

**ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE
ELEKTROT AŞINMASININ TELAFİSİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

TAYFUN ÇAĞLAR DENİZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2009

ANKARA

Tayfun Çağlar DENİZ tarafından hazırlanan “ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE ELEKTROT AŞINMASININ TELAFİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bedri TUÇ

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa İ. GÖKLER

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Tarih: 30/01/2009

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

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

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.

Tayfun Çağlar DENİZ

**ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE
ELEKTROT AŞINMASININ TELAFİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Tayfun Çağlar DENİZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OCAK 2009**

ÖZET

Elektro erozyon ile işlemede (EEİ) elektrot aşınma karakteristikleri farklı işleme parametreleri için deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar matematiksel modellerle ifade edilmiştir. Bu çalışmada, farklı boşalım ve vurum süreleri ile farklı derinlik değerleri için işparçası ve elektrotta meydana gelen aşınmalar geometrik olarak tespit edilmiştir.

Daha sonra elektrot aşınması üzerinde varsayımlar yapılarak tersine mühendislik (reverse engineering-RE) metoduna dayalı işlemler yapılmış ve elektrotta oluşan geometrik aşınmalar minimuma indirilmeye çalışılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar Matlab paket programı kullanılarak kuvvet serisi cinsinden matematiksel olarak ifade edilmiştir. Böylece işparçası geometrisinin son şeklinin daha kısa sürede ve daha az sayıda elektrot kullanılarak elde edilmesi hedeflenmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.140

Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile işleme, tersine mühendislik, elektrot aşınması, elektrot aşınma telafisi

Sayfa Adedi : 60

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

**EXPERIMENTALLY INVESTIGATION OF ELECTRODE WEAR AMENDS
IN ELECTRIC DISCHARGE MACHINING
(M. Sc. Thesis)**

Tayfun Çağlar DENİZ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
JANUARY 2009**

ABSTRACT

In This study, electrode wear characteristics are investigated under various machining parameters are in electrical discharge machining (EDM). The obtained experimental results are modelled mathematically. In the study, the geometric wear characteristics of workpiece and tool electrodes are obtained for various pulse time, discharge current and machining depth settings.

Then, some assumptions are made for determination of electrode wear to apply reverse engineering approach is used in reduction of geometric electrode wear. The experimental results are expressed mathematically in terms of power series by using matlab software package. By this way, the final shape of the workpiece is obtained in a shorter while with a less number of electrodes.

Science Code : 914.1.140

**Keywords : Electric discharge machining, reverse engineering,
electrode wear compensation.**

Page Number : 56

Adviser : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Tezimin tamamlanmasında değerli katkılarından dolayı muhterem hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a teşekkür ederim.

Deneylerim sırasında yardımcı olan Araştırma Görevlisi Sayın Ali ÖZGEDİK'e ve Yusuf ATAĞ'a laboratuvar çalışmalarında ve deneyler esnasında bütün içtenlikleriyle her türlü yardımı esirgemeyen Takım Tezgâhları Laboratuvarı sorumlusu Uzman Sayın Kadir YILMAZ'a, Jeoloji ve Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvarı sorumlusu Sayın Aydın GÖKÇE'ye yürekten teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmalarım sırasında ihtiyaç duyduğum her türlü yardımını, sonsuz sevgisini ve desteğini veren rahmetli babam Yaşar DENİZ'e, sevgili annem Emine DENİZ'e ve kardeşim Seval DENİZ'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMENİN (EEİ) TEMEL PRENSİPLERİ	6
2.1. EEİ Yöntemi	6
2.2. EEİ'nin Fiziksel Prensibi	7
2.3. Elektriksel parametreler	9
2.4. EEİ'de Performans Karakteristikleri	11
3. DALMA ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEMEDE ELEKTROT AŞINMASI	12
3.1. Geometrik Aşınma	12
3.1.1. Yan yüzey aşınması	13
3.1.2. Köşe aşınması	14
3.1.3. Ön yüzey aşınması	20
4. DENEYLER	23
4.1. Elektro Erozyon Tezgahı	23

	Sayfa
4.2. Elektrot	24
4.3. Elektrot Bağlama Adaptörü	25
4.4. Dielektrik Sıvı	27
4.5. İşparçası	27
4.6. İşleme Parametreleri	28
4.7. Elektrot Aşınmalarının Tespiti	31
4.8. Elektrot Geometrisinin Revize Edilmesi	32
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	34
5.1.Çıkıntısız Elektrotlarla Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	34
5.2. Çıkıntısız Elektrotlarla Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	36
5.3. Çıkıntılı ve Çıkıntısız Elektrotlarda A1, A2 ve A3 Değerleri ve Karşılaştırılması	42
5.4. Çıkıntı Geometrisinin Matematiksel Modelle İfadesi Ve Modelin Denenmesi	47
5.4.1. Modelleme	47
5.4.2. Sonuçların istatiksel analizi	48
5.4.3. Modelin verdiği sonuçların denenmesi	50
6. SONUÇ	51
KAYNAKLAR	52
EKLER	55
ÖZGEÇMİŞ	60

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. EEİ tezgahının teknik özellikleri	24
Çizelge 4.2. Elektrot malzemesi kimyasal bileşimi	24
Çizelge 4.3. İşparçası malzemesi kimyasal bileşimi	27
Çizelge 4.4. İşleme parametreleri	29
Çizelge 4.5. Deney tasarımı	29
Çizelge 5.1. Deney sonuçları	34
Çizelge 5.2. Çıkıntılı elektrotlarla yapılan deney sonuçları	41
Çizelge 5.3. Çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarla yapılan deney sonuçları	42
Çizelge 5.4. Sonuçların istatistiksel analizi	48
Çizelge 5.5. Deneysel ve teorik k değerleri	49
Çizelge 5.6. Teorik k değerine bağlı oluşturulan çıkıntılarla yapılan işlemler	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. EEİ' nin şematik görünüşü	6
Şekil 2.2. EEİ tezgâhının ana kısımları	7
Şekil 2.3. EEİ ile işlemenin fiziksel prensibi	7
Şekil 2.4. Elektrot ile iş parçası arasındaki erozyon farklılığı	9
Şekil 2.5. Voltaj kontrollü bir vurum jeneratöründe vurum süresince gerilim ve akım dalga biçimleri	10
Şekil 3.1. İşleme aralığı modeli	12
Şekil 3.2. Geometrik aşınma bileşenleri	13
Şekil 3.3. Elektrot yan yüzey aşınması	13
Şekil 3.4. Elektrot köşe aşınması	14
Şekil 3.5. Elektrot iç köşe ve dış köşe aşınması	14
Şekil 3.6. Köşe aşınmasının boşalım akımı ile değişimi	16
Şekil 3.7. Köşe aşınmasının vurum süresi ile değişimi	16
Şekil 3.8. Elektrot yüzeyine yapışan karbon tabakası	17
Şekil 3.9. Püskürtme tipi ve statik tipi dielektrik sıvı uygulamalarında köşe yarıçap değişimi	18
Şekil 3.10. Püskürtme tipi ve emme tipi dielektrik sıvı uygulamalarında köşe yarıçap değişimi	19
Şekil 3.11. Geometrik aşınma bileşenleri	20
Şekil 4.1. Elektrot malzemesi ölçüleri	25
Şekil 4.2. İşparçası merkezleme aparat boyutları	27
Şekil 4.3. İşparçası malzemesi ölçüleri	28
Şekil 4.4. İşleme sonrası elektrot geometrisi	32

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. İşleme sonrası elektrotta meydana gelen aşınma alanları	32
Şekil 4.6. Elektrot üzerinde oluşturulan geometrik çıkıntılar	33
Şekil 5.1. Elektrot üzerinde oluşturulan giriş üçgen çıkıntı	36
Şekil 5.2. Elektrot üzerinde oluşturulan dış teğet üçgen çıkıntı	38
Şekil 5.3. K değerine bağlı olarak oluşturulan çıkıntı	40
Şekil 5.4. 25A, 200 μ s'de çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarda h ve A1 değerlerinin işleme derinliği ile değişimi	43
Şekil 5.5. 25A, 200 μ s'de çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarda k ve A2 değerlerinin işleme derinliği ile değişimi	44
Şekil 5.6. 25A, 200 μ s'de çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarda l ve A3 değerlerinin işleme derinliği ile değişimi	45

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Furkan EDM M50 A elektro erozyon tezgâhı	23
Resim 4.2. Elektrot ve iş parçası bağlama detayları	26
Resim 4.3. Elektrot bağlama adaptörü	26
Resim 4.4. İşleme sonrası elektrot ve işparçası	31
Resim 5.1. 200µs vurum süresi, 25A akım ve 5mm işleme derinliği değerlerinde işleme sonrası alan değerleri	35
Resim 5.2. İç teğet çıkıntı ile işleme sonrası elektrot ve işparçası geometrisi	37
Resim 5.3. Dış teğet çıkıntı ile işleme sonrası elektrot ve işparçası geometrisi	39
Resim 5.4. 200µs vurum süresi, 25A akım ve 5mm işleme derinliği değerlerinde işleme sonrası görüntüleri	46

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/san.
h	İşleme derinliği, mm
i_e	Ortalama çalışma akımı, amper
i_d	Boşalım akımı, amper
n	Deney sayısı, adet
r	Yarıçap, mm
R	Korelasyon katsayısı
R_a	İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü, μm
t_c	Vurum çevrim süresi, μs
t_d	Boşalım süresi, μs
$t_{i\text{ş}}$	İşleme süresi, dak.
t_l	Gecikme süresi, μs
t_p	Bekleme süresi, μs
β	EEİ açısı, derece
k	Çıkıntı boyutu, mm
$\sum z$	Bağımsız gerçek z değerlerinin toplamı
$\bar{z}$	Z değerlerinin ortalaması
σ_z	Z değerlerinin standart sapması

Kısaltmalar	Açıklama
-------------	----------

BA	Bağıl aşınma, %
BSD	Bilgisayar Sayısal Denetim
EAH	Elektrot aşınma hızı, mm ³ /dak.
EEİ	Elektro-Erozyon ile İşleme
HRC	Rockwell Sertliği-C Skalası
İİH	İşparçası işleme hızı, mm ³ /dak.
TM	Tersine Mühendislik

1. GİRİŞ

Genel

Endüstride kalıp ve takım imalatındaki isteklerin sürekli artması, değişik teknolojilerin bu alanda uygulanması zorunluluğunu da beraberinde getirmiştir. Elektro-Erozyon İle İşleme (EEİ), takım tezgâhlarında işlenmesi oldukça zor olan geometrisi karmaşık, yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve çok sert malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılan alışılmamış imal usullerinden birisidir. EEİ, dielektrik sıvı içerisinde elektrot ile işparçası arasında oluşan elektriksel boşalımın iş parçası yüzeyinden çok küçük bir hacmi aşındırması esasına dayanır. İletken elektrot (erkek kalıp), iş parçasında (dişi kalıp) oluşturulacak boşluğa göre hazırlanır. Karmaşık yapıya sahip kalıp boşluklarının ve işparçalarının elektrot ile işparçası arasında doğrudan fiziksel temas olmadan yüksek doğruluk ve hassasiyetle işlenebilmesi bu yöntemi günümüz kalıp üretimindeki vazgeçilmez metotlardan biri kılmıştır. Elektriksel kıvılcımın aşındırma etkisi ilk olarak 1768 yılında İngiliz bilim adamı Priestly tarafından keşfedilmiştir. Elektrik kontağındaki aşındırıcı etkiyi yok etmek için yapılan çalışmalar sırasında Rus bilim adamları B. R. ve N. I. Lazarenko 1943 yılında elektriksel kıvılcımın aşındırıcı etkisini faydalı bir şekilde kullanmaya karar vermişler ve metal işlenmesi için önemli bir yöntem geliştirmişlerdir. Lazarenko devresi olarak bilinen kıvılcım jeneratör devresi ile ilk EEİ tezgâhını ortaya çıkarmışlardır. Bu jeneratör devresinin geliştirilmiş bir tipi günümüz erozyon tezgâhlarında da kullanılmaktadır [1]. 1960'lı yılların sonuna doğru elektrik devrelerinin ve kontrol sistemlerin geliştirilmesi, EEİ'nin güvenilir ve hassas bir talaş kaldırma metodu olarak tanınmasını sağlamıştır. Özellikle 1980'li yıllarda bilgisayar sayısal denetimli (BSD) tezgâhların geliştirilmesi, EEİ'de işparçası işleme hızının (İİH) artmasını, elektrot aşınma hızının (EAH) azalmasını ve işparçası yüzey pürüzlülüğünün azalmasını sağlamıştır. Bu gelişmeler iş parçasında hassas işlemlerin yapılmasını, EEİ tezgâhlarının BSD olarak geliştirilmesini ve imalat endüstrisindeki yerini almasını sağlamıştır.

