

**ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEMEDE
TEL DEMETİ ELEKTRODUN PERFORMANSININ
DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ**

Kadir DURSUN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2007
ANKARA**

Kadir DURSUN tarafından hazırlanan ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEMEDE
TEL DEMETİ ELEKTRODUN PERFORMANSININ DENEYSEL VE TEORİK
İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, Jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim
Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bedri TUÇ

Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

Kalıpcılık Eğitimi Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Ersan ARSLAN

Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Ü.

Doç. Dr. Mustafa YURDAKUL

Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Tarih : 17/12/2007

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini
onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kadir DURSUN

**ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEMEDE
TEL DEMETİ ELEKTRODUN PERFORMANSININ
DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

Kadir DURSUN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2007**

ÖZET

Elektro erozyon ile işlemede (EEİ) karmaşık geometriye sahip kalıp ve modellerin kaba, yarı-kaba ve ince işlemleri için ayrı ayrı elektrot yapılması, üretim maliyetlerini ve teslim sürelerini artırmaktadır. Elektrotların aşınması, üretim maliyetinin ve süresinin yüksek olması; bakır malzemeden dolu elektrot üretimi, stereolitografi (SLA), toz metalürjisi (T/M) ve nokta yazıcıli elektrotla işleme yöntemi dışında elektrot yapımında daha farklı elektrot üretim yöntemlerinin kullanılmasını gündeme getirmiştir. Bu çalışmada, birbiriyle aynı veya farklı kesitlere sahip bakır tellerin, işparçasında işlenecek yüzeye benzer bir tel demeti halinde oluşturulmasına dayanan, Tel Demeti Elektrotunun (TDE) işleme performansı deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada, tekli ve çoklu tellerle oluşturulan tel demetleri ile yapılan deneylerde vurum süresi ve boşalım akımının işleme performansına ve tel aşınmasına ve işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.140
Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon, tel demeti, elektrot aşınması
Sayfa Adedi : 105
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTRODES BY
USING WIRE BUNCHES IN EDM PROCESS**

(Ph. D. Thesis)

Kadir DURSUN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
December 2007**

ABSTRACT

In Electrical Discharge Machining (EDM), the making of separate electrodes for roughing, semi-finishing and finishing electrical discharge machining of many dies and moulds having complex surface, results in development in the cost and the lead-time in the production. In the production of the electrode, eroding of electrodes, being high the lead-time and the cost, have brought to agenda different electrode processes unlike producing filled electrode from copper material, powder metallurgy (P/M), stereolithography (SLA) and dot matrix method. In this thesis, the working performance parameters of the electrodes by using wire bunches method depended on the discrete copper wires having similar or different cross sectional area and positioned to the almost surface to be machined was experimentally and theoretically analyzed. In the experiments with one and more wired electrodes, the working performance parameters, the wearing of electrodes and the surfaces of the machined works were examined according to discharge current and impulse time.

Science Code : 914.1.140
Key Words : EDM, wire bunches, electrode wear
Page Number : 105
Adviser : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca gösterilen çabada, değerli katkılarından dolayı Danışmanım Sayın Prof. Dr. Can ÇOĞUN'na teşekkür ederim.

Tezimin izleme komitesi üyeleri olan Öğretim Üyeleri Sayın Prof. Dr. Bedri TUÇ'a ve Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e şükranlarımı sunarım.

Deneylerde kullanılan kare kesitli ASA 3100 kaynak tellerini bedelsiz karşılayan ASA Kaynak Malzemeleri Sanayi ve Ticaret A.Ş'nin yetkililerine, tel elektro-erozyon işlemlerinde yardımcı olan KALIPSAN A.Ş.'den Sn. Abdurrahman KELEŞ'e, 3 boyutlu ölçümlerde yardımcı olan Köprüören Makine Sanayi ve Tic. Ltd. Şti'nin sahibi Sn. Ahmet ŞEN'e ve ayrıca bu teze önemli katkılarından dolayı ÖZGEN KALIP'ın sahibi Sn. Gayim ÖZGEN'e teşekkür ederim.

Deneyler sırasında yardımcı olan Araştırma Görevlisi Sayın Ali ÖZGEDİK ve katkı sağlayan Yrd. Doç. Dr. Muzaffer BALBAŞI'ya, laboratuvar çalışmalarında ve deneyler esnasında bütün içtenlikleriyle her türlü yardımı esirgemeyen Takım Tezgâhları Laboratuvarı sorumlusu Uzman Sayın Kadir YILMAZ'a, Araştırma Görevlisi Asım GENÇ'e, Jeoloji ve Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvarı sorumlusu Sayın Aydın GÖKÇE'ye yürekten teşekkür ederim.

Doktora çalışmaları sırasında çocuklarım Ömer (15) ve Furkan (13) 'nın yetişmesindeki eksiklerimi de tamamlayarak her türlü yardımı, sonsuz sevgisini ve desteğini veren sevgili eşim Figen DURSUN'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMENİN TEMEL PRENSİPLERİ	5
2.1. Elektro Erozyon İle İşleme Yöntemi	5
2.2. Elektro Erozyon İle İşlemenin Fiziksel Prensibi	7
2.3. Elektro Erozyon İle İşlemenin Temel Parametreleri	9
2.3.1. Elektriksel parametreler	9
2.3.2. Vurum jeneratörü karakteristikleri	11
2.3.3. Dielektrik sıvı parametreleri	13
2.3.4. İşparçası malzemesinin fiziksel özellikleri	17
2.3.5. Elektrot malzemesinin fiziksel özellikleri	17
2.4. EEİ'de Performans Karakteristikleri	17
3. EEİ'DE HIZLI ELEKTROT ÜRETİM TEKNİKLERİ	19
3.1. T/M ile Elektrot Üretim Metodu	19
3.2. SLA ile Elektrot Üretim Metodu	22

Sayfa

3.3. Nokta Yazıcı Tipli Elektrotlar	25
4. TDEO METODU.....	27
5. DENEYLER	30
5.1. Elektro Erozyon Tezgahı	30
5.2. Elektrot Adaptörü ve Tel Dizme Mastarları.....	32
5.3. İşparçası	35
5.4. Dielektrik Sıvı	36
5.5. Elektrot	36
5.6. İşleme Parametreleri	38
5.7. Deney Tasarımları.....	39
5.8. İşparçası İşleme Hızının (İİH) Tespiti.....	41
5.9. Elektrot Aşınma Hızının (EAH) Tespiti	42
5.10. Bağıl Aşınmanın (BA) Tespiti.....	43
5.11. Deney Numunelerinin CMM'de Ölçümü.....	43
6. TELLERİN AŞINMASININ VE İŞLEME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ.....	45
6.1. Tellerin EEİ Süresi	45
6.2. Tellerin BA Değerleri	47
6.3. Tellerin İİH ve EAH'ları.....	48
5.4. İşlenen İşparçalarının Yüzey ve Tellerin Aşınma Geometrileri.....	50
7. TDEO METODUNUN EEİ PERFORMANSININ BELİRLENMESİ.....	57
7.1. Açılı ve Kademeli Elektrodun İİH ve EAH'ya etkileri	58
7.2. Açılı ve Kademeli Elektrotun BA'ya Etkisi	60

Sayfa

7.3. TDEO’da İşleme Derinliği ile İşleme Süresi Arasındaki İlişki.....	61
7.4. İşlenen İş Parçalarının Yüzey Geometrilere	64
7.5. En Uygun EEİ Sürecinin Belirlenmesi	68
7.6. Demeti Elektrotun Dolu Bakır Elektrot ile Kıyaslanması.....	69
8. TDEO METODUNUN TEORİK VE UYGULAMALI İNCENMESİ.....	71
8.1. TDEO Metodunda İİH ve EAH’nın Matematiksel Modellenmesi	71
8.2. TDEO Metodunda Oluşabilecek İşleme Hataların Hesaplanması.....	74
8.3. TDEO Metodunda Tel Ayar Boylarının Hesaplanması.....	77
8.4. TDEO Metodu İçin Örnek Uygulamalar.....	82
8.5. TDEO Metodunun Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi.....	88
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR.....	95
EKLER	100
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. EEİ tezgahının teknik özellikleri	31
Çizelge 5.2. İşparçası malzemesinin kimyasal bileşimi.....	35
Çizelge 5.3. Tel malzemesinin kimyasal bileşimi.....	37
Çizelge 5.4. Dolu bakır elektrot malzemesinin kimyasal bileşimi.....	38
Çizelge 5.5. İşleme parametreleri	39
Çizelge 5.6. Deney tasarımı (Tel Aşınması)	40
Çizelge 5.7. Deney tasarımı (EEİ modelleme)	41
Çizelge 6.1. İİH, EAH, BA ve $t_{iş}$ ' e ait deney sonuçları	46
Çizelge 6.2. Tek telli işlemede işleme aralıkları (mm).....	56
Çizelge 7.1. İİH, EAH, BA ve $t_{iş}$ ' e ait deney sonuçları	57
Çizelge 7.2. Deney süreleri.....	62
Çizelge 7.3. İşparçası ve elektrot aşınma hacimleri	64
Çizelge 7.4. 25 Amperde, 13 ve 200 μs 'de yapılan deney sonuçları.....	68
Çizelge 7.5. Dolu bakır elektrotla yapılan deney sonuçları.....	69
Çizelge 8.1. Açılı işlemede deneysel sonuçların matematiksel model ile karşılaştırılması.....	73
Çizelge 8.2. Kademeli işlemede deneysel sonuçların matematiksel model ile karşılaştırılması	73
Çizelge 8.3. Deneysel ve matematiksel modele ait BA değerleri.....	74
Çizelge 8.4. Açılı ve kademeli EEİ'lerdeki açı ve derinlik ölçümleri.....	80
Çizelge 8.5. Açılı elektrot ile işlemede gerçek ve teorik L_a/L_t değerleri.....	81
Çizelge 8.6. 4 mm kademedeki gerçek ve teorik L_a/L_t değerleri.....	81
Çizelge 8.7. 8 mm kademedeki gerçek ve teorik L_a/L_t değerleri.....	81

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.8.12 mm kademedeki gerçek ve teorik L_a/L_t değerleri.....	82
Çizelge 8.9. Birinci örneğin işleme değerleri.....	83
Çizelge 8.10. İkinci örneğin işleme değerleri.....	86
Çizelge 8.11. Elektrot hazırlama metotlarına göre EEİ'ler.....	89
Çizelge 8.12. Örnek işlemlere ait dolu elektrot fiyatları ve teslim süreleri.....	90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. EEİ'nin şematik görünüşü	5
Şekil 2.2. EEİ tezgâhının ana kısımları	6
Şekil 2.3. EEİ ile işlemenin fiziksel prensibi	7
Şekil 2.4. Elektrot ile işparçası arasındaki erozyon farklılığı	9
Şekil 2.5. Gerilim kontrollü bir vuruş jeneratöründe vuruş süresince gerilim ve akım dalga biçimleri.....	10
Şekil 2.6. RC jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı ve gerilim ve akım dalga tipi.....	12
Şekil 2.7. Döner vuruş jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı ve gerilim ve akım dalga tipi.....	12
Şekil 2.8. Isopuls jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı ve gerilim ve akım dalga tipi.	13
Şekil 2.9. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri	15
Şekil 3.1. T/M ile üretilmiş elektrotlarda İİH karakteristikleri	20
Şekil 3.2. T/M ile üretilmiş elektrotlarda EAH karakteristikleri.....	21
Şekil 3.3. Kaplama kalınlıkları.....	24
Şekil 3.4. Tolerans bozuklukları.....	24
Şekil 3.5. Nokta yazıcı tipli tezgahın yapısı.....	25
Şekil 3.6. Tel elektrotların farklı iki çeşit beslenmesi.....	26
Şekil 3.7. Nokta yazıcıyla işlenen işparçası.....	26
Şekil 3.8. Nokta yazıcı gibi EEİ tezgahının işleme prosesi.....	26
Şekil 4.1. TDEO metoduna bir örnek	27
Şekil 4.2. Tel şekilleri	28
Şekil 5.1. İşparçası konumlandırma adaptörü.....	34

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. İşparçası malzemesi ölçüleri (Modelleme).....	35
Şekil 5.3. İşparçası malzemesi ölçüleri (Aşınma).....	36
Şekil 6.1. İşleme parametrelerinin tellerin işleme sürelerine etkisi.....	47
Şekil 6.2. İşleme parametrelerinin tellerin BA'sına etkisi	48
Şekil 6.3. İşleme parametrelerinin tellerin İİH'na etkisi	49
Şekil 6.4. İşleme parametrelerinin tellerin EAH'na etkisi	49
Şekil 7.1. Açılı elektrot için İİH'nin I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi.....	58
Şekil 7.2. Açılı e elektrot için EAH'nin I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi.....	58
Şekil 7.3. Kademeli elektrot için İİH'nin I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi.....	59
Şekil 7.4. Kademeli elektrot için EAH'nin I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi.....	59
Şekil 7.5. Açılı elektrot için BA'nın I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi.....	60
Şekil 7.6. Kademeli elektrot için BA'nın I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi.....	61
Şekil 7.7. Açılı elektrot için. işleme derinliği ile işleme süresi arasındaki ilişki	62
Şekil 7.8. Kademeli elektrot için işleme derinliği ile işleme süresi arasındaki ilişki.....	63
Şekil 8.1. Negatif/Pozitif EEİ toleransları.....	74
Şekil 8.2. Dairesel kesitli tel elektrotta oluşacak artık çıkıntı alanları.....	75
Şekil 8.3. Eğik veya yay benzeri yüzeyde hata.....	76
Şekil 8.4. Açılı düz yüzeyde hata.....	76
Şekil 8.5. Yarıçapın 0 ile 90 derecelerdeki yüzey hataları.....	77
Şekil 8.6. Açılı işleme metodu.....	78
Şekil 8.7. Kademeli işleme metodu.....	79
Şekil 8.8. Birinci örneğin işleme modeli.....	83

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Epoksi kalıp, 10 μ m iletken boya, SL ile 180 μ m bakırla kaplanmış elektrotlar.....	22
Resim 3.2. Kaplaması bozulmuş elektrotlar.....	23
Resim 3.3. Daimler-Chrysler firmasının önerdiği elektrot.....	23
Resim 4.1. Çapı 1 ve 3 mm ve 2 tel karışımı olan tellerle TDEO Metodu....	28
Resim 5.1. Furkan EDM M25 A elektro erozyon tezgâhı	30
Resim 5.2. Elektrot ve işparçası bağlama detayları.....	31
Resim 5.3. Elektrot adaptörü	32
Resim 5.4. 20x21 Tel matris	33
Resim 5.5. 11° açılı tel dizme mastarı	34
Resim 5.6. 4'er mm derinlik kademeli tel dizme mastarı.....	34
Resim 5.7. Bakır fosfor alaşımlı kaynak telleri.....	36
Resim 5.8. 6x21 Tel matris	37
Resim 5.9. Tellerin demetten çıkartılmış resimleri.....	37
Resim 5.10. Dolu bakır elektrot.....	38
Resim 5.11. Numunelerin 3 boyutlu ölçümü.....	43
Resim 6.1. Tek tel ile aşındırılan işparçaları ve aşınan tellerin fotoğrafları	51
Resim 6.2. İki tel ile aşındırılan işparçaları ve aşınan tellerin fotoğrafları	52
Resim 6.3. Dört tel ile aşındırılan işparçaları ve aşınan tellerin fotoğrafları	53
Resim 6.4. Dokuz tel ile aşındırılan işparçaları ve aşınan tellerin fotoğrafları	54

Resim	Sayfa
Resim 6.5. Tel aşınmaları ve teorik modeli.....	55
Resim 7.1. Kademeli işlemede krater boyutlarının değişimi.....	64
Resim 7.2. İşparçası ve tel demetinin açılı işleme sonrası fotoğrafları.....	65
Resim 7.3. İşparçası ve tel demetinin kademeli işleme sonrası fotoğrafları.....	66
Resim 7.4. Ergimiş karbonun yüzeylere yapışması.....	67
Resim 7.5. Büyütülmüş bazı tel kesitlerindeki aşınma biçimleri.....	67
Resim 7.6. 25 Amper ve 200 μ s ile 13 μ s'de açılı ve kademeli işleme.....	68
Resim 7.7. Dolu bakır elektrotla açılı ve kademeli işleme.....	70
Resim 8.1 Birinci örnek işlemeye uygun tel dizme mastarı.....	84
Resim 8.2. Birinci örneğe ait aşındırılan işparçası ve aşınan teller.....	84
Resim 8.3. Üç yollu elektrik priz.....	84
Resim 8.4. 12x20 tel matris.....	86
Resim 8.5. Örnek tel itmeleri.....	87
Resim 8.6. Tel dizimi tamlanmış 12x20 matris.....	87
Resim 8.7. İşlenmiş işparçası ve işleme sonrası teller.....	88
Resim 8.8. İkinci numune için alçıdan master üretimi	91

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Çıkıntı alanı, mm ²
f_c	Vurum frekansı, vurum/s
h	Teller arasındaki yükseklik farkı, mm
i	Ortalama çalışma akımı, Amper
i_d	Boşalım akımı, Amper
k	Regresyon denklemlerindeki katsayı sayısı
L_t	Tasarlanan EEİ derinliği, mm
L_a	Aşınma dâhil ayarlanması gereken tel boyu, mm
n	Yapılan deney sayısı, adet
r	Yarıçap, mm
R	Korelasyon katsayısı
R_a	İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü, µm
P	Dielektrik sıvı basıncı, bar
P_d	Boşalım gücü, Watt
t_c	Vurum çevrim süresi, µs
t_d	Boşalım süresi, µs
t_{iş}	İşleme süresi, dak.
t_i	Gecikme süresi, µs
t_p	Bekleme süresi, µs
t_s	Vurum süresi, µs
T_m	Ergime sıcaklığı, °C
V	Ortalama çalışma gerilimi, Volt
V_d	Boşalım gerilimi, Volt

Simgeler	Açıklama
V_o	Açık devre gerilimi, Volt
w	Kare tel kesit ölçüsü, mm
W_s	Vurum enerjisi, joule
η	Vurum ara süresi oranı
θ	EEİ açısı, derece
ϵ	Çıkıntı boyu, mm
$\sum z$	Bağımsız gerçek z değerlerinin toplamı
$\bar{z}$	Z değerlerinin ortalaması
σ_z	Standart sapma

Kısaltmalar	Açıklama
BA	Bağıl aşınma, %
BS	British Standart
BSD	Bilgisayar Sayısal Denetimli
CCM	Coordinate Measuring Machine
EAH	Elektrot aşınma hızı, mm ³ /dak.
EDM	Electro Discharge Machining
EEİ	Elektro-Erozyon ile İşleme
HRC	Rocwell Sertliği-C Skala
İİH	İşparçası işleme hızı, mm ³ /dak.
LC	Sarım-Kapasitör
M_{EEİ}	EEİ'nin maliyeti, YTL
M_{EEİT}	EEİ'nin tasarlanma maliyeti, YTL
M_{ET}	Elektrot tasarım maliyeti, YTL
M_i	İşleme maliyetini, YTL
M_{işç}	Tel dizme işçilik maliyeti, YTL
M_{Mi}	Tel dizme mastarının imalat maliyeti, YTL
M_{MM}	Mastar malzeme maliyeti, YTL
M_{MT}	Tel dizme mastarının tasarım maliyeti, YTL

Kısaltmalar	Açıklama
M_{TM}	Aşınan telin malzeme maliyeti, YTL
RC	Direnç-Kapasitör
RLC	Direnç-Sarım-Kapasitör
RLCD	Direnç-Sarım-Kapasitör-Diyot
SAE	Society of Automotive Engineers
SLA	Stereolitograph
TDEO	Tel Demetiyle Elektrot Oluşturma
TDE	Tel Demeti Elektrot
T/M	Toz Metalürjisi

1. GİRİŞ

Endüstride Elektro-Erozyon ile İşleme (EEİ) metotları içinde en çok kullanılanları Dalma-EEİ ile Tel-EEİ metotlarıdır. Dalma-EEİ metodu, elektrik iletmeyen sıvı (dielektrik sıvı) içine daldırılmış elektrik iletkenliğine sahip elektrot ile işparçası arasında oluşturulan kontrollü elektriksel boşalımlar sayesinde işparçası yüzeyinden küçük bir bölgenin sıvılaştırılması veya buharlaştırılması ve bunların dielektrik sıvı yardımıyla uzaklaştırılması esasına dayanır [1]. Tel-EEİ metodu ise, elektrik iletkenliğe sahip, 0,05 ile 0,4 mm çaplı, sürekli belli bir hızda sürülen tel elektrot ile işparçası arasında oluşturulan elektriksel boşalımlar sayesinde işparçası kesitinden malzemenin sıvılaştırılması veya buharlaştırılması esasına dayanır [2].

EEİ, klasik işleme yöntemleriyle şekillendirilmesi oldukça zor olan, geometrisi karmaşık, yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklığa dayanıklı, sert malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılan alışılmamış malzeme işleme usullerinden birisidir. EEİ imalat endüstrisinde ihtiyaç duyulan yüksek kalitedeki pres, enjeksiyon, dövme, ekstrüzyon ve toz sıkıştırma kalıplarının imalatı başta olmak üzere, çok küçük parçalarının seri imalatı ile uzay, otomotiv, mekanik tıp, uçak ve ziraat makinaları endüstrilerinde model işlemede kullanılmaktadır [3–5]. EEİ sırasında, elektrot ile işparçası arasında doğrudan fiziksel temas olmaması, işparçası üzerinde mekanik gerilmeye neden olmaması, işparçasının komple ısı etkiye maruz kalmaması ve işleme sırasında titreşimden uzak olması EEİ'yi diğer malzeme işleme usullerinden farklı, kalıp üretiminde ise ana işleme metotlarından biri kılmıştır [1,6].

Elektriksel kıvılcımın aşındırma etkisi ilk olarak 1768 yılında İngiliz bilim adamı Joseph Priestly tarafından keşfedilmiştir. Rus bilim adamları B.R. ve N.I. Lazarenko, elektrik kontağındaki aşındırıcı etkiyi azaltmak için yaptıkları çalışmalar sırasında hangi sertlikte olursa olsun elektrik ileten tüm metallerin kıvılcım atlaması ile birbirlerini aşındırabileceklerini tespit etmişlerdir [1].

Rus bilim adamları 1943 yılında elektriksel kıvılcımın aşındırıcı etkisini faydalı bir şekilde kullanmaya karar vererek yeni bir metal işleme metodu geliştirmişlerdir. Lazarenko devresi olarak bilinen kıvılcım jeneratör devresini kurarak ilk EEİ tezgâhını ortaya çıkarmışlardır. Bu jeneratör devresinin geliştirilmiş bir şekli mevcut birçok erozyon tezgâhında halen kullanılmaktadır. 1960 yıllarının sonuna doğru elektrik devrelerinin ve kontrol sistemlerin geliştirilmesi, EEİ'nin güvenilir ve hassas bir talaş kaldırma metodu olarak tanınmasını sağlamıştır. Özellikle 1980'li yıllarda Bilgisayarlı Sayısal Denetimli (BSD) bilgisayarların geliştirilmesi, EEİ'de işparçası işleme hızının (İİH) artması, elektrot aşınma hızının (EAH) azalması, işparçasının yüzey kalitesinin artmasını sağlamıştır. Bu gelişmeler işparçasında ince işlemlerin yapılmasını, EEİ tezgâhlarının BSD olarak geliştirilmesini ve imalat endüstrisindeki yerini almasını sağlamıştır.

Elektro-Erozyon ile işlenecek kalıp ve modeller seri imalat endüstrisinde ara ürün olup, bütün üretim zinciri içinde önemli ve kilit bir yer tutarlar. Genelde kalıp ve modeller bütün üretim programları içinde küçük bir yatırım ifade ederken, üretim akışının ve maliyetinin belirlenmesinde, üretimlerdeki ölü zamanların tespitinde, üretim kalitesinin ölçülmesinde ve üretimlerdeki ayırık parçalara ait maliyetin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir [7–9].

EEİ tezgâhlarında işlenecek söz konusu kalıp ve modeller işlenecek hacmin pozitif veya negatif bir benzeri olan elektrotlara ihtiyaç duyar. Söz konusu kalıp ve modeller daha karmaşık olduklarında EEİ'de kullanılan elektrot sayısı da artmaktadır [7,10–12]. Ayrıca EEİ sırasında, işleme hassasiyetini arttırmak için kaba, yarı-kaba ve ince işlemeye elektrodun aşınmasına bağlı olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Bu işlemler içinde ayrı ayrı elektrot kullanılmaktadır [12].

Kalıp ve modellerde klasik yöntemlerle gerçekleştirilmesi zor veya mümkün olmayan çeşitli delik ve boşlukların EEİ için gerekli olan zaman, toplam üretim zamanın %25'i ile %40'nı almaktadır. Bu EEİ'de oluşacak maliyetin ve

işleme zamanının %50'si elektrot yapımına ait olduğu bilinmektedir [10]. Örneğin el tipi telsiz telefon kapağının EEİ ile işlenmesi için 100 takım elektrot yapımının gerektiği, ayrıca EEİ için 20 saat işçilik gerekirken, bu elektrotların yapımı için 80 saat gerektiği bildirilmiştir [13].

Tezin Amacı

Karmaşık geometriye sahip kalıp ve modellerde hem birçok işlenmesi gereken yerler hem de kaba, yarı-kaba ve ince EEİ için ayrı ayrı elektrot yapılması, kalıp ve model yapımındaki üretim maliyetlerinin ve teslim sürelerinin artmasına, bunun ise bütün üretim prosesi içinde ölü zamanı ve maliyeti arttırmasına neden olmaktadır. Ayrıca elektrotların işparçasının işlenmesi sırasında aşınması ve kullanılmaz duruma gelmesi elektrot yapımında daha farklı hızlı prototip yöntemlerin kullanılmasını gündeme getirmiştir.

Bu amaçla, tez kapsamında özellikle kaba ve yarı-kaba işlemleri de ortadan kaldıracakı öngörülen, işparçasında her türlü üç boyutlu hızlı delik ve boşluk işlemeyi mümkün kılacak “Tel Demeti Elektrot” (TDE) için EEİ performansı bu tez çerçevesinde incelenmiştir.

TDE Oluşturma Metodu, birbirinden bağımsız, genellikle birbirleriyle aynı veya farklı kesitlere sahip bakır tellerin işparçasında işlenecek yüzeye benzer bir tel demeti halinde tutulmasına dayanan basit ve esnek bir prototip elektrot hazırlama yöntemidir Tel Demetiyle Elektrot Oluşturma Metoduna bundan sonra (TDEO) metodu (yöntemi) denilecektir.

Literatür çalışmaları sırasında bu tezde tanımlanan TDEO metoduna benzer bir çalışma bulunamamıştır. Bu nedenle, TDEO metodunun deneysel incelemesi olarak, tellerin aşınma olayının modellenmesi ve oluşumlarının açıklanması, performans karakteristiklerinin ve tellerin tek ve grup halinde davranışlarının deneysel olarak belirlenmesi ilk önce öngörülmüştür.

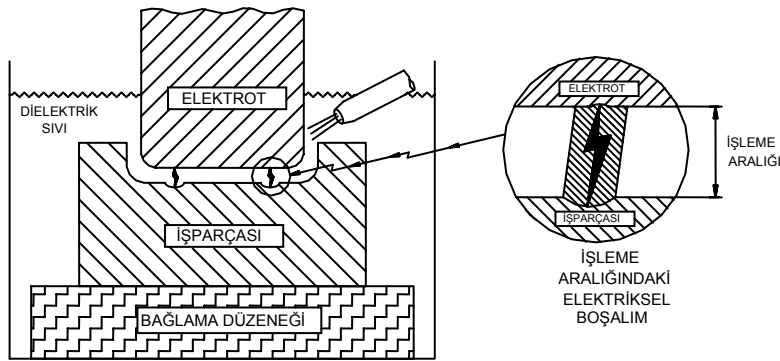
Sonra TDEO uygulamasının performansının belirlenmesi amacıyla, tel demetinin farklı hem şekillerinde hem de boşalım ve vurum sürelerinde, işparçası performans kriterleri olan işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve bağlı aşınmaların (BA) tespit edilmesi uygun görülmüştür.

Daha sonra dolu bakır elektrotla işleme yapılarak TDEO metodunun kıyaslaması yapılmıştır. Takiben elde edilen deneysel veriler kullanarak İİH ve EAH'nın matematiksel modellemesi yapılmıştır. Bu modeller kullanılarak örnek işleme uygulamaları gerçekleştirilmiş ve ekonomik olarak TDEO metodu tartışılmıştır.

2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMENİN TEMEL PRENSİPLERİ

2.1. Elektro Erozyon İle İşleme Yöntemi

EEİ Yöntemi, dielektrik sıvı içerisinde daldırılmış elektriksel iletkenliğe sahip elektrot ile işparçası arasında, ardışık oluşturulan elektriksel boşalmalar sayesinde sağlanan elektriksel enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesiyle, işparçası yüzeyinden eriyen veya buharlaşan çok küçük bir hacmin uzaklaştırılması esasına dayanır (Şekil 2.1).

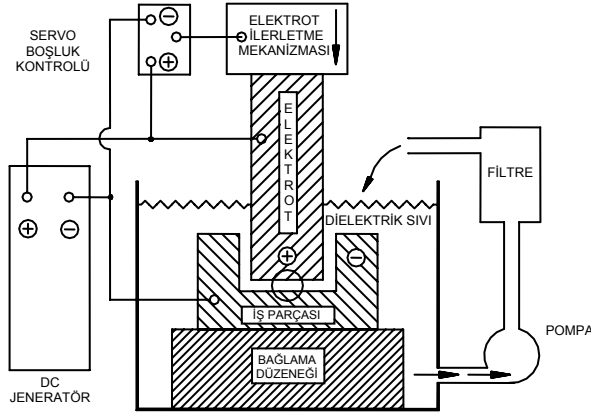


Şekil 2.1. EEİ'nin şematik görünüşü

Elektriksel boşalım enerjisi nedeniyle ısınan elektrot ile işparçası yüzeylerinin soğutulması ve işleme atıklarının işleme aralığından uzaklaştırılması dielektrik sıvı tarafından sağlanır. EEİ'nin devam edebilmesi için gerekli olan işleme aralığının sabit bir değerde tutulması, elektrotun servo kontrollü besleme mekanizmasının işparçasına doğru hareket ettirilmesi sayesinde gerçekleşir.

EEİ'de, 10^5 ile 10^7 W/mm² arasındaki yüksek konsantrasyonlu termal enerji tarafından oluşturulan plazma kanalının anot ve katot uçlarında ortalama 8 000 °C ile 20 000 °C arasında sıcaklıklar oluşur [6,14]. Her bir elektriksel boşalımda ise 10^{-6} ile 10^{-4} mm³ arasındaki malzeme hacmi ayrılır. Malzeme işleme hızı ise uygulamaya bağlı olarak 2 ile 400 mm³/dak arasında değişir [6].

EEİ tezgahlarının ana kısımları; vurum jeneratörü, kontrol paneli, servo kontrol mekanizması, elektrot besleme (ilerleme) mekanizması, elektrot bağlama adaptörü, işparçası bağlama düzeneği, dielektrik sıvı tankı, dielektrik sıvı pompası, dielektrik sıvı filtresi ve alt tabladır (Şekil 2.2).



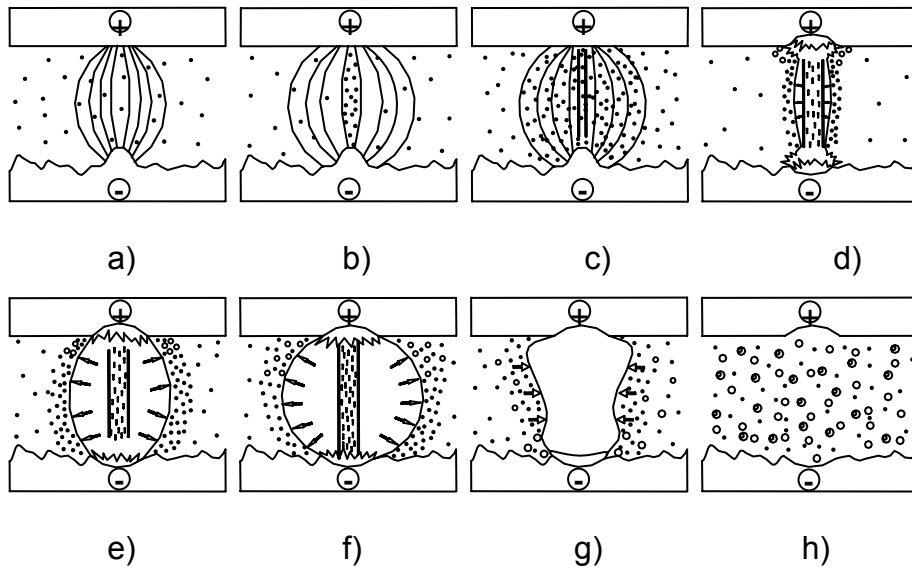
Şekil 2.2. EEİ tezgâhının ana kısımları

EEİ tipleri ve prensipleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- i) İş parçasının sabit profilli bir elektrot ile boydan boyya delinmesi veya 3 boyutlu elektrotun işparçasına belirli bir işleme derinliğinde batırılması EEİ ile delme ve oyma diye olarak adlandırılır.
- ii) İş parçasının levha, disk, tel veya şerit şeklindeki elektrotlar ile çeşitli profillerde kesilerek koparıldığı veya belirli bir işleme derinliğinde elektrotun işparçası üzerinde çentik oluşturduğu bütün operasyonları EEİ ile kesme olarak adlandırılır.
- iii) İş parçasının silindirik veya konik şekillere sahip kendi eksenine etrafında dönen elektrotlar ile dış yüzeylerinin veya iç deliklerinin taşlanması EEİ ile taşlama olarak adlandırılır [1].

2.2. Elektro Erozyon İle İşlemenin Fiziksel Prensibi

EEİ fiziksel prensibi olarak, bir elektriksel boşalım sırasında, EEİ'nin üç temel elemanı olan elektrot, işparçası ve dielektrik sıvı arasındaki ardışık fiziksel olaylar oluşmaktadır [15]. İşlemler sırayla Şekil 2.3'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. EEİ ile işlemenin fiziksel prensibi [15]

Şekil 2.3 a'da elektrot ile işparçası arasını dolduran dielektrik sıvı çok küçük partiküller içermektedir.

Şekil 2.3 b'de 10-40 μm 'lik işleme aralığı boyunca uygulanan yaklaşık 80-200 V'luk doğru akım gerilimi işparçası ve elektrot arasında manyetik alan oluşmasına sebep olur. İşlemin başlangıcında hiçbir elektrik akım akışı olmaz. Bunun nedeni dielektrik sıvının elektrotu ve işparçasını yalıtmış olmasıdır. Elektriksel alan dielektrik sıvı içerisindeki küçük parçacıkların elektriksel alan içinde bir hat üzerinde asılı kalmasına ve işleme aralığı boyunca bir köprü oluşturmaya neden olur.

