibariyle 500 µm çapta elde edilen değerlere kıyasla daha düşük olmuştur. EEİ ile delinen mikro deliklerde 400 µm çaplarda deliklerde geometrik özellikleri iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Asokan, T., Reddy, S. S., Costa, P. D. E., “Electrical discharge drilling of titanium alloys for aerospace applications”, *Proceedings of 19th AIMTDR conference, IIT Madras, Chennai*: 161-165 (2000).
- Bigot S., Valentin J., Blatnik O., Junkar M., “Micro EDM parameters optimisation”, *Multi-Material Micro Manufacture*, 195-198, (2006).
- Bamberg, E., Heamawatanachai, S., “Orbital electrode actuation to improve efficiency of drilling micro-holes by micro-EDM”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1826–1834 (2009).
- Chen, S.L., Yan, B.H., Huang, F.Y. (1999). Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti–6Al–4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 87 (1-3), 107-111.
- Chen, Y., Mahdavian, S.M. (1999). Parametric study into erosion wear in a computer numerical controlled electro–discharge machining process, *WEAR*, 236, 350-354.
- Chern G-L., Chuang, Y., “Study on vibration-EDM and mass punching of micro-holes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 180: 151–160 (2006).
- Chow, H. M., Yan, B. H., Huang, F. Y., Hung, J. C., “Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electrodischarge machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, 101: 95- 103 (2000).
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., & Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri Ve Uygulama Alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (031), 53-70.
- Çiğdem, M. (1996); *İmal Usulleri*, Çağlayan Kitabevi
- Çoğun, C. ve Akaslan, Ş. (2002). The effect of machining parameters on tool electrode wear and machining performance in electric discharge machining, *KSME International Journal*, 16 (1), 46-59.
- Çoğun, C., Erden, A. (1984). Effect of pause time on properties of pulse trains in electric discharge machining, *METU Journal of Pure and Applied Sciences*, 17 (3), 191-208.
- Çoğun, C., Kocabaş, B., Özgedik, A., “Elektro Erozyon İle İşlemede (EDM) İşparçası Yüzey Pürüzlülük Profilinin Deneyisel Ve Teorik Olarak İncelenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 19 (1): 97-106 (2004).
- Dursun, K. (2007). Elektro-erozyon ile İşlemede Tel Demeti Elektrodun Performansının Deneyisel Ve Teorik İncelenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

- Ekmekci., B., Sayar., A., Öpöz. T. T., Erden., A., “Geometry and surface damage in micro electrical discharge machining of micro-holes”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19, 105030, 16 (2009).
- Endo, T., Tsujimoto, T., Mitsui, K., “Study of vibration-assisted microEDM—The effect of vibration on machining time and stability of discharge”, *Precision Engineering*, 32: 269–277 (2008).
- Erdem, O., Çoğun, C., Ürtekin, L., Özerkan, H.B., Uslan, İ. (2016). Toz katkılı ve ısıtılmış dielektriğin Elektro Erozyon ile İşlemede (EEİ) delik delme performansı üzerine etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(3), 531- 544.
- Erden, A. (1983). Effect of materials on the mechanism of electric discharge machining (E.D.M), *Journal of Engineering Materials and Technology*, 105, 132-138.
- Ergün, Z, E., Çoğun, C., “Elektro Erozyon İle İşleme (EEİ) İş Parçası Yüzey Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 21 (3): 427-441 (2006).
- Ezugwu, E.O. (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 1353-1367.
- Göv, K. "Influence of Coolant on the Performance of Electro Discharge Hole Drilling." *Politeknik Dergisi* 20.1 (2017): 191-196.
- Gündoğdu, H. E. (2006). Kesme sıvılı ve kuru talaşlı işlemenin iş parçası ve kesici takım üzerindeki etkileri.
- Gürgen, S., Sofuoğlu, M. A., Çakır, F. H., Kuşhan, M. C., & Orak, S. (2016). Yenilikçi Bir İmalat Yöntemi: Ultrasonik Yardımlı Sıcak Tornalama. *In 1st International Conference On Engineering, Technology And Applied Sciences*, Afyon, Turkey.
- Ho, K.H. and Newman S.T. (2003). State of Art Electrical Discharge Machining (EDM), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 1287-1300.
- Hocheng, H., Lei, W. T., & Hsu, H. S. (1997). Preliminary study of material removal in electrical-discharge machining of SiC/Al. *Journal of Materials Processing Technology*, 63(1-3), 813-818.
- Huang, ML, Chang, YC, Chang, CH, Lee, YJ, Chang, P., Kwo, J., ... ve Hong, M. (2005). III-V bileşik yarı iletkenlerin atomik tabaka biriktirme-yetiştirilen Al2O3 kullanılarak yüzey pasifleştirilmesi 3. *Applied Physics Letters* , 87 (25), 252104.
- Jahan,. M. P. , Wong, Y. S. , Rahman., M., “A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator”, *Journal of Materials Processing Technology* 209, 1706-1716 (2009).
- Kansal, H. K. , Singh, S. , Kumar, P., (2005). Application of taguchi method for optimization of powder mixed electrical discharge machining, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 7, 2-4.