Mevcut yöntemlerle işlenmesi çok zor olan metallerin bu yöntemle işlenmesi hem süre hem de maliyet açısından büyük kazanç sağlamıştır [2]. Günümüzde pres kalıpları, enjeksiyon kalıpları, dövme kalıpları, ekstrüzyon kalıpları, toz sıkıştırma kalıpları bu yöntemin kullanıldığı alanlardır [3]. EEİ yönteminin kullanım alanını genişletmeye yönelik birçok deneysel çalışma mevcuttur. 30-50 µm çapındaki döner elektrotla deliklerin işlenmesi [4], klasik delme operasyonu ile oluşturulan kalıplardaki soğutma kanallarının keskin köşe ve düz hatlarının sebep olduğu verimsiz akışı gidermek için eğrisel soğutma kanallarının işlenmesi [5], dielektrik sıvı içerisine karıştırılmış metal tozları ile yüzey bitirme işlemi [6], kompozit elektrotla yüzey modifikasyonu [7], çevresel işleme [8] gibi çalışmalar bu deneysel çalışmalara verilebilecek bazı örneklerdir.

EEİ işleminde karşılaşılan ana problemler şunlardır:

1) EEİ işleminde talaş kaldırma, işparçası malzemesinin ergimesi ve buharlaşması ile gerçekleşmektedir [9]. İşleme esnasında işparçasından talaş kaldırılırken elektrot da aşınmaktadır [10, 11].

2) EEİ ile işlenmiş işparçalarının yüzeyinde hızlı ve düzensiz soğumalar nedeniyle tekrar katılaşmış bir bölge ve bunun altında ısıl etkilenecek çok katmanlı bir bölge oluşur. Bu bölgelerden işparçası yüzeyine yakın olan kısım beyaz tabaka olarak anılır. Bu tabaka çok yüksek sertliğe ve çok kırılkan bir yapıya sahiptir. Beyaz tabaka yüzeyinde ani soğumalar sebebiyle kalıcı gerilmelerden dolayı mikro çatlaklar ve yüzeye çıkamayan içeride kalan gazlar sebebiyle gözenekler oluşur [9,12, 13, 14].

3) Derin işlemlerde dielektrik sıvı uygulama şeklinin ve hızının yeterli düzeyde olmaması halinde işleme aralığında işleme artıklarının meydana getirdiği bölgesel kirlenme nedeniyle işparçası ile elektrot arasında kısa devre ve ark tipi vurumların oluşumunun arttığı belirlenmiştir. Bunun sonucu

olarak İİH'da düşüş, EAH'nda artış, kötü yüzey kalitesi ve tolerans dışı boyutlar elde edilir [11, 15]. Dielektrik sıvı uygulamasının başarılı olması, dielektrik sıvı uygulama yöntemine, hızına ve iki vurum arasındaki bekleme süresine bağlıdır. Bekleme süresi ne kadar kısa seçilirse kısa devre ve ark oluşumu riski de o oranda artar [14].

4) Kaba işleme ile bitirme işlemleri arasında elektrot değişimi nedeniyle sapmalar, istenen işleme ölçülerinin dışında kalınmasına neden olur [14].

Yukarıda sıralanan problemlerden en önemlisi elektrodun aşınmasıdır. İşleme esnasında elektrotta meydana gelen aşınma elde edilecek işparçası geometrisinin son şeklini doğrudan etkileyerek şekil bozulmasına neden olmaktadır [10, 16]. Son teknolojik gelişmeler ve yapılan çalışmalar EAH ve bağlı aşınma (BA) değerlerini çok küçük değerlere düşürmesine rağmen tamamen ortadan kaldıramamıştır [16]. EEİ ile işlenen işparçalarının geometrik ve boyutsal karakteristikleri doğrudan elektrotun aşınma karakteristiklerine bağlıdır. Bunun yanı sıra EEİ işleminin maliyeti kullanılacak olan elektrodun malzeme maliyetine, üretim maliyetine ve özellikle sayısına bağlıdır. Birçok EEİ işleminde elektrot maliyeti toplam işleme maliyetinin %70'inden fazladır. Bu nedenle EEİ işleminin planlanması esnasında, elektrotun aşınma karakteristiklerinin çok iyi incelenerek elde edilen verilere göre elektrot geometrisinin oluşturulması gerekir. Elektrot aşınma karakteristiklerinin incelenmesi sonucunda tasarlanan elektrotlar ile yapılan işlemler, maliyeti ve hataları düşük seviyede tutarak EEİ yönteminin daha ekonomik bir yöntem olmasını sağlar. İşlem esnasında elektrotta meydana gelen aşınmanın elde edilecek işparçası geometrisinin son şeklini doğrudan etkilediği ve şekil bozulmasına neden olduğu belirtilmiştir [10, 16]. Elektrottaki aşınma farklı bölgelerde değişik şekil bozulmalarına neden olmaktadır. İşleme aralığındaki dielektrik sıvıda meydana gelen bölgesel kirlenmeler elektrot ön yüzeyindeki aşınma profilinin farklılığına neden olmaktadır [14]. Elektrodun yan yüzeylerindeki aşınmanın, keskin köşelerdeki ve ön

yüzeydeki aşınmadan farklı karakterde olduğu gözlenmiştir. Bu farklılık yan yüzeylerin konikleşmesi ile ifade edilmiştir. İşleme aralığındaki elektriksel alan, elektrodun keskin köşelerinde ve yan yüzeye yakın bölgelerinde daha yüksek düzeydedir. Elektriksel alan değerinin yüksek olması bu bölgelerde boşalım vurumlarının daha yoğun olmasına neden olmaktadır. Elektrodun keskin köşelerindeki aşınmanın, köşe yuvarlanması şeklinde olduğu ve bu yuvarlanmanın bir çember parçası ile ifade edilebileceği belirtilmiştir [16]. Ön yüz, yan yüz ve köşe aşınmasını, elektrot aşınmasının geometrik bileşenleri olarak ifade etmek doğru olacaktır. Elektrot aşınması ile ilgili sınırlı sayıdaki teorik ve deneysel çalışmalar elektrot aşınmasının geometrik bileşenlerinin bir bütün halinde ele alınmadığını göstermektedir [13].

Vurum süresinin, akımın ve püskürtme basıncının artışı ile elektrot köşe yarıçap aşınmasının arttığı ve işleme parametreleri ile köşe aşınmaları arasındaki ilişkinin güç fonksiyonu kullanılarak ifade edilebileceği daha önceden tespit edilmiştir [16].

Amaç

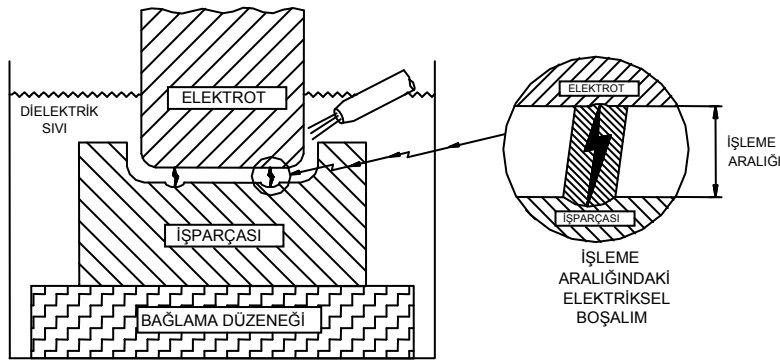
EEİ işlemi sonrası oluşan işparçası geometrisinin elektrot aşınma geometrisinden doğrudan etkilendiği ve bu sebeple elektrot aşınma geometrisinin kritik bir problem olduğu yapılan literatür araştırmasında elde edilen bir sonuçtur. Bu bilgiler ışığında elektrot aşınma geometrisi ile ilgili az sayıda çalışma bulunduğu ve konu üzerinde yapılacak kapsamlı deneysel ve teorik çalışmaların önemli olacağı anlaşılmıştır. Literatürde elektrot aşınma karakteristikleri deneysel olarak incelenmiş ve bulunan sonuçlar için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Ancak, işparçası ve elektrotta oluşan şekil bozukluklarını gidermek amacıyla bu çalışmada üzerine eğilinen Tersine Mühendislik, (TM) yaklaşımına rastlanmamıştır. Bu çalışmada, TM metodunun uygulanmasında, önce farklı boşalım akımı, vurum süreleri ve farklı işleme derinlik değerleri için işparçası ve elektrotta meydana gelen geometrik bozulmaların (shape degeneration) tespit edilmesi

gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elektrottaki aşınmalar incelenerek bazı geometrik eklentilerin yapılması ve elektrotta dolayısıyla işparçasında oluşan şekil bozukluklarının minimuma indirilmesi amaçlanmıştır. Böylece işparçası geometrisinin son şeklinin daha kısa sürede ve daha az masrafla elde edilmesi hedeflenmiştir. Son olarak da deneylerde elde edilen aşınma verileri Matlab paket programı kullanılarak kuvvet serisi cinsinden ifade edilmiştir.

2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMENİN (EEİ) TEMEL PRENSİPLERİ

2.1. EEİ Yöntemi

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

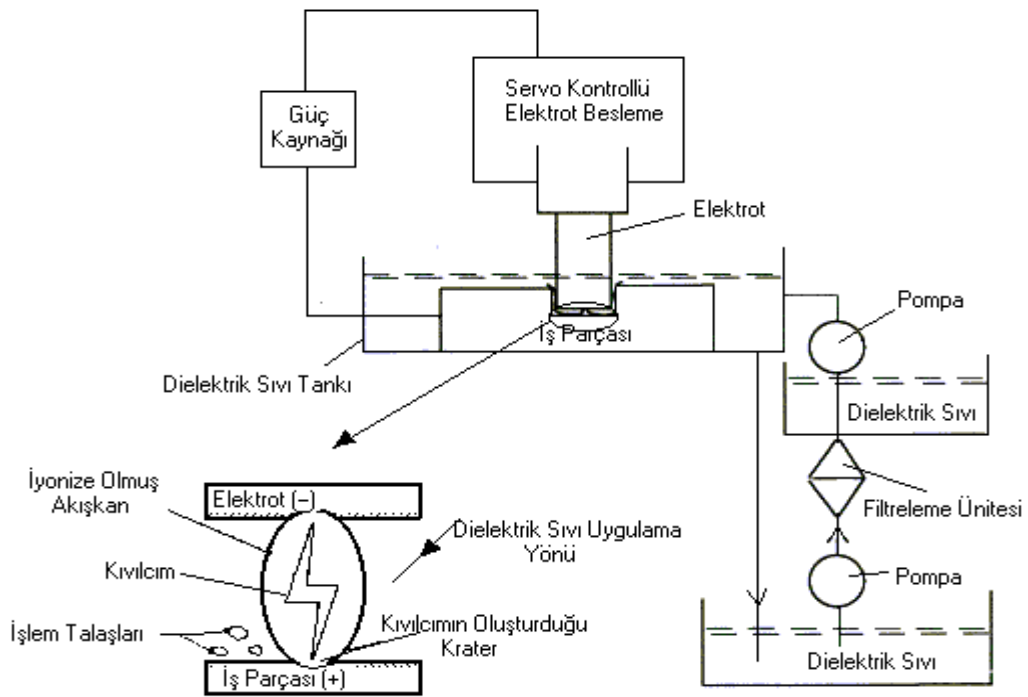


Şekil 2.1. EEİ' nin şematik görünüşü

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 mekanizmanın iş parçasına doğru hareket ettirilmesi sayesinde gerçekleşir.

EEİ'de, 10^5 ile 10^7 W/mm² arasındaki yüksek yoğunluklu ısı enerjisi tarafından oluşturulan plazma kanalının anot ve katot uçlarında ortalama 8 000 °C ile 20 000 °C arasında sıcaklıklar oluşur [11,12]. Her bir elektriksel boşalımda 10^{-6} ile 10^{-4} mm³ aralığında malzeme hacmi ayrılır. Malzeme işleme hızı ise uygulanan işleme parametrelerine bağlı olarak 2 ile 400 mm³/dak arasında değişir [11].