Şekil 2.3 c'de köprü boyunca dielektrik sıvı kırılarak iyonlaşır ve elektriksel özelliğe sahip olur. Bu nedenle işleme aralığındaki gerilim değeri düşer ve akım değeri operatör tarafından ayarlanmış olan sabit değere kadar yükselir.

Şekil 2.3 d'de akımın artmasıyla bu bölgede ısı süratle artar, elektrot ile işparçasının bir kısmı buharlaşır ve plazma kanalı oluşur.

Şekil 2.3 e'de Şekil 2.3 d'deki plazma kanalı vurum süresi boyunca büyür.

Şekil 2.3 f'de plazma kanalının içindeki buhar kabarcıkları dışarıya doğru genişler. Fakat plazma kanalının etrafındaki dielektrik sıvı yoğunluk etkisiyle oluşan basınç plazma kanalının gelişimini sınırlar ve plazma kanalına giren enerjiyi çok küçük bir hacimde konsantre halde tutar.

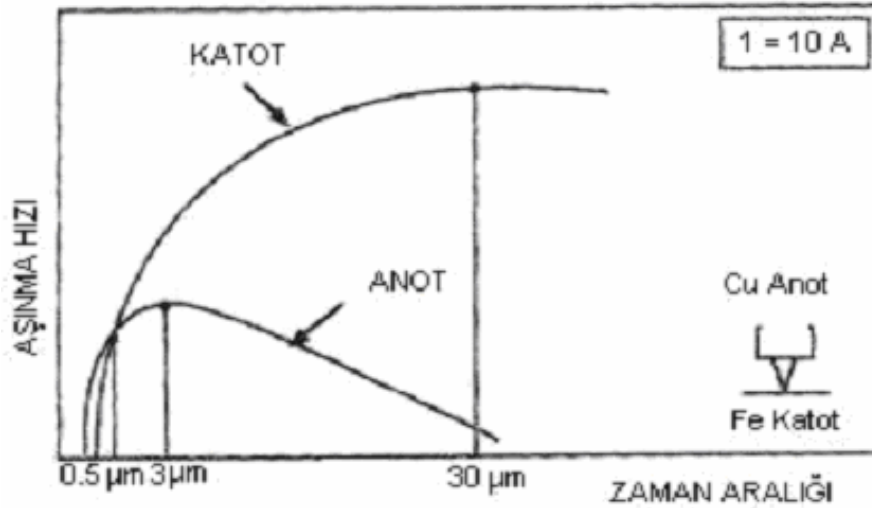
Şekil 2.3 g'de 3 j/mm^3 'e kadar olan enerji yoğunlukları, yerel plazma sıcaklıklarının $40\,000 \text{ }^\circ\text{K}$ 'e kadar ulaşmasına neden olur. Yoğunluk etkileri sebebiyle dinamik plazma basıncı 3 kbar'a kadar çıkar. Vurum süresi boyunca yüksek plazma enerjisi işparçası ve elektrot çiftini termal iletimle eritir. Fakat yüksek plazma basıncı sebebiyle sınırlı elektrot malzemesi buharlaşması olur. Akım durduğunda plazma kanalı kesilir ve buhar kabarcıkları söner. Bu da elektrot ve işparçası yüzeylerindeki aşırı ısınmış sıvı partiküllerin dielektrik sıvı içinde patlamasına sebep olur.

Şekil 2.3 g'de dielektrik sıvı eriyik malzemeyi soğutup katılaştırır ve ortamdan uzaklaştırır. Artık birbirine en yakın iki nokta aşınmıştır.

Bu çevrim işlemenin sonuna kadar her bir boşalım için tekrarlanır. Her boşalımda $10\mu\text{m} - 150\mu\text{m}$ genişliğinde boşluklar oluşur.

Vurum süresinin başlangıcında hızlı hareket eden elektronların bombardımanı sebebiyle elektrot ilk başta hızla erimesine rağmen, plazma basıncının artması yerel ısı akışında azalmaya neden olur.

Bu ise hızla ergiyen elektrot malzemesinin birkaç mikro saniye içerisinde tekrar katılaşmasına neden olur. Büyük kütleli pozitif iyonların daha düşük hareket kabiliyetleri sebebi ile işparçasının ergimesi daha geç olur (Şekil 2.4) [16].



Şekil 2.4. Elektrot ile işparçası arasındaki erozyon farklılığı [16]

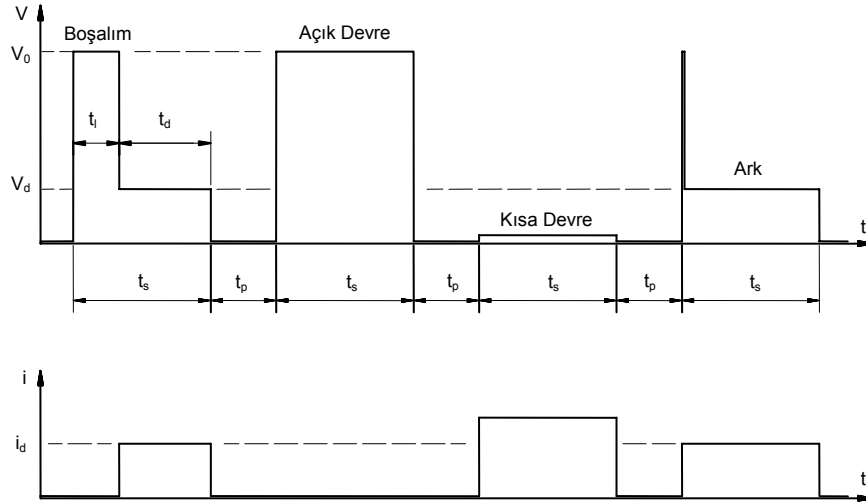
2.3. Elektro Erozyon İle İşlemenin Temel Parametreleri

EEİ ile işlemenin temel parametreleri aşağıda verilmiştir:

1. Elektriksel parametreler,
2. Vurum jeneratörü karakteristikleri,
3. Dielektrik sıvı parametreleri,
4. İş parçası malzemesinin fiziksel özellikleri,
5. Elektrot malzemesinin fiziksel özellikleri.

2.3.1. Elektriksel parametreler

İşleme aralığındaki boşalım işleminin tipik gerilim ve akım değişimleri $V(t)$ ve $i(t)$ tarafından karakterize edilirler. Bu değişimler Şekil 2.5'de gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için gösterilmiştir [17,18].



Şekil 2.5. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurum süresince gerilim ve akım dalga biçimleri [17,18]

EEİ ile işlemenin elektriksel parametreleri ile ilgili eşitlikler ve tanımlar aşağıda verilmiştir;

a) Gecikme süresi (t_l): Dielektrik sıvının iyonlaşma süresi.

b) Boşalım süresi (t_d): İşleme aralığı boyunca oluşan boşalımın süresi.

c) Vurum süresi (t_s): İşleme aralığına gerilimin ilk uygulanması anı ile boşalımın bitiş anı arasındaki toplam süre.

$$t_s = t_l + t_d \quad (2.1)$$

d) Bekleme süresi (t_p): İki vurum arasında vurum jeneratörü tarafından bırakılan ara süresi.

e) Vurum çevrim süresi (t_c): Jeneratör tarafından uygulanan vurum ve bekleme süresinin toplamı.

$$t_c = t_s + t_p \quad (2.2)$$

f) Vurum ara süresi oranı $\eta = \frac{t_s}{t_c}$ (2.3)

g) Vurum frekansı (f_c): Jeneratör tarafından elektrot ile işparçası arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısı.

$$f_c = \frac{1}{t_c} \quad (2.4)$$

h) Açık devre gerilimi (V_o): Akım boşalımı olmadığı anda işleme aralığında görülen gerilim.

i) Boşalım gerilimi (V_d): Boşalımın devam ettiği sürece ölçülen gerilim.

j) Boşalım akımı (i_d): Boşalım süresince işleme aralığından geçen akım.

k) Boşalım gücü (P_d): Tek bir boşalım süresince uygulanan güç.

$$P_d = V_d(t) \cdot i_d(t) \quad (2.5)$$

l) Vurum enerjisi (W_s): Boşalım süresince işleme aralığına uygulanan enerji

$$W_s = \int_{t_d} V_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt \approx V_d \cdot i_d \cdot t_d \quad (2.6)$$

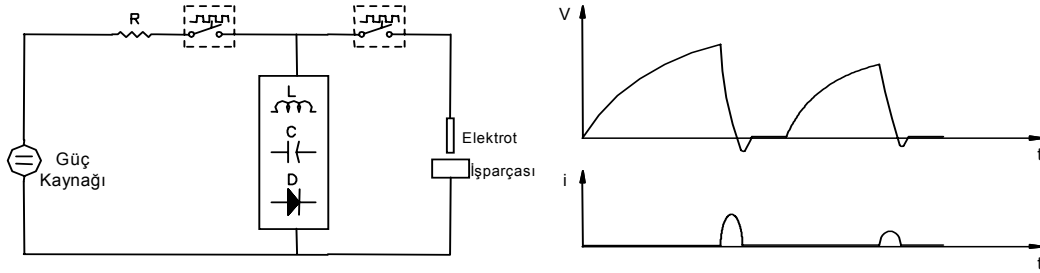
m) Ortalama çalışma gerilimi (V): İşleme süresince işleme aralığında ölçülen gerilimin aritmetik ortalaması.

n) Ortalama çalışma akımı (i): İşleme süresi boyunca işleme aralığından geçen akımın aritmetik ortalaması.

2.3.2. Vurum jeneratörü karakteristikleri

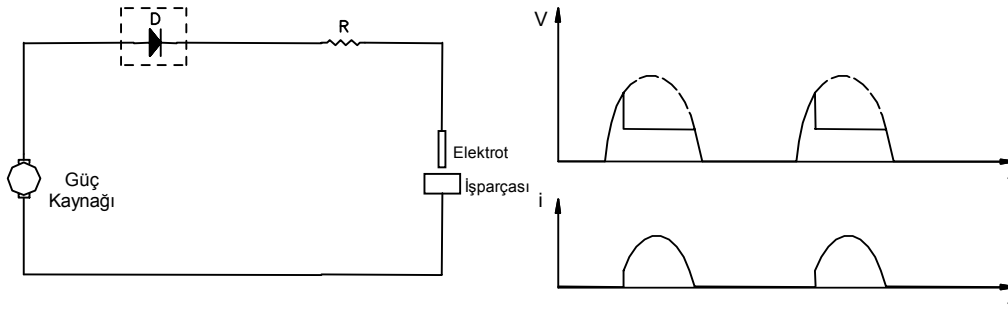
i) RC tipi jeneratörler: Doğal ateşlemenin ve çoğunlukla salınımlı boşalımların olduğu, boşalım sonunun enerji depolanması tarafından etkilendiği, boşalım

süresi ve sıklığının esasen devre elemanlarına bağlı olduğu kadar işleme aralığındaki şartlara da bağlı olduğu jeneratörlerdir (Şekil 2.6). Bu tipteki jeneratörlerde kullanılan elemanlar kapasitanslar, indüktanslar veya her ikisinin beraber kullanıldığı RC, RLC, RLCD, LC tipindeki elemanlardır [1,17].



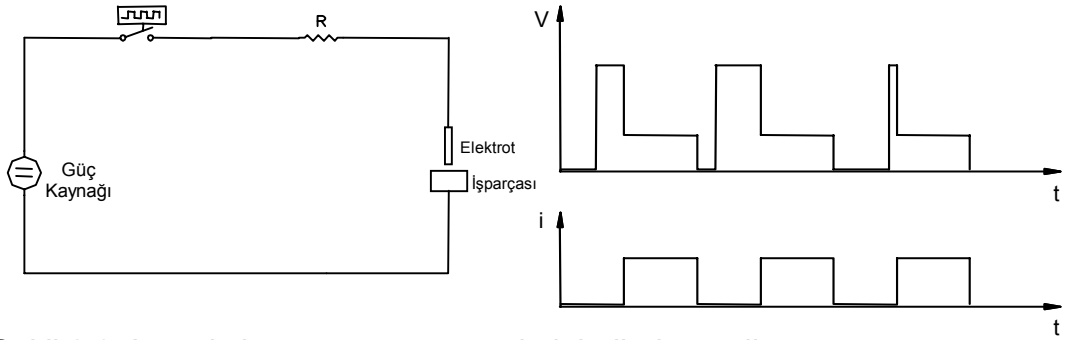
Şekil 2.6. RC jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı ve gerilim ve akım dalga tipi [1,17]

ii) Döner vurum jeneratörleri: Gerilim kaynağının doğrudan bir direnç üzerinden boşalım aralığına bağlı olduğu, boşalım süresi ve sıklığının öncelikle döner jeneratör tarafından belirlendiği jeneratörlerdir (Şekil 2.7). Bu jeneratörler bir kolektör ve bir doğrultucu ile teçhiz edilebilir [17].



Şekil 2.7. Döner vurum jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı ve gerilim ve akım dalga tipi [17]

iii) Isopuls jeneratörler: Gerilimin anahtarlama elemanları kullanımıyla işleme aralığına bağlı olduğu, boşalım sürelerinin ve sıklıklarının özellikle kontrollü anahtarlama proseslerine bağlı olduğu jeneratörlerdir (Şekil 2.8) [17].



Şekil 2.8. Isopuls jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı ve gerilim ve akım dalga tipi [17]

2.3.3. Dielektrik sıvı parametreleri

EEİ ile işlemede kullanılan dielektrik sıvının görevleri aşağıdadır.

- i) Fiziksel olarak dielektrik sıvı elektrotlar üzerinde toplanan yükü belirli bir süre için tutar. Bu süre işleme aralığı şartları ile belirlenir. İşleme aralığı şartları uygun olduğunda dielektrik sıvı elektrik akımının çok küçük bir dirençle artmasına izin verir.
- ii) Dielektrik sıvı, boşalımı dar bir kanalda tutar. Böylece elektrot yüzeyi üzerindeki güç yoğunluğu ve işleme hızı artar.
- iii) Boşalım esnasında açığa çıkan ısı hemen atılmalıdır. Çünkü bu ısı erozyona katkıda bulunmaz. Aksine elektrot ve işparçası yüzeyleri üzerinde zarara sebep olur. Dielektrik sıvı ısıyı yüzeylerden boşalım biter bitmez uzaklaştırır.
- iv) Boşalım sonrası işleme aralığında oluşan işleme atıkları dielektrik sıvı ile işleme aralığından uzaklaştırılır. Bu işlem kısa devreleri ve elektrot aşınmasını önleme yüksek işparçası işleme hızı ve düşük yüzey pürüzlülüğü açısından çok önemlidir [19].

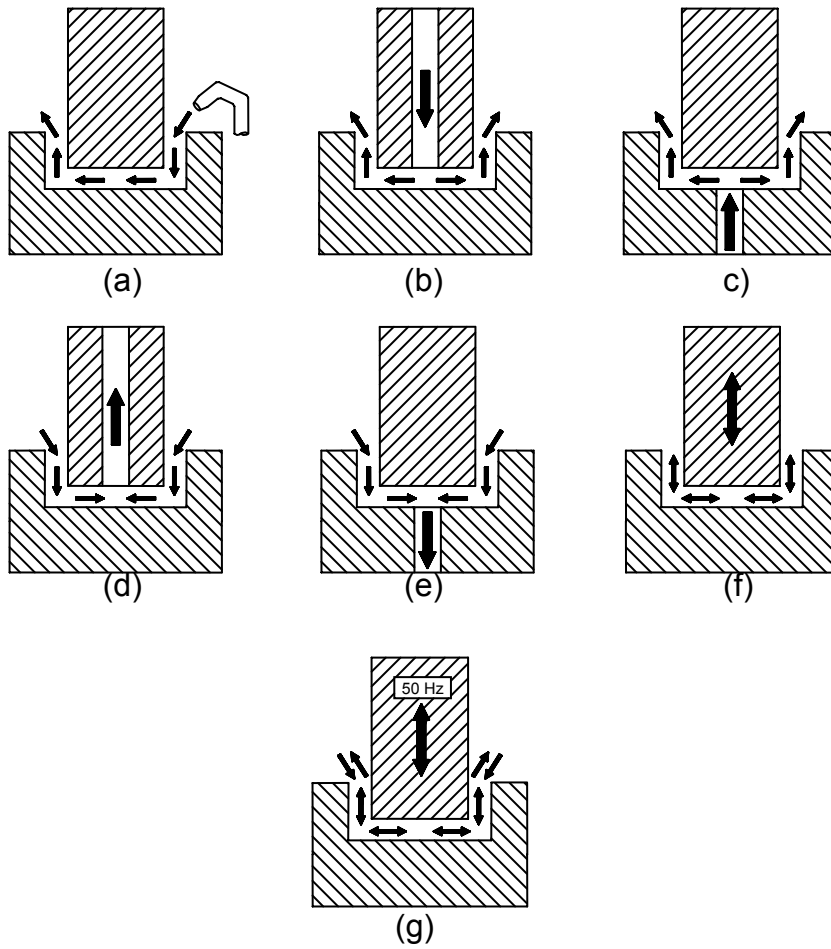
EEİ'de dielektrik sıvıya ait özellikler de işlem üzerinde oldukça büyük bir oranda etkilidir. İşleme üzerinde etkili olan dielektrik sıvı özellikleri aşağıda sunulmuştur.

1) *Dielektrik sıvının cinsi:* EEİ'de en çok kullanılan dielektrik sıvı hidrokarbon bileşikleri ve sudur. Bunların yanı sıra organik bileşikler olan glikol ve etilenin farklı hacimsel oranlardaki sulu çözeltileri de kullanılmaktadır [20]. Hidrokarbon bileşikleri ham petrolden rafine edilmiş yağlar olup, bunların arasında en iyi düşük akışkanlığa sahip bilinen gaz yağıdır. Dielektrik su olarak saf suyun kullanımı Tel-EEİ'de, Mikro EEİ'de ve karbon ihtiva edilmemesi ile düşük viskozitenin avantajlı olduğu özel Dalma-EEİ tezgâhlarında geçerlidir [21, 22].

Ayrıca deneysel amaçlı gaz jeti uygulamaları da mevcuttur [23]. İşlemede yüzey pürüzlülüğünün ve işleme zamanının arttırılması için dielektrik sıvı içine metal tozlarının atıldığı uygulamalarda mevcuttur [24–26].

2) *Dielektrik sıvı uygulama yöntemi:* EEİ ile işlemede yaygın olarak kullanılan beş tip dielektrik sıvı uygulama yöntemi vardır (Şekil 2.9). Bu teknikler şunlardır:

- i) Yanal püskürtme: Dielektrik sıvının işleme aralığına yardımcı bir aparat ile işleme aralığına yandan uygulandığı bir yöntemdir (Şekil 2. 9 a).
- ii) Elektrot veya işparçası içinden püskürtme: Dielektrik sıvının işleme aralığına elektrot veya işparçasına açılan bir delik yoluyla püskürtüldüğü bir yöntemdir (Şekil 2.9 b, c).
- iii) Elektrot veya işparçası içinden emme: Dielektrik sıvının işleme aralığından elektrot veya iş parçasına açılan bir delik yoluyla emildiği bir yöntemdir (Şekil 2.9 d, e).
- iv) Statik: Dielektrik sıvının sadece elektrotun aşağı ve yukarı yönde yaptığı hareketleriyle oluşan basınç vasıtası ile uygulandığı bir yöntemdir (Şekil 2.9 f).
- v) Titreşimli: Elektrodun 50 Hz frekansta aşağı yukarı doğrultuda titreştirilmesi ile sağlanan pompalamayı kullanan bir yöntemdir (Şekil 2.9 g) [21,27].



Şekil 2.9. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri

- a) Yanal püskürtme b) Elektrot içinden püskürtme
c) İşparçası içinden püskürtme d) Elektrot içinden emme
e) İşparçası içinden emme f) Statik g) Titreşimli

3) *Dielektrik sıvı basıncı*: Dielektrik sıvının işleme aralığındaki işleme atıklarını ortamdaki uzaklaştırması ve yüzeylerdeki aşırı ısınmayı engellemesi için uygulanan farklı yöntemler vardır. Bu yöntemlerden dielektrik sıvının hiçbir basınç uygulanmadan sadece yanak akış yöntemiyle uygulanması durumunda işleme atıkları işleme aralığının iç kenarlarında toplanarak boşalım kapasitesini azaltır.

Basıncın uygulanmadığı durumlarda yüzeylerden kaldırılan talaş birikerek kirlilik oluşturur. Basıncın uygulanması bilhassa derin işleme koşullarında daha kritiktir. Çünkü yanak akış derin işleme koşullarında işleme aralığında,

boşalımın oluşturduğu basınçtan dolayı yeterli dielektrik sıvı nüfuziyeti gerçekleşemez ve biriken işleme atıkları boşalımın verimini düşürür. Ayrıca basıncın uygulanmaması halinde işleme derinliğinde belirgin oranda azalma gözlenir.

Dielektrik sıvının basıncındaki artış İİH ve EAH'nda artışa sebep olurken, yüzey pürüzlülüğünün önce artmasına daha sonra yüksek basınç değerlerinde fazla değişmemesine neden olur [28–30]. Bunların yanı sıra dielektrik sıvının basınçlı bir şekilde uygulandığı yöntemlerde elektrotun keskin köşe ve kenarlarındaki yuvarlanma eğilimi basınç uygulanmadığı durumlara göre daha yüksektir. Bunun sebebi ise ergimiş metalin yüzeyde tekrar katılaşmadan basınç yoluyla ortamdan uzaklaştırılmasıdır [28].

4) *Dielektrik sıvı akış hızı*: Dielektrik sıvının akış hızı uygulama merkezinden uzaklaştıkça azalır. Yüksek hızlardaki dielektrik sıvı akışında kabarcıklara neden olur. Bu kabarcıklar akışın türbülanslı olmasına yol açar. Dielektrik sıvının yüksek akış hızı ve türbülanslı yapısı, bir sonraki boşalımın aynı noktalarda oluşma yoğunluklarının daha yüksek olma olasılığını artırır [31]. Ayrıca dielektrik sıvı akış hızı işparçası yüzeyindeki tekrar katılaşmış tabaka kalınlığını ve bu tabakadaki mikro çatlakların yoğunluğunu da etkiler. Akış hızının yüksek olması, ergimiş işparçası malzemesinin yüzeyden daha çabuk uzaklaştırılmasını sağlayacağı için tekrar katılaşan tabaka kalınlığı hızın artışı ile azalır [21].

5) *Dielektrik sıvı viskozitesi*: Yüksek viskozite değerine sahip dielektrik sıvılarla yapılan derin işleme koşullarında işleme atıklarının ortamdan uzaklaştırılması zordur. Bunun sebebi ise yüksek viskoziteye sahip dielektrik sıvının işleme aralığı ve kesme genişliği aralıklarında etkin bir sirkülasyon sağlayamamasıdır. Bu nedenle kaba işlemlerde yüksek, ince işlemede düşük viskoziteli dielektrik sıvı kullanılmalıdır. Düşük viskoziteli dielektrik sıvıların ise kırılmaya karşı dirençleri düşüktür.

6) *Dielektrik sıvı sıcaklığı*: İşleme sırasında dielektrik sıvının soğutma işlemine tabi tutulmaması dielektrik sıvının ısınmasına ve viskozite değerinin düşmesine sebep olur. Bunun neticesinde dielektrik sıvının elektriksel kırılmaya karşı direnci azalarak düzensiz boşalımlara neden olur.

2.3.4. İşparçası malzemesinin fiziksel özellikleri

EEİ'de elektriksel iletkenliğe sahip bütün malzemeler işparçası olarak işlenebilir. Fakat işparçası malzemesinin işlenebilirlik derecesi işparçası malzemesinin bazı ısı-fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerden en etkili olanları ise yoğunluk, ısıl kapasite ve ergime sıcaklığı değerleridir. Bu değerler ile işleme hızı ters orantılıdır [16].

2.3.5. Elektrot malzemesinin fiziksel özellikleri

EEİ ile işlemede bütün elektrik ileten malzemeler elektrot yapımında kullanılabilir. Bununla birlikte elektrot malzemenin fiziksel özellik olarak, yüksek erime sıcaklığı, ısı iletim katsayısı ve elektrik iletim katsayısına sahip olması istenir. Bunun nedeni ise EEİ ile işlemede elektrot aşınmasının bu değerler ile ters orantılı olmasıdır. Yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek ısıl kapasiteye sahip elektrot malzemelerinin aşınma direncide yüksektir [32].

2.4. EEİ'de Performans Karakteristikleri

EEİ operasyonlarında işleme performansı genel olarak işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), bağıl aşınma (BA) ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilir [33–35].

$$İİH \left[\text{mm}^3/\text{dak} \right] = \frac{\text{İş parçasını işleme hacmi} \left[\text{mm}^3 \right]}{\text{Toplam işleme süresi} \left[\text{dak.} \right]} \quad (2.7)$$

$$EAH \left[\text{mm}^3/\text{dak.} \right] = \frac{\text{Elektrot toplam aşınma hacmi} \left[\text{mm}^3 \right]}{\text{Toplam işleme süresi} \left[\text{dak.} \right]} \quad (2.8)$$

$$BA [\%] = \frac{EAH}{\bar{I}H} \times 100 \quad (2.9)$$

İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a): Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri işparçası yüzeyinde belirli bir uzunluktaki doğrultu üzerinden ölçülen yüzeye dik eksenindeki değerlerin μm cinsinden aritmetik ortalamasıdır.

EEİ'de $\bar{I}H$ en yüksek, EAH en düşük ve ortalama yüzey pürüzlülüğü en düşük durumları, EEİ'de en iyi performans karakteristikleri olarak adlandırılır.

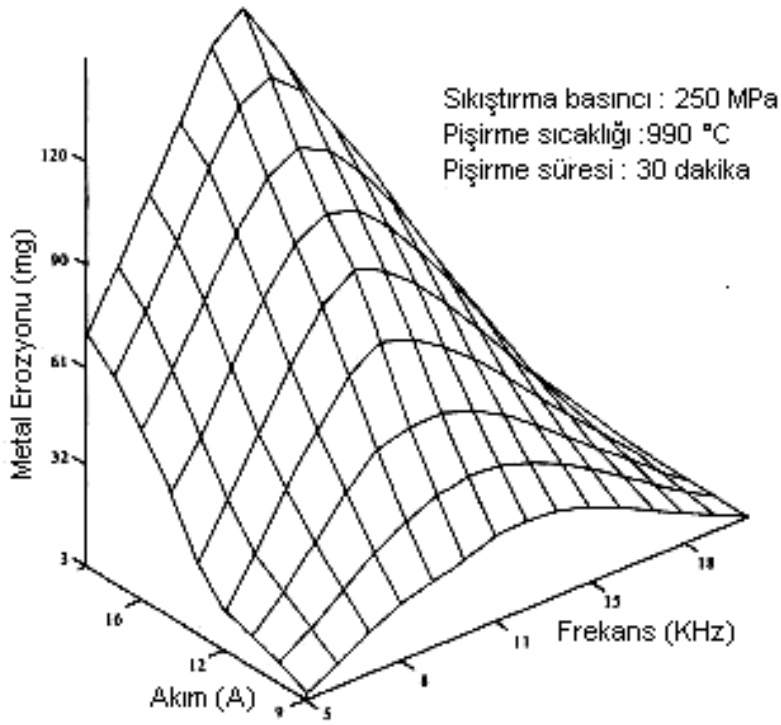
3. EEİ'DE HIZLI ELEKTROT ÜRETİM METOTLARI

EEİ'deki elektrot üretimleri genel olarak doğrudan ve dolaylı yaklaşımlar olarak ikiye ayrılabilir. Doğrudan yaklaşımlarda elektrot pozitif-erkek model olarak tasarlanır. Dolaylı yaklaşımlarda ise elektrotların işleyeceği boşluk yani negatif-dişi önce tasarlanır ve bu boşluğa uygun bir elektrot çeşitli tekniklerle üretilir. İşparçasında işlenecek boşluğun negatif kopyası olan elektrotların klasik metotlarla üretimi çoğunlukla doğrudan yaklaşımlar olarak adlandırılır. Elektrotların toz metalürjisi (T/M) veya stereolitografi (SLA) metotlarında üretimi ise dolaylı yaklaşımlardır.

3.1. T/M ile Elektrot Üretim Metodu

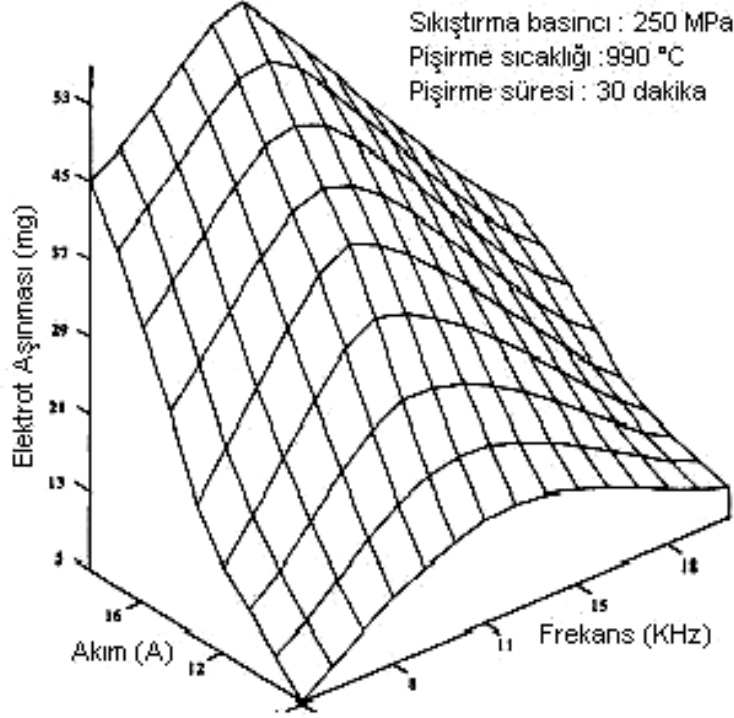
Samuel ve Philips, T/M ile üretilmiş elektrotlar üzerine çalışmışlardır. Deneylerinde elektrot üretmek amacıyla, görünür yoğunluğu $2,9 \text{ g/cm}^3$, akış hızı $1,25 \text{ g/s}$ ve ASTM E11 olan %99,7 saflıktaki bakır tozlarını kullanmışlardır [36]. Bakır tozlarını ağırlık başına %1'lik çinko tozları ile birlikte çift konili karıştırıcıyla karıştırıp, 20 tonluk presle 62 ile 625 MPa arasında sıkıştırılıp, 950°C olan fırında 30 dakika pişirerek çapı 14 mm boyu 12 mm olan silindirik elektrotlar üretmişlerdir. Bu elektrotlarla yaptıkları deneylerde EEİ sırasında T/M ile üretilmiş elektrot üzerinde uygulanan kısa devre durumlarını, ark oluşumlarını, işparçası ile elektrot arasındaki kirliliği, EEİ'nin kararlılığı ile İİH ve EAH'nı akım ile vurum frekansı değişimlerine göre durumlarını incelemişlerdir. T/M ile üretilmiş elektrotlarda; büyük bakır parçaların işleme sırasında kısa devreye neden olduğunu, yüzey pürüzlülüğünün fazla olması nedeniyle çok kolay ark oluşumuna neden olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca işparçası ile elektrot arasındaki kirlilik ne kadar dielektrik sıvıya ve uygulama metoduna bağlı olsa da T/M üretim parametreleri olan sinterleme sıcaklığı ile sıkıştırma basıncının da kirlilikte etkili olduğu, işleme kararlılığının ise özellikle bakır tozlarının büyüklüğüyle ters orantılı olarak azaldığını gözlemlemişlerdir [36].

T/M ile üretilmiş elektrotlarla yapılan işlemlerde, düşük akım–yüksek frekansta veya yüksek akım–düşük frekansta İİH'nın düşük olduğu, bunun tersine yüksek akım–yüksek frekansta ise İİH'nın yüksek olduğu belirlenmiştir. Burada etkili faktörün ise, elektrotun gözenekli yüzey yapısının olduğunu belirlemişlerdir (Şekil 3.1). T/M ile üretilmiş elektrotlarda EAH'nın düşük sinterleme sıcaklığı ile düşük sıkıştırma basıncına sahip elektrotlarda fazla olduğu, işleme akım ve vurum frekansının ise İİH'ndaki aynı etkiyi verdiğini belirlemişlerdir (Şekil 3.2).



Şekil 3.1. T/M ile üretilmiş elektrotlarda İİH karakteristikleri [36]

Tay ve Haider, ortalama boyutları 30 μm olan bakır, bronz ve nikel tozlarını T/M metoduna göre karıştırıp sıkıştırarak elektrot üretmişlerdir. Oluşturdukları elektrotların yüzeylerini IR 200 W CO₂ lazerle sinterleyerek düşük erime sıcaklığına sahip bronz malzemeyi eritmişler ve soğuyunca elektrotların 50 μm 'lik derinliğe kadar kuvvetli bağın oluşmasını ve elektrot yüzeyindeki gözeneklerin düzeltilmesini sağlamışlardır [37].



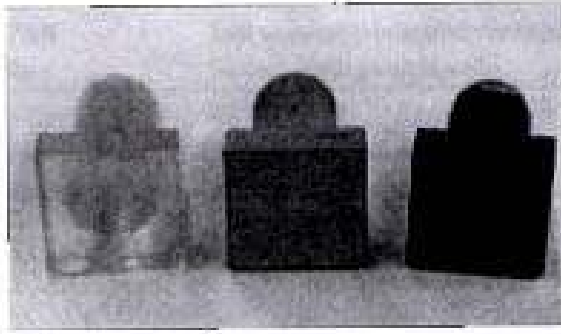
Şekil 3.2. T/M ile üretilmiş elektrotlarda elektrot aşınma karakteristikleri [36]

Tay ve Haider, ürettikleri bu elektrotlarla 15, 20, 25 ve 30 dakikalık işleme sürelerinde takım çeliği üzerinde kaba, yarı kaba ve ince işlemler yapmışlardır. Elektrotların düşük İİH'ında kaba ve yarı kaba işlemlerde mükemmel sonuç verdiğini bulmuşlardır. Elektrot yüzeyinin pürüzlülüğünün ve ısı ve elektrik iletkenliğinin artırılması için bakırla kapladıkları elektrotlarla yaptıkları deneylerde ise uygun İİH'larında yüksek boyutsal hassasiyet sağlamışlardır [37].