- Keskin, Y., Halkacı, H.S., Kizil, M. (2006). An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surface roughness in electrical discharge machining (EDM), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28 (11-12), 1118-1121.
- Kruth, JP, Stevens, L., Froyen, L., ve Lauwers, B. (1995). Kalıp batan elektro-deşarj işlemesi ile işlenen bir yüzeyin beyaz katmanının incelenmesi. *CIRP yıllıkları* , 44 (1), 169-172.
- Kumagai S., Sato N. and Takeda, K. (2007). Operation parameter optimization for fabrication of a narrow deep hole in metal by electrical discharge machining using a dielectric-encased wire electrode, *Journal of Materials Processing Technology*, 189 (1-3), 310-315.
- Kuppan, P., Narayanan, S., Oyyaravelu, R., & Balan, A. S. S. (2017). Performance Evaluation of Electrode Materials in Electric Discharge Deep Hole Drilling of Inconel 718 Superalloy. *Procedia Engineering*, 174, 53-59
- Kuppan, P, Rajadurai, A., and Narayanan, S., (2008). Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718, *Advanced Manufacturing Technology Journal*, 38 (1-2), 74-84.
- Küçüktürk, G., Çoğun, C. (2009). Elektro erozyon ile işlemede elektrik iletken olmayan iş parçalarının işlenmesi için yöntem geliştirilmesi, *Mühendis ve Makina*, 50 (594), 7-13
- Lauwers, B., Kruth, J.P., Liu, W., Eeraerts, W., Schacht, B., Bleys, P. (2004). Investigation of material removal mechanism in EDM of composite ceramic materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 347-352.
- Leao. F.N. (2005). Optimisation of EDM fast hole-drilling through evaluation of dielectric and electrode materials, *18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, MG.
- Lee, S.H., Li, X.P. (2001). Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide, *Journal of Materials Processing Technology*, 115 (3), 344- 358.
- Lim, L.C., Lee, L.C., Wong, Y.S., Lu, H.H. (1991). Solidification microstructure of electrodischarge machined surfaces of tool steels, *Materials Science and Technology*, 7 (3), 239-248.
- Lin, J. L., and Lin, C. L. (2002). The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, 237-244.
- Liu., H. S., Yan., B. H., Huang,. F. Y., Qiu., K. H., “A study on the characterization of high nickel alloy micro-holes using micro-EDM and their applications”, *Journal of Materials Processing Technology* 169: 418-426 (2005).