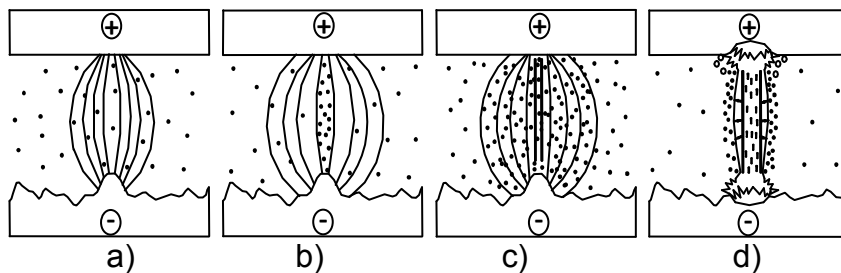
EEİ tezgahlarının ana kısımları; vurum jeneratörü, kontrol paneli, servo kontrol mekanizması, elektrot besleme (ilerleme) mekanizması, elektrot bağlama adaptörü, işparçası bağlama düzeneği, dielektrik sıvı tankı, dielektrik sıvı pompası, dielektrik sıvı filtresi ve alt tabladır (Şekil 2.2).



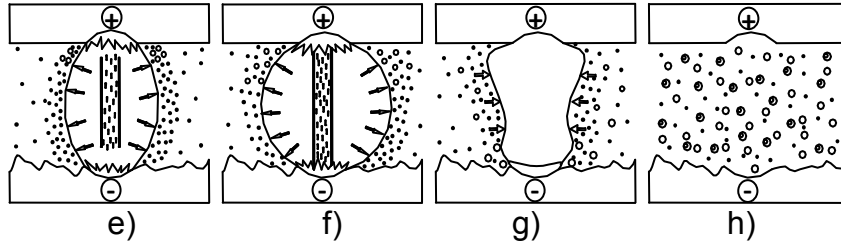
Şekil 2.2. EEİ tezgahının ana kısımları

2.2. EEİ'nin Fiziksel Prensibi

Elektriksel boşalım sırasında, EEİ'nin üç temel elemanı olan elektrot, işparçası ve dielektrik sıvı arasında ardışık fiziksel olaylar oluşmaktadır [13]. İşlemler sırayla Şekil 2.3' de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. EEİ ile işlemin fiziksel prensibi [13].



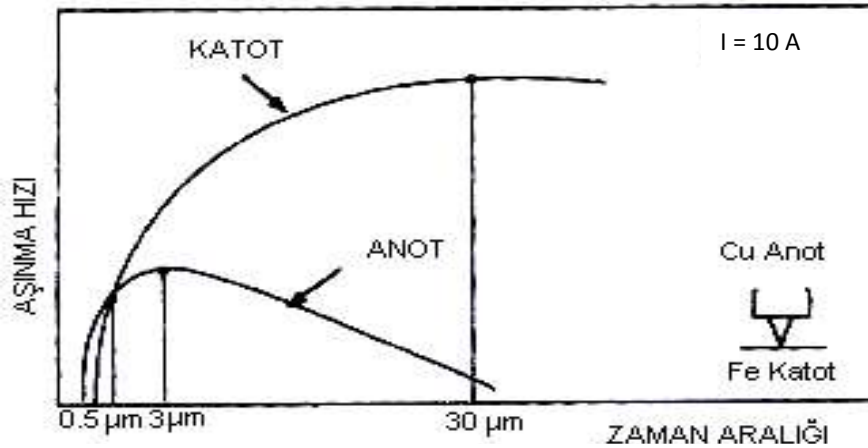
Şekil 2.3. (Devam) EEİ ile işlemin fiziksel prensibi [13].

Şekil 2.3.a'da elektrot ile iş parçası 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 iş parçası ve elektrot arasında manyetik alan oluşmasına sebep olur. İşlemin başlangıcında hiçbir elektrik akım akışı olmaz. Bunun nedeni dielektrik sıvının elektrotu ve iş parçasını 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 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 bölgelerde ısı hızla artar, elektrot ile iş parçasının bir kısmı buharlaşır ve plazma kanalı oluşur. Şekil 2.3.e'de Şekil 2.3.d' deki plazma kanalı vurum süresince 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 tutar. Şekil 2.3.g'de 3 J/mm^3 'e kadar olan enerji yoğunlukları, yerel plazma sıcaklıklarının 40 000°K'e kadar ulaşmasına neden olur. Yoğunluk etkisiyle dinamik plazma basıncı 3 kbar'a kadar çıkar. Vurum süresi boyunca yüksek plazma enerjisi iş parçası ve elektrot çiftini ısıtma ile eritir. Fakat yüksek plazma basıncı sebebiyle sınırlı elektrot malzemesinde buharlaşması olur. Akım kesildiğinde plazma kanalı kesilir ve buhar kabarcıkları söner. Bu da elektrot ve iş parçası

yüzeylerindeki aşırı ısınmış sıvı partiküllerin dielektrik sıvı içinde patlamasına sebep olur. Şekil 2.3.g'de dielektrik sıvı ergimiş 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 10–150 μm genişliğinde boşluklar oluşur.

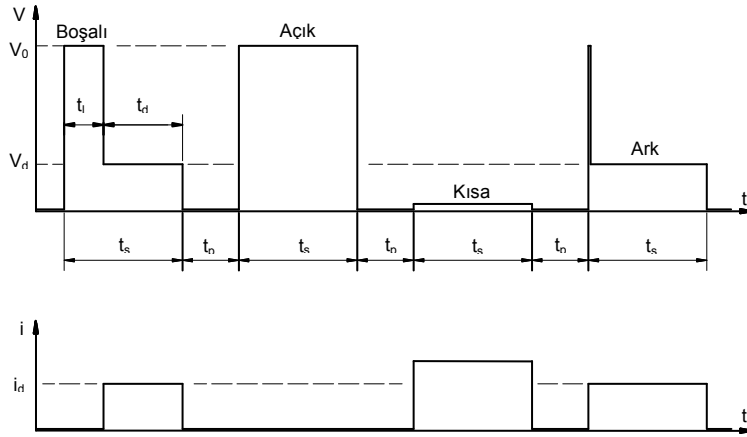
Vurum süresinin başlangıcında hızlı hareket eden elektronların bombardımanı sebebiyle elektrot ilk başta hızla erimesine rağmen, plazma basıncının artması yerel ısı akışında azalmaya neden olur. Bu ise hızla eriyen elektrot malzemesinin birkaç mikro saniye içerisinde tekrar katılaşmasına neden olur. Büyük kütleli pozitif iyonların daha düşük hareket kabiliyetleri sebebi ile iş parçasının ergimesi daha geç olur (Şekil 2.4) [14].



Şekil 2.4. Elektrot ile iş parçası arasındaki erozyon farklılığı [14]

2.3. Elektriksel parametreler

İşleme aralığındaki boşalım işleminin tipik gerilim $V(t)$ ve akım değişimleri $i(t)$ Şekil 2.5'de gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurum süresince gerilim ve akım dalga biçimleri [15,16]

EEl'de elektriksel parametreler 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 iş parçası arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısı.

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

- h) Açık devre gerilimi (V_0): 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): Boşalım süresince uygulanan güç.

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

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

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.

2.4. EEİ'de Performans Karakteristikleri

EEİ'de işleme performansı genel olarak iş parçası işleme hızı ($\dot{V}_H$), elektrot aşınma hızı (EAH), bağıl aşınma (BA) ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilir;

$$\dot{V}_H [\text{mm}^3 / \text{dak}] = \frac{\text{İşparçası işleme hacmi [mm}^3 \text{]}}{\text{Toplam işleme süresi [dak]}} \quad (2.7)$$

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

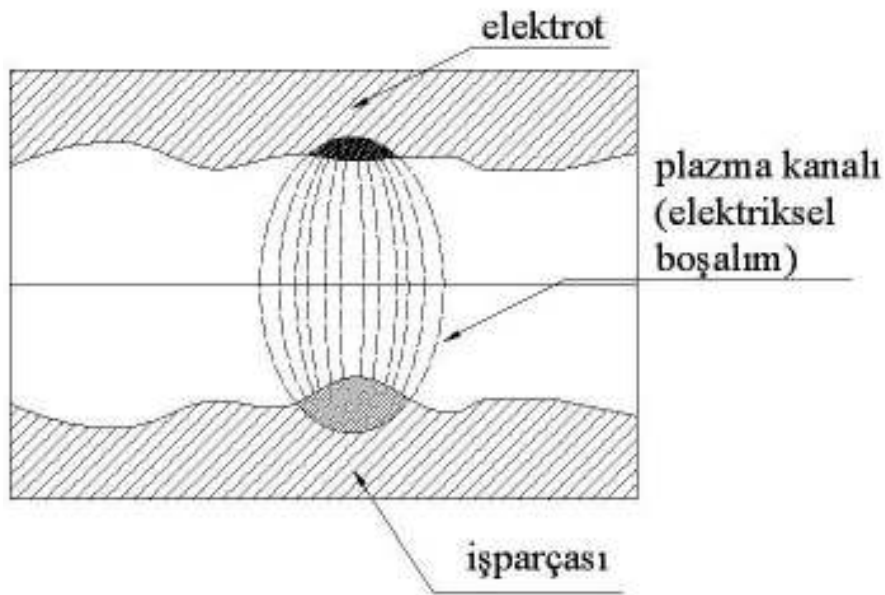
$$\text{BA [\%]} = \frac{\text{EAH}}{\dot{V}_H} \times 100 \quad (2.9)$$

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

EEİ'de $\dot{V}_H$ yüksek, EAH düşük ve ortalama yüzey pürüzlülüğü düşük durumları, EEİ'de iyi performans karakteristikleri olarak adlandırılır.

3. EEİ'DE ELEKTROT AŞINMASI

EEİ'de işleme aralığında oluşan her bir elektriksel boşalım ile işparçası malzemesinden bir miktar talaş kaldırılırken elektrot malzemesinden de belirli bir miktarda malzeme aşınır (Şekil 3.1). Elektrot malzemesindeki bu aşınım, işleme sonunda elde edilecek işparçasının boyut hassasiyetini doğrudan etkiler.



Şekil 3.1. İşleme aralığı modeli

Elektrot malzemesinde meydana gelen aşınma üç ana karakteristik altında incelenebilir:

1. Elektrot aşınma hızı (EAH)
2. Bağıl aşınma (BA)
3. Geometrik aşınma

3.1. Geometrik Aşınma

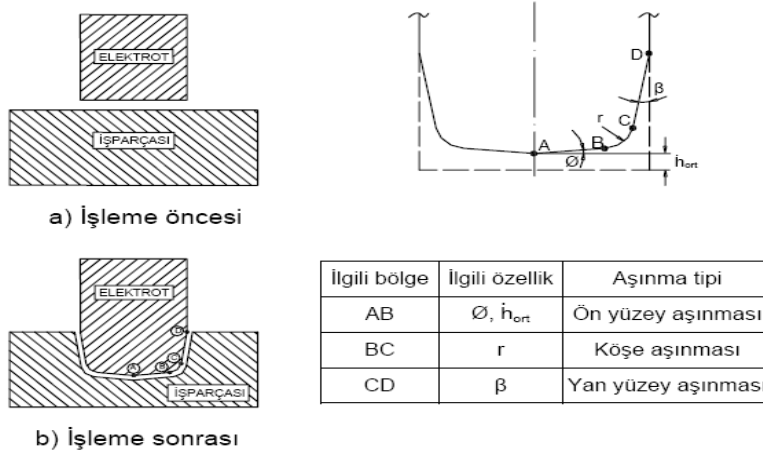
EEİ'de elektrot üzerinde oluşan geometrik aşınma üç bölgede incelenebilir [13] Bunlar;

1. Yan yüzey aşınması,

2. Köşe aşınması,

3. Ön yüzey aşınmasıdır

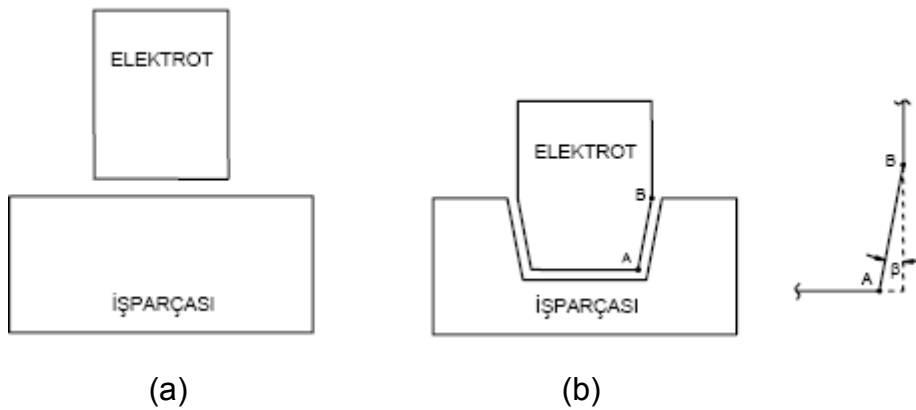
Şekil 3.2. elektrot üzerinde meydana gelen geometrik aşınma bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 3.2. Geometrik aşınma bileşenleri [13].