Mohri ve arkadaşları, elektrot aşınması nedeniyle boşalım boşluklarının oluştuğunu, bunun da İİH'nı azalttığı için ısıya dayanıklı volfram karbürlerini içeren bakır kompozit ve demir bulunduran kompozit alüminyum elektrotlar üretmişlerdir. Ürettikleri 16 mm çapında 5 mm kalınlığındaki elektrotlarla EEİ yaparak, zamanla ergime sıcaklığı düşük malzemenin ergimesiyle elektrot yüzeyinin, sertliğin ve mikro yapının değiştiğini görmüşlerdir [38].

3.2. SLA ile Elektrot Üretim Metodu

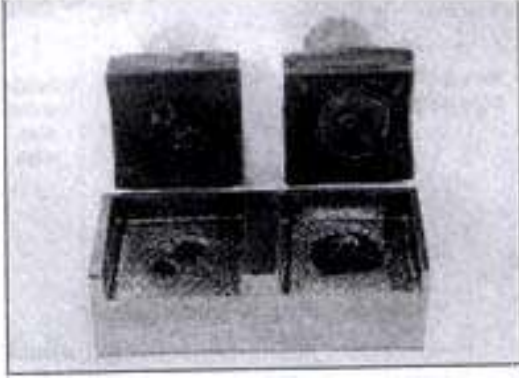
Arthur, Dickens ve Cobb, klasik elektrot üretiminde elektrot malzemesi olarak bakır, pirinç veya grafit kullanıldığını ve bunların zamanla erozyona uğradığını ve kullanılmaz hale geldiğini bildirmişlerdir. Kendi çalışmalarında 15x155 mm'lik epoksi malzemeden yapılan elektrotları önce 10 μm iletken boya ile kaplamışlar, sonra streolitografi (SLA) metoduyla 180 μm bakırla kaplayarak elektrotlar üretmişlerdir (Resim 3.1) [10].



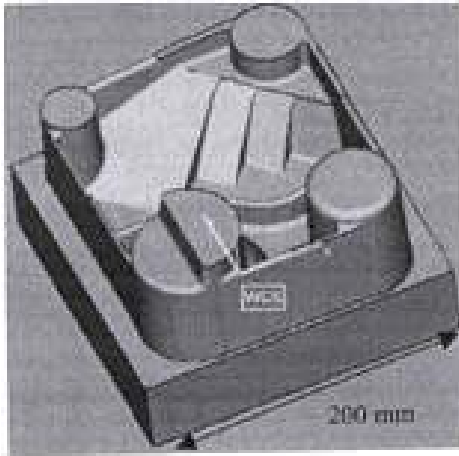
Resim 3.1. Epoksi kalıp, 10 μm iletken boya, SL ile 180 μm bakırla kaplanmış elektrotlar [10]

Bu elektrotlarla takım çeliklerinde 4mm'lik delme işlemesi gerçekleştirerek, İİH'larını, EAH'larını ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. SLA ile kaplanmış elektrotların yarı kaba veya ince erozyon işlemlere uygun olduğunu, fakat bu metotta en büyük sıkıntının ise kaplamanın aşınması ve buna bağlı yüzey pürüzlülüğündeki bozulma olduğunu belirlemişlerdir (Resim 3.2).

Dimla, Hopkins ve Rodge, çalışmalarında Daimler-Chrysler firmasının önerdiği kompleks yapıdaki elektrotu; SL7540 reçinesini kullanarak SLA metoduyla üretmişler (Resim 3.3). Elektrot yüzeyinin ortalama kalınlığı 3 μm olacak şekilde gümüş boya ile boyadıktan sonra, yaklaşık 1A/100cm²'lik akımla, 37 saat boyunca bakır kaplama kalınlığı 176 μm 'yi bulan bir şekilde CuSO₄ asidinin içinde elektrodu üretmişlerdir [39].



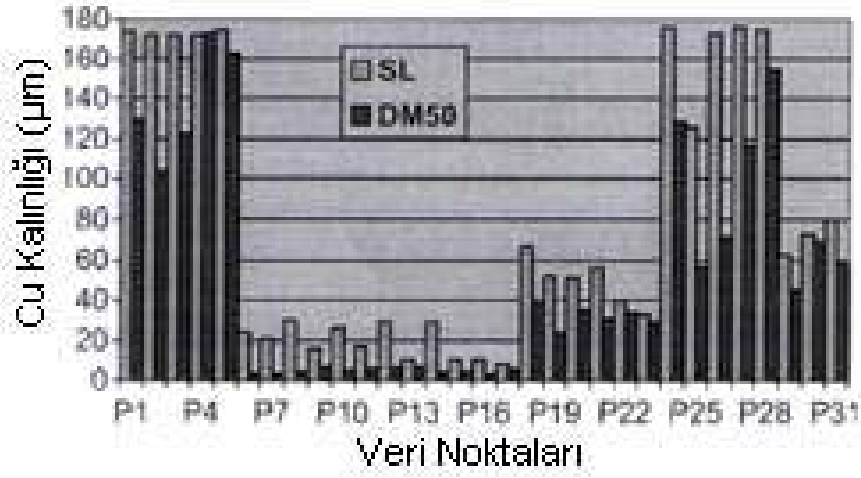
Resim 3.2. Kaplaması bozulmuş elektrotlar [10]



Resim 3.3. Daimler-Chrysler firmasının önerdiği elektrot [39]

Ayrıca Tay ve Haider, Samuel ortalama boyutları 30 μm olan bakır, bronz ve nikel tozlarını T/M metoduna göre sıkıştırdıktan sonra oluşturulan elektrotun yüzeyini lazerle sinterlemiş ve aynı metotla kaplama yapmışlardır (Şekil 3.3).

Kaplanmış elektrotlar işlemler sonrasında 7x9 matris biçiminde ayrılmış bölgelerde yapılan ortalama kaplama kalınlık incelemelerinde, yetersiz kaplamalı bölgelerde elektrot yanmasının ve erozyonun hemen başladığını belirlemişlerdir (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Kaplama kalınlıkları [39]

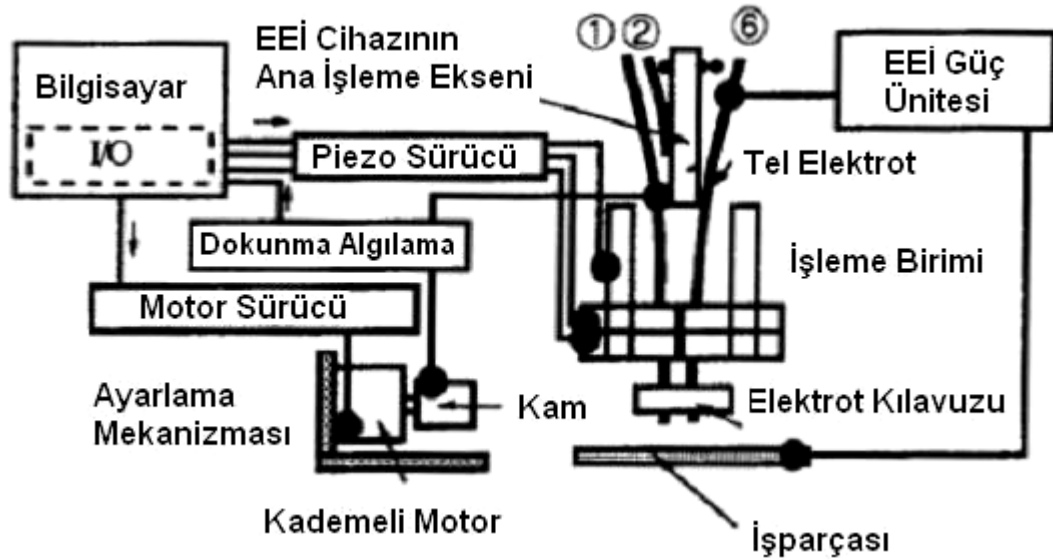
533						425
457		88	102	127	381	375
<25	76	88		127	76	127
<25	<25		<25	<25		
			<25	<25	<25	<25
	76	76				
431	457	533	76	<25	450	584
		558			584	787
482	686				1016	813

Şekil 3.4. Tolerans bozuklukları [39]

Anıl [40], SL ile üretilen elektrotların bakır kaplamasının EEİ sırasında oluşan ısı nedeniyle kalkmasını/bozulmasını engellemek ve daha fazla işleme derinliklere inmesini sağlamak amacıyla, elektrotların soğumasını kolaylaştıran iç kanallı SL elektrotları tasarlayıp üretmiştir. Anıl, iç kanallarla sağlanan soğutmanın SL elektrotların performansını ve ömrünü arttırdığını belirlemiştir.

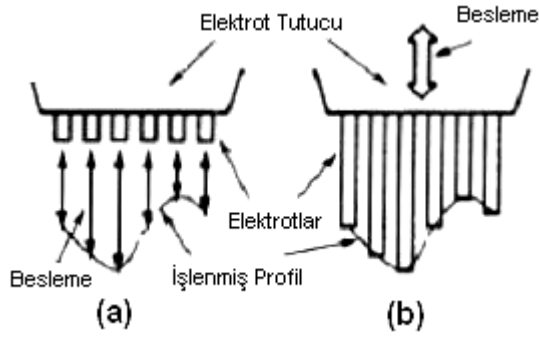
3.3. Nokta Yazıcı Tipli Elektrotlar

Furutani, Enami ve Mohri, nokta yazıcı tipli 0,76 mm aralıkta sıralı dizilmiş 6 adet 0,3mm çapındaki ince bakır tel ile EEİ yapan (x-y ile z yönündeki hareketleri ile tellerin aşınma hızlarına göre tel beslemesini bilgisayar yardımıyla sağlayan) bir cihaz üretmişlerdir (Şekil 3.5.) [41,42]. TDEO metoduna en yakın metot nokta yazıcı tipli elektrotlarla yapılan işlemdir.

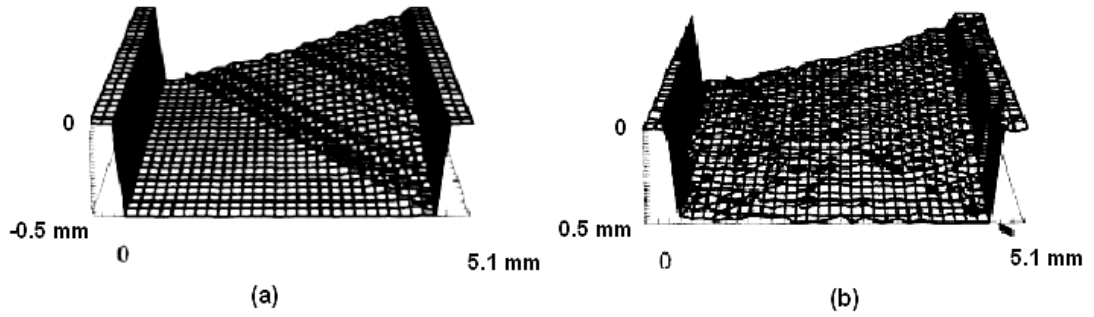


Şekil 3.5. Nokta yazıcı tipli tezgâhın yapısı [41,42]

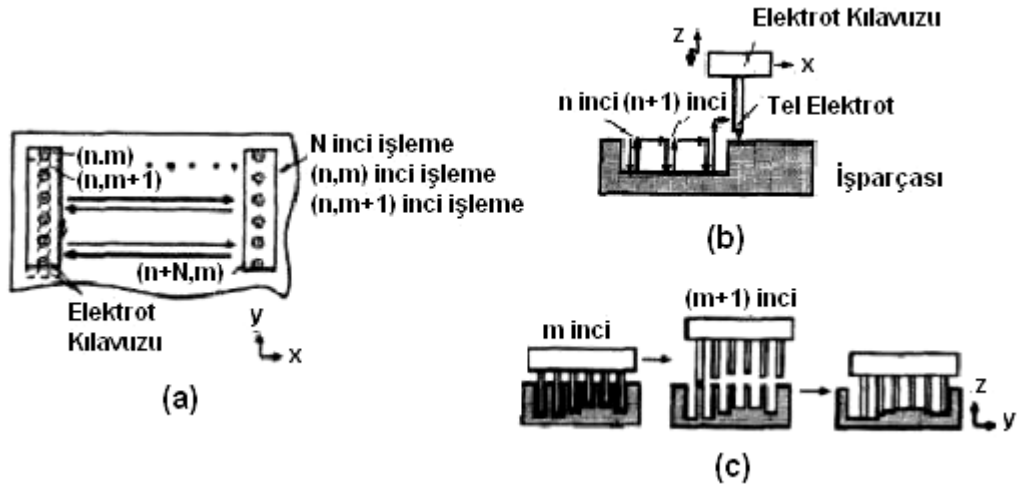
Klasik metotlarla elektrot tasarımı ve imalatını kaldıran bu EEİ yaklaşımında tel elektrotlar bağımsız olarak beslenmiştir (Şekil 3.5). Furutani, Enami ve Mohri, söz konusu sistemle işparçası üzerinde küçük boyutlarda EEİ gerçekleştirmişler (Şekil 3.7). Tellerin EEİ'deki aşınmasının bilgisayar ortamında hesaba katılması ve tüm hareketlerin bilgisayar ortamında kontrol edilmesi, küçük boyutta çok hassas yüzey işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Teller arasındaki boşluklara karşı gelen işparçası çıkıntıları ise işparçasını tutan x-y düzlem tablasını dikdörtgensel hareket ettirilerek (işleme sırasında) yok edilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.6. Tel elektrotların farklı iki çeşit beslenmesi [41,42]
a) Her bir elektrotun beslenmesi b) İşleme biriminin beslenmesi



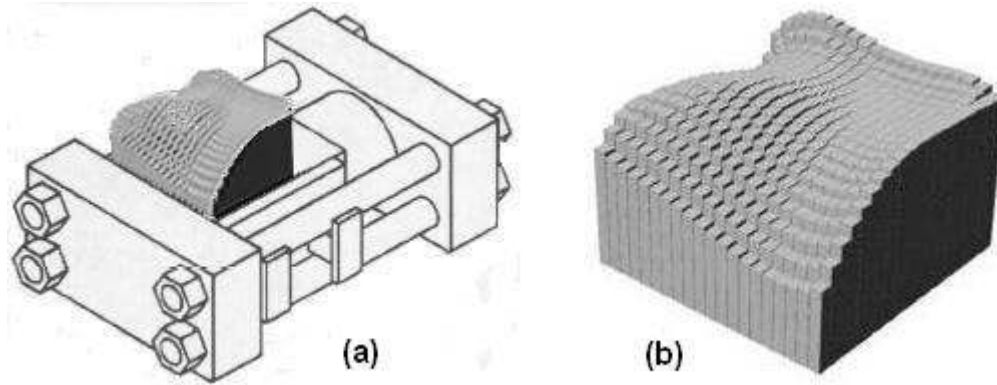
Şekil 3.7. Nokta yazıcıyla işlenen işparçası [41,42].
a) Tasarlanmış işleme b) İşlenmiş işparçası (gerçekleşen)



Şekil 3.8. Nokta yazıcı gibi EEİ tezgâhının işleme prosesi [41,42].
a) Üstten görünüş b) Yandan görünüş c) Önden görünüş

4. TDEO METODU

TDE Oluşturma Metodu, birbirinden bağımsız, genellikle birbirleriyle aynı veya farklı kesitlere sahip bakır tellerin işparçasında işlenecek yüzeye benzer bir tel demeti halinde tutulmasına dayanan basit ve esnek bir prototip elektrot hazırlama yöntemidir (Şekil 4.1).

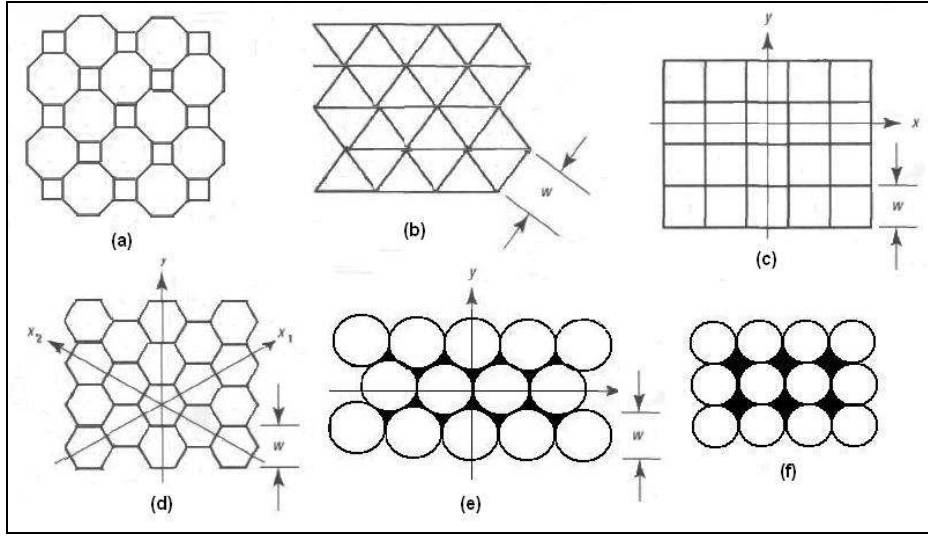


Şekil 4.1. TDEO metoduna bir örnek

a) Elektrot adaptörü b) Oluşturulan örnek EEİ yüzeyi

TDEO metodunun esas amacı, farklı geometrik şekillere sahip elektrot ihtiyacını hızlı ve kolay bir şekilde karşılamaktır. TDEO metodunda, tel demetindeki bağımsız teller bir matrise benzer şekilde, yan yana dizilmiş ve birbirine temas halinde tutulmaktadır. Tellerin demet halinde tutulması uygun bir elektrot adaptörü sayesinde gerçekleştirilir (Şekil 4.1 a). Teller işlenecek kalıp veya modelin boşluk alanın yüzeyine denk gelecek kadar olan teller diğer tellere göre işleme derinliğine uygun boyda itilir veya çıkartılır (Şekil 4.1 b). Tel demeti işlenecek yüzeyin hassasiyetine bağlı olarak daha küçük veya daha farklı kesitlere sahip tellerden oluşturulabilir.

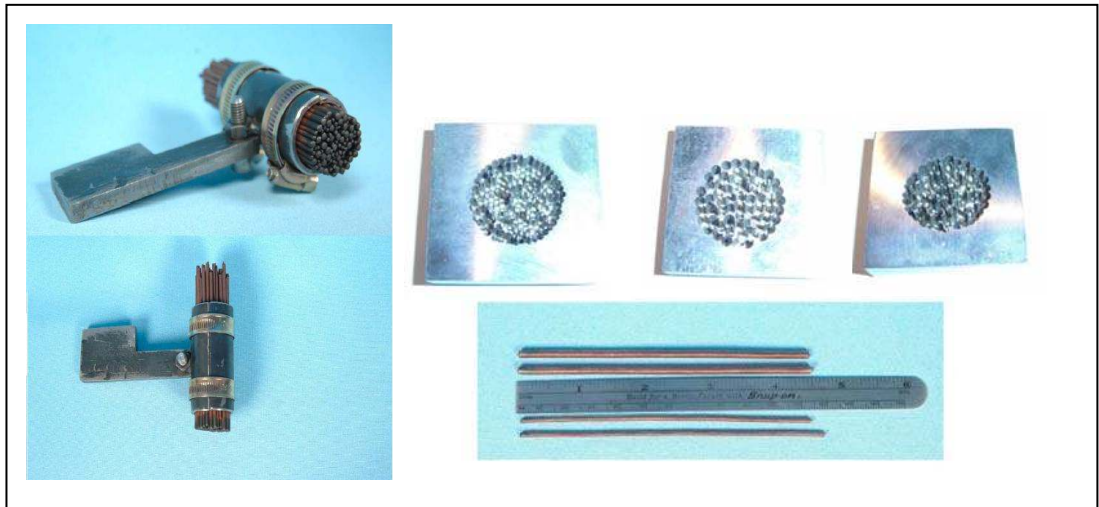
TDEO metodunun en önemli kısmı elektrot oluşturmada kullanılan tellerdir. TDEO metodunda çeşitli kesit alanına sahip teller kullanılabilir (Şekil 4.2) [43].



Şekil 4.2. Tel şekilleri [43]

a) Sekizgen ve kare b) Üçgen c) Kare d) Altıgen
e) Daire (Atlamalı diziliş) e) Daire (Üst üste diziliş)

Tellerin ticari olarak temini için piyasada araştırma yapılmış olup, araştırma sonucunda, özellikle kare ve yuvarlak kesitli tellerin ticari olarak temininin kolay olduğu bulunmuştur. Şekil 4.2'deki tel şekilleri dikkatle incelendiğinde, sadece daire kesitli tellerle oluşturulan elektrotlarla yapılan işlemede, işparçası üzerinde küçük çıkıntılar ile daire kesitli tellerde diziliş hatalarının kolayca oluşacağı görülür. Bu amaçla tez kapsamında yuvarlak kesitli tellerle yapılan örnek bir çalışma Resim 4.1'de gösterilmektedir.



Resim 4.1. Çapı 1 ve 3 mm ve 2 tel karışımı olan tellerle TDEO Metodu

Sonuç olarak, TDEO metodunun metodolojisine uygun EEİ çalışmasının pratik açıdan EEİ'nin kare kesitli tellerle yapılması tez kapsamında uygun görülmüştür.

5. DENEYLER

5.1. Elektro Erozyon Tezgâhı

TDEO Metoduna ait deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgâhları Laboratuvarında bulunan Furkan EDM M25 A tipi Dalma-EEİ tezgâhında gerçekleştirilmiştir (Resim 5.1). Tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 5.1’de verilmiştir [44].

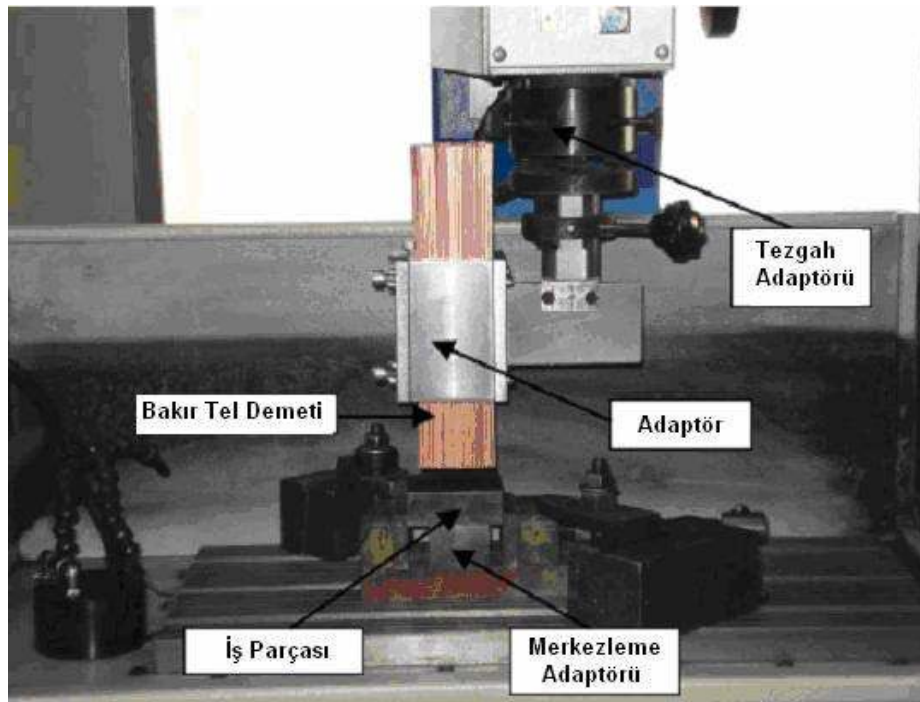


Resim 5.1. Furkan EDM M25 A elektro erozyon tezgâhı

Çizelge 5.1. EEİ tezgâhının teknik özellikleri

Elektronik Güç Devresi	
Güç (220 V, 50 Hz, 3f)	3 KVA
Boşalım Akımı Kademeleri	1,5 - 3 - 6 - 12 - 25 A
Vurum Süresi Kademeleri	4-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 μ s
Bekleme Süresi Kademeleri	4-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 μ s
Çalışma Süresi Kademeleri	0,1-0,2-0,4-0,8-1,6-3,2-6,4-12,8 s-Sürekli
Geri Çekme Süresi Kademeleri	0,1-0,2-0,4-0,8-1,6-3,2-6,4-12,8 s
Tezgâh Gövde Boyutları	
İş Tablası Ölçüleri (X-Y)	550 x 250 mm
Tabla Hareket Ölçüleri (X-Y)	300 x 200 mm
Tabla Hareket Hassasiyeti (X-Y)	0,02 mm
İşleme Haznesi Ölçüleri (X-Y-Z)	860 x 470 x 280 mm
Maksimum İş Parçası Ölçüleri (X-Y-Z)	660 x 470 x 280 mm
Z - Eksenli Kontrol Mekanizması	Servo Kontrol
Z - Eksenli Hareket Kursu	160 mm
Z - Eksenli Hareket Hassasiyeti	0,01 mm
Dielektrik Sıvı Sistemi	
Depo Ölçüleri (X-Y-Z)	950 x 580 x 600 mm
Pompa Kapasitesi	50 lt/dak.

Resim 5.2’de Dalma-EEİ tezgâhının iç haznesi içerisindeki Dalma-EEİ tezgâhının adaptörü, bakır tel demetini tutan elektrot adaptörü ve işparçasının bağlama detaylarından oluşan deney düzeneği gösterilmiştir.

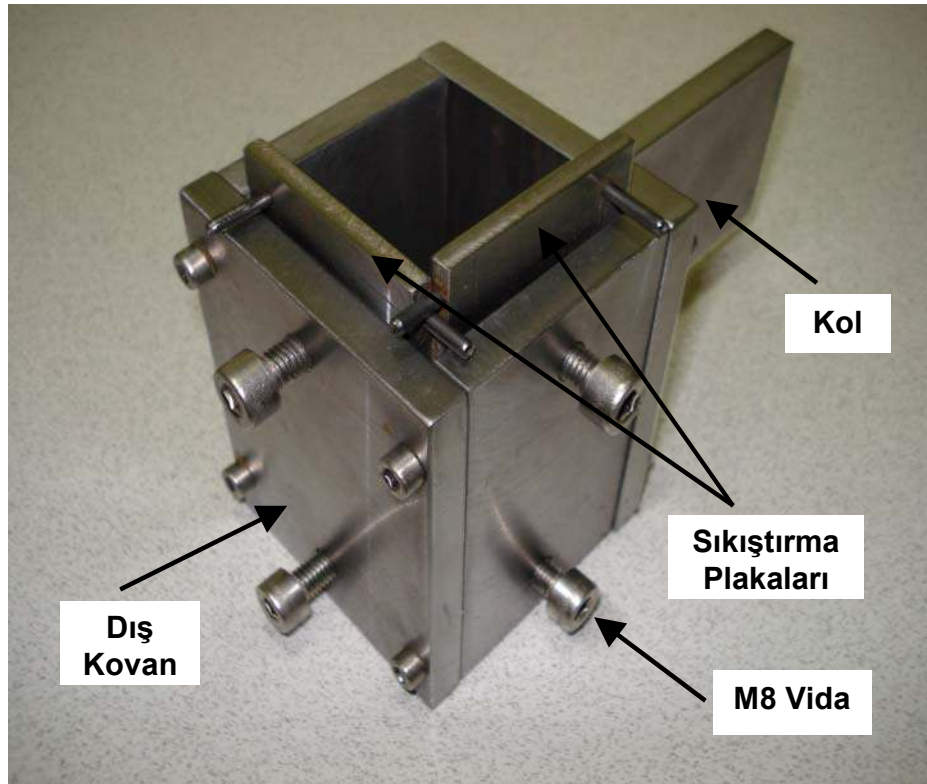


Resim 5.2. Elektrot ve işparçası bağlama detayları

5.2. Elektrot Adaptörü ve Tel Dizme Masterları

Resim 5.3’de deneylerde birbirinden bağımsız bakır tellerin tel demeti halinde tutulmasını sağlayan elektrot adaptörünün fotoğrafı görülmektedir. Elektrot adaptörü, EEİ tezgâhının adaptörüne bağlanmasını sağlayan kol, telleri içerisinde muhafaza eden dış kovan ile telleri iki farklı yönden sıkıştırılmasını sağlayan 2 adet sıkıştırma plakası olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır.

Deneyler sırasında bakır tellerin işparçasında işlenecek yüzeye benzer şekilde tutulmasını sağlamak ve EEİ sırasında tellerde herhangi bir oynamanın oluşmasını önlemek için sıkıştırma plakalarını alt ve üstten itmek için 4 adet M8 vida kullanılmıştır. Elektrot adaptörü frezeleme yöntemiyle kalınlığı 10 mm’ye indirilmiş Ç1040 olarak ifade edilen çelik plakalardan üretilmiştir.



Resim 5.3. Elektrot adaptörü

Resim 5.4’de tellerin 20x21 tel matris şeklinde dizilerek elektrot adaptörü ile tutulması gösterilmektedir.



Resim 5.4. 20x21 Tel matris
a) Boyuna görünüş b) Enine görünüş

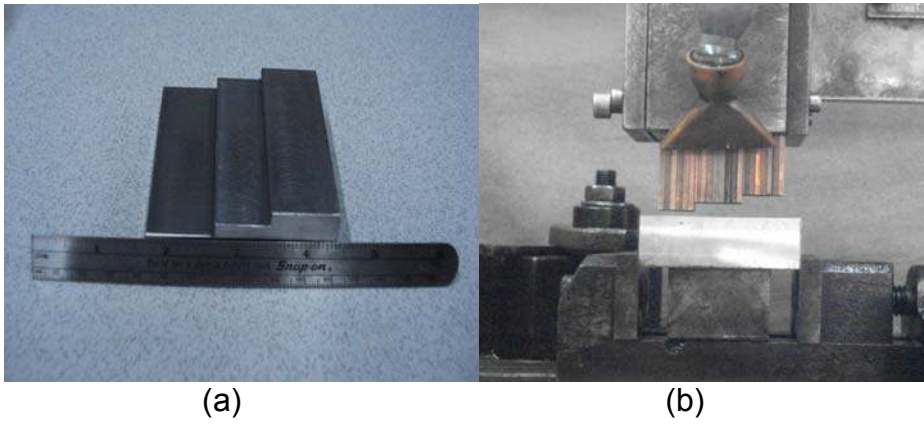
Bütün deneylerde, deneye başlamadan önce tel kare kesitlerinin düzgün olması ve tel demetinin aynı boya getirilmesi için 4 Eksen Sodick AQ750LH model Tel-EEİ tezgâhında tel demeti üst ve alt uçlarından kestirilmiştir.

EEİ performans karakteristiklerinin matematiksel modellemesi için yapılan deneylerde tellerin dizilmesini sağlamak için Resim 5.5 ve Resim 5.6’da verilen tel dizme mastarları kullanılmıştır. Mastarlar kolay yapılabilecek olan alçı, tahta, derlin, pirinç, bronz, vb. gibi malzemeler yerine, deneyler için fazla temin edilen işparçası malzemesi olan çelikten üretilmiştir. Resim 5.5’deki mastar freze tezgâhında kesme ucuna 11° verilerek üretilmiştir. Resim 5.6’daki mastar freze tezgâhında 4 mm derinlik kademeleri oluşturacak şekilde işlenmesiyle üretilmiştir.

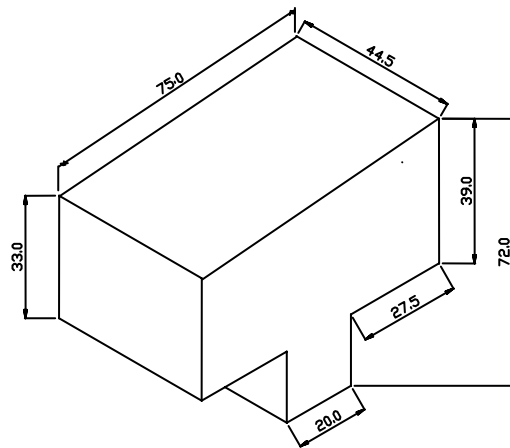
Deneylerde kullanılan işparçalarının daima aynı pozisyonda bağlanabilmesi için, Resim 5.2, Resim 5.5 ve Resim 5.6’da gösterilen ve EEİ tezgâhının mengene kanalına kızaklanan, işparçası konumlama adaptörü kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Resim 5.5. 11° açılı tel dizme mastarı
a) Master b) Açılı dizilmiş teller



Resim 5.6. 4'er mm derinlik kademeli tel dizme mastarı
a) Master b) Kademeli dizilmiş teller



Şekil 5.1. İşparçası konumlandırma adaptörü

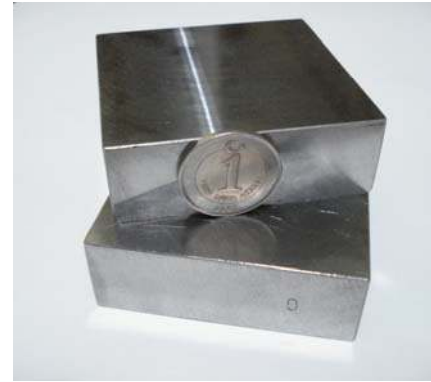
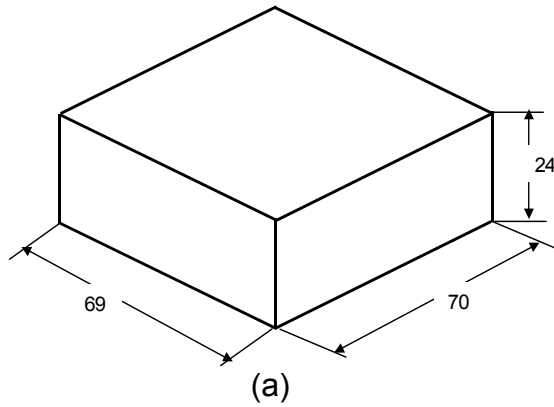
5.3. İşparçası

Deneylerde iş parçası olarak Çizelge 5.2'de kimyasal bileşimi verilmiş olan SAE 1040 çeliği (BS 189) kullanılmıştır.

Çizelge 5.2. İşparçası malzemesinin kimyasal bileşimi

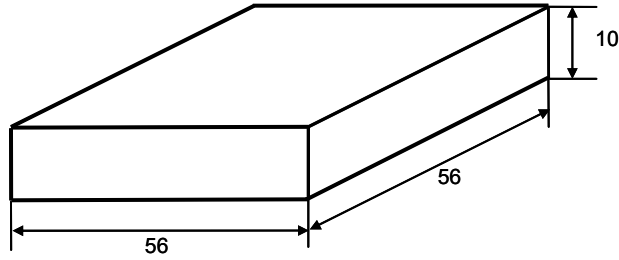
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	W	Fe
%	0,3754	0,208	0,744	0,0081	0,0269	0,0727	0,0148	0,097	0,0183	0,0243	0,1495	0,0915	98,175

EEİ'nin matematiksel modellenmesi için yapılacak deneylerde kullanılan işparçaları ticari olarak sektörden temin edilen 71×25,5 mm kesitli lamadan imal edilmiştir Lama işparçası 71 mm uzunluk ölçülerinde kesildikten sonra frezelenerek 70x69x24 mm ölçülerine getirilmiştir (Şekil 5.2).