- Liu., H. S., Yan., B. H., Chen., C. L., Huang., F. Y., “Application of microEDM combined with high-frequency dither grinding to micro-hole machining”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 80–87 (2006).
- Lonardo, P.M., Bruzzone, A.A., (1999), “Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM”, *Annals of the CIRP*, 48 (1): 123-126.
- Mohri, N., Fukuzawa, Y., Tani, T., Sata, T. (2002). Some considerations to machining characteristics of insulating ceramics-towards practical use in industry” *Annals of the CIRP*, 51(1), 161-164.
- Mohri, N., Fukuzawa, Y., Tani, T., Saito, N., Furutani, K. (1996). Assisting electrode method for machining insulating ceramics, *Annals of the CIRP*, 45(1), 201-204.
- Muttamara, A., Fukuzawa, Y., Mohri, N., Tani, T., (2003), “Probability of Precision Micro Machining of Insulating Si₃N₄ ceramics by EDM”, *Journal of Materials Processing Technology*, 140:243-247.
- Okka, M.A. (2011). An Experimental Investigation of Electrical Discharge Machining (EDM) Fast Hole Drilling of Inconel 718 and Ti-6Al-4V, M.Sc Thesis, *University of Gaziantep*, Turkey.
- Ozerkan, H. B., “Delikli Döner Elektrot Kullanarak Elektrokimyasal Delme Yönteminin Geliştirilmesi Ve Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).
- Ozerkan, H. B., “Elektro Erozyon ile İşlemede Toz Karışıklı Dielektrik Sıvının İşleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2003).
- Özerkan, B., Coğun, C., (2005), “Effect of Powder Mixed Dielectric On Machining Performance In Electric Discharge Machining (EDM)”, *G.U. Journal of Science*, 18(2), 211-228.
- Özgedik, A. (2009). Elektro-Erozyon İle İşlemede İşparçasına Uygulanan Titreşimlerin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Özgedik, A., & Cogun, C. (2006). An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(5-6), 488-500.
- Özgedik, A., Coğun, C., “Elektro Erozyon ile İşlemede Elektrot Ön Yüzey Aşınmasının Deneysel İncelenmesi”, *Mühendis ve Makina*, 521: 21-28 (2003).
- Özgedik, A., Coğun, C., “Elektro-Erozyon İle İşlemede İşleme Haznesine Uygulanan Titreşimlerin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 8 (3): 13-25 (2011).

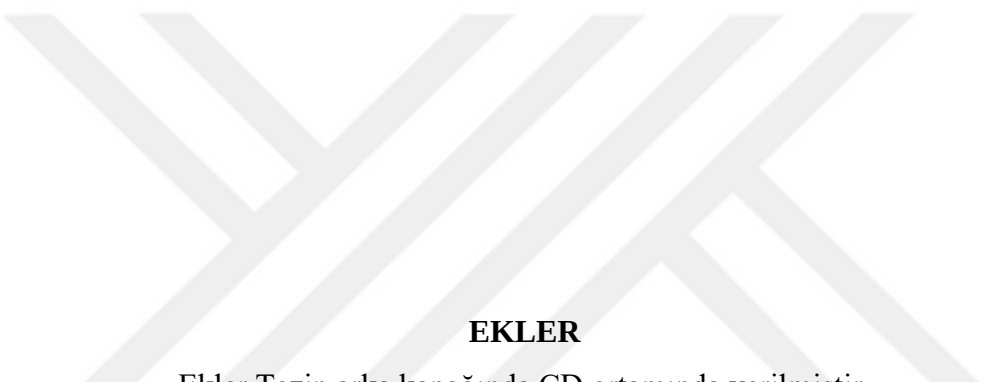
- Panda, D. K., & Bhoi, R. K. (2006). Electro-discharge machining—a qualitative approach. *Materials and Manufacturing Processes*, 21(8), 853-862.
- Panda, D.K., Bhoi, R.K., “Artificial neural network prediction of material removal rate in electro discharge machining”, *Materials and Manufacturing Processes*, 20 (2005) 645 – 672.
- Pandey, P.C., Shan, H.S., “Modern Machining Processes”, *Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited*, New Delhi, 84-114 (1980).
- Pham, D.T., Dimov, S.S., Bigot, S., Ivanov, A., Popov, K., “Micro-EDM Recent Developments And Research Issues”, *Journal Of Materials Processing Technology* 149: 50–57 (2004).
- Petrofes, N.F. and Gadalla, A.M. (1988). Processing aspects of shaping advanced materials by electrical discharge machining, *Advanced Materials & Manufacturing Processes*, 3, 127-153.
- Petropoulos G., Vaxevanidis N.M., Pandazaras C., “Modeling of surface finish in electro – discharge machining based upon statistical multi – parameter analysis”, *Journal of Materials Processing Technology* 155- 156 (2004) 1247—1251.
- Petropoulos G., Torrance A. and Pandazaras C., N. 2003. “Abbott Curves Characteristics of Turned Surfaces, *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 43: 237-243.
- Puri, A.B., Bhattacharyya, B., “Modeling and analysis of white layer depth in a wire- cut EDM process through response surface methodology”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25 (2005) 301-307.
- Rajmohan, T., et al. "Optimization of machining parameters in electrical discharge machining (EDM) of 304 stainless steel." *Procedia Engineering* 38 (2012): 1030-1036.
- Rajurkar.,K.P., Shen.,H., “High Aspect Ratio and Complex Shaped Blind Micro Holes by Micro EDM”, *Annals of the CIRP*, 51 (1): 359-362 (2002).
- Singh, A., Ghosh, A. (1999). A Thermo-electric model of material removal during electric discharge machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39 (4), 669-682.
- Singh, S., Maheshwari, S., Pandey, P.C. (2004). Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3), 272-277.
- Snoney, R., Steaelens, F. and Dekeyser, W. (1986). Current trends in non-conventional material removal process, *Annals of the CIRP*, 35(2), 467-480.
- Soni, J.S., Chakraverti G. (1993). Surface characteristics of titanium with rotary EDM, *Bulletin of Materials Science*, 16 (3), 213-227.