3.1.1. Yan yüzey aşınması

EEİ esnasında elektrodun işparçası ile temas halinde olan yan yüzeyinde oluşan aşınma geometrik olarak koniklik ile ifade edilir.



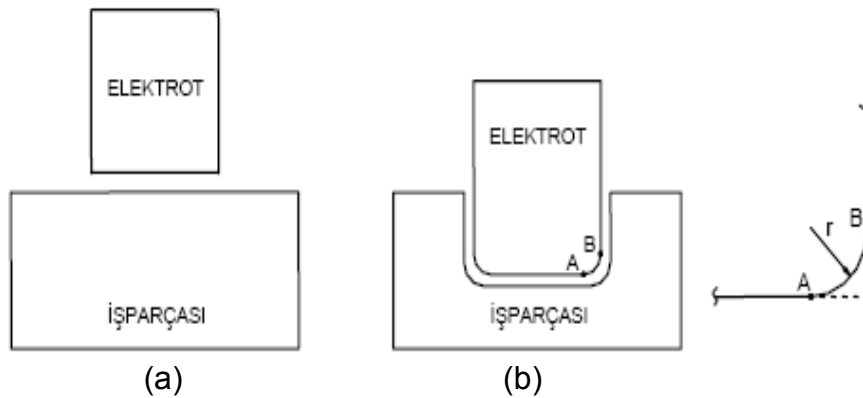
Şekil 3.3. Elektrot Yan Yüzey Aşınması

a) işleme öncesi b) işleme sonrası

Bu konikliğin nedeni, besleme yönünde elektrot yan yüzeyindeki noktaların kaldıracığı talaş hacminin basamak basamak azalması ve ilerleme yönüne zıt istikametteki yan yüzey üzerinde bulunan noktalarda aşınmanın basamak basamak azalmasıdır. EEİ'de yan yüzeylerde oluşan koniklik açısı çok küçüktür. Koniklik açısı genelde kalıp üretiminde kullanılan EEİ yöntemi için bir avantaj oluşturur. Bunun nedeni ise kalıp yan yüzeylerinde oluşan konikliğin kalıp içindeki ürünün çıkartılmasında kolaylık sağlamasıdır. Diğer geometrik aşınma bileşenleri olan köşe aşınması ve ön yüzey aşınması işleme parametrelerine daha fazla bağımlı olup işparçası boyutlarını olumsuz yönde etkiler.

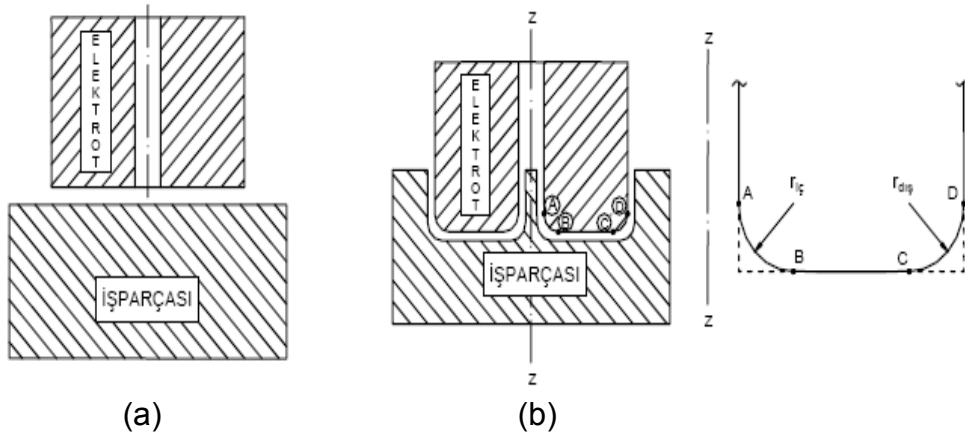
3.1.2. Köşe aşınması

EEİ'de kullanılan elektrotların keskin köşelerinde işlemenin başlamasıyla birlikte çok hızlı bir aşınma gerçekleşir. Bu aşınma Şekil 3.4'de gösterildiği gibi köşelerin yuvarlanması şeklindedir [16]. Köşelerdeki bu yuvarlanma genelde dairesel bir yay parçası ile ifade edilir [17, 18]. Bu dairesel yay yarıçap değeri işleme başlangıcında çok hızlı bir şekilde artar. Yarıçap değeri büyüdükçe artış miktarı azalır.



Şekil 3.4. Elektrot köşe aşınması

a) işleme öncesi b) işleme sonrası



Şekil 3.5. Elektrot iç köşe ve dış köşe aşınması

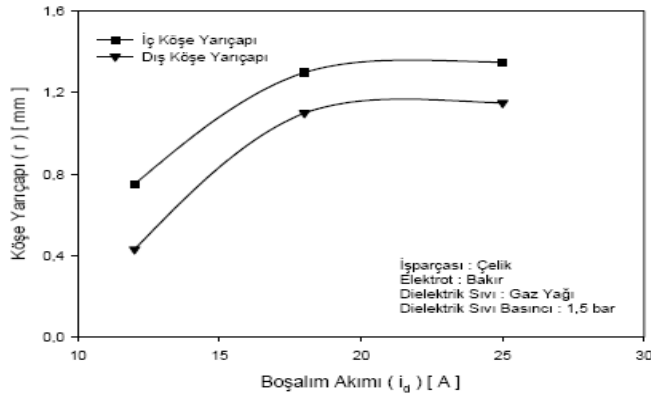
a) işleme öncesi b) işleme sonrası

Köşe aşınmasını etkileyen çok sayıda işleme parametresi vardır. Bunlardan etkili olanlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Boşalım akımı
2. Vurum süresi
3. Dielektrik sıvı özellikleri
4. İşparçası malzemesi özellikleri
5. Elektrot boyutu
6. Elektrot köşe açısı

Boşalım akımı

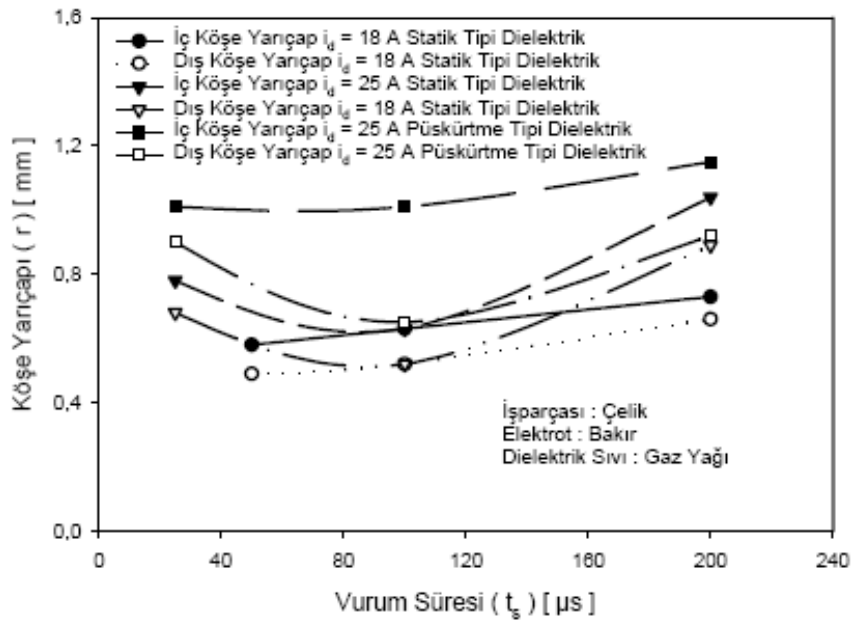
Akımın artışı ile iç köşe ve dış köşe yarıçap değerleri de artar (Şekil 3.6)[16]. Bunun nedeni akım değerinin artışı ile elektrot aşınma hızının da artmasıdır. Ayrıca yüksek enerji yoğunluklarının geometrik aşınmayı hızlandırdığı bilinmektedir.



Şekil 3.6. Köşe aşınmasının boşalım akımı ile değişimi [16].

Vurum süresi

Vurum süresindeki artış ile iç ve dış köşe yarıçapı değerlerinde belirgin bir değişim görülmez. Vurum süresi değişimi ile boşalım akımı ve dielektrik sıvı uygulama özelliklerinin farklı kombinasyonları farklı değişimler gösterir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Köşe aşınmasının vurum süresi ile değişimi [16].

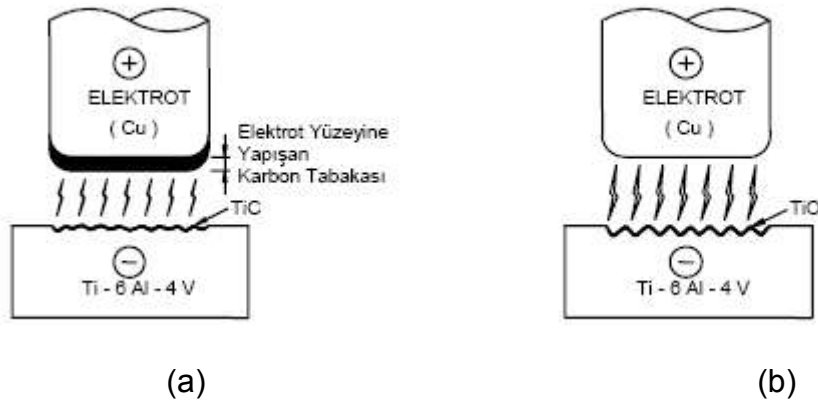
Dielektrik sıvı özellikleri

Köşe aşınması üzerinde dielektrik sıvı özelliklerinin etkisi önemlidir. Dielektrik sıvının en etkili özellikleri ise;

- i) Dielektrik sıvının cinsi,
 - ii) Dielektrik sıvı uygulama şekli,
 - iii) Dielektrik sıvı basıncı,
 - iv) Dielektrik sıvı debisi,
- olarak sıralanabilir.

- i) Dielektrik sıvının cinsinin köşe aşınmasına etkisi

Karbon içeren dielektrik sıvıların işleme sırasında bozunması ile karbon ve bileşikleri açığa çıkar. Açığa çıkan karbon elementleri yüksek ısı nedeniyle elektrot yüzeyine yapışarak burada bir karbon tabakası oluşturur. Bu tabaka elektrot yüzeyini aşınmaya karşı korur. İşleme başlangıcında keskin köşelere karbon yapışması olmadığından köşeler hızla aşınarak eğrisel bir yüzey oluşturur. Zamanla bu yüzeye karbon elementleri yapışarak koruyucu bir tabaka oluşturur (Şekil 3.8). Köşelerdeki yarıçap artış hızındaki azalma da bu koruyucu tabakanın oluşmasındandır.