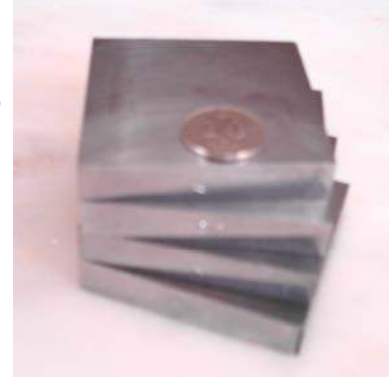


Şekil 5.2. İşparçası malzemesi ölçüleri (Modelleme)
a) Boyutlar b) İş parçasının resmi

Tel aşınmasının modellemesinde kullanılan işparçaları ise ticari olarak sektörden temin edilen 11×60 mm kesitli lamadan imal edilmiştir Lama işparçası 60 mm uzunluk ölçülerinde kesildikten sonra frezelenerek 56x56x10 mm ölçülerine getirilmiştir (Şekil 5.3). Frezelenmiş işparçası malzemeleri deneylerde kolaylık sağlaması amacıyla alfabetik numaratorle markalanarak kodlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.3. İşparçası malzemesi ölçüleri (Aşınma)
a) Boyutlar b) İş parçasının resmi

5.4. Dielektrik Sıvı

Deneylerde dielektrik sıvı olarak gaz yağı (Mobil Oil Velocite 6) kullanılmıştır.

5.5. Elektrot

Elektrot olarak 2,5 mm kare kesitli bakır kaynak telleri (ASA 3100) demet haline getirilerek kullanılmıştır (Resim 5.7). Tellerin kimyasal bileşimi Çizelge 5.3'te verilmiştir [44]. 420 adet tel 21x20 matris biçiminde dizilmiş ve deneyler öncesi 230 mm boya Tel-EEİ tezgâhında getirilmiştir (Resim 5.4). Deneylerde teller Resim 5.8'de gösterildiği üzere 6x21 matris oluşturacak şekilde dizilerek kullanılmıştır.



(a)

(b)

Resim 5.7. Bakır fosfor alaşımlı kaynak telleri
a) Uzaktan görünüş b) Yakından görünüş

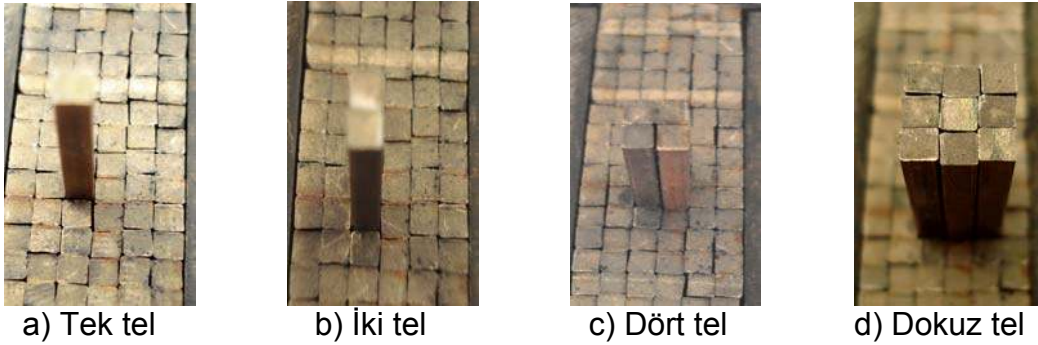
Çizelge 5.3. Tel malzemesinin kimyasal bileşimi [45]

Model	% Ag	%Cu	% P	Ergime Sıcaklığı ° C	BS 1845	DIN 8513
ASA 3100	—	94	6	710-895	CP6	L-CuP6



Resim 5.8. 6x21 Tel matris
a) Yandan görünüş b) Önden görünüş

Tellerin aşınmasının modellenmesi ve açıklanması için yapılan 1, 2, 4 ve 9'arlı tel demeti deneylerinde, teller Resim 5.9'da görüldüğü üzere 6x21 tel matrisinden 20 mm yukarıya çıkarılarak kullanılmıştır.



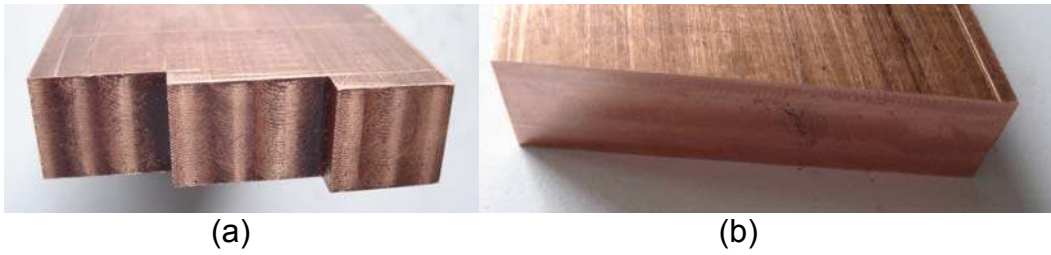
Resim 5.9. Tellerin demetten çıkartılmış resimleri

Ayrıca TDEO metodunun dolu bakır elektrot ile kıyaslanması için Çizelge 5.4'de kimyasal bileşimi verilmiş olan lama elektrolitik bakır, blok elektrot olarak kullanılmıştır. 15x60x110 mm boyutlarındaki lama şeklindeki bakır elektrot freze tezgâhında 15x52,5x110 mm boyutlarına getirilmiştir.

Çizelge 5.4. Dolu bakır elektrot malzemesinin kimyasal bileşimi

ELEMENT	Cu	O	Sn
%	99,94	0,035	0,018

Sonra Resim 5.5 ve Resim 5.6’da gösterilen mastarlara benzer şekilde iki ucundan freze tezgâhında işlenmiştir (Resim 5.10).



Resim 5.10. Dolu bakır elektrot
a) Kademeli b) Açılı

5.6. İşleme Parametreleri

Deneylerde kullanılan işleme parametreleri liste halinde Çizelge 5.5’de verilmiştir.

İşleme parametreleri içinde dielektrik sıvının püskürtülmesi ile ilgili en önemlileri çalışma süresi ve geri çekme süresidir. İşparçasında işlenecek yüzey alanının ve derinliğin büyük olması, işleme aralığında dielektrik sıvının püskürtülme zorluğu, işlemenin sürekli kesilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, her bir deney süresince kesintisiz (düzenli) işlemeyi sağlamak için çalışma süresi 6,4 saniye, geri çekme süresi 0,4 saniye olarak ayarlanmıştır.

Geri çekme süresinin verilmesindeki amaç, elektrot ile işparçası arasında koparılan talaşın düzenli uzaklaştırılmasını sağlamak ve oluşacak ark ve kısa devrelerden dolayı EEİ’nin sürekli kesilmesini önlemektir. Deneyler sırasında işleme başlığını hareket ettiren servo motorun hız ayar potu, 0,4 saniye geri

Çizelge 5.5. İşleme parametreleri

İşleme Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı (i_d) [A]	25, 12 ve 6
Vurum Süresi (t_s) [μ s]	100, 50 ve 25
Bekleme Süresi (t_p) [μ s]	12
Dielektrik Sıvı Uygulama Şekli	Statik ve Püskürtme
Çalışma Süresi [s]	6,4
Geri Çekme Süresi [s]	0,4
Püskürtme Basıncı (P) [bar]	0,3
Statik Basınç (P) [bar]	0,30
Emme Basıncı (P) [bar]	0,0
Kutuplama	Elektrot (+), İşparçası (-)
Bekleme Süresi (t_p) [μ s]	12
Dielektrik Sıvı	Gaz Yağı
İşparçası Malzemesi	Çelik (SAE 1040)
Elektrot Malzemesi	2,5 mm Kare Kesitli Bakır Kaynak Teli
İşleme Derinliği (Aşınma) [mm]	5
İşleme Derinliği (Modelleme) [mm]	12

çekme süresi içerisinde tezgâh üniversal başlık 2,5 mm yukarıya çıkacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler süresince servo motor hız ayar potu sabit tutulmuştur.

5.7. Deney Tasarımları

Bu tez çerçevesinde iki grup deney tasarlanmıştır. Birinci grup deneyler tellerin aşınmasının modellenmesi ve açıklanması ve tel davranışlarının belirlenmesini kapsamaktadır. Bu amaçla 1, 2, 4 ve 9'arlı tel demetleri kullanarak ve her birinden 9'ar adet olmak üzere toplam 36 deney tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.6).

İkinci grup deneyler TDEO metodunun işleme performans karakteristiklerinin matematiksel modellenmesini kapsamaktadır. Bu amaçla 11° açılı ve 4 mm derinlik kademeli elektrotlar için 9'ar deneyden oluşan toplam 18 deney tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.7).

Çizelge 5.6. Deney tasarımı (Tel Aşınması)

İşleme Modeli	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Bekleme Süresi	İşleme Süresi	Geri Çekme Süresi	Dielektrik Sıvı Basıncı	Dielektrik Sıvı Uygulaması
	[I_d , Amper]	[t_s , μs]	[t_p , μs]	sn	sn	[P, bar]	Şekli
1 Tel	25	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
1 Tel	25	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
1 Tel	25	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
1 Tel	12	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
1 Tel	12	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
1 Tel	12	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
1 Tel	6	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
1 Tel	6	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
1 Tel	6	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	25	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	25	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	25	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	12	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	12	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	12	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	6	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	6	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
2Tel	6	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	25	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	25	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	25	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	12	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	12	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	12	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	6	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	6	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
4 Tel	6	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	25	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	25	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	25	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	12	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	12	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	12	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	6	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	6	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
9 Tel	6	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme

Çizelge 5.7. Deney tasarımı (EEİ modelleme)

İşleme Modeli	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Bekleme Süresi	İşleme Süresi	Geri Çekme Süresi	Dielektrik Sıvı Basıncı	Dielektrik Sıvı Uygulaması
	[I_d , Amper]	[t_s , μs]	[t_p , μs]	sn	sn	[P, bar]	Şekli
Kademeli	25	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Kademeli	25	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Kademeli	25	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Kademeli	12	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Kademeli	12	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Kademeli	12	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Kademeli	6	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Kademeli	6	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Kademeli	6	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	25	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	25	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	25	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	12	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	12	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	12	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	6	100	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	6	50	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme
Açılı	6	25	12	6,4	0,4	0,3	Püskürtme

Sonuçları tutarsızlık gösteren bazı deneyler tekrarlanmıştır. Deneyler sırasında tezgâh dalma derinliği komparatörü, akım ve gerilim göstergeleri ve dielektrik basınç göstergesi sürekli izlenmiştir. Ayrıca elektrot ilerleme komparatörünün her 1 mm derinliğe dalması için geçen işleme süresi ($t_{iş}$) kaydedilmiştir.

5.8. İşparçası İşleme Hızının (İİH) Tespiti

İşparçaları tasarlanan nihai ölçülerine getirildikten sonra gaz yağı ile temizlenmiş ve basınçlı hava ile kurutulmuştur. Daha sonra 0,01 g hassasiyete sahip GEC-AVERY firmasına ait SC042-1AA2MI0AAE model dijital terazi ile üçer kez tartılmıştır. Bu üç ölçümün aritmetik ortalaması

hesaplanmış ve işparçalarının deney öncesi ağırlığı olarak kaydedilmiştir. Her deney tamamlandıktan sonra işparçaları aynı temizleme ve kurutma işlemine tabi tutularak üçer kez tartılmış ve bu üç ölçümün ortalaması işparçalarının deney sonrası ağırlığı olarak kaydedilmiştir.

İş parçası yoğunluk değeri ($7,8 \text{ g/cm}^3$) işparçalarının deney öncesi ve sonrası ağırlık farkına bölünerek işparçalarından işlenen hacim hesaplanmıştır. En son işlem olarak, işparçalarının işleme hacimleri toplam işleme sürelerine bölünerek her bir deney için İH [mm^3/dak] elde edilmiştir (Eşitlik 2.7).

5.9. Elektrot Aşınma Hızının (EAH) Tespiti

Elektrotu oluşturulan teller tel-EEİ tezgâhında aynı boya getirildikten sonra gaz yağı ile temizlenmiş ve basınçlı hava ile kurutulmuştur. Tellerin aşınmasının modellenmesi amacıyla yapılan 36 deneyde kullanılan tel grupları deneyler öncesi üçer kez tartılmıştır. Bu üç ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanmış ve tellerin deney öncesi ağırlıkları olarak kaydedilmiştir. Her deney tamamlandıktan sonra teller aynı temizleme ve kurutma işlemine tabi tutularak üçer kez tartılmış ve bu üç ölçümün ortalaması ve tellerin deney sonrası ağırlığı olarak kaydedilmiştir.

TDEO metodunun EEİ performansının modellenmesi deneylerinde kullanılacak olan 126 adetten oluşan üç ayrı tel grubu elektrot adaptöründeki 420 telden oluşturulmuş ve üçer kez tartılmıştır. Bu üç ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanmış ve tellerin deney öncesi ağırlıkları olarak kaydedilmiştir. Her deney tamamlandıktan sonra teller aynı temizleme ve kurutma işlemine tabi tutularak üçer kez tartılmış ve bu üç ölçümün ortalaması ve tellerin deney sonrası ağırlığı olarak kaydedilmiştir.

Sonra tellerin yoğunluk değeri ($8,15 \text{ g/cm}^3$) deney öncesi ve sonrası ağırlık farkına bölünerek tellerin toplam aşınma hacimleri hesaplanmıştır. En son işlem olarak, hesaplanarak bulunan tellerin aşınma hacimleri toplam işleme

sürelerine bölünerek her bir deney için EAH'ları [mm^3/dak] hesaplanmıştır (Eşitlik 2.8).

5.10. Bağlı Aşınmanın Tespiti (BA)

Her bir deneyin bağlı aşınma değeri (BA), EAH değeri İH'na bölünüp 100 ile çarpılmasıyla bulunmuştur (Eşitlik 2.9).

5.11. Deney Numunelerinin CMM'de Ölçümü

Deney numunelerinin boyut ölçümleri DEA GLGM Performans 7–17 Model 3 boyut ölçer cihazında (CMM) yapılmıştır (Resim 5.11). Ölçümlerde 1 mm çaplı kırmızı yakut uçlu prob kullanılmıştır.



Resim 5.11. Numunelerin 3 boyutlu ölçümü

Kademeli elektrotla işlemeye tabi tutulmuş numunelerde ölçüm yapmak için işparçası üzerindeki işleme yapılmamış yerlerden değerler alınarak bir düzlem oluşturulmuştur. Sonra her bir kademede derinlik için 9'ar noktadan değerler alınarak düzlemler oluşturulmuş ve bu düzlemlerin önceden belirlenen düzleme göre derinliği 0,01 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Açılı

elektrotla işlemeye tabi tutulmuş numunelerde ölçüm yapmak için işparçası üzerindeki işleme yapılmamış yerlerden ölçümler alınarak bir düzlem oluşturulmuştur. Sonra 21 sıralı olan her bir tel EEİ derinliği için en az iki adet ölçüm almak şartıyla, toplamda 50 ile 60 noktadan değerler alınarak bir düzlem oluşturulmuş ve bu düzlemin önceden belirlenen düzleme göre açısı $0,01^\circ$ hassasiyetle hesaplanmıştır.

Ayrıca, kademeli tel dizme mastarının kademeler arası derinliği 0,01 mm hassasiyetle üçer kez gerçek ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Bu ölçümler sonrası kademeli mastarda 1. kademenin derinliği 4,05 mm, ikinci kademenin derinliği 7,97 mm olarak ölçülmüştür. Açılı tel dizme mastarın eğimi ise $0,01^\circ$ hassasiyetle $11,06^\circ$ olarak ölçülmüştür.

6. TELLERİN AŞINMASININ VE İŞLEME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

Tellerin aşınmasının modellenmesi ve açıklanması, performans karakteristiklerinin ve tellerin tek ve grup halinde davranışlarının deneysel olarak belirlenmesi için 1, 2, 4 ve 9'arlı telden oluşan elektrotlarla Çizelge 4.6'da verilen deneyler yapılmıştır. Deneyler Çizelge 4.5'de verilen işleme parametrelerinde ve Çizelge 4.6'da verilmiş boşalım akımları (I_d), vurum süreleri (t_s), vurum ara süresi (t_p) (bekleme), işleme ve geri çekme sürelerinde yapılmıştır. Tüm deneylerde 5 mm işleme derinliği gerçekleştirilmiştir.

1, 2, 4 ve 9'ar adet telden oluşan elektrotlarla yapılan deneyler neticesinde ölçülen deney süresi ($t_{i\bar{s}}$) ile hesaplanan işleme performansı karakteristiklerine (İİH, EAH ve BA) ait sonuçlar Çizelge 6.1'de toplu olarak verilmiştir.

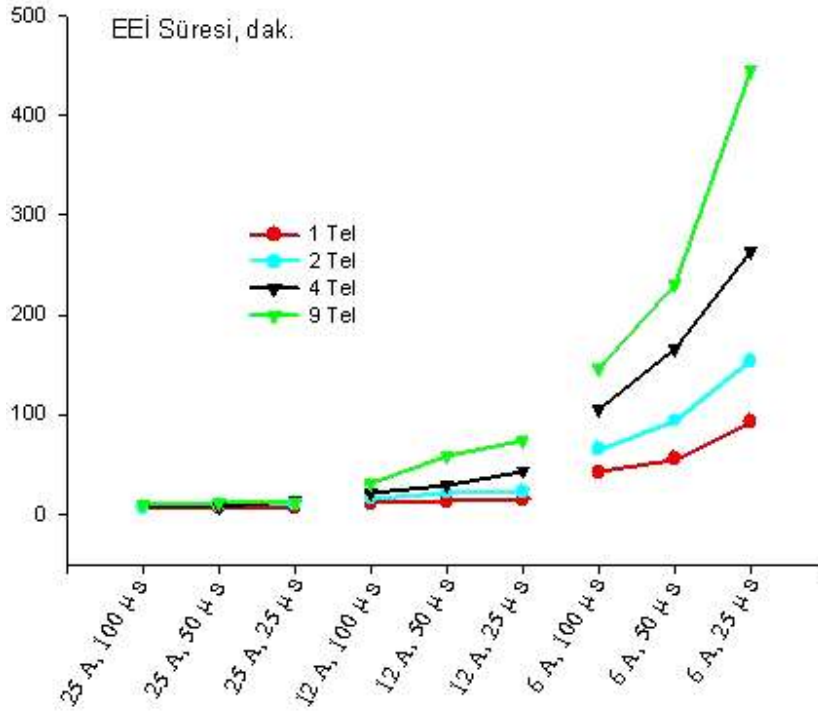
6.1. Tellerin EEİ süresi

1, 2, 4 ve 9'ar adet tellerden oluşan elektrotlarla gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen ve Çizelge 6.1'de verilen işleme sürelerinin ($t_{i\bar{s}}$) boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı iki boyutlu grafikleri Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekilden, boşalım akımı (I_d) ve vurum süresinin (t_s) azalmasıyla işleme süresinin ($t_{i\bar{s}}$) tel veya tel grupları için arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca işleme süresinin ($t_{i\bar{s}}$) tel sayısının artması ile arttığı gözlenmiştir. Bu artış özellikle düşük boşalım akımı (I_d) ve vurum süresinde (t_s) fazla olmaktadır. Yüksek boşalım akımı (I_d) ve vurum sürelerinde (t_s) tel sayısının artışı işleme süresini ($t_{i\bar{s}}$) fazla etkilememektedir. Sonuç olarak, tel sayısı ya da başka deyişle işleme alanının artışı işleme süresini ($t_{i\bar{s}}$) arttırmaktadır.

Çizelge 6.1. İİH, EAH, BA ve $t_{iş}$ 'e ait deney sonuçları

Deney No	İşleme Modeli	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Deney Süresi	İşparçası İşleme Hızı (İİH)	Elektrot Aşınma Hızı (EAH)	Bağıl Aşınma
		[i_d , Amper]	[t_s , μs]	[$t_{iş}$, dak.]	[$mm^3/dak.$]	[$mm^3/dak.$]	[BA, %]
1*	1 tel	24	100	6.52	2.26	2.92	128.99
2*	1 tel	24	50	5.92	2.92	2.90	99.25
3	1 tel	24	25	6.48	2.87	3.35	116.83
4*	1 tel	12	100	11.02	1.40	1.56	111.66
5	1 tel	12	50	12.65	1.27	1.28	101.07
6	1 tel	12	25	13.53	1.04	1.13	108.76
7	1 tel	6	100	42.22	0.30	0.42	138.77
8	1 tel	6	50	54.83	0.26	0.35	134.86
9	1 tel	6	25	92.28	0.18	0.21	114.11
10*	2 tel	24	100	7.22	4.26	4.42	103.68
11	2 tel	24	50	9.13	4.42	3.83	86.59
12	2 tel	24	25	10.35	3.22	2.96	92.02
13	2 tel	12	100	15.43	1.79	1.99	111.29
14	2 tel	12	50	21.32	1.47	1.44	97.66
15	2 tel	12	25	22.83	1.43	1.32	91.95
16	2 tel	6	100	65.27	0.44	0.51	114.85
17	2 tel	6	50	93.60	0.30	0.37	123.98
18	2 tel	6	25	153.45	0.16	0.22	136.00
19*	4 tel	24	100	8.72	8.60	6.82	79.35
20*	4 tel	24	50	8.32	8.63	6.42	74.34
21	4 tel	24	25	13.92	5.20	4.36	83.85
22	4 tel	12	100	21.62	2.91	3.04	104.49
23*	4 tel	12	50	28.45	2.21	2.22	100.59
24	4 tel	12	25	43.88	1.52	1.66	109.51
25	4 tel	6	100	104.75	0.52	0.63	120.48
26	4 tel	6	50	165.80	0.31	0.43	141.74
27	4 tel	6	25	262.75	0.21	0.26	122.11
28	9 tel	24	100	10.43	16.72	11.71	70.02
29	9 tel	24	50	12.38	13.51	9.84	72.82
30	9 tel	24	25	12.64	14.00	9.12	65.19
31	9 tel	12	100	31.57	4.49	4.35	97.00
32	9 tel	12	50	58.28	2.30	2.38	103.49
33*	9 tel	12	25	74.56	2.06	1.75	84.94
34	9 tel	6	100	146.58	0.96	0.92	96.14
35	9 tel	6	50	230.57	0.58	0.66	114.20
36	9 tel	6	25	444.75	0.30	0.33	108.92

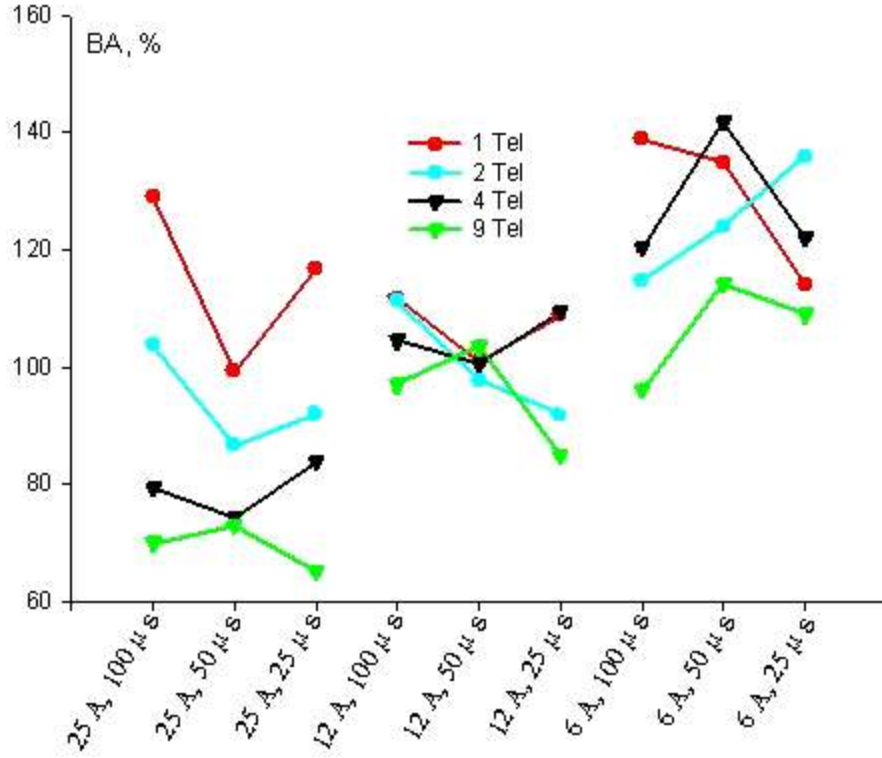
* Tekrarlanan deneyler



Şekil 6.1. İşleme parametrelerinin tellerin işleme sürelerine etkisi

6.2. Tellerin BA Değerleri

1, 2, 4 ve 9'ar adet tellerden oluşan elektrotla gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen ve Çizelge 6.1'de verilen BA değerlerinin boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı değişimi Şekil 5.2.'de verilmiştir. Şekilden, 25 A boşalım akımında (I_d) farklı tel gruplarından elde edilen BA değerleri %65 ile %130 arasında değişirken, 6 A boşalım akımında (I_d) elde edilen BA değerleri ise %95 ile %140 arasında değiştiği gözlenmiştir. 12 A boşalım akımında (I_d) elde edilen BA değerleri ise %110 ile %85 arasında değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca, tel sayısının başka değişle işleme alanının artmasının BA değerlerini azalttığı görülmüştür. Düşük boşalım akımı (I_d) ile yapılan işleme deneylerinde, tel sayısının azalması BA değerlerindeki artmasını sağlarken, BA değerlerindeki değişimin azaldığı gözlenmiştir. Bunun tersine yüksek boşalım akımlarında (I_d) ise BA değerlerindeki değişim fazla olmasına rağmen, tel sayısının artması BA değerlerini fazla düşürmektedir.

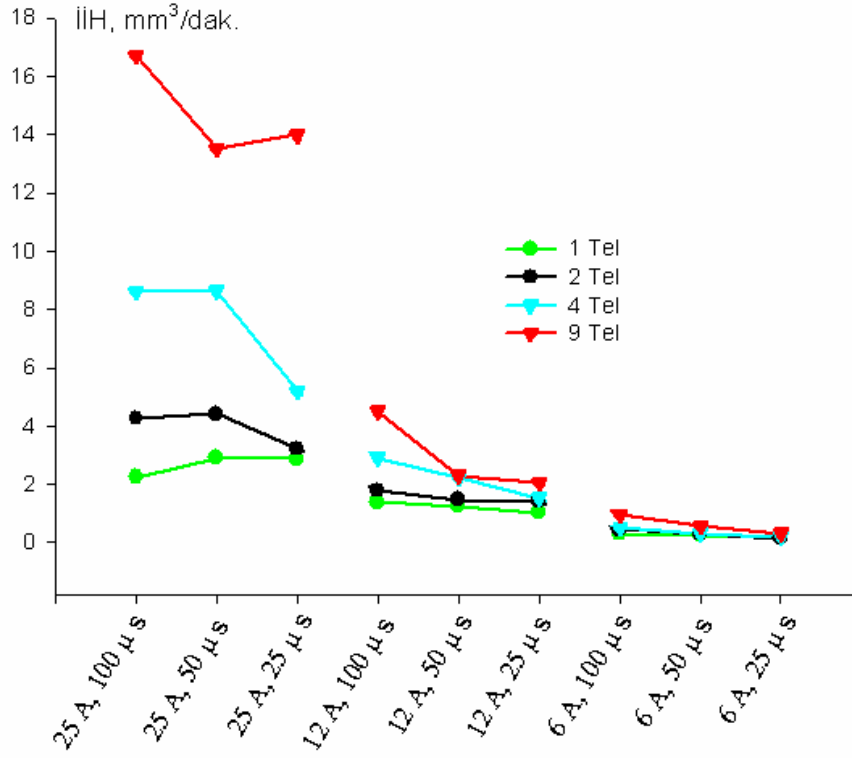


Şekil 6.2. İşleme parametrelerinin tellerin BA'sına etkisi

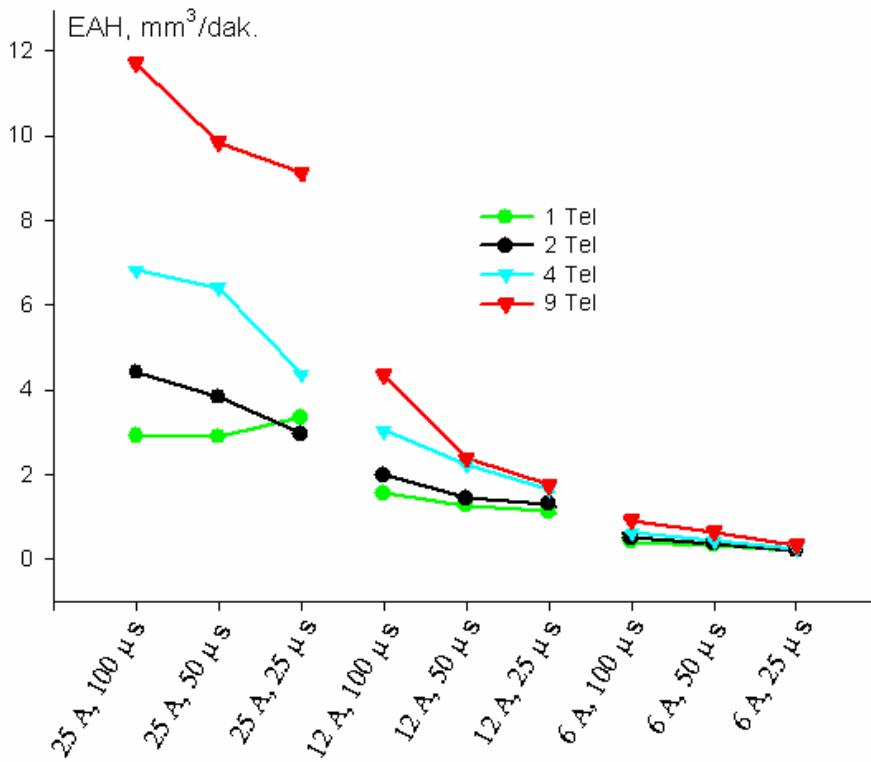
Tel sayısı azaldıkça tellerin birbirinden bağımsız işleme yapma davranışına sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Bunun tersine, yüksek boşalım akımlarında (I_d) tel sayısının artmasıyla tellerin dolu elektrot gibi davrandığını gösterir. Bu sonuçlar doğrultusunda, yüksek boşalım akımlarında (I_d) işparçası üzerinde daha küçük kesit alana sahip tellerle işleme yapılması durumunda, tel sayısının artması (teorik olarak elektrodun dolu elektroda benzemesi) nedeniyle, işlemlerde BA değerlerinin düşeceği ve tek parçadan oluşan elektrodun BA değerine yaklaşıacağı sonucuna ulaşılmıştır.

6.3. Tellerin İİH ve EAH'ları

1, 2, 4 ve 9'arlı tellerden oluşan elektrotla gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen İİH ve EAH'nın boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı değişimleri Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.3. İşleme parametrelerinin tellerin İİH'na etkisi



Şekil 6.4. İşleme parametrelerinin tellerin EAH'na etkisi

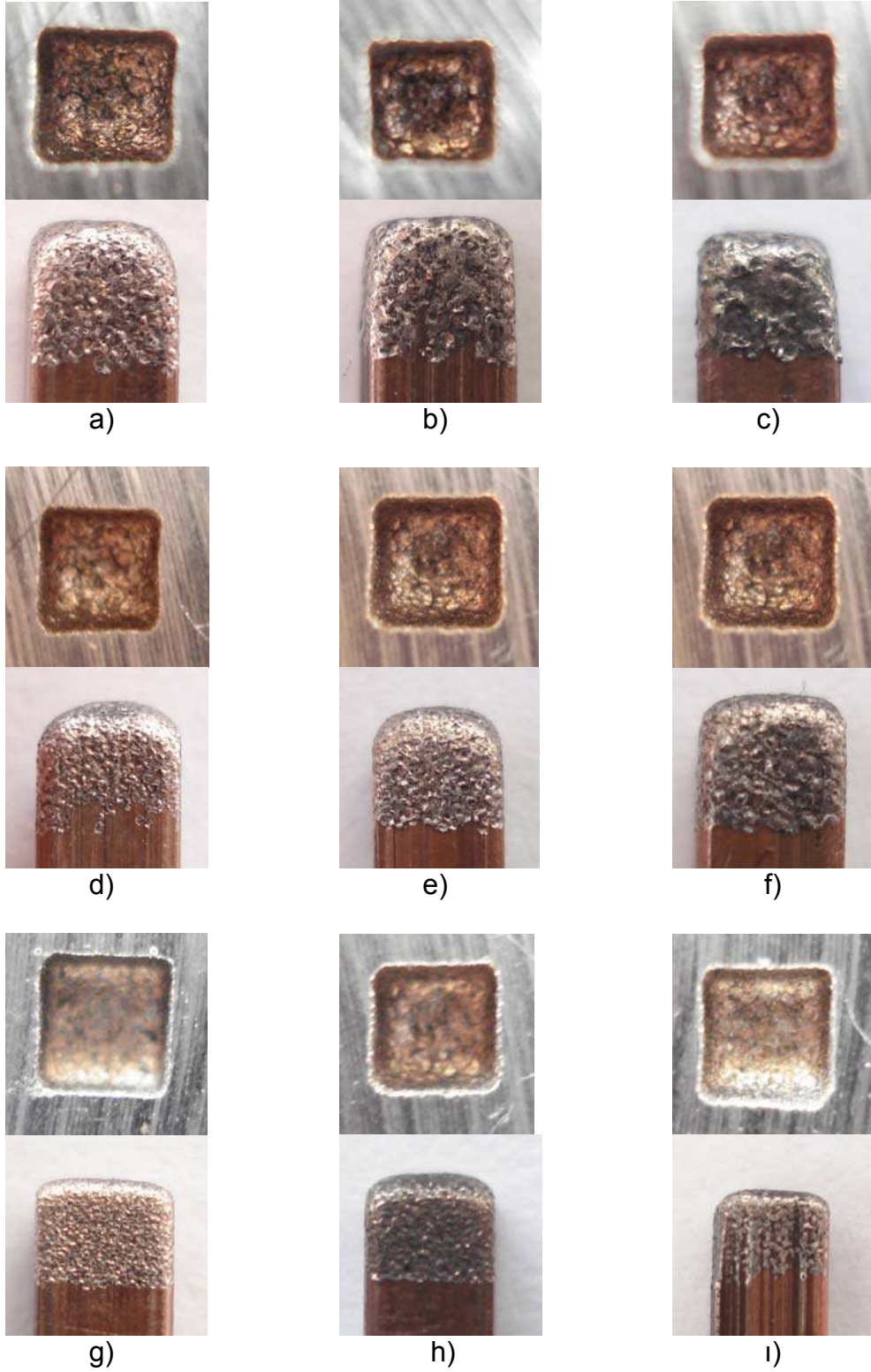
Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 incelendiğinde, düşük boşalım akımı (I_d) ve vurum süresinde (t_s) her bir tel grubu için EAH ve İİH'nın düşük ve birbirine yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yüksek boşalım akımı (I_d) ve vurum sürelerinde (t_s) ise, EAH ve İİH'nın tel sayısının artışıyla birlikte arttığı gözlenmiştir. Özellikle yüksek boşalım akımı (I_d) ve vurum sürelerinde (t_s) tel sayısının (işleme alanının) artması İİH ve EAH değerlerinin daha fazla artmasına neden olmaktadır.