- Tsai, K. M. , Wang, P. J. , “Comparisons of neural network models on material removal rate in electrical discharge machining”, *Journal of Materials Processing Technology* 17 (2001) 111-124.
- Ulutaş, T. (2013). An Experimental Study on Drilling Through and Blind Holes on Inconel 718 by Electrical Discharge Machining, M.Sc Thesis, *University of Gaziantep*, Turkey. .
- Wang K., Gelgele H.L., Wang Y., Yuan Q., Fang M., “A hybrid intelligent method for modeling the EDM process”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 995—999.
- Wang, C.C., Yan, B.H. (2000), Blind-hole drilling of Al₂O₃/6061 Al composite using rotary electro-discharge machining, *Materials Processing Technology Journal*, 102, 90-102.
- Wong, Y.S., Lim, L.C. and Lee, L.C. (1995). Effects of flushing on electro–discharge machined surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, 48 (1-4), 299-305.
- Yahya, A., Manning, C.D., “Determination of material removal rate of an electrodischarge machine using ditmnsional alaysis”, *Journal of Physics D: Applied Physics* 37 (2004) 1467-1471.
- Yan, B.H., Lin, Y.C., Huang, F.Y., Wang, C.H., “Surface modification of SKD 61 during EDM with metal powder in the dielectric”, *Materials Transactions* 42(2001) 2597-2604.
- Yan, B.H., Wang. A.C., Huang. C.Y., Huang. F.Y., “Study of precision microholes in borosilicate glass using micro EDM combined with micro ultrasonic vibration machining”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42: 1105–1112 (2002).
- Yavuz, N. (2003); *Modern İmalat Yöntemleri Ders Notları*
- Yılmaz, O., Bozdana, A.T., Okka, M.A., Filiz, İ.H. (2009). Uzay ve havacılık malzemelerinde elektriksel erozyon ile hızlı delik delme performansının deneysel incelenmesi, *Mühendis ve Makine*, 51-608, 31-37.
- Yılmaz, V. (2013). Elektro Erozyon ile İşleme Yöntemiyle Mikro Deliklerin Delinebilirliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Yılmaz, V., Dilipak, H., Özdemir, M., Uzun G., “Examining The Surface Roughness While Drilling Micro-Size Deep Holes With Electro Discharge Technique On Hadfield Steel”, 2. *International Symposium On Innovative Technologies İn Engineering*, 18-20 June, Karabük (2014).

- Yirmibeş, Z.S. (2015). Farklı Isıl İşlem Görmüş Formadur 2738 Malzemesinin Elektro Erozyon İle Mikro Delinebilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Zilonga, P., Zhenlonga, W., Yinghuaia, D., Huia, C., “Development of a reversible machining method for fabrication of microstructures by using micro-EDM”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210: 129–136 (2010).
- Znidarsic, M., Junkar, M., “Deep Small Hole Drilling with EDM”, *Proceedings of 4th International Conference on Advanced manufacturing Systems and Technology*, Udine, 527-533 (1996).







EKLER

Ekler Tezin arka kapağında CD ortamında verilmiştir.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EKİCİ, Merve
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 21.10.1989, Kastamonu
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (533) 746 07 35
 e-mail : mozcan2@kgm.gov.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2011
Lise	Göl Anadolu Öğretmen Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Karayolları Genel Müdürlüğü	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

EKİCİ, M., ABASI, T., & YILMAZ, O. Uzay Ve Havacılık Alaşımlarının Elektriksel Erozyonla Delinmesi İşleminde Yüzey Bütünlüğünün İncelenmesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 31, 33-40.

Hobiler

Yoga, Fitness





GAZİ GELECEKTİR..