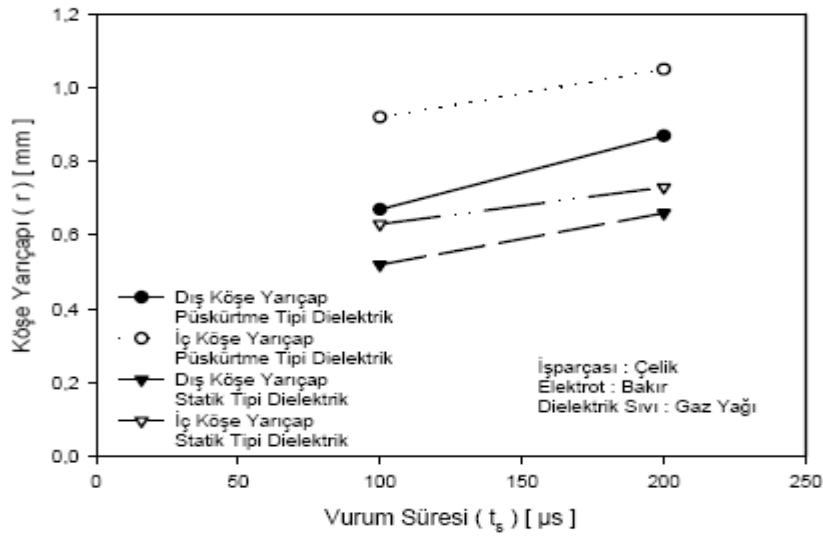
Şekil 3.8. Elektrot yüzeyine yapışan karbon tabakası [9].

a) gaz yağı ile işleme

b) saf su ile işleme

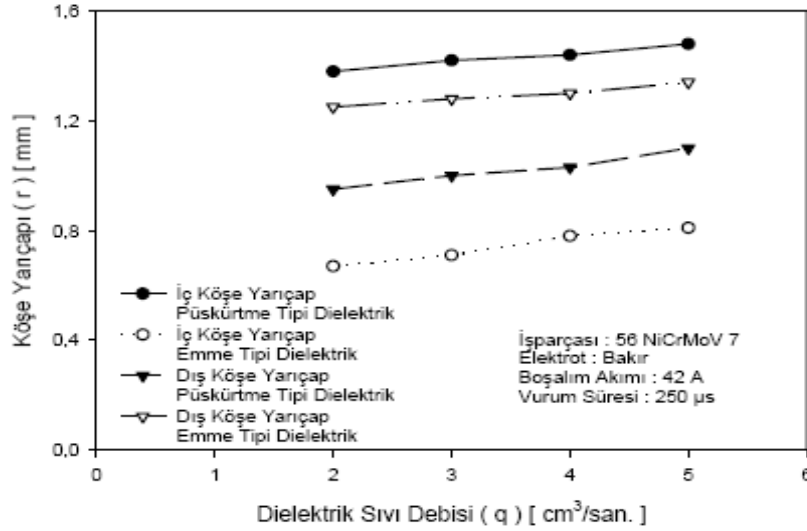
ii) Dielektrik sıvı uygulama şeklinin köşe aşınmasına etkisi

Statik tipi dielektrik sıvı uygulama şartlarındaki iç ve dış köşe yarıçap değerleri, püskürtme tipi dielektrik sıvı uygulama şartlarındaki yarıçap değerlerinden küçüktür (Şekil 3.9) [16].



Şekil 3.9. Püskürtme tipi ve statik tipi dielektrik sıvı uygulamalarında köşe yarıçap değişimi [16].

Püskürtme tipi dielektrik sıvı uygulamasında iç köşe yarıçapı emme tipi dielektrik sıvı uygulama şartlarındaki iç köşe yarıçapı değerinden büyüktür. Dış köşe yarıçapı değerlerinde ise iç yarıçapın tam tersi bir durum söz konusudur (Şekil 3.10). Bu durum dielektrik sıvının işleme aralığına giriş yönündeki azalan sıcaklık, gaz hacmi ve bölgesel kirlenme ile açıklanır [19].



Şekil 3.10. Püskürtme tipi ve emme tipi dielektrik sıvı uygulamalarında köşe yarıçap değişimi [16].

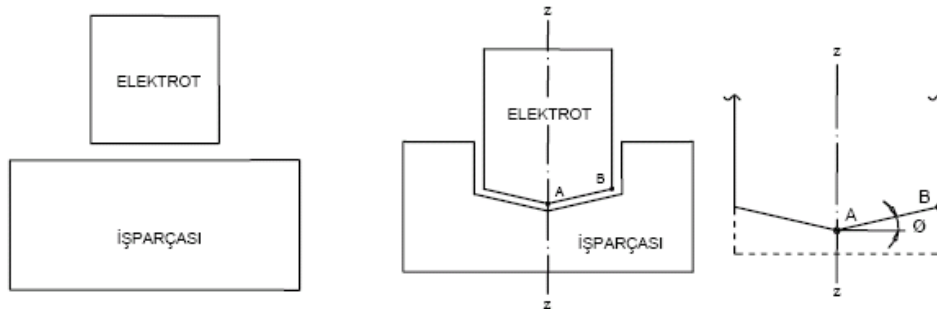
İşparçası malzemesinin özellikleri

İdeal bir EEİ elektrodu maksimum işparçası işleme hızını sağlamakla beraber aşınmaya karşı yüksek bir dirence sahip olmalıdır. Elektrot malzemesinin ergime sıcaklığı (T_m), yoğunluğu (ρ), ısıl iletkenlik katsayısı (k), özgül ısısı (C_s), kohezyon enerjisi (C_e) ve buharlaşma gizli ısısı (L_v), aşınma hızını etkileyen en temel ısı-fiziksel özelliklerdir. İşparçası malzemesinin ergime sıcaklığı (T_m) ve kohezyon enerjisi (C_e) elektrot aşınmasını etkileyen işparçası malzemesi ısı-fiziksel özellikleridir. Elektrot malzemesinin T_m , ρ , k , C_s , C_e ve L_v değerlerinin büyük olması aşınmaya karşı direnci artırırken işparçası malzemesinin C_e ve T_m değerlerinin büyük olması yüksek vurum enerjisi gerektireceğinden elektrot aşınmasını artırır [20, 21]. Bundan dolayı yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek yoğunluğuna sahip elektrotlar daha yüksek aşınma direnci gösterir [20].

Elektrot şekli ve boyutu

Küçük işleme yüzey alanına sahip elektrotlar, yüksek akım değerlerinde akım yoğunluğunun artması ve yüksek ısı değerlerinin açığa çıkmasından dolayı daha fazla ısınarak hızlı aşınır. Elektrot işleme yüzey alanı arttığında aşınma azalır [21]. Bundan dolayı içi boş tüp şeklindeki elektrotlar dolu elektrotlara göre daha fazla aşınır [20].

3.1.3. Ön yüzey aşınması



Şekil 3.11. Elektrot ön yüzey aşınması [16].

a) işleme öncesi b) işleme sonrası

EEİ ile işleme esnasında elektrot ön yüzeyinde oluşan aşınma Şekil 3.11' deki değişken $\emptyset$ açısına sahip bir doğru ile ifade edilebilir.

Elektrot ön yüzeyinde oluşan bu eğimin en büyük nedeni dielektrik sıvının akış yönüdür [16]. Ön yüzey aşınmasını etkileyen çok sayıda işleme parametresi vardır. Bunlardan en etkili olanlar aşağıda verilmiştir.

Boşalım akımı

Boşalım akımındaki artış, elektrot ön yüzeyindeki aşınma miktarını arttıracğından eğim açısı $\emptyset$ ' yi artırır [16].

Vurum süresi

Vurum süresindeki artış da elektrot ön yüzeyindeki eğim açısı θ ’ yi arttırır. Fakat bu artış boşalım akımındaki kadar yüksek olmaz.

Dielektrik sıvı özellikleri

i) Dielektrik sıvı 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. Ayrıca deneysel amaçlı gaz jeti uygulamaları da mevcuttur. Hidrokarbon bileşikleri ham petrolün rafine edilmiş formu olup, bunların arasında en iyi bilinen gaz yağıdır (kerosene). Suyun kullanımı, tel erozyon tezgâhlarında geçerlidir.

ii) Dielektrik sıvı uygulama şekli

Elektrot ön yüzey aşınmasında oluşan eğim açısı θ ’nin pozitif veya negatif bölgede olması tamamen dielektrik sıvının işleme aralığına giriş noktası ve işleme aralığındaki akış yönünün dielektrik sıvı uygulama şekline göre farklılık göstermesinden kaynaklanır (Şekil 3.11).

Bunun nedeni ise dielektrik sıvının işleme aralığına girdiği noktada gaz hacminin, sıcaklığın, bölgesel kirliliğin az olması ve bu değerlerin akış yönünde ilerledikçe artarak aşınmayı sağlayan boşalım yoğunluğunu azaltmasıdır. Ayrıca yüzeyden uzaklaştırılan ergimiş elektrot malzemesi miktarı da aynı yönde azalmaktadır. Emme tipi dielektrik sıvı uygulamasında

oluşan yüzey açısı değerleri, püskürtme tipi dielektrik sıvı uygulamasında oluşarlardan küçüktür (Şekil 3.11) [13].

iii) Dielektrik sıvı debisi

Dielektrik sıvı debisindeki artış ile ön yüzey açısı $\emptyset$ bütün dielektrik sıvı uygulama şekillerinde artış gösterir (Şekil 3.11). Bunun nedeni, birim zamanda işleme aralığından geçen sıvı hacminin artışı ile yüzeyden kaldırılan ergimiş metal miktarının ve gaz hacmindeki, sıcaklıktaki, bölgesel kirlenmedeki azalmaların neden olduğu boşalım yoğunluğundaki artış ile aşınmanın artmasıdır [13].

İşparçası malzemesinin özellikleri

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

4. DENEYLER

4.1. Elektro Erozyon Tezgâhı

Deneyisel çalışmalar, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgâhları Laboratuvarında bulunan Furkan EDM M50 A tipi Dalma-EEİ tezgâhında gerçekleştirilmiştir (Resim 4.1). Tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Resim 4.1. Furkan EDM M50 A elektro erozyon tezgâhı

Çizelge 4.1. EEİ tezgâhının teknik özellikleri

Elektronik Güç Devresi	
Güç (220 V, 50 Hz, 3f)	3 KVA
Boşalım Akımı Kademeleri	1,5 - 3 - 6 -12 -25 -50 A
Vurum Süresi Kademeleri	4 -6 -12-25-50-100-200-400-800-1600 µs
Bekleme Süresi Kademeleri	4-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 µs
Çalışma Süresi Kademeleri	0,1-0,2-0,4-0,8-1,6-3,2-6,4-12,8-Sürekli
Geri Çekme Süresi Kademeleri	0,1-0,2-0,4-0,8-1,6-3,2-6,4-12,8
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 - Ekseni Kontrol Mekanizması	Servo Kontrol
Z - Ekseni Hareket Kursu	160 mm
Z - Ekseni Hareket Hassasiyeti	0,01 mm
Dielektrik Sıvı Sistemi	
Depo Ölçüleri (X-Y-Z)	950 x 1080 x 600 mm
Pompa Kapasitesi	50 lt/dak.

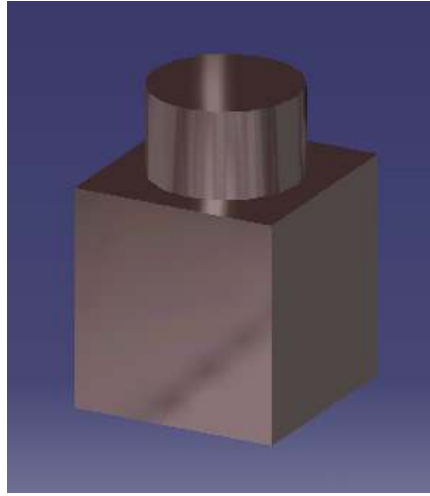
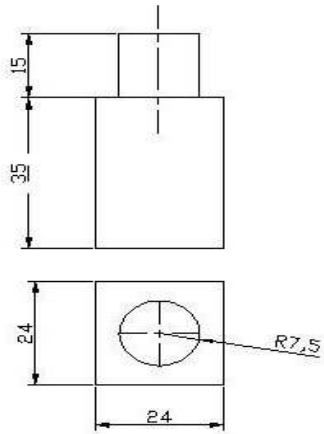
4.2. Elektrot

Deneylerde elektrot olarak Çizelge 4.2' de kimyasal bileşimi verilmiş olan kare kesite sahip elektrolitik bakır kullanılmıştır. Kare kesit kullanılmasıdaki amaç işleme sonrası elektrotta oluşacak olan aşınmaları simetrik olarak gözlemlemektir.