6.4. İşlenen İşparçalarının Yüzey ve Tellerin Aşınma Geometrilere

1, 2, 4 ve 9'arlı telden oluşan elektrotlarla gerçekleştirilen deneyler sonucunda işparçasının işlenmiş yüzeyleri ve tel aşınma geometrileri Resim 6.1 - Resim 6.4'te verilmiştir. Vurum süresi sabit, boşalım akımının 25 A, 12 A ve 6 A olarak değiştirildiği deneylerden elde edilen fotoğraflarda yer alan yüzeyler ile tellerin uçları incelendiğinde, elektriksel boşalımlar sonucu oluşan krater boyutlarının (çaplarının) boşalım akımıyla (I_d) arttığı görülmektedir. Boşalım akımı sabit, vurum süresinin 100, 50 ve 25 μ s olarak değiştirildiği deneylerde, yüksek vurum sürelerinde işparçasında ve tellerde ergimenin fazla olduğu ve kraterlerin birbirine birleştiği gözlemlenmiştir.

Yüksek boşalım akımı (I_d) ve vurum süresinden (t_s) düşük boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) doğru yapılan işlemlerde, işleme yüzeylerinin ve tel uçlarının kenar, köşe ve yüzeylerinin daha düzgün (yuvarlanmamış) olduğu gözlenmiştir.

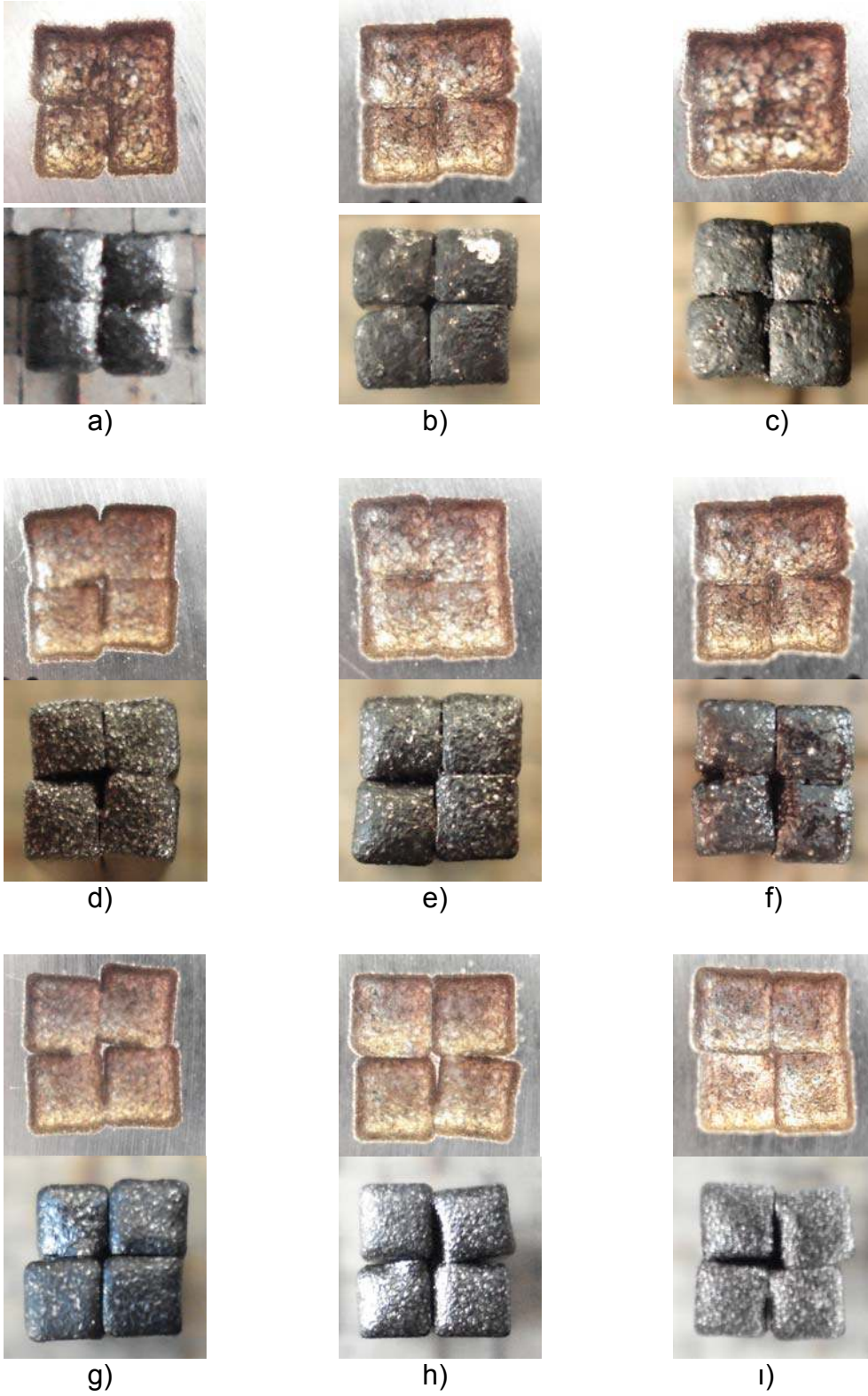
Tek telli deneylerde tellerin aşınma hacmi $18,05 \pm 1,46 \text{ mm}^3$ olup, ortalama boyları 2.88 mm kısalmaktadır. İki telli deneylerde ortalama tel başına aşınma hacmi $16,56 \pm 0,80 \text{ mm}^3$ olup, ortalama boy kısalması 2,58 mm olarak bulunmaktadır. Aynı şekilde 4 tellide tel başına aşınma hacmi $16,14 \pm 1,19 \text{ mm}^3$, ortalama boy kısalması 2,58 mm ve 9 tellide ise tel başına aşınma hacmi $14,81 \pm 1,07 \text{ mm}^3$ olup, ortalama boy kısalması 2,37 mm'dir.



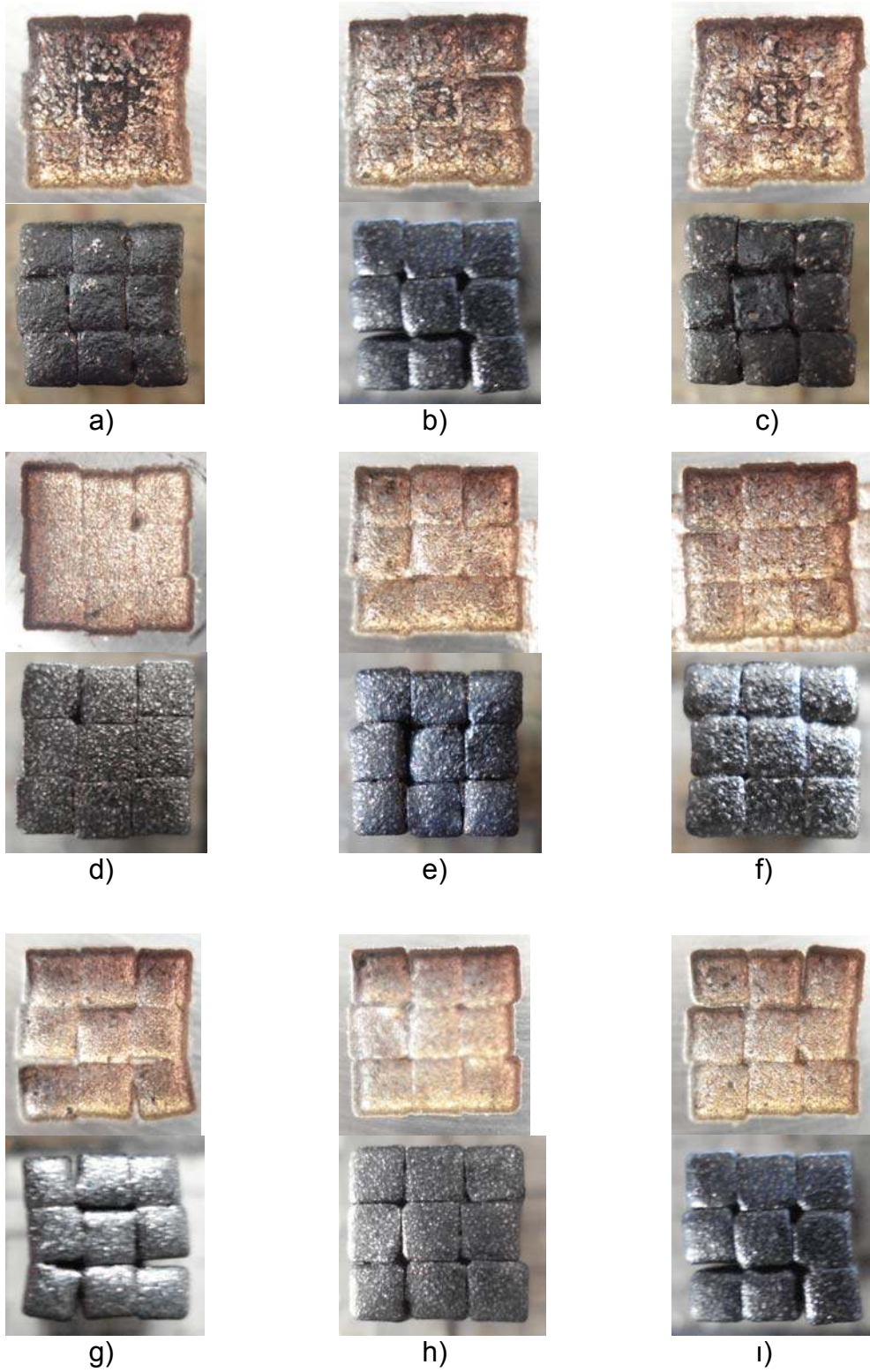
Resim 6.1. Tek tel ile aşındırılan işparçaları ve aşınan tellerin fotoğrafları
 a) 25 A, 25 μ s, b) 25 A, 50 μ s, c) 25 A, 100 μ s, d) 12 A, 25 μ s,
 e) 12 A, 50 μ s, f) 12 A, 100 μ s, g) 6 A, 25 μ s, h) 6 A, 50 μ s ve
 i) 6 A, 100 μ s



Resim 6.2. İki tel ile aşındırılan işparçaları ve aşınan tellerin fotoğrafları
a) 25 A, 25 μ s, b) 25 A, 50 μ s, c) 25 A, 100 μ s, d) 12 A, 25 μ s,
e) 12 A, 50 μ s, f) 12 A, 100 μ s, g) 6 A, 25 μ s, h) 6 A, 50 μ s ve
ı) 6 A, 100 μ s



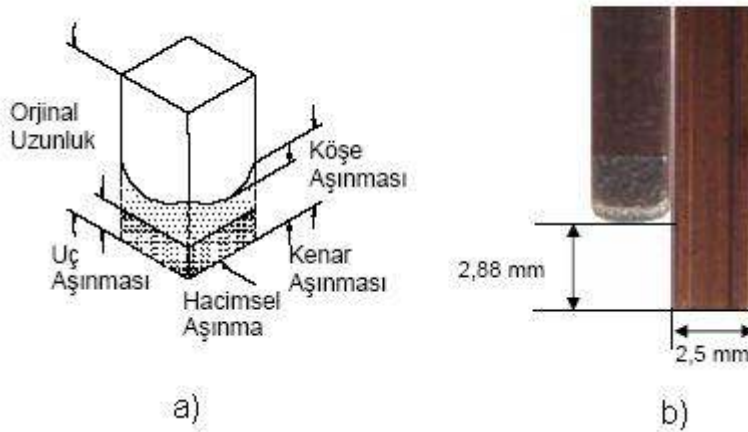
Resim 6.3. Dört tel ile aşındırılan işparçaları ve aşınan tellerin fotoğrafları
 a) 25 A, 25 μ s, b) 25 A, 50 μ s, c) 25 A, 100 μ s, d) 12 A, 25 μ s,
 e) 12 A, 50 μ s, f) 12 A, 100 μ s, g) 6 A, 25 μ s, h) 6 A, 50 μ s ve
 i) 6 A, 100 μ s



Resim 6.4. Dokuz tel ile aşındırılan işparçası ve aşınan tellerin fotoğrafları
 a) 25 A, 25 μ s, b) 25 A, 50 μ s, c) 25 A, 100 μ s, d) 12 A, 25 μ s,
 e) 12 A, 50 μ s, f) 12 A, 100 μ s, g) 6 A, 25 μ s, h) 6 A, 50 μ s ve
 i) 6 A, 100 μ s

Bu sonuçlar tellerin BA ile ilgili bulgulara (Bkz. Bölüm 6.2) uygun olup, tel sayısının artması tellerin tek yani dolu elektrot gibi davranma karakteristiğine yaklaştıklarını ve tel sayısı arttıkça tel başına düşen aşınmanın azaldığını göstermektedir.

Resim 6.1–Resim 6.4 incelendiğinde ortaya çıkarılan diğer bir gözlem ise, boşalım akımının (I_d) artmasıyla tellerin kenar ve köşelerinin aşırı aşınması ve bu nedenle tel uçlarının yuvarlanmasıdır. Küçük boşalım akımlarında (I_d) ise tellerdeki kenar ve köşe aşınması az olmakta ve tel geometrisi ilk görünüşüne yakın olmaktadır (Resim 6.5).



Resim 6.5 Tel aşınmaları ve teorik modeli [20]

a) Teorik aşınma modeli b) Aşınmış örnek tel uçları

TDEO metodunda teller tek tek işleme yaptığından, TDEO uygulamalarında ortalama işleme aralığını bulmak için tek telle kare işlenmiş işparçası ve işlemeyi yapan tel uçlarının “x” ve “y” koordinat yönündeki kenarlarından, 0,01 mm hassasiyete sahip dijital kumpasla, iki ölçüm alınmıştır. Sonra bu iki ölçüm ortalamalarından elde edilen değerlerin “x” ve “y” eksen yönünde farkları bulunmuş ve bu farkların ortalaması ikiye bölünerek elde edilen değer ortalama işleme aralığı olarak kaydedilmiştir. Ölçümlerle bulunan işleme aralıkları Çizelge 6.2’de toplu olarak verilmiştir. Çizelge 6.2’de verilen değerler [46] nolu referansla uyumludur.

Çizelge 6.2. Tek telli işlemede işleme aralıkları (mm)

	25 μ s	50 μ s	100 μ s
25 A	0,07	0,08	0,12
12 A	0,04	0,05	0,07
6 A	0,03	0,04	0,06

Çizelge 6.2'den görüldüğü üzere, işleme aralığı işleme parametrelerine bağlı olarak tel kenar uzunluğunun (2.5 mm) %1,2 ile %5'si kadar değişmekte olup, boşalım akımı (I_d) ve vurum süresinin (t_s) artmasıyla artmaktadır. Bu durumda teller arasında oluşan boşluklar yüksek boşalım akımı (I_d) ve vurum sürelerinde (t_s) önemli olmamakta ve işparçası üzerinde çıkıntılar oluşmamaktadır.

Boşalım akımının (I_d) artması tellerin işleme aralığının artmasına neden olmaktadır. Bu ise işparçası üzerinde oluşan çıkıntıların azalmasına veya yok denecek kadar az olmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, yüksek boşalım akımında (I_d) yüksek vurum süresi (t_s) yerine, düşük vurum sürelerinde (t_s) çıkıntıların az ve hatta yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise yüksek vurum süreli işlemlerde işleme aralığındaki akım yoğunluğunun azalmasıdır.

Sonuç olarak, hem yüksek boşalım akımlarında hem de düşük vurum sürelerinde teller yekpare yani dolu elektrot gibi davranmaktadır. Bu nedenle, TDEO metodolojisine en uygun işlem süreçleri yüksek boşalım akımı ve düşük vurum süreleri olarak tespit edilmiştir.

7. TDEO METODUNUN EEİ PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

TDEO metodunun işleme performans karakteristikleri olan İİH ile EAH'nın boşalım akımı ve vurum süresine bağlı olarak matematiksel modellenmesi amacıyla hem 11° açılı elektrot hem de 4 mm derinlik kademeli elektrot için belirlenen ve Çizelge 4.7'de verilen deneyler yapılmıştır. Deneyler Çizelge 4.5'de verilen işleme parametrelerinde ve Çizelge 4.7'de verilmiş boşalım akımları (I_d), vurum süreleri (t_s), vurum ara süresi (t_p) (bekleme), işleme ve geri çekme sürelerinde yapılmıştır. Tüm deneylerde 12 mm derinlik işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Açılı ve kademeli elektrotlar için gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen deney süresi (t_{is}) ile hesaplanan işleme performansı karakteristiklerine (İİH, EAH ve BA) ait sonuçlar Çizelge 7.1'de toplu olarak verilmiştir.

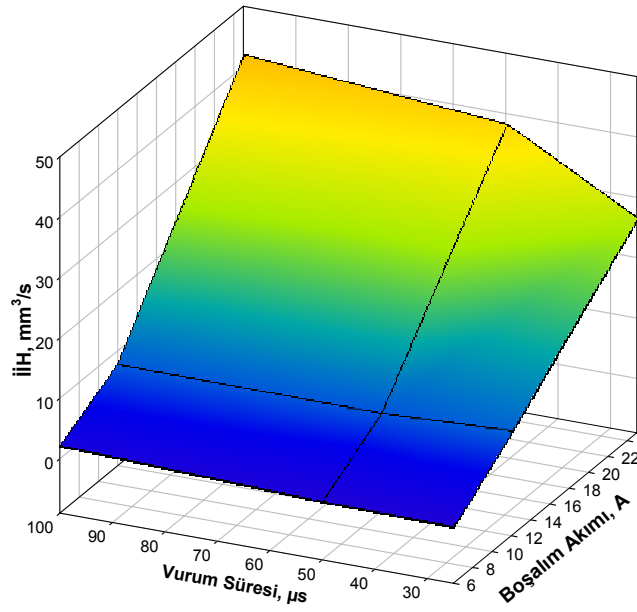
Çizelge 7.1. İİH, EAH, BA ve t_{is} 'e ait deney sonuçları

Deney No	İşleme Modeli	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Deney Süresi	İşparçası İşleme Hızı (İİH)	Elektrot Aşınma Hızı (EAH)	Bağıl Aşınma
		[I_d , Amper]	[t_s , μs]	[t_{is} , s, dak.]	[$mm^3/dak.$]	[$mm^3/dak.$]	[BA, %]
1	Kademeli	25	100	1s. 13,88 dak.	56,918	29,230	51,35
2	Kademeli	25	50	1s. 38,40dak.	44,689	21,697	48,55
3	Kademeli	25	25	2s. 12,17dak.	33,562	15,132	45,09
4	Kademeli	12	100	9s. 55,21dak.	6,203	7,050	77,65
5*	Kademeli	12	50	10s. 17,38dak.	6,184	5,343	86,39
6	Kademeli	12	25	10s. 37,62dak.	5,891	4,080	69,25
7	Kademeli	6	100	26s. 45dak.	2,325	1,731	74,48
8	Kademeli	6	50	71s. 26dak.	0,781	0,736	94,24
9	Kademeli	6	25	93s. 35dak.	0,594	0,514	86,50
10	Açılı	25	100	1s. 27.40dak.	41,953	23,445	55,88
11	Açılı	25	50	1s. 42,47dak.	38,285	19,039	49,73
12	Açılı	25	25	2s. 24,42dak.	26,632	13,339	50,09
13*	Açılı	12	100	6s. 27,37dak.	7,877	6,652	84,45
14*	Açılı	12	50	6s. 38,61dak.	7,623	5,725	75,11
15	Açılı	12	25	6s. 58.61dak.	8,513	5,206	61,15
16	Açılı	6	100	24s. 27dak.	2,237	1,589	71,03
17	Açılı	6	50	58s. 28dak.	0,789	0,745	94,38
18	Açılı	6	25	77s. 25dak.	0,618	0,542	87,59

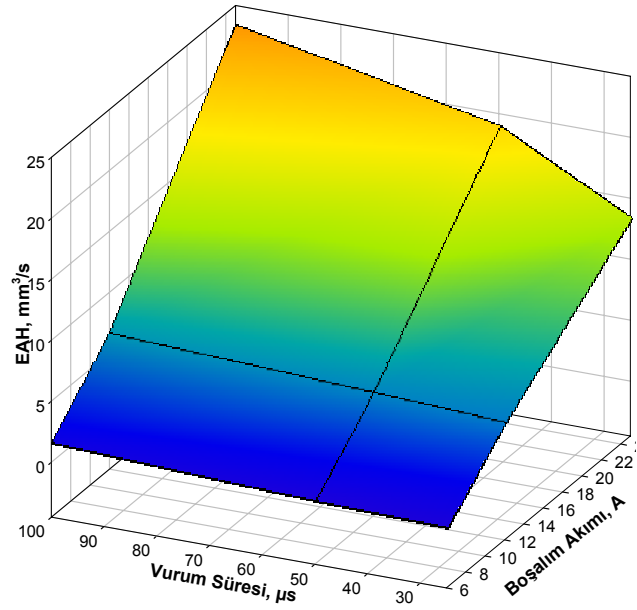
* Tekrarlanan deneyler

7.1. Açılı ve Kademeli Elektrodun İİH ve EAH'ya Etkileri

Açılı elektrot ile gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen İİH ve EAH'nın boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı üç boyutlu grafikleri Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de verilmiştir.

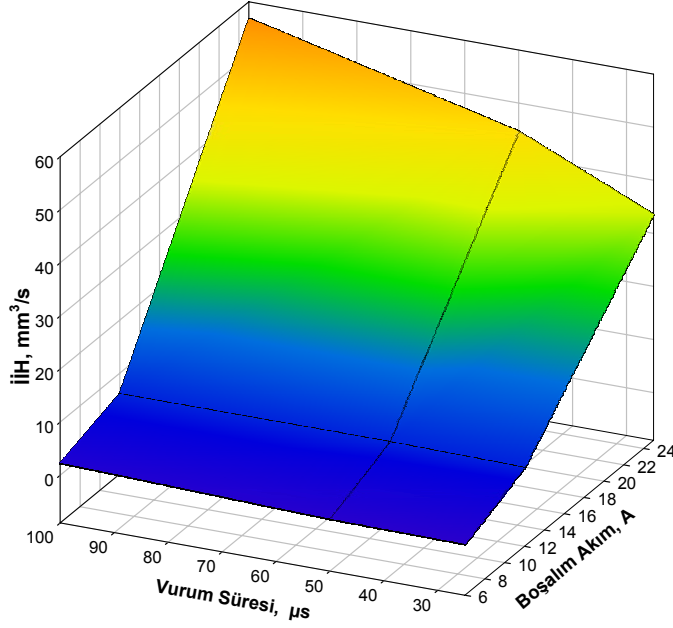


Şekil 7.1. Açılı elektrot için İİH'nin I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi

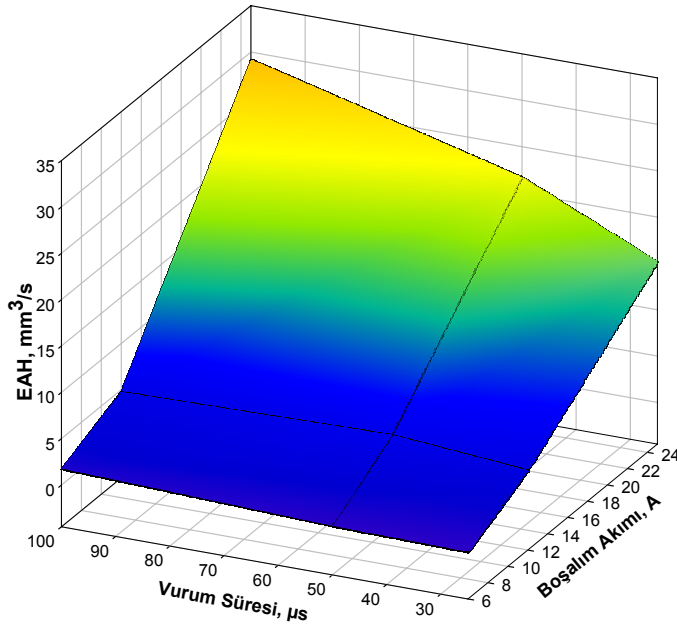


Şekil 7.2. Açılı e elektrot için EAH'nin I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi

Kademeli elektrot ile gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen İİH ve EAH'nın boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı üç boyutlu grafikleri Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'de verilmiştir.



Şekil 7.3. Kademeli elektrot için İİH'nin I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi

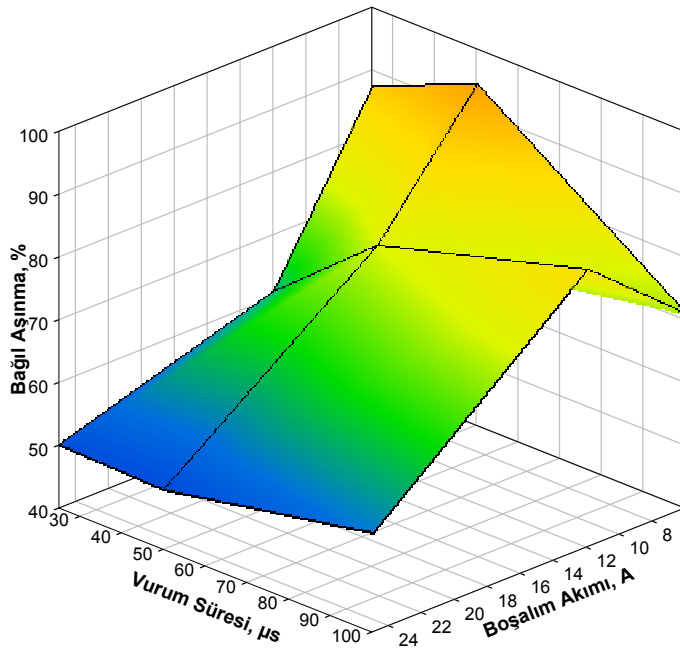


Şekil 7.4. Kademeli elektrot için EAH'nın I_d ve t_s 'ye bağlı değişim

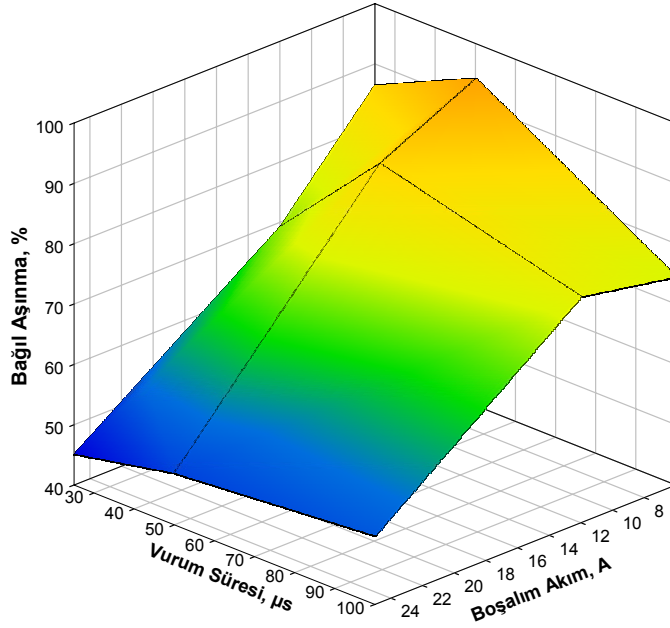
Elde edilen Şekil 7.1–Şekil 7.4 incelendiğinde, değişim eğilimlerinin aynı olduğu ve İİH ve EAH'nın boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Boşalım akımının İİH ve EAH'na etki eden en önemli parametre olduğu grafiklerden belirlenmiştir. Ayrıca boşalım akımının (I_d) artması vurum süresinin (t_s) işlemedeki etkisini de attırmaktadır.

7.2. Açılı ve Kademeli Elektrotun BA'ya Etkisi

Açılı elektrot ile gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen BA değerlerinin boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı değişimi Şekil 7.5'de, kademeli elektrotun BA değerleri ise Şekil 7.6'da verilmiştir. Şekil 7.5 ve Şekil 7.6 incelendiğinde, hem açılı hem de kademeli elektrotların için BA değişim eğilimlerinin aynı olduğu ve BA'nın boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. BA değerlerinin fazla tel sayısına rağmen klasik EEİ değerlerine göre büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak elektrot oluşturulmasında kullanılan kaynak tellerinin işleme sırasında tek tek işleme yapmaya devam ettiği sonucuna varılmıştır. Tellerin kesit alanlarının küçük olması EAH ve BA'nın artmasına neden olmuştur.



Şekil 7.5. Açılı elektrot için BA'nın I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi



Şekil 7.6. Kademeli elektrot için BA'nın I_d ve t_s 'ye bağlı değişimi

Her iki tip elektrot için BA değerlerinin yüksek boşalım akımlarında düşük, düşük boşalım akımlarında (I_d) ise yüksek olduğu gözlenmiştir. Özellikle boşalım akımının (I_d) sabit olduğu, fakat vurum süresinin değiştiği durumlarda ise 25 ve 100 μs 'ye göre 50 μs 'ye ait deneylerde BA değeri yüksek çıkmaktadır. Ayrıca 9 telli deneylerde BA değerleri %65 ile %110 arasında değişirken, 126 telli hem kademeli hem de açılı deneylerde elde edilen BA değerleri %45 ile %95 arasında değişmektedir.

7.3. TDEO'da İşleme Derinliği ile İşleme Süresi Arasındaki İlişki

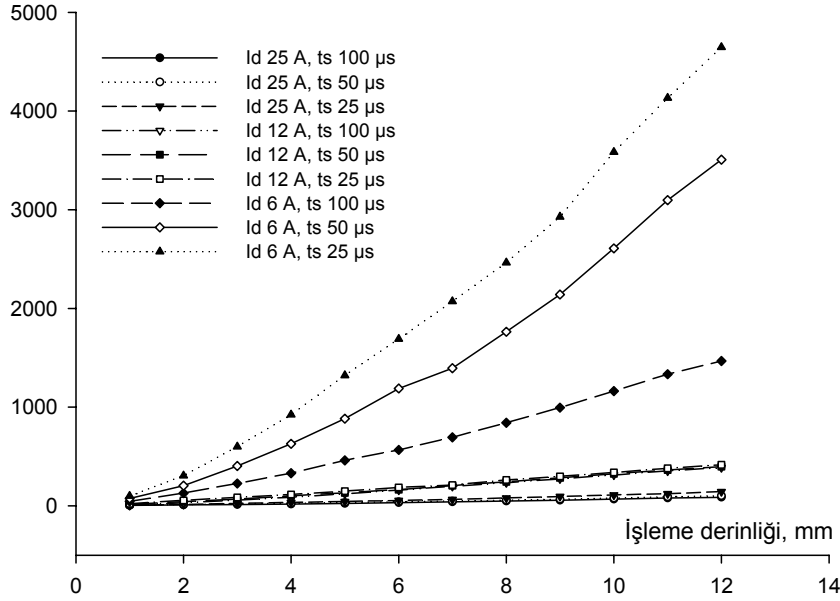
EEİ deneyleri sırasında tezgah komparatöründen ölçülen her bir milimetre derinlik için geçen işleme süreleri Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Açılı elektrot deneyleri sırasında tezgâh komparatöründen ölçülen her bir milimetre derinlik işleme için geçen süreler için grafik Şekil 7.7'de verilmiştir. Kademeli elektrot deneylerine ait grafik ise Şekil 7.8'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Deney süreleri

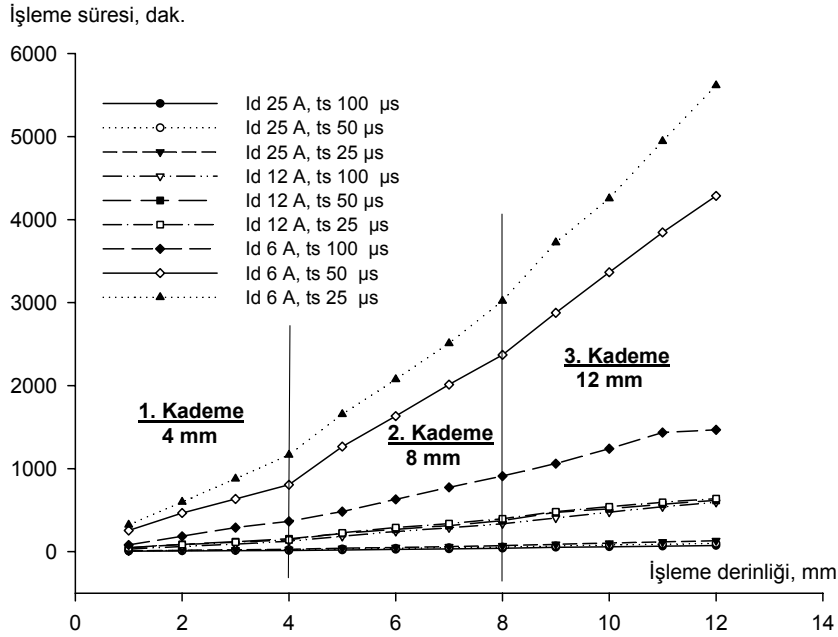
Deney No	İşleme Modeli	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	1 mm Derinlik İşleme Süresi	2 mm Derinlik İşleme Süresi	3 mm Derinlik İşleme Süresi	4 mm Derinlik İşleme Süresi	5 mm Derinlik İşleme Süresi	6 mm Derinlik İşleme Süresi	7 mm Derinlik İşleme Süresi	8 mm Derinlik İşleme Süresi	9 mm Derinlik İşleme Süresi	10 mm Derinlik İşleme Süresi	11 mm Derinlik İşleme Süresi	12 mm Derinlik İşleme Süresi	Toplam Süre
—	—	[I_d , Amper]	[t_s , μs]	dak.	dak.	dak.	dak.	dak.	dak.	dak.	dak.	dak.	dak.	dak.	dak.	Saat olarak
1	Kademeli	25	100	6,15	9,25	12,11	14,98	20,11	27,33	32,17	40,60	53,35	58,63	66,25	73,88	1s. 13,88 dak.
2	Kademeli	25	50	8,42	14,30	18,33	23,38	31,93	39,43	46,77	55,75	67,58	78,67	89,13	98,40	1s. 38,40 dak.
3	Kademeli	25	25	9,63	16,53	22,30	28,13	40,05	50,00	60,13	71,20	87,12	102,13	116,77	132,17	2s. 12,17 dak.
4	Kademeli	12	100	30,12	62,11	90,50	125,42	183,27	242,67	285,41	335,00	405,63	475,25	540,15	595,21	9s. 55,21 dak.
5	Kademeli	12	50	47,93	88,10	118,77	153,75	217,78	267,78	313,93	372,40	473,50	515,32	570,62	617,78	10s. 17,38 dak.
6	Kademeli	12	25	47,27	85,07	113,20	141,02	225,77	289,38	338,08	395,90	481,38	541,50	593,78	637,62	10s. 37,62 dak.
7	Kademeli	6	100	81	185	290	365	483	630	775	910	1060	1240	1435	1467	26s. 45 dak.
8	Kademeli	6	50	255	466	634	806	1266	1633	2013	2371	2876	3365	3846	4286	71s. 26 dak.
9	Kademeli	6	25	323	598	878	1164	1655	2075	2510	3020	3725	4255	4945	5615	93s. 35 dak.
10	Açılı	25	100	4,52	9,25	13,85	19,08	25,43	33,23	41,13	49,27	58,43	68,58	79,13	87,40	1s. 27,40 dak.
11	Açılı	25	50	5,08	11,87	25,65	25,78	33,50	41,00	48,25	57,88	67,53	77,88	91,70	102,47	1s. 42,47 dak.
12	Açılı	24	25	5,42	14,58	24,80	34,05	43,82	54,63	66,22	79,85	94,58	111,25	123,50	144,42	2s. 24,42 dak.
13	Açılı	12	100	10,25	31,18	57,42	87,45	122,45	159,80	198,18	235,78	273,93	313,42	353,80	387,37	6s. 27,37 dak.
14	Açılı	12	50	15,45	43,05	69,12	101,35	132,47	165,87	205,03	243,65	284,76	324,38	364,16	398,61	6s. 38,61 dak.
15	Açılı	12	25	21,97	56,08	85,42	115,55	150,22	187,50	221,68	262,53	298,75	338,95	380,37	417,15	6s. 58,61 dak.
16	Açılı	6	100	46	129	227	332	462	568	695	842	995	1164	1334	1467,00	24s. 27 dak.
17	Açılı	6	50	75	206	404	630	884	1189	1394	1764	2141	2608	3098	3508,00	58s. 28 dak.
18	Açılı	6	25	100	307	600	925	1322	1691	2071	2464	2929	3584	4131	4645,00	77s. 25 dak.

İşleme süresi, dak.



Şekil 7.7. Açılı elektrot için işleme derinliği ile işleme süresi arasındaki ilişki

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8 incelendiğinde, hem kademeli hem de açılı işlemlerde boşalım akımı 25 Amper olduğunda deney süreleri 1 saat ile 2,5 saat arasında değişmektedir. Boşalım akımı 12 Amper olduğunda deney süreleri 6 saat ile 11 saat arasında, 6 Amper olduğunda ise deney süreleri 25 saat ile 100 saat arasına değişmektedir.



Şekil 7.8. Kademeli elektrot için işleme derinliği ile işleme süresi arasındaki ilişki

Sonuç olarak boşalım akımı arttıkça işleme süresi azalmaktadır. Şekil 7.8’de görüldüğü gibi düşük boşalım akımlarında (I_d), işleme alanındaki kademeli artış EEİ süresinin ($t_{iş}$) kademeli artmasına neden olmaktadır. Aynı durum büyük boşalım akımlarında (I_d) görülememektedir. Açılı elektrot işlemede ise (Şekil 7.7) alanın büyümesi işleme süresini parabolik olarak arttırmaktadır.

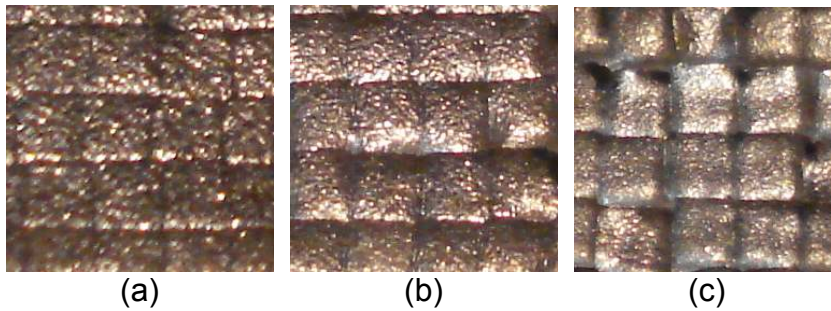
EEİ deneylerinde ölçülen işparçası işleme ve tel aşınma hacimlerinin verildiği Çizelge 7.3 incelendiğinde, işparçası işleme hacimlerinin 2800 mm³ ile 5700 mm³ arasında, elektrot aşınma hacimlerinin ise 2100 mm³ ile 3100 mm³ arasında değiştiği tespit edilir. Hacimlerin iki kat gibi değişmesine rağmen, EAH’nın 0,5 mm³/dak. ile 29 mm³/dak., İİH’nın ise 0,6 mm³/dak. ile 57 mm³/dak. arasında (50 ile 100 kat arası) değişmesi, boşalım akımından (I_d) kaynaklandığını gösterir. Sonuç olarak, boşalım akımının (I_d) düşmesi deney sürelerinin hızlı artışına, İİH ve EAH’nın düşmesine neden olmaktadır.

Çizelge 7.3 İşparçası ve elektrot aşınma hacimleri

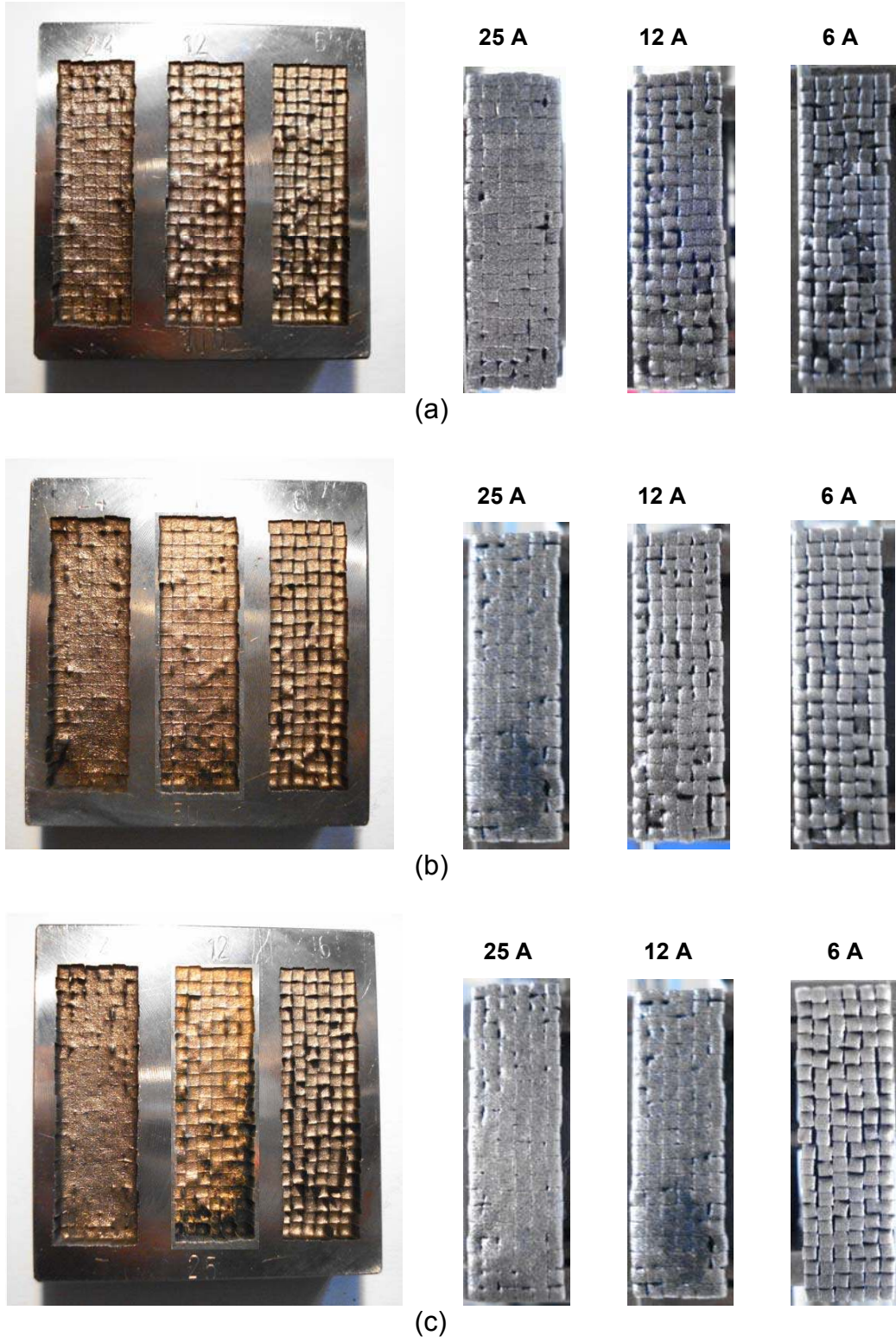
Deney No	İşleme Modeli	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Tel Aşınma Hacmi	Numune İşleme Hacmi
		[I_d , Amper]	[t_s , μs]	mm^3	mm^3
1	Kademeli	25	100	2159,5	4205,1
2	Kademeli	25	50	2135,0	4397,4
3	Kademeli	25	25	2000,0	4435,9
4	Kademeli	12	100	2858,9	3692,3
5	Kademeli	12	50	3300,6	3820,5
6	Kademeli	12	25	2601,2	3756,4
7	Kademeli	6	100	2539,9	3410,3
8	Kademeli	6	50	3153,4	3346,2
9	Kademeli	6	25	2883,4	3333,3
10	Açılı	25	100	2049,1	3666,7
11	Açılı	25	50	1950,9	3923,1
12	Açılı	25	25	1926,4	3846,2
13	Açılı	12	100	2576,7	3051,3
14	Açılı	12	50	2282,2	3038,5
15	Açılı	12	25	2171,8	3551,3
16	Açılı	6	100	2331,3	3282,1
17	Açılı	6	50	2613,5	2769,2
18	Açılı	6	25	2515,3	2871,8

7.4. İşlenen İş Parçalarının Yüzey Geometrileri

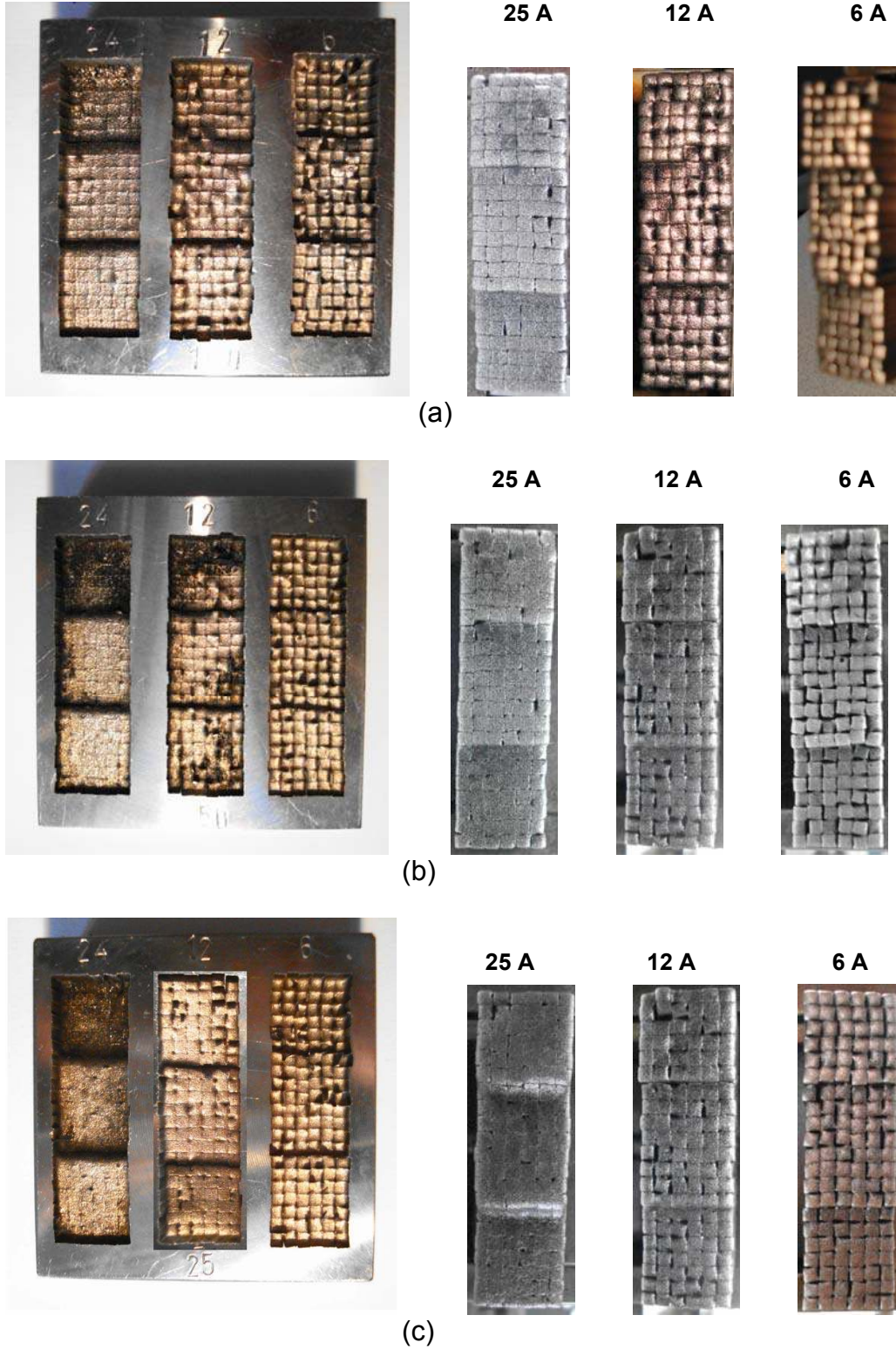
Vurum süresi sabit, boşalım akımının (I_d) değiştiği deneylerde, işparçasındaki tel kesit alanlarına karşılık gelen yüzeyler incelendiğinde üzerinde elektriksel boşalımların oluşturduğu krater boyutlarının (çaplarının) boşalım akımıyla (I_d) artmakta olduğu gözlenmiştir (Resim 7.1). Açılı ve kademeli EEİ'de aşındırılan işparçası ve aşınan tellerin fotoğrafları Resim 7.2 ve Resim 7.3'de gösterilmektedir.



Resim 7.1. Kademeli işlemede krater boyutlarının değişimi
a)100 μs , 25 A, b) 100 μs , 12 A c)100 μs , 6A



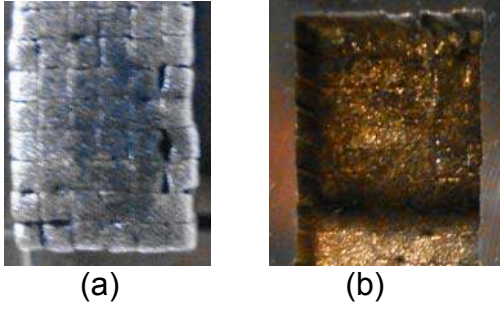
Resim 7.2. İşparçası ve tel demetinin açılı işleme sonrası fotoğrafları
 a) 100 μ s vurum süresinde, 25A, 12A ve 6 A akım değerlerinde
 b) 50 μ s vurum süresinde, 25A, 12A ve 6 A akım değerlerinde
 c) 25 μ s vurum süresinde, 25A, 12A ve 6 A akım değerlerinde



Resim 7.3. İşparçası ve tel demetinin kademeli işleme sonrası fotoğrafları
a) 100 μ s vurum süresinde, 25A, 12A ve 6 A akım değerlerinde
b) 50 μ s vurum süresinde, 25A, 12A ve 6 A akım değerlerinde
c) 25 μ s vurum süresinde, 25A, 12A ve 6 A akım değerlerinde

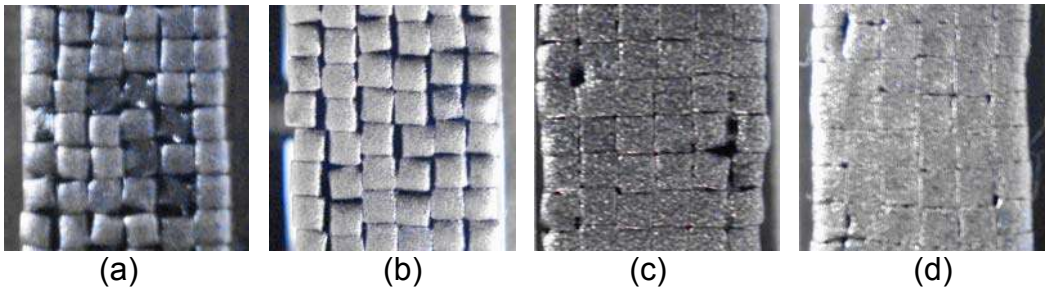
Resim 7.2 ve Resim 7.3 incelendiğinde, boşalım akımının artmasıyla işparçası üzerinde oluşan çıkıntıların azaldığı, vurum süresinin (t_s) azalmasıyla işparçası üzerinde oluşan pürüzlülüğün azaldığı gözlenmiştir.

Ayrıca Resim 7.4'de görüldüğü üzere EEİ'de özellikle gaz yağının yüksek boşalım akımlarında (I_d) bozulması ve işparçasının ergimesi ile açığa çıkan karbon hem elektrot olarak kullanılan tellere hem de işparçasının yüzeyine yapışmaktadır. Bu olay özellikle kademeli elektrotlarda yoğun olarak görünmüştür.



Resim 7.4. Ergimiş karbonun yüzeylere yapışması
a) Tellerde b) İş parçasında

Sonuç olarak, Resim 7.2, Resim 7.3 ve büyütülmüş tel kesitlerindeki aşınmayı gösteren Resim 7.5'de görüldüğü üzere tellerin TDEO metodolojisine en uygun işleme süreçleri yüksek boşalım akımı (I_d) ve düşük vurum (t_s) süreleridir. Yüksek boşalım akımı (I_d) ve düşük vurum (t_s) sürelerinde tel demetleri dolu elektrot gibi davranmaktadır.



Resim 7.5. Büyütülmüş bazı tel kesitlerindeki aşınma biçimleri
a) 6 A, 100 µs b) 6 A, 25 µs c) 25 A, 100 µs d) 25 A, 25 µs

7.5. En Uygun EEİ Sürecinin Belirlenmesi

TDEO metoduna en uygun işleme süreçlerinin yüksek boşalım akımı ve düşük vurum süreleri olması ve bu değerlerde tel demetleri dolu elektrot gibi davranmasından dolayı, 25 Amperlik boşalım akımında deney vurum sürelerinin bir üst seviyesi olan 200 μ s ve bir alt seviyesi olan 13 μ s'de hem açılı hem de kademeli elektrot için dört deney daha yapılmıştır.

Gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen deney süresi (t_{is}) ve deneysel işleme performansı karakteristikleri Çizelge 7.4'de verilmiştir. Resim 7.6'da 25 Amperde, 200 μ s ve 13 μ s'de yapılan hem açılı hem de kademeli işleme deneylerinin işparçası fotoğrafları verilmektedir.

Çizelge 7.4. 25 Amperde, 13 ve 200 μ s'de yapılan deney sonuçları

Deney No	İşleme Modeli	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Deney Süresi	İşparçası İşleme Hızı (İİH)	Elektrot Aşınma Hızı (EAH)	Bağlı Aşınma
		[i_d , Amper]	[t_s , μ s]	[t_{is} , s, dak.]	[$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	[$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	[BA, %]
1	Açılı	25	200	1s. 13,21 dak.	20,642	11,584	56,12
2	Açılı	25	13	3s. 26,38 dak.	22,016	10,660	48,42
3	Kademeli	25	200	2s. 14,62 dak.	30,581	16,762	54,81
4	Kademeli	25	13	3s. 20,77 dak.	27,503	13,592	49,42



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 7.6. 25 Amper ve 200 μ s ile 13 μ s'de açılı ve kademeli işleme
a) Açılı işleme, 25 A, 200 μ s b) Açılı işleme 25 A, 13 μ s
c) Kademeli işleme 25 A, 200 μ s d) Kademeli işleme 25 A, 13 μ s

Resim 7.6 ve Çizelge 7.4 incelendiğinde, TDEO metodolojisine en uygun işleme parametrelerin yüksek boşalım akımı ve düşük vurum sürelerinde olduğu ve bu değerlerde oluşturulan tel demetlerinin dolu elektrot olarak davrandığı belirgin olarak görülmektedir. TDEO metodunda BA'nın düşük olduğu değerler ise 13 μ s'de yapılan deneylere aittir.

7.6. Tel Demeti Elektrotun Dolu Bakır Elektrot ile Kıyaslanması

Elektrolitik bakırdan yapılmış kesit alanı 15x52,5 mm olan (6x21 adet tel demeti alanının karşılığı) kademeli ve açılı işlenmiş dolu elektrot (Resim 4.10) ile 25 Amper–50 μ s ve 12 Amper–100 μ s'de işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

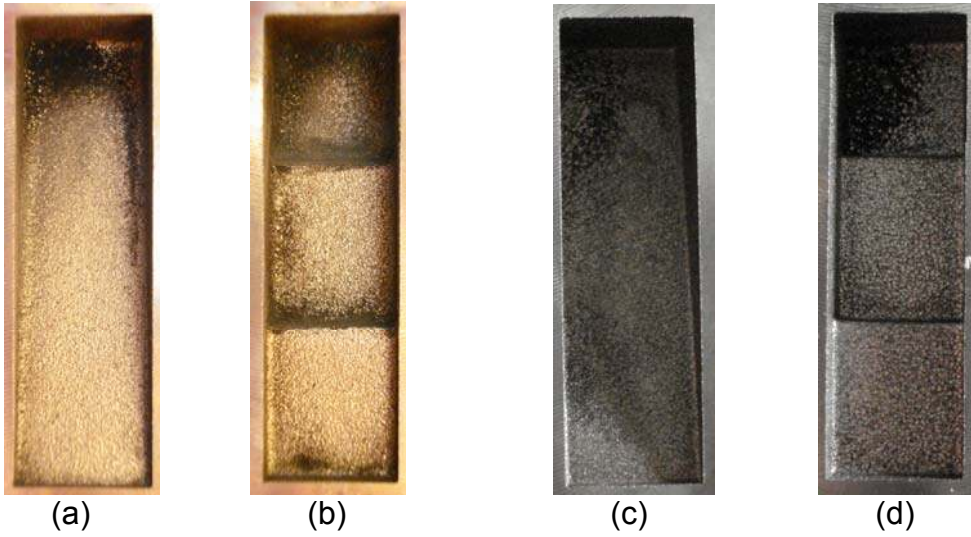
Çizelge 7.5'de dolu elektrotla gerçekleştirilen deneyler neticesinde ölçülen deney süresi (t_{is}) ile hesaplanan işleme performansı karakteristiklerine ait sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 7.5. Dolu bakır elektrotla yapılan deney sonuçları

Deney No	İşleme Modeli	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Deney Süresi	İşparçası İşleme Hızı (İİH)	Elektrot Aşınma Hızı (EAH)	Bağlı Aşınma
		[I_d , Amper]	[t_s , μ s]	[t_{is} , s, dak.]	[mm ³ /dak.]	[mm ³ /dak.]	[BA, %]
1	Kademeli	25	50	1s. 03,18 dak.	142,976	15,304	10,70
2	Açılı	25	50	1s. 30 dak.	136,410	12,857	9,43
3	Açılı	12	100	2s. 41,98 dak.	32,768	2,546	7,77
4	Kademeli	12	100	1s. 55,10 dak.	51,160	2,850	5,57

Dolu elektrotla yapılan işleme sonuçları incelendiğinde, elde edilen BA değerleri TDEO metoduna göre çok düşüktür. Dolu elektrotla elde edilen en yüksek BA %10,70 iken, tel demeti elektrotuyla yapılan işlemlerde en düşük %45,09 elde edilmiştir. Bu, TDEO metodunda her bir telin işleme sırasında tek bir elektrot gibi davranmasından (aşınmasından) kaynaklanmaktadır.

Doğal olarak dolu bakır elektrotla yapılan işlemlerde elde edilen İİH ve EAH değerleri TDEO metoduna çok yüksek olup, işleme süreleri ve BA değerleri çok düşüktür. Resim 7.7’de normal elektrotla yapılan deneyler sonucu elde edilen iş parçası fotoğrafları görülmektedir. Şekil 7.7’deki iş parçaları gözle incelendiğinde, dolu bakır elektrot kullanımı sonrası elde edilen kademeli ve açılı iş parçası yüzeyleri arasında yüzey pürüzlülüğü dışında herhangi bir fark görülmemektedir. Fakat, dolu bakır elektrotla elde edilen işleme yüzeylerinin sınır çizgileri TDEO metoduna göre daha belirgin ve keskin olduğu gözlenmektedir.



Resim 7.7. Dolu bakır elektrotla açılı ve kademeli işleme
a) 12A, 100 μ s b) 12 A, 100 μ s c) 25A, 50 μ s d) 25 A, 50 μ s

Deneylerde kullanılan tellerde aşırı aşınma olduğundan, kademe inişleri keskin olmamaktadır. Dolu bakır elektrotla işleme sonrası elde edilen kademe inişlerinin daha keskin ve derinlik değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

8. TDEO METODUNUN TEORİK VE UYGULAMALI İNCELENMESİ

8.1. TDEO Metodunda İİH ve EAH'nın Matematiksel Modellenmesi

Şekil 7.1–Şekil 7.4’de verilen İİH ve EAH’nın boşalım akımı (I_d) ve vurum sürelerine (t_s) göre üç boyutlu grafikleri incelendiğinde, hızların boşalım akımı (I_d) ve vurum süresi (t_s) ile değişiminin doğrusal olmadığı, İİH ve EAH’na etki eden en önemli parametrenin boşalım akımı olduğu görülür. Boşalım akımı ve vurum süresinin ayrı ayrı İİH ve EAH değişimlerine olan matematiksel etkisi aşağıdaki gibi kuvvet fonksiyonlarıyla ifade edilebilir.

$$\dot{I}I H = A_1 I_d^{b1} t_s^{c1} \quad (8.1)$$

$$EAH = A_2 I_d^{b2} t_s^{c2} \quad (8.2)$$

Kuvvet fonksiyonları, hem boşalım akımı (I_d) ve vurum süresinin (t_s) ayrı ayrı İİH ve EAH’ya etkisi açısından çok terimli (polinom) ve parabolik fonksiyona göre daha iyi olması hem de üstel fonksiyona göre daha doğrudan ifade edilebildiğinden diğer fonksiyonlara göre uygundur.

Deneylerde tasarlanan boşalım akımı (I_d) ve vurum süresi (t_s) değerleri için elde edilen İİH ve EAH değerleri arasında bir ilişkisinin yukarıdaki eşitliklerle ifade edilebilmesi için iki dereceli regresyon analizi kullanılmıştır. İki dereceli regresyon analizi, deneysel bulunan İİH ve EAH değerleri ile Şekil 7.1–Şekil 7.4’deki yüzeylerin matematiksel modellenmesiyle oluşturulacak teorik yüzeylerin deney noktalarındaki bulunacak İİH ve EAH değerleri arasındaki farklara ait karelerinin toplamının minimum olmasına dayanır (EK–1, EK–2) [47,48]. Ayrıca regresyon analizi, elde edilen ilişkilerin doğruluğu hakkında kesin bilgi vermemektedir. Bu bilginin sağlanması için korelasyon analizine ihtiyaç vardır.

Korelasyon analizi ise deneyler sonucu elde edilen İİH ve EAH değerlerinde gözlenen değişkenliğin ne kadarının rastlantısal (tesadüfi) sebeplerden ileri geldiğini ve ne kadarının akımı (I_d) ve vurum süresi (t_s) ile aralarındaki ilişkiden kaynakladığının belirlenmesine dayanır (EK-3).

Açılı elektrottaki İİH ve EAH'na ait Eş. 8.1 ve Eş. 8.2'de verilen matematiksel ilişki EK-1'de detayları sunulan regresyon analizi ile,

$$\dot{I}I H_A = 0,0030 I_d^{2,466} t_s^{0,392} \quad (8.3)$$

$$EAH_A = 0,0043 I_d^{2,129} t_s^{0,417} \quad (8.4)$$

olarak elde edilmiştir. Kademeli elektrottaki İİH ve EAH'na ait Eş. 8.1 ve Eş. 8.2'de verilen matematiksel ilişki ise,

$$\dot{I}I H_K = 0,0014 I_d^{2,635} t_s^{0,467} \quad (8.5)$$

$$EAH_K = 0,0022 I_d^{2,239} t_s^{0,515} \quad (8.6)$$

olarak bulunmuştur.

İİH'leri ile ilgili eşitlikler (Eş 8.3 ve Eş.8.5) incelendiğinde boşalım akımının (I_d) üstel katsayısının ortalama 2,5 civarında, vurum süresinin (t_s) üstel katsayısının ortalama 0,43 civarında olduğu görülmektedir. EAH'ları için ilgili eşitlikler (Eş 8.4 ve Eş. 8.6) incelendiğinde boşalım akımının (I_d) üstel katsayısının ortalama 2,17 civarında, vurum süresinin (t_s) üstel katsayısının ortalama 0,46 civarında olduğu görülmektedir. Regresyon analizi yardımıyla bulunan ve Eş. 8.3 – Eş. 8.6'da verilen matematiksel formüller boşalım akımı ve vurum süresinin deney parametre değerlerinde denenmiştir. Modellenecek bulunan teorik İİH ve EAH değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırması açılı elektrot için Çizelge 8.1'de, kademeli elektrot için Çizelge 8.2'te verilmiştir.

Çizelge 8.1. Açılı işlemede deneysel sonuçların matematiksel model ile karşılaştırılması

Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Deneysel İşleme Hızı (İİH)	Model İşleme Hızı (İİH)	Standart Sapma ve Korelasyon	Deneysel Elektrot Aşınma Hızı (EAH)	Model Elektrot Aşınma Hızı (EAH)	Standart Sapma ve Korelasyon
[İd, Amper]	[ts, µs]	[mm ³ /dak.]	[mm ³ /dak.]		[mm ³ /dak.]	[mm ³ /dak.]	
25,000	100,000	41,953	51,191	R² = 0,973	23,445	27,853	R² = 0,973
25,000	50,000	38,285	39,013		19,039	20,857	
25,000	25,000	26,632	29,732		13,339	15,618	
12,000	100,000	7,877	8,379		6,652	5,838	
12,000	50,000	7,623	6,386		5,725	4,372	
12,000	25,000	8,513	4,866		5,206	3,274	
6,000	100,000	2,237	1,517		1,589	1,335	
6,000	50,000	0,789	1,156		0,745	1,000	
6,000	25,000	0,618	0,881		0,542	0,748	

Çizelge 8.2. Kademeli işlemede deneysel sonuçların matematiksel model ile karşılaştırılması

Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Deneysel İşleme Hızı (İİH)	Model İşleme Hızı (İİH)	Standart Sapma ve Korelasyon	Deneysel Elektrot Aşınma Hızı (EAH)	Model Elektrot Aşınma Hızı (EAH)	Standart Sapma ve Korelasyon
[İd, Amper]	[ts, µs]	[mm ³ /dak.]	[mm ³ /dak.]		[mm ³ /dak.]	[mm ³ /dak.]	
25,000	100,000	56,918	59,993	R² = 0,997	29,230	31,759	R² = 0,993
25,000	50,000	44,689	43,406		21,697	22,218	
25,000	25,000	33,562	31,405		15,132	15,544	
12,000	100,000	6,203	8,671		4,803	6,142	
12,000	50,000	6,184	6,274		5,343	4,297	
12,000	25,000	5,891	4,539		4,080	3,006	
6,000	100,000	2,325	1,396		1,731	1,302	
6,000	50,000	0,781	1,010		0,736	0,911	
6,000	25,000	0,594	0,731		0,514	0,637	

Çizelge 8.1 ve Çizelge 8.2 incelendiğinde, deneyler sonucu bulunan İİH ve EAH değerleri ile matematiksel model sonucu bulunan İİH ve EAH değerlerinin uyumlu olduğu korelasyon (R^2) değerlerinin 1'e yakın olmasından anlaşılmıştır.

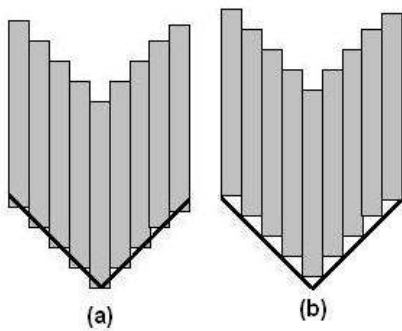
Modellemeyle bulunan İİH ve EAH değerlerinden yararlanarak bulunan BA değerleri ile deneysel BA değerleri Çizelge 8.3’de verilmiştir. Modelleme ile bulunan değerler yüksek boşalım akım değerlerinde deneysel olarak bulunanlarla uyumludur. Düşük boşalım akımlarında ise farklılıklar görülmüştür.

Çizelge 8.3. Deneysel ve matematiksel modele ait BA değerleri

	Boşalım Akımı ve Vurum Süresi								
	25A,100 μ s	25A,50 μ s	25A,25 μ s	12A,100 μ s	12A,50 μ s	12A,25 μ s	6A,100 μ s	6A,50 μ s	6A,25 μ s
Model Kademeli	52,94	51,19	49,50	70,84	68,50	66,23	93,27	90,18	87,20
Deneysel Kademeli	51,35	48,55	45,09	77,43	86,39	69,25	74,48	94,24	86,50
Model Açılı	54,41	53,46	52,53	69,68	68,46	67,27	88,01	86,47	84,96
Deneysel Açılı	55,88	49,73	50,09	84,45	75,11	61,16	71,03	94,38	87,59

8.2. TDEO Metodunda Oluşabilecek İşleme Hataların Hesaplanması

TDEO metoduna göre işparçasının işlenmesinde işleme toleranslarının seçimi önemlidir. İşpaçasında işlenecek boşluğun dışında kalacak şekilde seçilecek toleranslar (+) pozitif, içerisinde kalacak şekilde seçilecek tolerans negatif (–) işleme toleransı olarak adlandırılmıştır (Şekil 8.1) [49].