Çizelge 4.2. Elektrot malzemesi kimyasal bileşimi

ELEMENT	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	Cu
%	0,021767	0,029167	0,001	0,033233	0,0277	99,87667

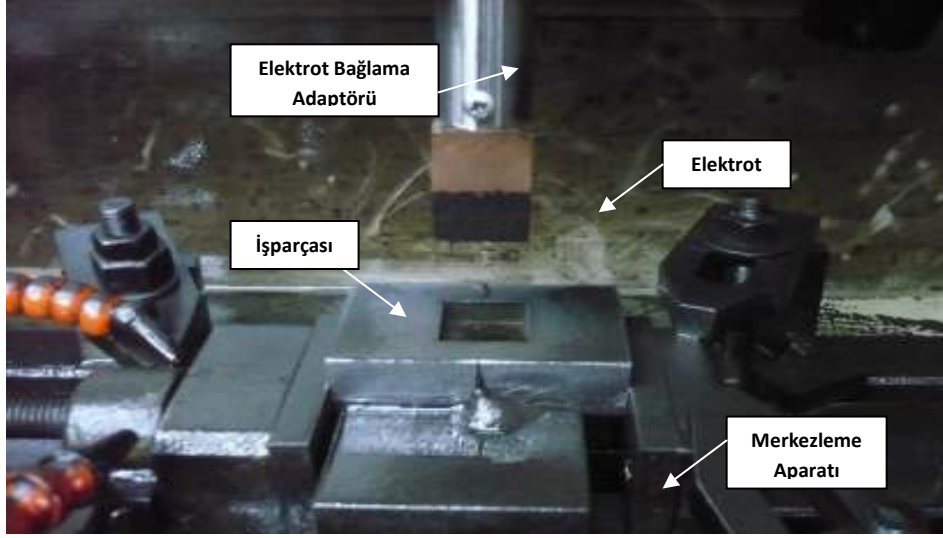
Kare kesitli çubuk şeklindeki bakır elektrot 24x24 mm kesitinde frezelenmiş ve boyu 50 mm olacak şekilde kesilmiştir. Daha sonra elektrotun 50 mm olan boy kısmının 15 mm'lik kısmı, elektrotu bağlama aparatına sabitlemek amacıyla, tornalanarak çapı 15 mm olan dairesel kesitli silindirik şekle getirilmiştir (Şekil 4.1).



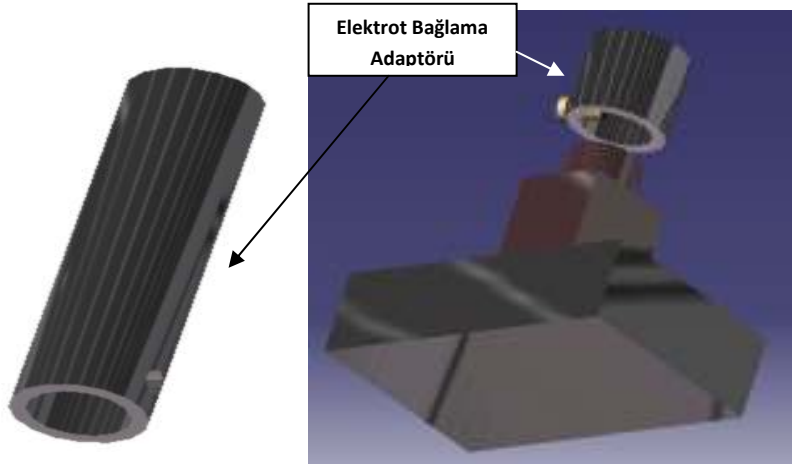
Şekil 4.1. Elektrot

4.3. Elektrot Bağlama Adaptörü

Resim 4.2 ve 4.3'te görüldüğü gibi elektrotlar, elektrot bağlama adaptörüne bir civata yardımı ile sabitlenmiştir.

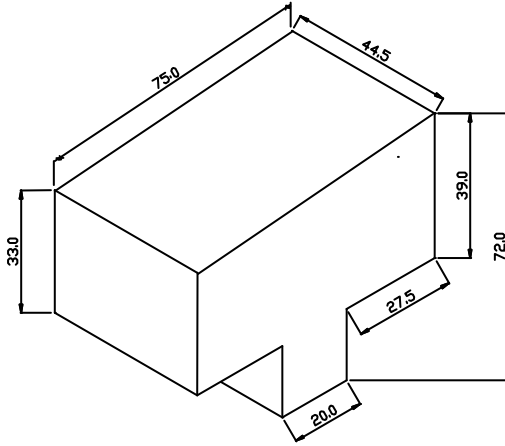


Resim 4.2. Elektrot ve iş parçası bağlama detayları



Resim 4.3. Elektrot bağlama adaptörü

Deneylerde iş parçalarının daima aynı pozisyonda bağlanabilmesi için Resim 4.2 ve Şekil 4.2'de gösterilen EEİ tezgâhının mengene kanalına kızaklanan iş parçası merkezleme aparatı kullanılmıştır.



Şekil 4.2. İş parçası merkezleme aparatı

4.4. Dielektrik Sıvı

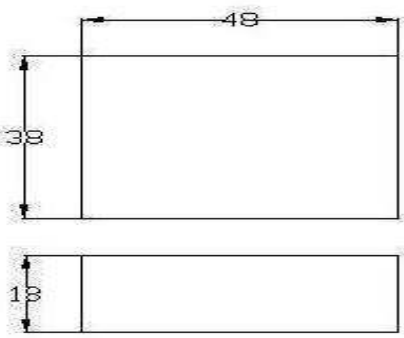
Deneylerde dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Elektrot köşe yarıçapı değerleri dielektrik sıvı basıncının artışı ile artar. Püskürtmesiz (statik) şartlardan başlayarak dielektrik püskürtme basıncında yapılan küçük artışlar köşe yarıçapı değerlerinde küçük ve doğrusal artışlar gösterir. Yüksek basınç değerlerindeki artışlarda köşe yarıçapı değerlerindeki artışlar daha hızlıdır. Bu nedenle de deneyler statik olarak gerçekleştirilmiştir.

4.5. İşparçası

İşparçası olarak Çizelge 4.3' de kimyasal bileşimi verilmiş olan SAE 1040 çeliği (BS 189) kullanılmıştır. Temin edilen 50×20 mm lama şeklindeki iş parçası malzemesi 40 mm uzunluk ölçülerinde kesildikten sonra frezelenerek 48x18x38 mm ölçülerine getirilmiştir (Şekil 4.3).

Çizelge 4.3. İş parçası malzemesi kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S
%	0,3754	0,2080	0,7440	0,0081	0,0269



Şekil 4.3. İşparçası

4.6. İşleme Parametreleri

Deneylerde kullanılan işleme parametreleri toplu olarak Çizelge 4.4' de verilmiştir. İşleme parametreleri içinde dielektrik sıvının püskürtmesi ile ilgili en önemlileri çalışma süresi ve geri çekme süresidir. İşparçasında işlenecek yüzey alanı ve derinliğin büyük olması, işleme aralığında dielektrik sıvının püskürtülme zorluğu nedeniyle, işlemenin sürekli kesilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, 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 oluşabilecek 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 çekme süresi içerisinde tezgâh universal başlığını 2,5 mm yukarıya çıkacak şekilde ayarlanmıştır.

Çizelge 4.4. İşleme parametreleri

İşleme Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı (i_d) [A]	50 ve 25
Vurum Süresi (t_s) [μs]	1600, 800, 400, 200
Bekleme Süresi (t_p) [μs]	12
Dielektrik Sıvı Uygulama Şekli	Statik ve Püskürtme
Çalışma Süresi [s]	6,4
Geri Çekme Uzunluğu [mm]	2,5
Geri Çekme Süresi [s]	0,4
Püskürtme Basıncı (P) [bar]	Statik
Kutuplama	Elektrot (+), İşparçası (-)
Dielektrik Sıvı	Gaz Yağı
İşparçası Malzemesi	SAE 1040 Çelik
Elektrot Malzemesi	24 mm Kare Kesitli Elektrolitik Bakır
İşleme Derinliği (H) [mm]	5 - 10 - 14 – 15 – 18 – 20 - 25

Çalışmada Çizelge 4.5’de görülen 36 deney tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sonuçları tutarsızlık gösteren bazı deneyler tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.5. Deney tasarımı

Deney no	i_d (A)	t_s (μs)	H (mm)	Açıklama
1	25	200	5	*
2	25	200	10	*
3	25	200	15	
4	25	200	20	
5	25	200	25	
6	25	400	5	*
7	25	400	10	
8	25	400	15	*

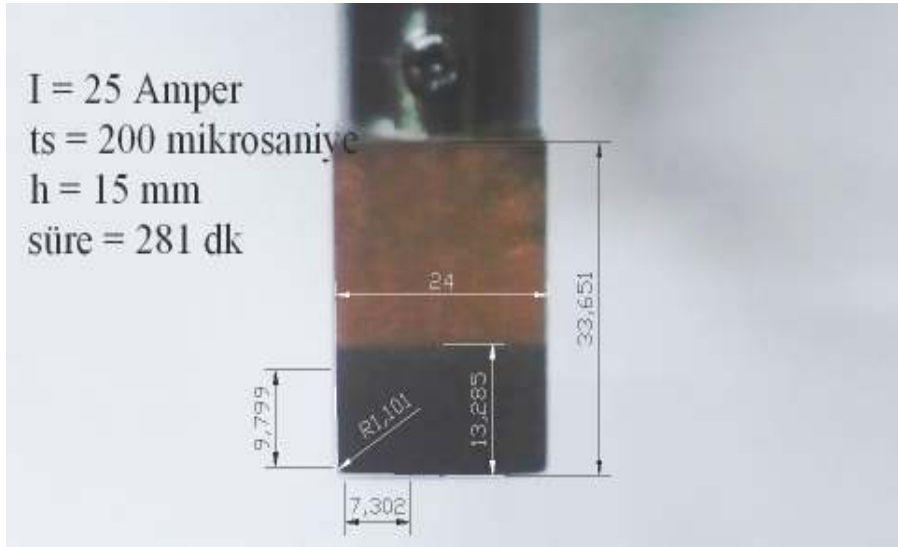
Çizelge 4.5. (Devam) Deney Tasarımı

Deney no	i_d (A)	t_s (μ s)	H (mm)	Açıklama
9	25	400	20	
10	25	400	25	
12	25	800	10	
13	25	800	14	
14	25	800	18	*
15	25	1600	5	*
16	25	1600	10	
17	25	1600	14	
18	25	1600	18	
19	50	200	5	*
20	50	200	10	
21	50	200	15	*
22	50	200	20	*
23	50	200	25	
24	50	400	5	
25	50	400	10	
26	50	400	15	*
27	50	400	20	*
28	50	400	25	*
29	50	800	5	*
30	50	800	10	*
31	50	800	14	
32	50	800	18	
33	50	1600	5	*
34	50	1600	10	
35	50	1600	14	
36	50	1600	18	*

* Tekrarlanan deneyler

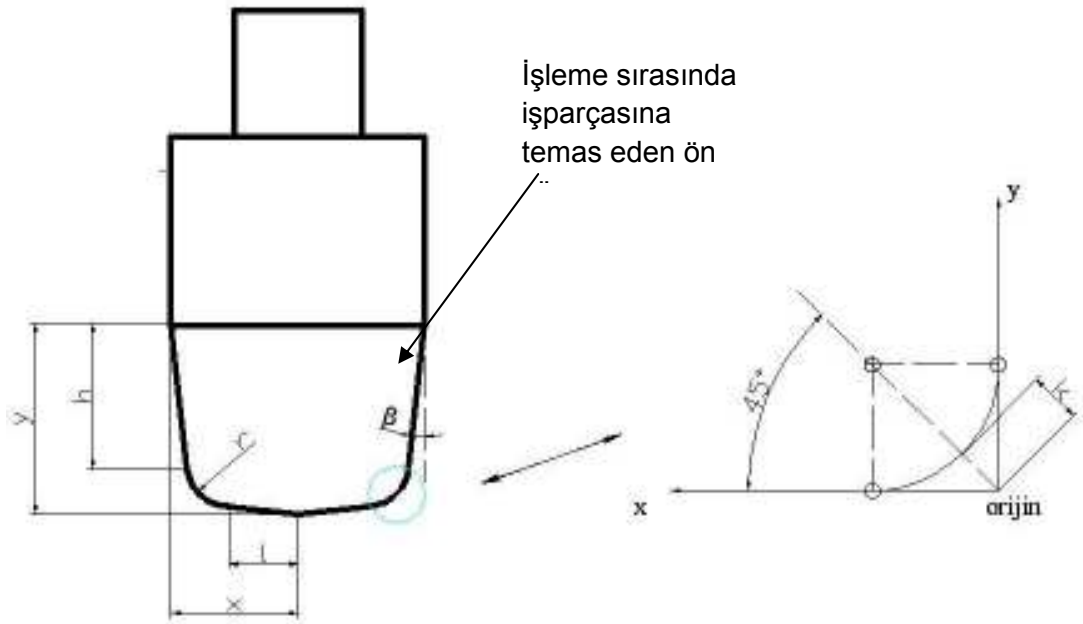
4.7. Elektrot Aşınmalarının Tespiti

Elektrot üzerinde meydana gelen köşe ve kenar aşınmalarını belirlemek için işleme sonrası elektrotların fotoğrafları çekilmiş (Resim 4.4), daha sonra bu fotoğraflar bilgisayara aktarılmıştır. Autocad 2007 çizim programı yardımıyla resimler üzerinde köşe ve kenar aşınmaları 2-B olarak belirlenmiştir.

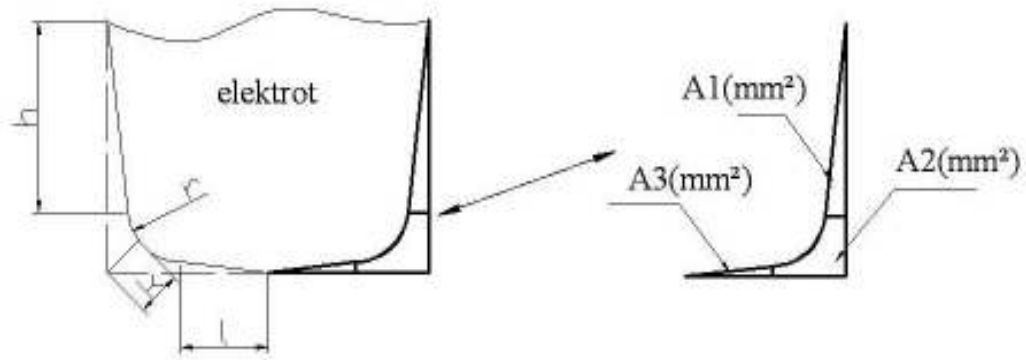


Resim 4.4. İşleme sonrası elektrot ve işparçası

Şekil 4.4.'de görüldüğü üzere β elektrotun yan yüzeyinde meydana gelen eğimin açısal olarak değerini, h elektrot üzerinde yanal aşınmanın başladığı nokta ile köşe aşınmasının başladığı nokta arasındaki düşey mesafeyi, l elektrotun ön yüzeyinde aşınma sonucu eğimin başladığı nokta ile köşe aşınmasının başladığı nokta arasındaki yatay mesafeyi, k orijinden x eksenine göre 45 derece açıyla çizilen çizginin köşe aşınmasını ifade eden dairesel kesiti kestiği noktaya kadar olan mesafeyi ifade etmektedir.



Şekil 4.4. İşleme sonrası elektrot geometrisi



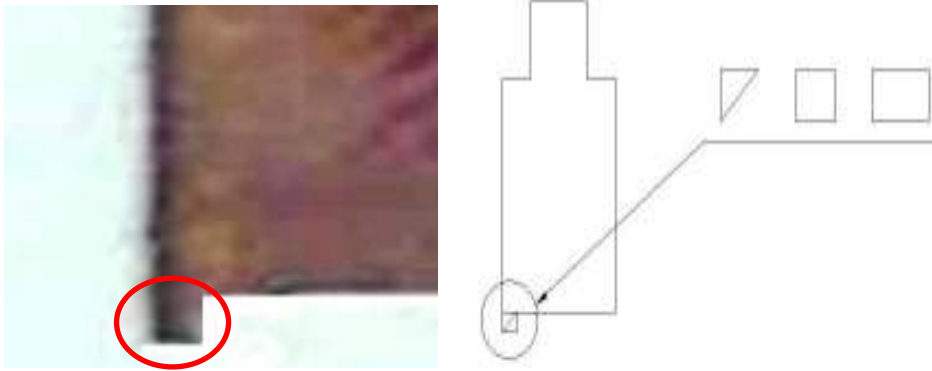
Şekil 4.5. İşleme sonrası 2-boyutta elektrotta meydana gelen aşınma alanları

Daha sonraki aşamada ise elektrotta aşınmalar sonucu meydana gelen β , h , k ve l (Şekil 4.4) değerleri ile alanlar ($A1$, $A2$ ve $A3$) (Şekil 4.5.) Autocad programı kullanılarak belirlenmiştir.

4.8. Elektrot Geometrisinin Revize Edilmesi

$A1$, $A2$ ve $A3$ değerlerini minimuma indirmek amacıyla elektrot üzerinde geometrik revizyonlar yapılmıştır. Bu amaçla elektrotun alt kısmına çıkıntılar

ilave edilmiştir. Bu çıkıntılarda kare, dikdörtgen ve üçgen gibi temel şekillerden faydalanılmıştır (Şekil 4.6.). Bundan sonra çıkıntı geometrisi ilave edilen elektrotlara “*çıkıntılı elektrot*” denecektir.



Şekil 4.6. Elektrot üzerinde oluşturulan geometrik çıkıntılar

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Çıkıntısız Elektrotlarla Elde Edilen DeneySEL sonuçlar

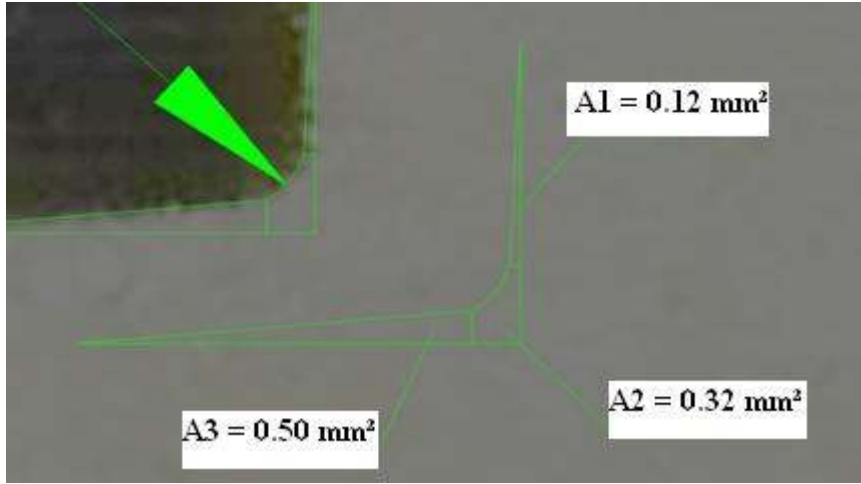
Belirli akım (i_d), vurum süresi (t_s), ve işleme derinliklerinde (H) 36 deney yapılmış, yapılan deneyler sonucu elde edilen aşınma değerleri toplu olarak Çizelge 5.1.'de sunulmuştur. A1, A2 ve A3 değerleri temelde β , ϕ ve h (Şekil 3.2.) değerlerini yansıttığından bu çalışmada sadece alan aşınmaları ağırlıklı olarak göz önüne alınmıştır.

Çizelge 5.1. Deney Sonuçları

Deney No	i_d (A)	t_s (μs)	H (mm)	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	A3 (mm ²)
1	25	200	5	0,01	0,04	0,28
2	25	200	10	0,32	0,11	0,62
3	25	200	15	0,45	0,55	1,35
4	25	200	20	0,54	0,69	1,64
5	25	200	25	0,61	0,74	1,67
6	25	400	5	0,01	0,25	0,19
7	25	400	10	0,23	0,34	0,64
8	25	400	15	0,31	0,67	1,12
9	25	400	20	0,66	1,16	1,54
10	25	400	25	0,77	1,44	1,68
11	25	800	5	0,03	0,13	0,35
12	25	800	10	0,34	0,42	0,56
13	25	800	14	0,51	0,69	1,02
14	25	800	18	0,65	0,86	1,34
15	25	1600	5	0,05	0,16	0,36
16	25	1600	10	0,36	0,44	0,59
17	25	1600	14	0,51	0,71	1,08
18	25	1600	18	0,65	0,88	1,51
19	50	200	5	0,05	0,11	0,41
20	50	200	10	0,11	0,26	1,46
21	50	200	15	0,24	0,39	1,97
22	50	200	20	0,65	0,87	2,31
23	50	200	25	0,78	0,96	2,98
24	50	400	5	0,08	0,16	0,46
25	50	400	10	0,19	0,38	1,76
26	50	400	15	0,31	0,51	2,32
27	50	400	20	0,71	0,91	2,51
28	50	400	25	0,82	1,13	3,14

Çizelge 5.1. (Devam) Deney Sonuçları

Deney No	i_d (A)	t_s (μs)	H (mm)	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	A3 (mm ²)
29	50	800	5	0,25	0,42	0,54
30	50	800	10	0,43	0,61	1,75
31	50	800	14	0,65	1,11	2,34
32	50	800	18	0,79	1,29	2,88
33	50	1600	5	0,14	0,27	0,67
34	50	1600	10	0,31	0,64	1,98
35	50	1600	14	0,43	0,79	2,68
36	50	1600	18	0,61	0,92	3,02

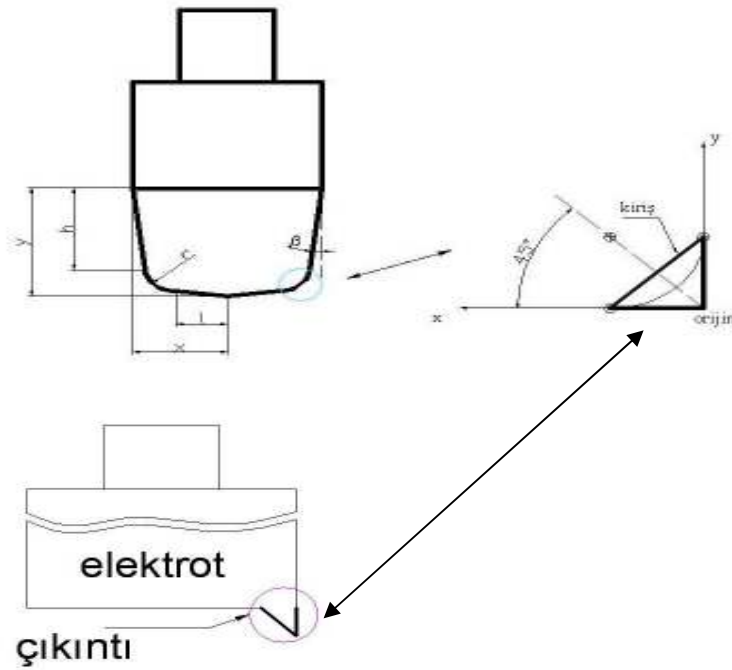
Resim 5.1. 200 μs vurum süresinde, 25A akım ve 5mm işleme derinliği değerlerinde işleme sonrası alan değerleri

Çizelge 5.1. ve elektrot kesit görüntülerinin incelenmesi neticesinde işleme performansı karakteristikleri ve geometrik aşınma bileşenleri değişimlerinin doğrudan işleme parametrelerine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Boşalım akımının artışı ile elektrot aşınma hızının (EAH) arttığı ve buna bağlı olarak şekil bozulmasının da hızlandığı görülmüştür. Çizelge 5.1. incelendiğinde;

- Sabit i_d ve t_s (μs) değerlerinde, H değeri arttıkça A1, A2 ve A3 değerlerinin arttığı,
- Sabit i_d ve H değerlerinde, t_s arttıkça A1, A2 ve A3 değerlerinin arttığı,
- Sabit t_s ve H değerlerinde, i_d değeri arttıkça A1, A2 ve A3 değerlerinin arttığı, görülmektedir.