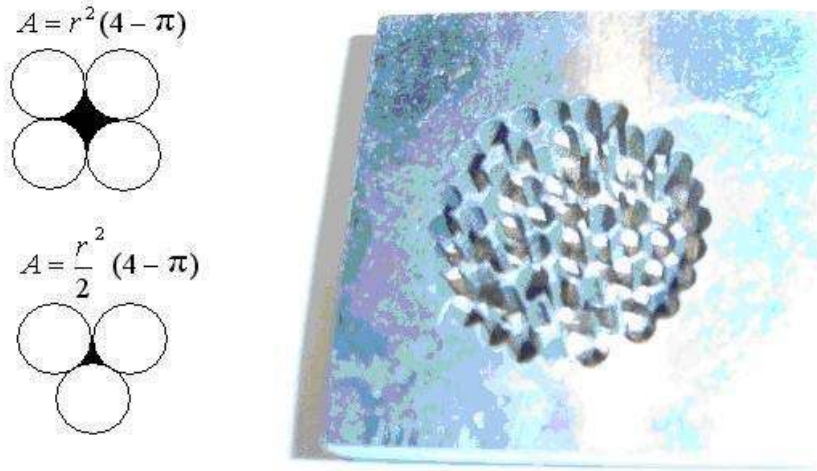


Şekil 8.1. Negatif/Pozitif EEİ toleransları [49]
a) Pozitif tolerans b) Negatif tolerans

EEİ’de her iki tolerans yaklaşımlarının kendine özgü avantajları olmasına rağmen, gerçek ölçülerden küçük Şekil 8.1 (a)’daki gibi pozitif toleranslarla işleme yapıldığında, daima yeni bir işlemeye ihtiyaç duyulmaktadır.

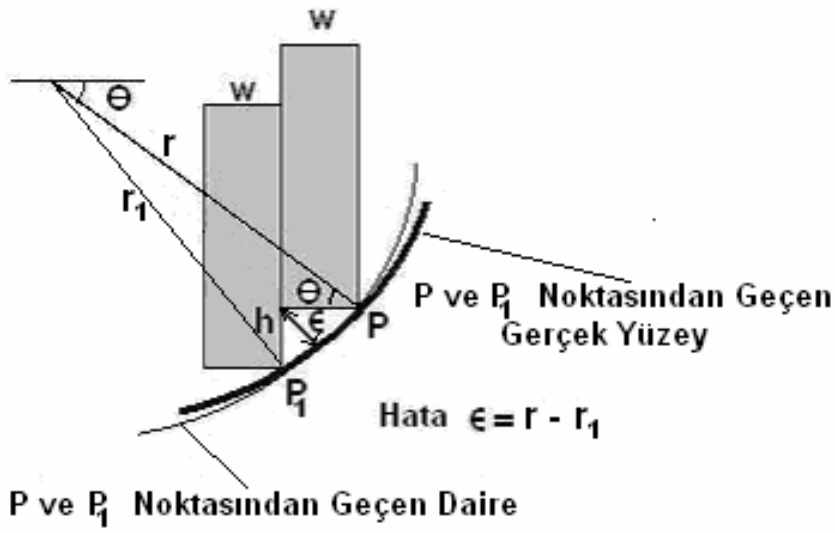
Fakat Şekil 8.1 (b)'deki gibi bir negatif tolerans seçilerek kaba işleme yapıldığında, işparçası üzerinde işlenmemiş malzeme kalacağından, ayrıca yarı kaba veya ince işleme yapılması gerekli olmaktadır. Bu nedenle, TDEO metoduna en uygun tolerans şekli negatif tolerans biçimidir.

Elektrotların işleme yüzeyi ile işlenecek yüzey kıyaslandığında, tel işleme toleransları nedeniyle doğal bazı çıkıntılar işparçası yüzeyinde oluşmaktadır. Bu durumda, yüzeyin tellerle işlenmesi sonucunda oluşacak çıkıntıların önceden tespiti amacıyla, oluşabilecek yüzey hatalarının önceden matematiksel olarak hesaplanması gerekmektedir [50,51]. Şekil 8.2'de dairesel tellerle elektrot oluşturulduğunda teorik olarak oluşacak tel çıkıntılarının alanları verilmektedir.



Şekil 8.2. Dairesel kesitli tel elektrotta oluşacak artık çıkıntı alanları

Bağımsız kare kesitli tellerle oluşturulan çember veya yay parçası ile oluşturulan yüzeylerin modellenmesi sırasında oluşacak çıkıntıların tahmin edilmesi amacıyla temas noktasından geçen bir çember çizilmiştir (Şekil 8.3) [50]. Şekil 8.3'de w , tellerin genişliğini; h , teller arasındaki yükseklik farkını; ϵ , oluşacak çıkıntı yüksekliğini; r ve r_1 ise P ile P_1 değme noktalarından geçen dairenin yarı çaplarını göstermektedir.



Şekil 8.3. Eğik veya yay benzeri yüzeyde hata [50]

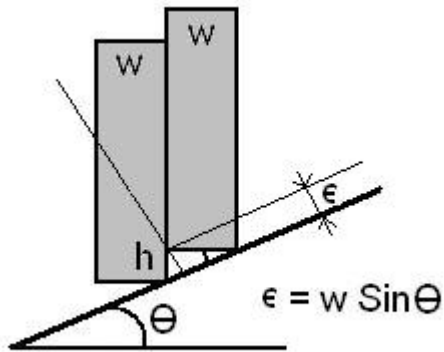
Bu duruma göre çıkıntı yüksekliği, $\epsilon = r - r_1$ olarak bulunur. (8.7)

Burada $r_1^2 = r^2 + w^2 - 2rw \cos \theta$ olursa, (8.8)

$\epsilon = r - \sqrt{r^2 + w^2 - 2rw \cos \theta}$ olur. (8.9)

şeklinde ifade edilir. Eğer kare kesitli tellerle bir açılı düz yüzey modellenirse (Şekil 8. 4), burada oluşacak çıkıntı yüksekliği,

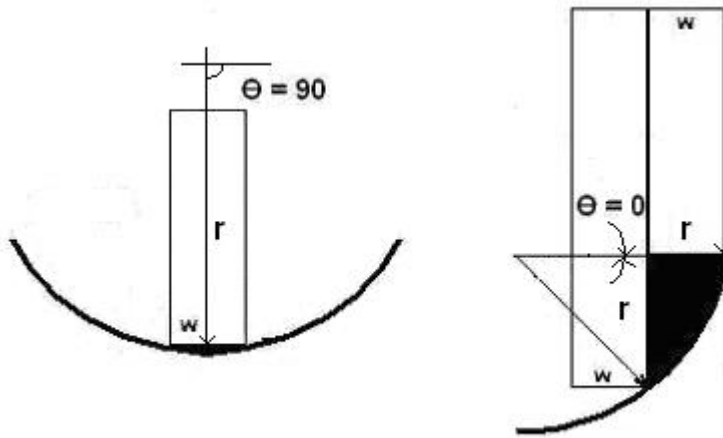
$\epsilon = w \sin \theta$ olur. (8.10)



Şekil 8.4. Açılı düz yüzeyde hata

Eş. 8.9 ve Eş. 8.10'dan anlaşılacağı üzere tellerin genişliği azaldıkça ($w \rightarrow 0$) çıkıntı yüksekliği de ($\epsilon \rightarrow 0$) düşmektedir ve istenilen yüzeye daha yakın bir şekil elde edilmektedir. Bu durumda elektrot adaptörü içindeki tel sayısı artmaktadır. Bu ise daha fazla telin ayarlanmasını gerektirir ve elle yapıldığında zaman kaybını arttırır.

Bir kalıp veya modelde açılı düz yüzey TDEO metoduna göre işlemeye tabi tutulursa, açı düştükçe çıkıntı yükseklikleri de küçülmektedir. Eğer kalıp veya modelde çember veya yay parçası ile ifade edilen bir boşluk TDEO metoduna göre işlenecek olursa, kare kesitli teller için en büyük çıkıntı (ϵ) yarıçap r 'ın 0° , en küçük çıkıntı (ϵ) ise yarıçap r 'ın 90° olduğu yerde oluşacaktır (Şekil 8.5). Eşitlik 7.9'daki içbükey yüzey için verilen çıkıntı formülü dışbükey yüzey içinde geçerlidir ve sadece karekök içindeki ifadenin işareti değişir.

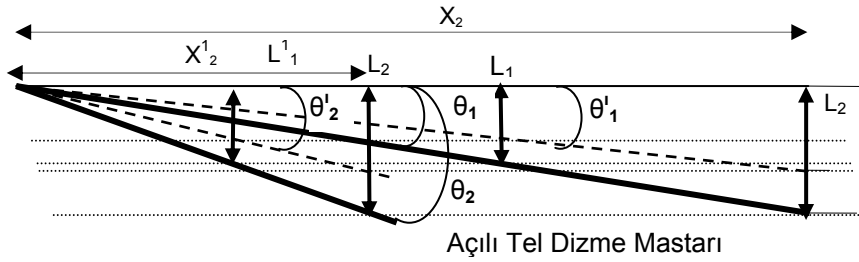


Şekil 8.5. Yarıçapın 0 ile 90 derecelerdeki yüzey hataları

8.3. TDEO Metodunda Tel Ayar Boylarının Hesaplanması

TDEO metodunda işleme yapabilmek için tellerin aşınma miktarına göre ilk tel boylarının hesaplanması gerekmektedir. Sonra, bu ilk boy uzunluklarına göre tellerin elektrot adaptöründe ayarları gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla daha önce çalışılan kademeli ve açılı işleme deneylerinden yararlanılmıştır.

Açılı elektrot deneylerinden elde edilen işparçalarının ölçümleri Şekil 8.6'da gösterilen ve Bölüm 4.11'de anlatılan biçimde alınmıştır. Şekil 8.6'da görüldüğü üzere tellerin master sayesinde dizildiği için θ_1 açısı $11,06^\circ$ 'dir. θ_1' açısı ise, işleme sonrası oluşan yüzeyden alınan değerler sonucu oluşturulan ve tellerin aşınma yüzeyini teorik olarak gösteren açıdır. L_2 ise X_2 ve X_2^1 uzaklarındaki tel boylarını göstermektedir.



Şekil 8.6. Açılı işleme metodu

Ayrıca Şekil 8.6 incelendiğinde, X_2 uzunluğunda, L_2 derinliğinde ve $11,06^\circ$ 'de ayarlanan tellerle yapılacak işleme X_2^1 uzaklığında ve farklı açıda da işlenebileceğinden, açılı işleme metodu derinliği 12 mm'yi geçmeyen bazı büyük işleme açılarını da kapsamaktadır. Örneğin ilk ve son tel boy farkı 12,5 mm olan (5 adet tel) yüzeyden açılı 12 mm derinlik işlenmek istense, işleme açısı $\theta_2=43,83^\circ$ olmaktadır. Tellerin eğik aşınma yüzeyini teorik olarak belirleyen açı θ_2' olarak gösterilmektedir.

Açılı elektrotla tasarlanan işleme derinliği L_t , aşınma dahil ayarlanması gereken tel boyu L_a , ile gösterilirse, telin ayarlanması gereken tel boyu,

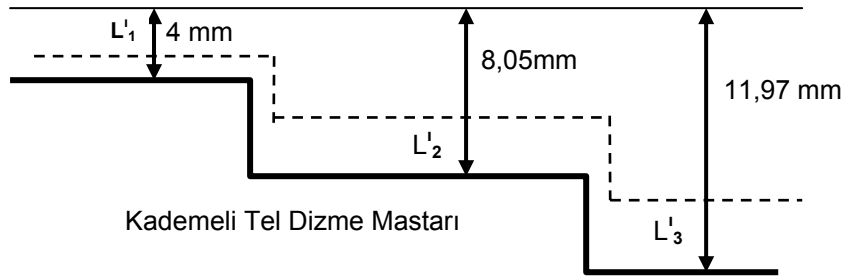
$$\frac{L_a}{L_t} = \frac{\tan 11.06}{\tan \theta} \text{ eşitliğinden elde edilir.}$$

(8.11)

Açılı elektrotla yapılan deneylerde, her deney öncesi teller $11,06^\circ$ eğimi olan açılı tel dizme masterı kullanarak dizilmiştir. Doğal olarak farklı boşalım akımları ve vurum sürelerinde işparçasının işleme yüzeylerinde farklı eğimler

oluşturmuştur. Daha önce yapılmış 9 farklı açılı elektrot işleme deneyi için bu eğimler ölçülmüştür.

Kademeli işleme deneylerinden elde edilen işparçalarının Şekil 8.7’de verilen şekilde ve Bölüm 4.11’de anlatılan biçimde derinlik ölçümleri alınmıştır.



Şekil 8.7. Kademeli işleme metodu

Şekil 8.7’de görüldüğü üzere, doğal olarak farklı boşalım akımları (I_d) ve vurum sürelerinde (t_s) işparçasının yüzeylerinde farklı yükseklikte kademeler oluşmuştur (L'_1 , L'_2 ve L'_3). Daha önce yapılmış 9 farklı kademeli elektrot işleme deneyinde oluşan 3 farklı kademe derinlikleri ölçülmüştür. Kademeli işlemede, her bir 4'er mm kademe derinlik için tellerin ayarlanması gereken tel boyları,

$$\frac{L_a}{L_t} = \frac{4}{L'_1} \quad (8.12)$$

$$\frac{L_a}{L_t} = \frac{8,05}{L'_2} \quad (8.13)$$

$$\frac{L_a}{L_t} = \frac{11,97}{L'_3} \quad (8.14)$$

eşitliklerinden elde edilir.

Açılı ve kademeli elektrot işlemleri için alınan ölçümler sonucu Eş. 8.11–Eş. 8.14’de verilen L_a/L_t oran hesaplanmıştır. Hesaplanan L_a/L_t oranları topluca Çizelge 8.4’de verilmiştir.

Çizelge 8.4. Açılı ve kademeli EEİ'lerdeki açı ve derinlik ölçümleri

Deney No	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Ölçülen Açı (θ)	Açılı EEİ L_a/L_t	Kademeli EEİ (4mm) L_a/L_t	Kademeli EEİ (8 mm) L_a/L_t	Kademeli EEİ (12 mm) L_a/L_t
	[I_d , Amper]	[t_s , μs]	Derece	$\tan 11,06/\tan \theta$			
1	25	100	6,75	1,651	1,653	1,536	1,546
2	25	50	6,76	1,649	1,460	1,491	1,540
3	25	25	7,23	1,541	1,471	1,445	1,506
4	12	100	6,38	1,748	1,550	1,695	1,747
5	12	50	6,67	1,671	1,600	1,681	1,752
6	12	25	6,75	1,651	1,626	1,600	1,662
7	6	100	6,73	1,656	1,860	1,742	1,737
8	6	50	6,10	1,829	1,818	1,890	1,876
9	6	25	6,32	1,765	1,810	1,876	1,915

Açılı ve kademeli elektrot işlemleri için Çizelge 8.4'de verilen L_a/L_t değerlerinin boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı olarak güç serileri formüllerinden teorik L_a/L_t oranları elde edilmiştir (EK-1). Bu formüllerden elde edilen bazı L_a/L_t değerlerine ait korelasyon değerleri düşük çıkmıştır. Bunun üzerine her bir L_a/L_t değerlerinin boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı üç boyutlu yüzey grafikleri (Sigmaplot 8.0 yazılım programı kullanarak) oluşturulmuştur. Bu yazılım programını kullanarak bu yüzeylere ait matematiksel (Lorentzian, Gaussian ve Paraboloid) matematiksel yüzey eğrileri oluşturulmuş ve deney noktalarına denk gelen L_a/L_t değerleri bulunmuştur. Bu değerlerden elde edilen L_a/L_t değerleri ile deneysel elde edilen L_a/L_t değerleri arasındaki korelasyonlar hesaplanmıştır. Matematiksel modellenerek bulunan L_a/L_t değerleri ile deneysel olarak elde edilen L_a/L_t değerlerine göre korelasyonlar, Çizelge 8.5–Çizelge 8.8'de verilmiştir.

En yüksek korelasyon değerleri, Çizelge 8.5'de Lorentzian yüzey modellemesinden elde edilen 0,77, Çizelge 8.6'da güç formülünden elde edilen 0,89, Çizelge 8.7'de güç formülünden elde edilen 0,94 ve Çizelge 8.8'de Lorentzian yüzey modellemesinden elde edilen için 0,94'tür. Korelasyon değerlerinin en yüksek olduğu L_a/L_t değerleri, yapılacak örnek işlemlerde kullanılacak tel işleme boylarının ayar katsayıları kabul edilmiştir.

Çizelge 8.5. Açılı elektrot ile işlemede gerçek ve teorik L_a/L_t değerleri

Deney No	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	Açılı EEİ için deneysel ve teorik L_a/L_t oranları				
	[I_d , Amper]	[t_s , μs]	Deneysel	Lorentzian	Gaussian	Paraboloid	Güç
1	25	100	1,651	1,610	2,035	1,610	1,633
2	25	50	1,649	1,641	1,750	1,610	1,616
3	25	25	1,541	1,581	1,607	1,610	1,599
4	12	100	1,748	1,698	2,111	1,701	1,700
5	12	50	1,671	1,731	1,826	1,701	1,683
6	12	25	1,651	1,667	1,684	1,701	1,665
7	6	100	1,656	1,742	2,171	1,743	1,771
8	6	50	1,829	1,776	1,886	1,743	1,752
9	6	25	1,765	1,711	1,744	1,743	1,734
Korelasyon				0,772	0,320	0,698	0,718

Çizelge 8.6. 4 mm kademedeki gerçek ve teorik L_a/L_t değerleri

Deney No	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	4 mm derinlik için deneysel ve teorik L_a/L_t oranları				
	[I_d , Amper]	[t_s , μs]	Deneysel	Lorentzian	Gaussian	Paraboloid	Güç
1	25	100	1,653	1,560	0,000	1,351	1,525
2	25	50	1,460	1,537	0,000	1,451	1,501
3	25	25	1,471	1,525	0,000	1,501	1,477
4	12	100	1,550	1,753	0,000	1,415	1,670
5	12	50	1,600	1,729	0,000	1,515	1,644
6	12	25	1,626	1,716	0,000	1,565	1,618
7	6	100	1,860	1,861	0,000	1,652	1,829
8	6	50	1,818	1,836	0,000	1,752	1,800
9	6	25	1,810	1,823	0,000	1,802	1,771
Korelasyon				0,827	0,000	0,754	0,890

Çizelge 8.7. 8 mm kademedeki gerçek ve teorik L_a/L_t değerleri

Deney No	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	8 mm derinlik için deneysel ve teorik L_a/L_t oranları				
	[I_d , Amper]	[t_s , μs]	Deneysel	Lorentzian	Gaussian	Paraboloid	Güç
1	25	100	1,536	1,481	1,469	1,830	1,503
2	25	50	1,491	1,503	1,501	1,615	1,492
3	25	25	1,445	1,474	1,460	1,508	1,481
4	12	100	1,695	1,699	1,687	1,984	1,667
5	12	50	1,681	1,723	1,724	1,769	1,655
6	12	25	1,600	1,692	1,677	1,661	1,643
7	6	100	1,742	1,823	1,803	2,158	1,850
8	6	50	1,890	1,848	1,842	1,943	1,836
9	6	25	1,876	1,816	1,792	1,835	1,823
Korelasyon				0,936	0,934	0,682	0,941

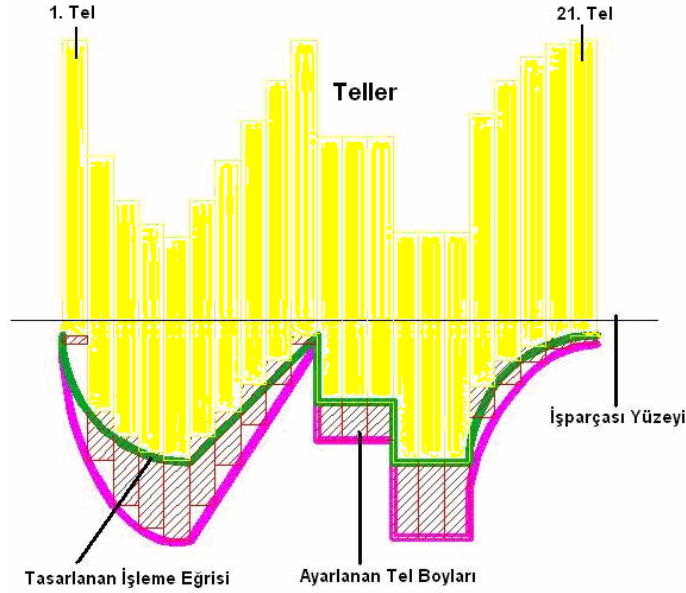
Çizelge 8.8. 12 mm kademedeki gerçek ve teorik L_a/L_t değerleri

Deney No	Boşalım Akımı	Vurum Süresi	12 mm derinlik için deneysel ve teorik L_a/L_t oranları				
	[I_d , Amper]	[t_s , μs]	Deneysel	Lorentzian	Gaussian	Paraboloid	Güç
1	25	100	1,546	1,505	1,811	1,527	1,537
2	25	50	1,540	1,550	1,651	1,551	1,543
3	25	25	1,506	1,526	1,571	1,538	1,549
4	12	100	1,747	1,705	1,981	1,731	1,686
5	12	50	1,752	1,756	1,821	1,755	1,692
6	12	25	1,662	1,729	1,741	1,742	1,698
7	6	100	1,737	1,810	2,099	1,843	1,849
8	6	50	1,876	1,864	1,939	1,866	1,856
9	6	25	1,915	1,835	1,859	1,854	1,863
Korelasyon				0,939	0,661	0,936	0,921

TDEO metodolojisine en uygun işleme parametrelerin yüksek boşalım akımı (I_d) ve düşük vurum sürelerinde (t_s) olduğu için, 25 A, 25 μs işlemeye ait ve korelasyonları en yüksek olan hesaplamalar için elde edilen L_a/L_t değerleri tel boyu ayar katsayısı olarak örnek işlemede kullanılmıştır. Bu L_a/L_t oranları; açılı EEİ için 1,581, 4mm kademeli EEİ için 1,477, 8 mm kademeli EEİ için 1,481 ve 12 mm kademeli EEİ için 1,526'dır.

8.4. TDEO Metodu İçin Örnek Uygulamalar

Bu tez kapsamında iki farklı örnek EEİ yapılmıştır. Bunlardan birincisi olan ve Resim 4.8'de gösterilen 6x21 matrisli dizilmiş tellerden oluşan örnek bir EEİ modeli Şekil 8.8'de verilmiştir. Bu örnek işleme modeline göre; işparçasının 1,5 mm derinliğinde başlamak kaydıyla, 6x21 matrisli dizilmiş tellerin ilk beş teli ile 12,5 mm yarı çapında bir içbükey çeyrek daire, sonra gelen 5 teli ile 12,5 mm'lik 45° açılı bir düzlem, sonra gelen 3 teli ile 8 mm derinliğinde birinci kademe, sonra gelen 3 teli ile 14 mm derinliğinde ikinci kademe ve en son 5 teli ile bir 12,5 mm yarı çapında bir dışbükey çeyrek daire işlenilmesi tasarlanmıştır. Tasarlanan yüzey profili ve buna göre ayarlanması gereken tel boylarına ait değerler Çizelge 8.9'da verilmiştir.



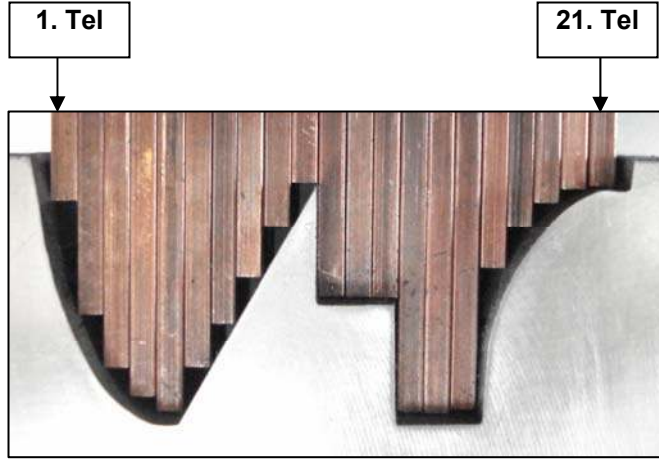
Şekil 8.8. Birinci örneğin işleme modeli

Çizelge 8.9. Birinci örneğin işleme değerleri

Tel Sıra No	İşleme Şekli	İşlenmesi Gereken Derinlik (mm)	L_a/L_t oranı	L_a (mm)
1	Kademeli (0-4)	1,50	1,477	2,37
2	Kademeli (8-12)	9,00	1,526	13,73
3	Açılı	11,50	1,581	18,18
4	Açılı	12,96	1,581	20,49
5	Açılı	13,75	1,581	21,74
6	Açılı	11,50	1,581	18,18
7	Açılı	9,00	1,581	14,23
8	Açılı	6,50	1,581	10,28
9	Açılı	4,00	1,581	6,32
10	Kademeli (0-4)	1,50	1,477	2,37
11	Kademeli (4-8)	8,00	1,481	11,84
12	Kademeli (4-8)	8,00	1,481	11,84
13	Kademeli (4-8)	8,00	1,481	11,84
14	Kademeli (8-12)	14,00	1,526	21,36
15	Kademeli (8-12)	14,00	1,526	21,36
16	Kademeli (8-12)	14,00	1,526	21,36
17	Kademeli (4-8)	6,50	1,481	9,62
18	Açılı	4,00	1,581	6,32
19	Açılı	2,54	1,581	4,02
20	Açılı	1,75	1,581	2,77
21	Kademeli (0-4)	1,50	1,477	2,37

Çizelge 8.9'da ayrıca her bir telin bir önceki tel derinliğine göre işleme biçimini göstermektedir. Birbirini takip eden tel uçları arasındaki derinlik farkı 4 mm olması durumunda işleme biçimi kademeli EEİ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 8.9'daki tel ayar (L_a) değerlerine uygun Resim 8.1'de gösterilen bir tel dizme mastarı işparçası malzemesinden 4 Eksen Sodick AQ750LH model Tel-EEİ tezgâhında üretilmiştir. Sonra teller mastara uygun dizilmiştir.



Resim 8.1. Birinci örnek işlemeye uygun tel dizme mastarı

Sonra Resim 8.2'de verilen örnek işleme gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.11'de belirtildiği gibi, Resim 7.2 (a)'daki örnek işlemenin enine olan tellerinden az 3'er tel olmak şartıyla olmak üç boyutlu ölçümleri alınmıştır.



(a)



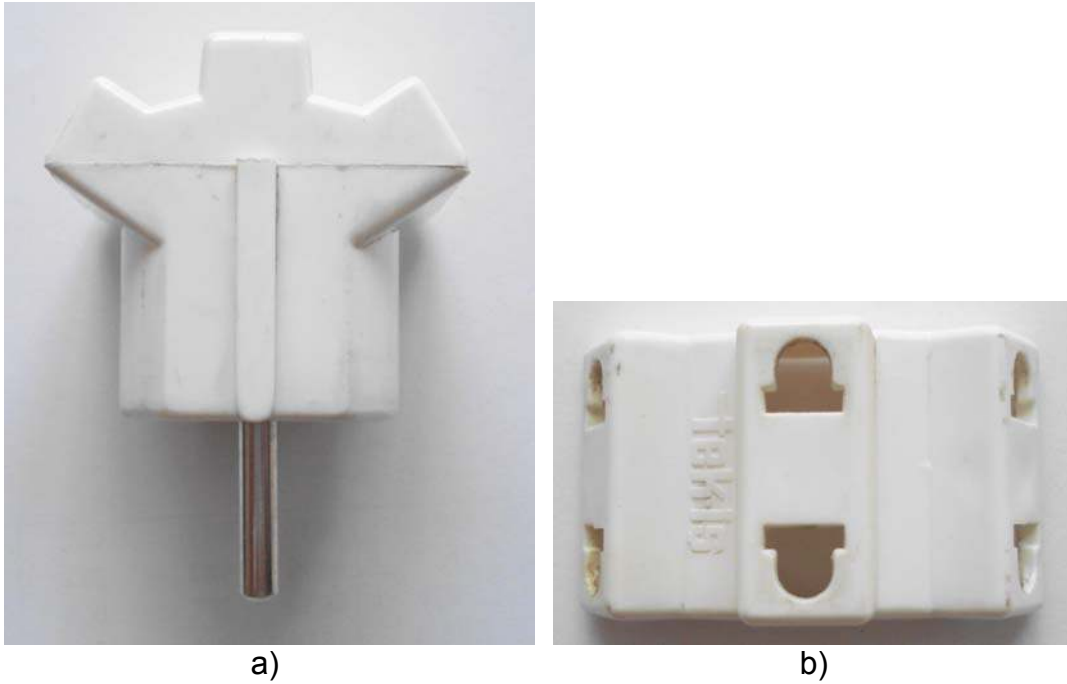
(b)

Resim 8.2. Birinci örneğe ait aşındırılan işparçası ve aşınan teller
a) İşlenmiş işparçası b) İşlemeden sonraki teller

Ölçümler sonucu içbükey çeyrek dairenin yarı çapı 11,89 mm, düzlemin eğimi 46,48 derece, düzlem, 8 mm'lik kademenin ortalama derinliği 7,12 mm, 14 mm'lik kademenin ortalama derinliği 12,49 mm ve dışbükey çeyrek dairenin yarı çapı 12,21 mm olarak ölçülmüştür.

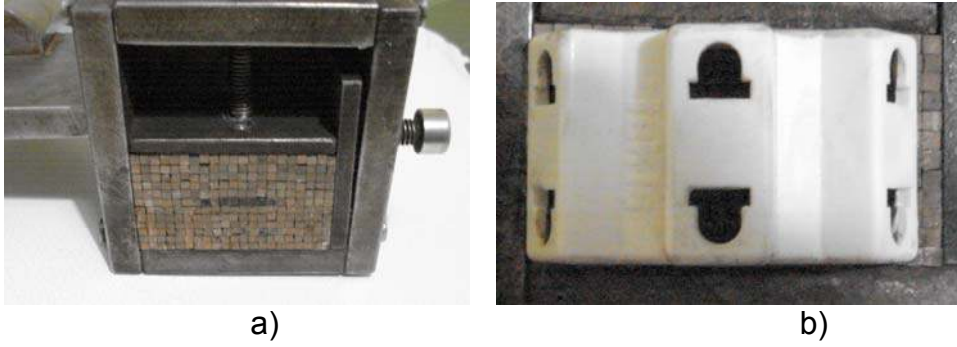
Bu örnek işlemede tasarlanan içbükey dairenin çapı %95, düzlemin eğimi %97, 8 mm'lik kademenin derinliği %89, 14 mm'lik kademenin derinliği %87 isabet ile ve dışbükey dairenin çapı %98 isabetle bulunmuştur.

İkinci örnek işleme olarak, Resim 8.3'de gösterilen üç yol prizin üst kısmının kaba işlemesi seçilmiştir.



Resim 8.3. Üç yollu elektrik prizi
a) Ön görünüş
b) Üst görünüş

İşlemeyi yapmak için ilk önce, Resim 4.4'de verilen 20x21 tel matris şeklinde dizilmiş elektrot adaptöründe, prizin üst kısmı parçasının yüzey alanına denk gelen 12x20 tel matrisini oluşturacak şekilde tellerin dizilmesi gerçekleştirilmiştir (Resim 8.4). Sonra priz üst kapağından 0.01 mm hassasiyete sahip dijital kumpasla gerekli ölçümler alınarak işlenmesi gereken hacim ve derinlikler ölçülmüştür. İşlenmesi gereken yerler için tel uzunluk boyları bir önceki örnekteki gibi hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler ve işleme biçimleri Çizelge 8.10'da topluca verilmiştir.



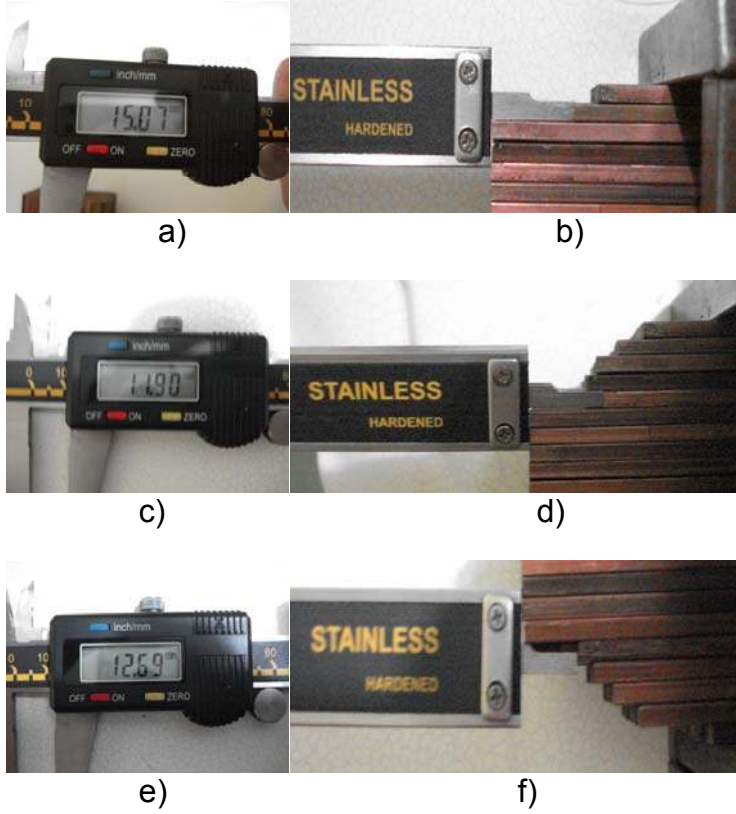
Resim 8.4. 12x20 tel matris

- a) 12x20 tel matrisli elektrot adaptörünün görünüşü
b) Priz üst kapağının 12x20 tel matrisini örtmesi

Çizelge 8.10. İkinci örneğin işleme değerleri

Tel Sıra No	İşleme Şekli	İşlenmesi Gereken Derinlik (mm)	L_a/L_t oranı	L_a (mm)	Tel İtme Boyu L_i (mm)
1	Açılı	2,00	1,58	3,16	22,18-3,16=19,02
2	Açılı	4,50	1,58	7,11	22,18-7,11=15,07
3	Açılı	6,75	1,58	10,67	22,18-10,67=11,51
4	Açılı	8,00	1,58	12,65	22,18-12,65=9,53
5	Açılı	6,50	1,58	10,28	22,18-10,28=11,90
6	Açılı	6,00	1,58	9,49	22,18-9,49=12,69
7	Açılı	7,50	1,58	11,86	22,18-11,86=10,32
8	Kademeli (12+)	14,50	1,53	22,18	0
9	Kademeli (12+)	14,50	1,53	22,18	0
10	Kademeli (12+)	14,50	1,53	22,18	0
11	Kademeli (12+)	14,50	1,53	22,18	0
12	Kademeli (12+)	14,50	1,53	22,18	0
13	Açılı	7,50	1,58	11,86	22,18-11,86=10,32
14	Açılı	6,00	1,58	9,50	22,18-9,49=12,69
15	Açılı	6,50	1,58	10,28	22,18-10,28=11,90
16	Açılı	8,00	1,58	12,65	22,18-12,65=9,53
17	Açılı	6,75	1,58	10,67	22,18-10,67=11,51
18	Açılı	4,50	1,58	7,11	22,18-7,11=15,07
19	Açılı	2,00	1,58	3,16	22,18-3,16=19,02

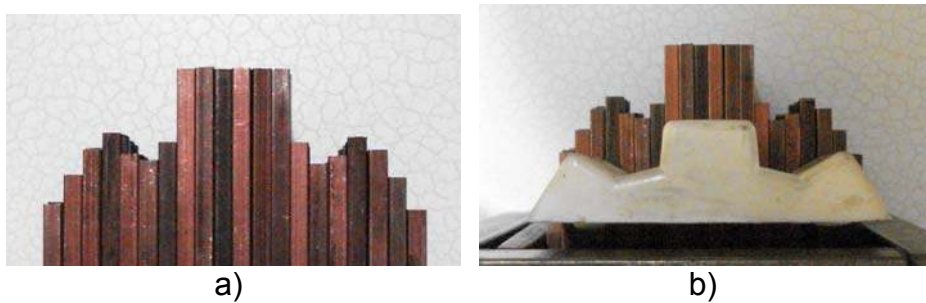
Çizelge 8.10'dan görüldüğü üzere, 8, 9, 10, 11 ve 12 sıradaki teller aynı boyda, diğer teller söz konusu tellerin sağ ve solunda eşit mesafede ve derinlikte (simetrik) işleme yapacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, Çizelge 8.10'nun son sütununda belirtildiği üzere, bu sefer tellerin 8, 9, 10, 11 ve 12nci sıradaki tellerden işleme farkı kadar itilerek tel işleme boylarının ayarlanması sağlanmıştır. Söz konusu tel itmelerine bazı örnekler Resim 8.5'te verilmiştir.



Resim 8.5. Örnek tel itmeleri

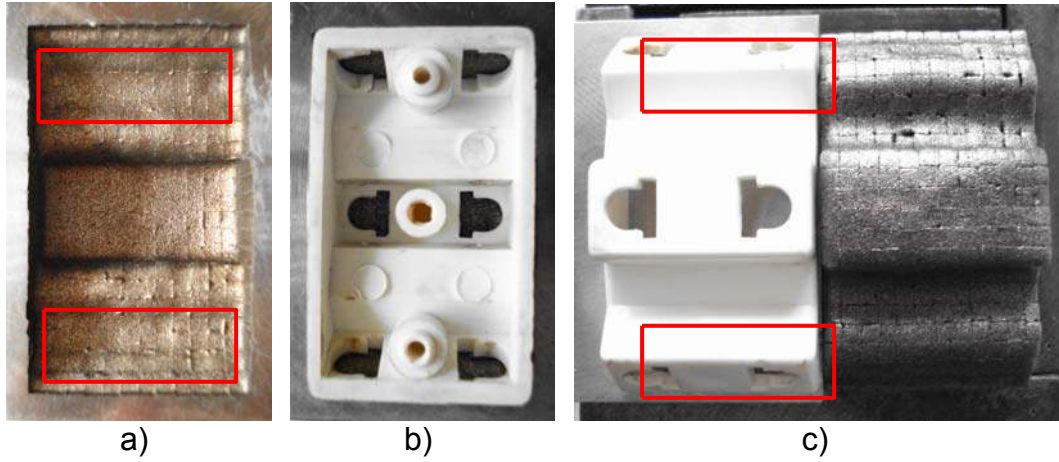
- a) Kumpasta 15,07 mm ayarlanması, b) telin 15,07 mm itilmesi
- c) Kumpasta 11,90 mm ayarlanması, d) telin 11,90 mm itilmesi
- e) Kumpasta 12,69 mm ayarlanması, f) telin 12,69 mm itilmesi

Söz konu itmeler tamamlanınca Resim 8.6'deki gibi elektrot adaptöründe tellerin dizilişi gerçekleşmiş oldu. İşleme sonrası işparçası ve tellerin görüntüsü Resim 8.7'de verilmiştir.



Resim 8.6. Tel dizimi tamlanmış 12x20 matris

- a) Dizilmiş teller
- b) Priz üst kapağı üzerinde dizilmiş teller



Resim 8.7. İşlenmiş işparçası ve işleme sonrası teller
 a) İşlenmiş işparçası,
 b) Priz üst kapağının işlenmiş işparçası içine yerleşmesi
 c) İşleme sonrası teller

İşleme sonrası yapılan incelemelerde, 12x20 matris tel grubuna ait EEİ alanı ile işleme derinliğinin orijinal parçayla oldukça uyumlu olduğuna, fakat priz üst kapağının iki tarafında simetrik olarak bulunan üçgene benzer iki çıkıntının işlemede kullanılan tel kenar uzunluğunun büyük olması ve tellerin sıralı dizilişinde tepe nokta yerinin az kayması nedeniyle, istenilen keskin tepenin oluşturulamadığı görülmüştür (Resim 8.7 a) ve c)). Sonuç olarak, tel kesit alanların ve buna bağlı işleme hatalarının (Bkz. Bölüm 8.2) EEİ’de dikkate alınması gerektiğine varılmıştır.

8.5. TDEO Metodunun Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Çizelge 8.11’de tez kapsamında incelenen elektrot hazırlama metotları ile EEİ’nin metodolojik sıra içerisinde tasarımından gerçekleşmesine kadar geçen süreçlerin sırası gösterilmektedir. Çizelge 8.11 incelendiğinde, en uzun metodolojik sıraya SLA ile EEİ alırken, en kısa olanı ise nokta yazıcı ile EEİ’dir. Fakat imalat endüstrisinde en fazla kullanılan metot, klasik EEİ olan elektrolit bakırdan dolu elektrot üretimiyle işlemedir. Halen araştırma aşamasında olan nokta yazıcı ile EEİ’nin pratik uygulaması yoktur, Benzer şekilde SLA ile EEİ ve T/M ile EEİ uygulamaları çok nadirdir.

Çizelge 8.11. Elektrot hazırlama metotlarına göre EEİ'ler

Metodolojik Sıra	Klasik EEİ	SLA ile EEİ	T/M ile EEİ	TDEO Metotlu EEİ	Nokta Yazıcılı EEİ
1	EEİ'nin tasarımı	EEİ'nin tasarımı	EEİ'nin tasarımı	EEİ'nin tasarımı	EEİ'nin tasarımı
2	Elektrot tasarımı	Elektrot tasarımı	Elektrot tasarımı	Tel boyalarının ayarlanması	EEİ'nin yapılması
3	Elektrodun üretimi	Elektrodun üretimi	T/M kalıbının hazırlanması	EEİ'nin yapılması	
4	EEİ'nin yapılması	Boya ile kaplanması	T/M elektrodun üretimi		
5		Elektriksel kaplama	EEİ'nin yapılması		
6		EEİ'nin yapılması			

Bu çerçevede elektrolit bakır ile klasik EEİ'nin maliyeti ($M_{EEİ}$); EEİ'nin tasarlanma maliyeti ($M_{EEİT}$), elektrot ve bağlantılarının tasarım maliyeti (M_{ET}), elektrot ve bağlantılarının malzeme maliyeti (M_{EM}), elektrot ve bağlantılarının imalat maliyeti (M_{EI}), işçilik maliyeti ($M_{İŞÇ}$) ve işleme maliyetini (M_I) kapsayacaktır.

$$M_{EEİ} = M_{EEİT} + M_{ET} + M_{EM} + M_{EI} + M_{İŞÇ} + M_I \quad (8.15)$$

TDEO metodu ile yapılan EEİ'nin maliyeti ($M_{EEİ}$) ise, EEİ'nin tasarlanma maliyeti ($M_{EEİT}$), elektrot tasarım maliyeti (M_{ET}), tel dizme mastarının tasarım maliyeti (M_{MT}), mastar malzeme maliyeti (M_{MM}), tel dizme mastarının imalat maliyeti (M_{MI}), aşınan telin malzeme maliyeti (M_{TM}), tel dizme işçilik maliyeti ($M_{İŞÇ}$) ve işleme maliyetini (M_I) kapsayacaktır.

$$M_{EEİ} = M_{EEİT} + M_{ET} + M_{MT} + M_{MM} + M_{MI} + M_{TM} + M_{İŞÇ} + M_I \quad (8.16)$$

Tel dizme işleminin mastarsız yapılması durumunda, EEİ'nin maliyetinde sadece tel dizme mastarına ait maliyetler olmayacağından, Eşitlik 8.16,

$$M_{EEİ} = M_{EEİT} + M_{ET} + M_{TM} + M_{İŞÇ} + M_I \quad (8.17)$$

olacaktır. Eşitlik 8.15–8.17'deki EEİ'nin tasarlanma maliyeti ($M_{EEİT}$), elektrot tasarlama maliyeti (M_{ET}) ve işleme maliyeti (M_I) her iki metot için aynıdır.

Bu amaçla her iki örnek işleme için elektrotların taslak resimleri hazırlanmıştır. Kalıpsan A.Ş., Özgen Kalıp Şti. ve Köprüören Makine Sanayi ve Tic. Ltd. Şti firmalarına gidilerek, birer adet elektrot için malzeme fiyatı, işçilik, işleme ve genel giderler ve elektrot teslim süreleri firmalardan alınmıştır (Çizelge 8.12). Ayrıca elektrolit bakır (dolü bakır) ile ASA 3100 kaynak telinin (tel demetini oluşturan teller) kilogram fiyatı araştırması yapılmış, piyasada elektrolit bakırın kilogramının 19 YTL'den ASA 3100 kaynak telinin kilogramının ise 25 YTL'den satıldığı belirlenmiştir.

Çizelge 8.12. Örnek işlemlere ait dolü elektrot fiyatları ve teslim süreleri

		FİRMALAR					
		KALIPSAN		ÖZGEN KALIP		KÖRÜÖREN	
		ÖRNEK 1	ÖRNEK 2	ÖRNEK 1	ÖRNEK 2	ÖRNEK 1	ÖRNEK 2
1	MALZEME FİYATI (YTL)	10	15	20	20	10	15
2	İŞÇİLİK (YTL)	10	10	15	20	10	15
3	İŞLEME (YTL)	65	75	180	200	150	175
4	GENEL GİDER (YTL)	5	10	15	20	1	15
5	TOPLAM FİYATI (YTL)	90	110	240	260	180	220
6	TESLİM SÜRESİ	1 GÜN	1 GÜN	10 SAAT	10 Saat	5 SAAT	6 SAAT

Kalıpsan A.Ş., Tel-Erozyon tezgâhı olması nedeniyle, elektrotların yapımında 90 ve 110 YTL gibi en düşük fiyatlandırma yaparken elindeki işleri ve malzeme teminindeki gecikmeleri hesaba katarak teslim sürelerini 1 gün olarak belirtmiştir. Köprüören Makine Sanayi ve Tic. Ltd. Şti ise, elindeki 4 ve 5 eksen BSD freze tezgâhları ile elektrotları 180 ve 220 YTL'ye yapabileceğini ve teslim sürelerini 5 ve 6 saat olarak belirtmiştir. Kalıpcılık işi yapan ve iki adet Furkan EDM M25 tipi dalma-erozyon tezgâhları olan Özgen Kalıp ise, elindeki 2 eksenli sayısal denetimli olan takım tezgâhları ile elektrotları yapabileceğini, fiyatlarını 240 ve 260 YTL olarak, teslim sürelerini ise 10'ar saat olarak bildirmiştir. Söz konusu elektrotlardan kaba, yarı-kaba ve ince işleme için üçer adet üretilmesi durumunda, elektrot maliyetlerinin üç katına, teslim sürelerinin ise iki katına çıkacağını bildirmişlerdir.

İlk örneğin dalma-erozyon tezgâhında işlenmesi 3 saat 55 dakika, ikinci örneğin ise 8 saat 9 dakika sürmüştür. Birinci örnek için üretilen tel dizme mastarının malzeme fiyatı 5 YTL, frezede işlenerek bir deney numunelerinin ölçülerine getirilmesi 15 YTL ve Tel-EDM cihazında işlenilmesi 65 YTL olmak üzere toplam 85 YTL'ye mal olmuştur ve elektrodun hazırlanması yaklaşık 1 gün sürmüştür. İkinci örnekte ise tel dizme mastarı kullanılmamıştır. Birinci örnekte tellerin dizilmesi ve kontrolü için gereken süre 25 dakika olurken, ikinci örnekte ise bu süre ise 50 dakika olmuştur. Tel dizilmesinde kullanılan mastarlar hem numunenin kendisi kullanılarak hem de numunesi olmadan yapılan mastarlar polimerden, tahtadan, sac metaldan veya Resim 8.8'de gösterildiği gibi alçıdan olabilir. Fakat TDEO metodunda teller fazla aşındığından numune üzerinden alınan kopyalarla tel dizme mastarının üretilmesi uygun olmamaktadır.



Resim 8.8. İkinci numune için alçıdan mastar üretimi

Tel 20x21 tel matrisli elektrot adaptöründe, elektrot adaptörünün yapısı gereği 20 veya 21 tel alan kenarlarının birisi sabit kalmak şartıyla 10x20 veya 15x21 gibi her türlü tel matris konfigürasyonu hazırlanabilmektedir. Ayrıca TDEO metodunda, teller düzgün olduğunda ve gaz yağı gibi bir sıvı ile ıslanarak teller arasında kayganlık sağlandığında, bir tel matrisi içindeki tel

boyunun itilerek işleme boyunun ayarlanması, her bir tel için en çok 0,5 dakika (30s) almaktadır. Bu kıstas ile 10 telli ayarlama 5 dakika, 50 telli ayarlama 25 dakika, 100 teli ayarlama 50 dakika olmaktadır. Bu ayarlamalarda herhangi bir master kullanımı zorunlu değildir. Sadece bu tür ayarlamalarda kullanılacak olan kumpasın derinlik gösterge piminin tel kesit alanına uygun küçüklükte olması gerekmektedir.

Sonuç olarak; tel dizme işleminin mastarsız yani tellerin sadece itilerek yapılması durumunda, sadece hassas işleme için bir elektrot üretilirken kaba ve yarı-kaba işlemler için TDEO metodu, hem işleme süresi hem de ekonomik açıdan en uygun yöntem olmaktadır.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elektro erozyon ile işlemede en büyük zaman ve maliyet unsuru olan elektrotların kolay ve hızlı bir şekilde üretilmesi amacıyla kare kesitli teller kullanılmıştır. Çeşitli geometrilerde ve tel sayılarında oluşturulan tel demeti formundaki elektrotlar, değişik boşalım akımı ve vurum süresi değerlerinde denenmiş ve pratik uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Tel demetiyle elektrot oluşturma (TDEO) metodunda, teller birbirinden bağımsız işleme yapmaktadır. Bu nedenle işlemenin bağıl aşınma (BA) değerleri yüksektir. Ancak, kullanılan tellerin sayısı ve vurum enerjisi arttıkça, elektrotta tel başına düşen aşınma miktarı azalmakta, BA değerleri düşmekte ve dolu elektrotun BA değerlerine yaklaşmaktadır. TDEO metodunda, elektrottaki tel sayısının artması işleme alanının büyümesine neden olduğundan işlemlerde işleme süresi artmaktadır. Özellikle yüksek boşalım akımlarında tel sayısının artmasıyla işparçası işleme hızı (İİH) ve elektrot aşınma hızı (EAH) artmaktadır. Boşalım akımı ve vurum süresinin artışıyla İİH ve EAH'ları artmakta, işleme süresi azalmaktadır.

TDEO metodolojisine en uygun işleme parametrelerin yüksek boşalım akımı ve düşük vurum süreleri olarak bu çalışmada tespit edilmiştir.

İşleme aralığı, boşalım akımı ve vurum süresinin artışıyla artmaktadır. Yüksek boşalım akımı ve düşük vurum sürelerinde işparçası yüzeylerinde teller arası boşluk sonucu karşılaşılan çıkıntılar oluşmadığından daha düzgün yüzeyler elde edilmektedir.

Çalışmada geliştirilen matematiksel modelle, 6–25 A boşalım akımı, 25–100 μ s vurum süresi aralıklarında ve 12 mm derinliğe kadar İİH, EAH, BA değerleri ve gerekli ilk tel uzunlukları hesaplanabilmektedir. Bu sayede işleme öncesinde tel boyları hesaplanarak elektrot tasarımı yapılabilir.

Çalışmada, özellikle yüksek boşalım akımı ve vurum süresinde tellerde uç, kenar ve köşe aşınmaları gözlenmiştir. Tellerin uç, kenar ve köşe aşınmaları tellerin BA'sı yüksek olduğundan tel işleme boylarının hesaplanmasında ihmal edilebilmektedir.

Kullanılacak tellerin kesit alanlarına ve şekillerine bağlı olarak işleme toleransları ve oluşacak çıkıntılar matematiksel bağıntılarla hesaplanabilmektedir.

Çalışmada, tel demeti elektrodu ile işlemenin ekonomik incelenmesi sonucunda dolu elektrotlara nazaran elektrot üretim işçiliğinin azaldığı ve kaba işlemeye hızla başlanarak toplam işleme maliyetinin ve süresinin aşağıya çekilebileceği örnek uygulamalarla gösterilmiştir.

TDEO metodu, kalıp ve model imalatı yapan atölyelerde uygulanabilecek ekonomik, basit ve esnek bir prototip elektrot hazırlama yöntemidir. Bu yöntemin kullanımı elektro erozyon ile işlemede ihtiyaç duyulan elektrot sayısını ve elektrot hazırlanması sırasında geçen bekleme süresini ve maliyetleri azaltacaktır. Özellikle kaba işlemlerde uygulanması uygundur.

İleriye dönük olarak, farklı veya karışık boyutlu tel kesitlerine sahip tellerden oluşturulmuş elektrotlarla, işparçası yüzey oluşturma kabiliyetleri ve işleme performansları üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Bakır, prinç, bronz veya benzeri alaşımlardan oluşan tellerle oluşturulacak elektrotlarla farklı dielektrik sıvılar denenmeli ve işleme performansları karşılaştırılmalıdır. Kullanılacak elektrot bağlama adaptörlerinin tasarımları üzerine yapılacak çalışmalar bir telin veya tel gruplarının kolayca itilmesi veya çıkartılmasını kapsayacak şekilde yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Pandey, P.C., Shan, H.S., "Modern Machining Processes", **Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited**, New Delhi, 84–114 (1980).
2. Ho, K.H., Newman, S.T., Rahimifard, S., Allen, R.D., "State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 44: 1247–1259 (2004).
3. Springborn, R.K., "Non-Traditional Machining Processes", **American Society of Tool and Manufacturing Engineers**, Dearborn, Michigan, 105–133 (1967).
4. Uhlman, E., Piltz, S., Doll, U., "Machining of micro/miniature dies and models by electrical discharge machining-Recent development", **Journal of Materials Processing Technology**, 167: 488–493 (2005).
5. Masuzawa, T., "State of the art of machining", **Annals of the CIRP**, 49 (2): 473–488 (1993).
6. Ho, K.H., Newman S.T., "State of Art Electrical Discharge Machining (EDM)", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 43: 1287–1300 (2003).
7. Valantincic, J., Brissaud, D., Junkar, M., "EDM process adaptation system in toolmaking industry", **Journal of Materials Processing Technology**, 172: 291–298 (2006).
8. Altan, T., Lilly, B., Kruth, J.P., König, W., Tönshoff, H.K., Van Lutterverlt, C.A., Khairy, A.B., "Advanced techniques for die and mold manufacturing", **Annals of the CIRP**, 42(2): 707–716 (1993).
9. Altan, T., Lilly, B., Yen, Y.C., "Manufacturing of dies and molds", **Annals of the CIRP**, 50(2): 405–423 (2001).
10. Arthur, A., Dickens, P. M., Cobb, R. C., "Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrode", **Rapid Prototyping Journal**, 2(1): 4–15 (1996).
11. Prasad, K.D.V., Christodoulou, P., Subraminian, V.S., "Feasibility studies on the production of electro-discharge machining electrodes with rapid prototyping and the electroforming process", **Journal of Materials Processing Technology**, 89–90: 231–237 (1999).
12. Ding X. M., Fuh, J. Y. H., Lee, K. S., "Computer aided EDM electrode design", **Computer & Industrial Engineering**, 42: 259–269 (2002).

13. Ding, X.M., Fuh, J.Y.H., Lee, K.S., Zhang, Y.F., Nee, A.Y.C., "A computer aided EDM electrode design system for mold manufacturing", ***International Journal of Production Research***, 38(13): 3079-3092 (2000).
14. Snoney, R., Steaelens, F., Dekeyser, W., "Current trends in non-conventional material removal process", ***Annals of the CIRP***, 35(2): 467-480 (1986).
15. Petrofes, N.F., Gadalla, A.M., "Processing aspects of shaping advanced materials by electrical discharge machining", ***Advanced Materials & Manufacturing Processes***, 3: 127-153 (1988).
16. DiBitonto, D.D., Eubank, P.T., Barrufet, M.A., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model", ***Journal of Applied Physics***, 66 (9): 4095-4103 (1989).
17. CIRP, CIRP UNIFIED TERMINOLOGY, Edition 1986.
18. Coğun, C., Erden, A., "Elektro erozyon ile işleme (EDM) performansının bilgisayarlı denetiminin gerçekleştirilmesi", ***2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi***, 17-19: 105-112 (1986).
19. Erden, A., Temel, D., "Investigation on the use of water as a dielectric liquid in E.D.M.", ***METU***, Ankara, Türkiye, 437-440 (1978).
20. König, W., Jörres, L., "Aqueous solutions of organic compounds as dielectrics for EDM sinking", ***Annals of the CIRP***, 36 (1): 105-109 (1987).
21. Wong, Y.S., Lim, L.C., Lee, L.C., "Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces", ***Journal of Materials Processing Technology***, 48: 299-305 (1995).
22. Jilani, S.T., Pandey, P.C., "Experimental investigations into the performance of water as dielectric in EDM", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 242: 31-43 (1984).
23. Kunieda, M., Yoshida, M., Taniguchi, N., "Electrical discharge machining in gas", ***Annals of the CIRP***, 46 (1): 143-146 (1997).
24. Wrong, Y.S., Lim, L.C., Rahuman, I., Tee, W.M., "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric", ***Journal of Materials Processing Technology***, 79: 30-40 (1998).

25. Çoğun, C., Özerkan, B., "Effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining (EDM)", **G.U. Journal of Science**, 18 (2): 211-228 (2005).
26. Zhao, W.S., Meng Q.G., Wang, Z.L., "The application of research on power mixed EDM in rough machining", **Journal of Materials Processing Technology**, 129: 30–33 (2002).
27. Benedict, G.F., "Nontraditional Manufacturing Processes", **New York and Basel Marcel Dekker, Inc**, 207–229 (1987).
28. Çoğun, C., Akaslan, Ş., "The effect of machining parameters on tool electrode wear and machining performance in electric discharge machining", **KSME International Journal**, 16 (1): 46–59 (2002).
29. Lonardo, P.M., Bruzzzone, A.A., "Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM", **Annals of the CIRP**, 48(1): 123–126 (1999).
30. Yan, B.H., Wang, C.C., "The machining characteristics of Al₂O₃/6061Al composite using rotary electro-discharge machining with a tube electrode", **Journal of Materials Processing Technology**, 95: 107–111 (1999).
31. Wells, P.W., Willey, P.C.T., "The effects of variation in dielectric flow rate in the gap on wear ratio and surface finish during electro-discharges", **Conf. of Elect. Meth. of Mach., IEEE Publ.**, 133: 110–117 (1975).
32. Patel, M.R., Barrufet, M.A., Eubank, P.T., DiBitonto, D.D., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model", **Journal of Applied Physics**, 66 (9): 4104–4111 (1989).
33. Chen, Y., Mahdavian, S.M., "Parametric study into erosion wear in a computer numerical controlled electro-discharge machining process", **WEAR**, 236: 350–354 (1999).
34. Lin, J.L., Wang, K.S., Yan, B.H., Tarng, Y.S., "Optimization of the electrical discharge machining process based on the Taguchi method with fuzzy logics", **Journal of Materials Processing Technology**, 102: 48–55 (2000).
35. Lin, J. L., Lin, C. L., "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 (2002).

36. Samuel, M. P., Philips, P. K., "Powder metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 37(11): 1625–1633 (1997).
37. Tay, F. E. H., Haider, E. A., "The potential of plating techniques in the development of rapid EDM tooling", ***Int J. Adv. Manuf. Technol.***, 18: 892–896 (2001).
38. Mohri, N., Saito, N., Tsunekawa, Y., "Metal Surface Modification by electrical discharge machining with composite electrode", ***Annals of the CIRP***, 42 (1): 115–118 (1993).
39. Dimla, D. E., Hopkins, N., Rodge, H., "Investigation of complex rapid EDM electrodes for rapid tooling application", ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 23: 149–255 (2004).
40. Anıl, D., "Elektroerozyon ile işlemede stereolitografi tekniği yardımıyla hızlı elektrot üretimi", Doktora tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 55-95 (2006).
41. Furutani, K., Enami, T., Mohri, N., "Three-dimensional shaping by dot-matrix electrical discharge machining", 1997, ***Precision Engineering***, 21: 65–71 (1997).
42. Furutani, K., Enami, T., Mohri, N., "Dot-matrix electrical discharge machining for shaping fine structure", ***Proceedings of the IEEE Micro-Electro-Mechanical Systems***, Japan, 180–185 (1997).
43. Walczyk, D.E., Hardt, D.E., "Design and analysis of reconfigurable discrete dies for sheet metal forming", ***Journal of Manufacturing Systems***, 17(6): 436–454 (1998).
44. Furkan Mühendislik, Furkan Elektro Erozyon Tezgâhları Temel Bilgiler Kılavuzu, ***Furkan Mühendislik***, Ankara, 35–80(2000).
45. Asa Kaynak Malzemeleri Sanayi ve Ticaret A.Ş., "6 adımda sert lehim", ***Eğitim Broşürü***, 8–9, İstanbul, Türkiye.
46. Sances, J.A., Lopez de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Bravo, U., "Study on gap variation in multi-stage planetary", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 46(12–13): 1598–1603 (2006).
47. Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter J.S., "Static's for experiments, An introduction to design, Data analysis and model building", ***John Wiley & Sons Book Co.***, Canada, 453–509 (1978).

48. Köksal, B.A., "İstatistiksel analiz metotları", **Çağlayan Basımevi**, İstanbul, Türkiye, 355–458 (1995).
49. Chiu, Y.Y., Liao, Y.S., Lee, S.C., "Slicing strategies to obtain of feature relation in rapidly prototyped parts", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 44: 797–806 (2004).
50. Kelkar, A., Nagi, R., Koç, B., "Geometric algorithms for rapidly reconfigurable mold manufacturing of free-form objects", **Computer Aided Design**, 37: 1–16 (2005).
51. Kulkarni, P., Dutta, D., "An accurate slicing procedure for layered manufacturing", **Computer Aided Design**, 28: 683–697 (1996).

EKLER

EK-1. Üstel Fonksiyonların Regresyon Analizi

Z değişkenleri ile bağımsız X ve Y değişken değerlerinin arasında bir ilişki olduğu tahmin ediliyorsa ve bu ilişki X ve Y'nin kuvvetleri olarak öngörülüyorsa söz konusu denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$Z = AX^bY^c \quad (1.1)$$

Z üstel fonksiyonun doğal logaritması alınarak doğrusal hale dönüştürülmesi mümkündür.

$$\ln Z = \ln A + b \ln X + c \ln Y \quad (1.2)$$

Söz konusu denklemin A, b ve c katsayıları birbirinden bağımsız X, Y ve Z'in değerlerinden yararlanarak hesaplanmasında en küçük farklar doğrusuna dayanan çoklu regresyon analizinden faydalanır. Eş. 2'de verilen doğrusal hale gelmiş üstel fonksiyonun regresyon analizi ile çözülmesi için aşağıdaki üç normal denklemin bir arada çözülmesi gerekmektedir.

$$\sum \ln Z = na + b \sum \ln X + c \sum \ln Y \quad (1.3)$$

$$\sum \ln X \ln Z = a \sum \ln X + b \sum \ln X^2 + c \sum \ln X \ln Y \quad (1.4)$$

$$\sum \ln Y \ln Z = a \sum \ln Y + b \sum \ln Y \ln X + c \sum \ln Y^2 \quad (1.5)$$

Yukarıdaki denklemde $a = \ln A$ 'dır. Denklemin doğrudan çözümlenmesi mümkün olduğundan gerçek X, Y ve Z değerlerinin ortalama orijininin farkları aşağıdaki denklemlerle elde edilir

$$\ln z = \ln Z - \ln \bar{Z} \quad (1.6)$$

$$\ln x = \ln X - \ln \bar{X} \quad (1.7)$$

$$\ln y = \ln Y - \ln \bar{Y} \quad (1.8)$$

EK-1 (Devam) Üstel Fonksiyonların Regresyon Analizi

Farklar eşleniklerinden faydalanarak 3, 4 ve 5 eşleniklerini aşağıdaki gibi basitleştirebiliriz.

$$\sum \ln z = na + b \sum \ln x + c \sum \ln y \quad (1.9)$$

$$\sum \ln x \ln z = a \sum \ln x + b \sum \ln x^2 + c \sum \ln x \ln y \quad (1.10)$$

$$\sum \ln y \ln z = a \sum \ln y + b \sum \ln y \ln x + c \sum \ln y^2 \quad (1.11)$$

$\sum \ln z$, $\sum \ln x$ ve $\sum \ln y$ değerleri sıfıra eşit olacağından birinci denklem ortadan kalkacaktır. Böylece denklem sayısı aşağıdaki gibi ikiye inecektir.

$$\sum \ln x \ln z = b \sum \ln x^2 \quad (1.12)$$

$$\sum \ln y \ln z = c \sum \ln y^2 \quad (1.13)$$

Söz konusu eşlenikler b ve c katsayıları için çözülürse,

$$b = \frac{\sum \ln x \ln z}{\sum \ln x^2} \text{ ve } c = \frac{\sum \ln y \ln z}{\sum \ln y^2} \quad (1.14)$$

elde edilir. Üçüncü bilinmeyen olan a katsayısının değerini bulmak için basit regresyonda takip edilen verilerin otlamalarından yararlanılır.

$$\ln \bar{Z} = a + b \ln \bar{X} + c \ln \bar{Y} \quad (1.15)$$

Bu denklem a katsayısına göre çözülürse,

$$a = \sum \ln \bar{z} - b \sum \ln \bar{x} - c \ln \sum \ln \bar{y} \quad (1.16)$$

olarak bulunur. A katsayısı ise $A = e^a$ denkleminde bulunur.

EK-2. Standart Sapma Hatası

Çoklu regresyon metoduyla hesaplanmış olan teorik Z değerleri ile gerçek Z değerleri arasında fark bulunması doğaldır. Bu nedenle gerçek Z değeri ile hesaplanan Z değerleri arasındaki farkların kareli ortalamasının kareköküne eşit olan değer, gerçek ve teorik değerler arasındaki standart sapmayı verecektir. Bu standart sapma değeri gerçek Z değerlerin regresyon yüzeyi etrafındaki dağılımını verecektir. Z değerleri ile ilgili standart sapma formülü aşağıdadır.

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum (Z_{gerçek} - Z_{hesaplan})^2}{n - k}} \quad (2.1)$$

Bu formülde, n gerçek Z değerlerinin sayısını, k ise regresyon denklemlerindeki katsayı sayılarını bildirmektedir. EK-1’de verilen Z üstel fonksiyonun A, b ve c katsayıları bulunduğundan k=3’tür.

EK-3. Korelasyon

Bulunan Z fonksiyonun mevcut X ve Y değerlerine göre uyumunu, uyum derecesi ve yönünün belirlemek amacıyla çoklu korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Çoklu korelasyonda aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$R = \pm \sqrt{1 - \frac{\sum (Z_{gerçek} - Z_{hesaplanan})^2}{\sum (Z_{gerçek} - \bar{Z}_{ortalama})^2} \frac{(n-1)}{(n-k-1)}} \quad (3.1)$$

Analizinin uyum derecesi, gerçek Z değerleri ile hesaplanan Z değerleri arasındaki farkın karesinden oluşan toplam tesadüfî değişkenliğin gerçek Z değerlerinin ortalama Z değerinden olan farklarının karesinden oluşan toplam değişkenliğine bölümünden elde edilen regresyon katsayısına bağlıdır.

Toplam tesadüfî değişkenliğin toplam değişkenliğe olan oranın küçük olması korelasyon katsayısının büyük olmasına neden olmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DURSUN, Kadir
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.06.1964 – Kırklareli
 Medeni hali : Evli (İki çocuđu var)
 Telefonlar : Ev; (312) 2517453, İş; (312) 4585307

Eğitim

Derece	Eğitim Yeri	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	ODTÜ, Mak. Müh. Böl.	1990
Lisans	ODTÜ, Mak. Müh. Böl.	1987
Lise	Kayseri Sümer Lisesi	1981

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1987–1990	Gaziantep Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
1991–2001	Aselsan A.Ş.	Uzman Mühendis
2001–2007	Ulaştırma Bakanlığı	Mühendis
2007-Halen	Sağlık Bakanlığı	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Teknik fuarları takip etmek, Türk Halk ve Sanat müziğı dinlemek.

Katıldığı Önemli Eğitimler

- JAR 145 ve JAR 21 DOA eğitimleri, Hollanda, Amsterdam (5'er gün)
- TKY (3 ay, ODTÜ), ISO 9001 (TSE), Kaza-Kırım Eğitimi (1ay, 901 As. Fab.)
- Mekanik, elektronik ve optik sistemlerin bakımı ve kalibrasyonu, ABD, Dallas (Toplam 120 gün)