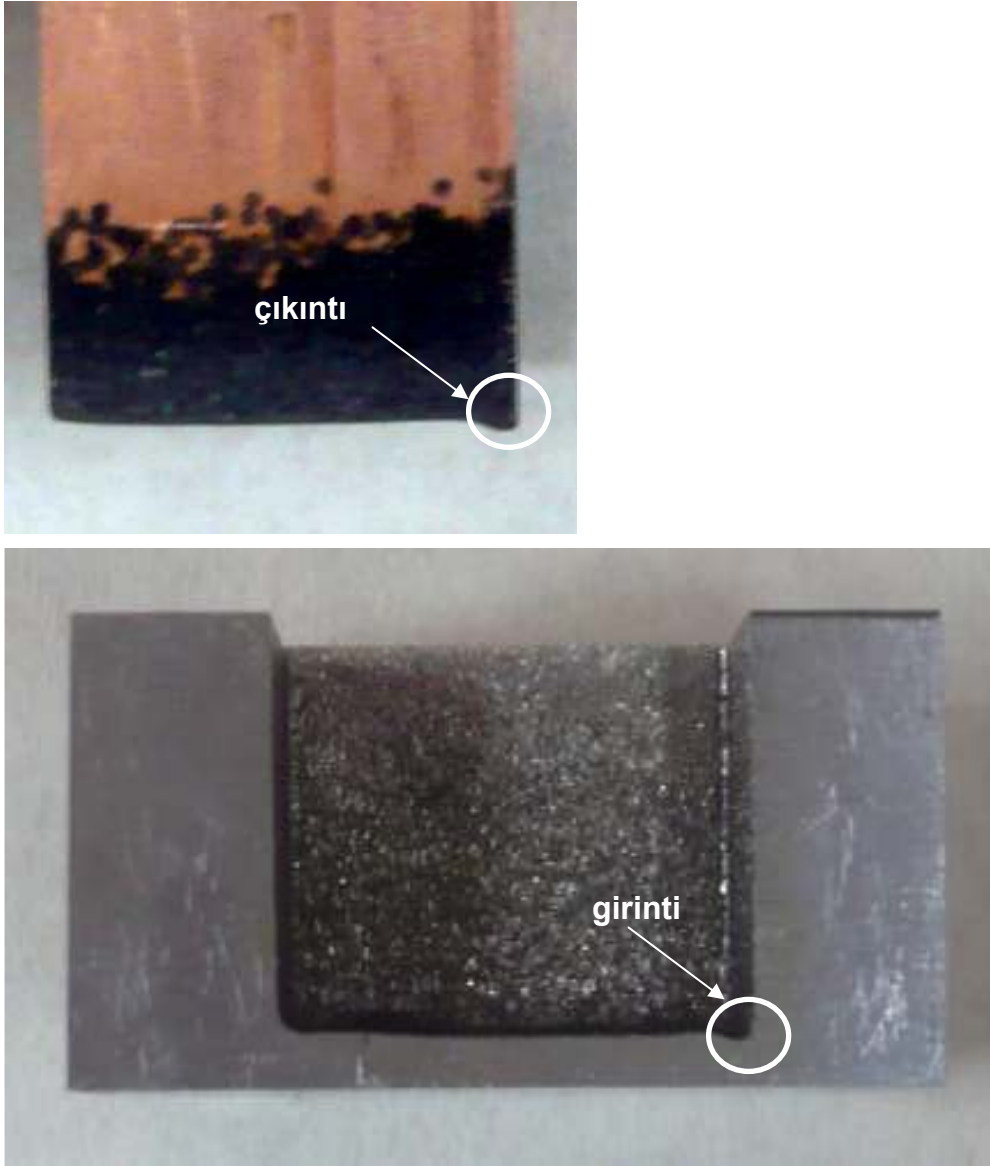
5.2. Çıkıntılı Elektrotlarla Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Şekil 4.4. ve Şekil 4.6. incelendiğinde köşe aşınmasını ifade eden A2 bölgesinin geometrisine en yakın ve imalatı basit geometrik şekillerin çıkıntı olarak ilave edilmesine çalışılmıştır. Bu nedenle çıkıntının geometrisini ve boyutlarını belirlemek için ilk olarak köşe aşınmasının başladığı noktalardan kiriş çizilmiş ve elektrotlara bu kirişe bağlı olarak üçgen bir çıkıntı verilmiştir (Şekil 5.1.a-b). Elde edilen çıkıntılı elektrot işlemeye tabi tutulmuştur.



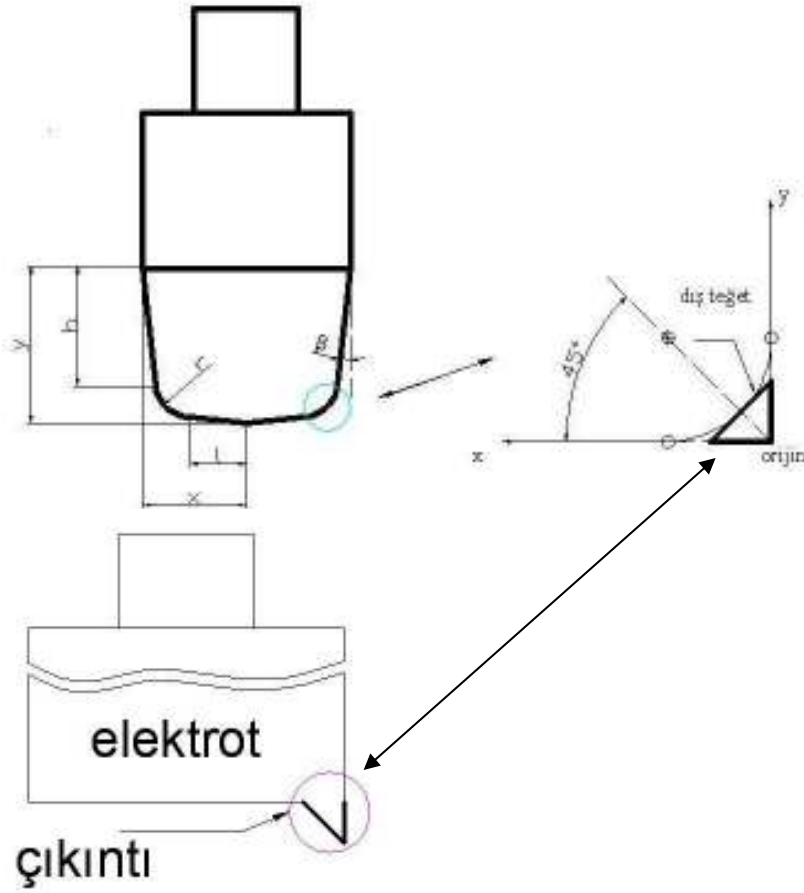
Şekil 5.1. Elektrot üzerinde oluşturulan kiriş üçgen çıkıntı

Köşe aşınma değerlerinin en az olduğu 25 A, 200 μ s ve 5mm işleme derinliği değerlerinde ve köşe aşınma değerlerinin en fazla olduğu 50 A, 1600 μ s ve 25mm işleme derinliği değerlerinde yapılan işlemler sonucunda elektrotlar incelendiğinde verilen çıkıntıların yok olmadığı ve iş parçası üzerinde oluşturulmak istenilen şeklin dışında bir girintinin oluştuğu gözlemlenmiştir (Resim 5.2.). Bundan dolayı ilk olarak ortaya konulan bu yaklaşım terk edilmiştir.



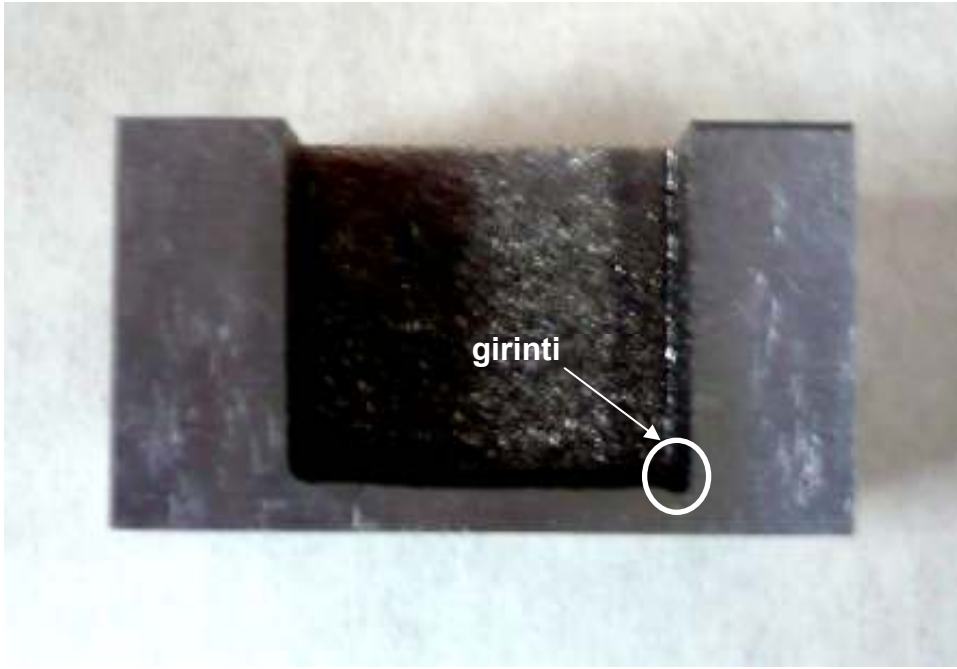
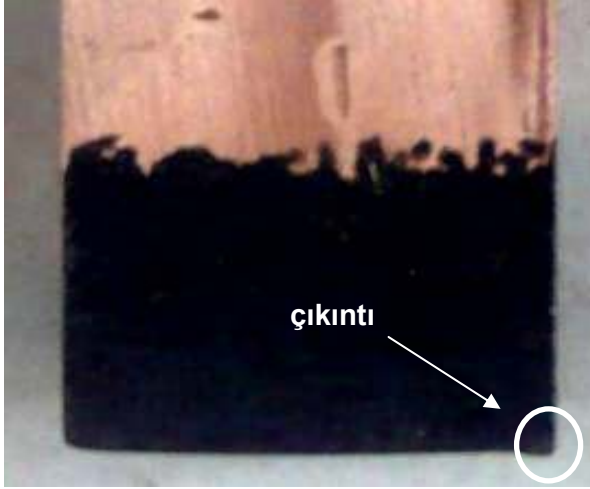
Resim 5.2. İşleme sonrası elektrot ve iş parçası geometrisi

İkinci yaklaşım olarak, çıkıntı boyutlarını küçültmek amacıyla birinci yaklaşımda oluşturulan üçgenden daha küçük bir üçgen elde edilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle de köşe aşınmasını ifade eden çember yayına dış teğet çizilmiş ve elektrotta bu teğete yapışık olarak üçgen bir çıkıntı verilmiştir. Elde edilen bu çıkıntılı elektrot işlemeye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.2. Elektrot üzerinde oluşturulan dış teğet üçgen çıkıntı

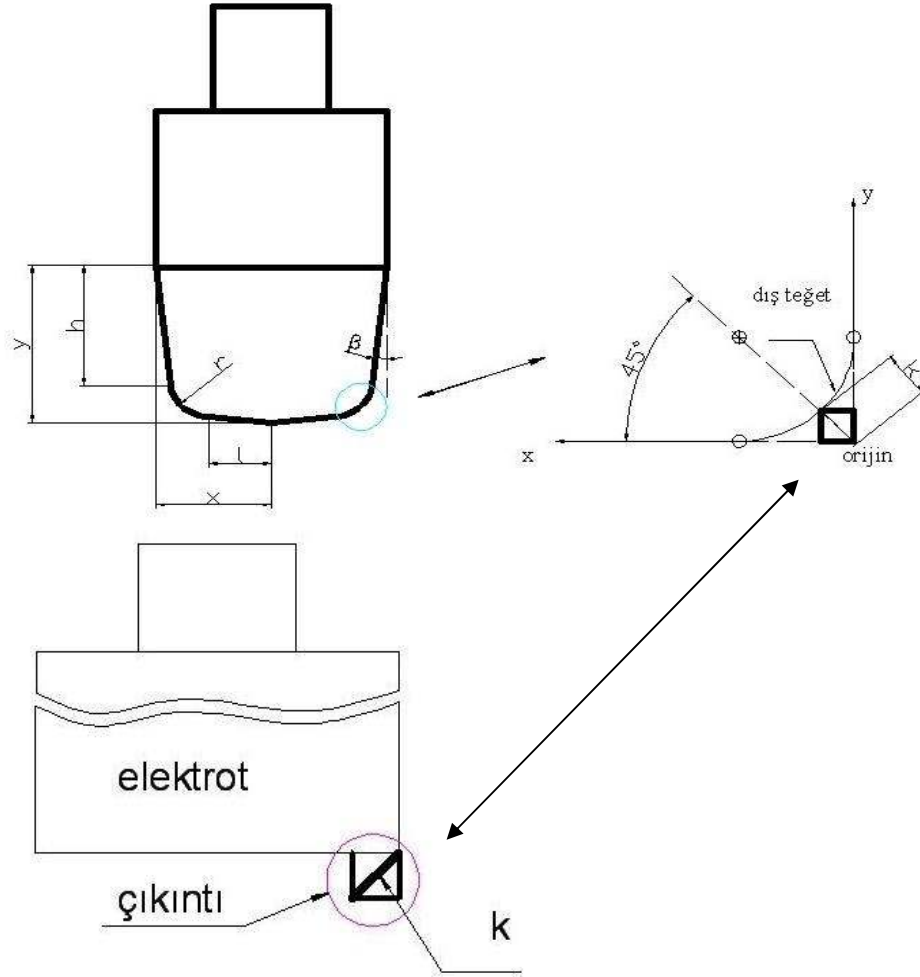
Birinci yaklaşımdaki işleme parametreleri ile ikinci yaklaşım sonucu oluşturulan çıkıntılı elektrotlarla yapılan işlemler sonucunda, elektrotlar incelendiğinde çıkıntıların yine yok olmadığı ve iş parçası üzerinde oluşturulmak istenilen şeklin dışında bir girintinin olduğu gözlemlenmiştir (Resim 5.3.). Bundan dolayı ortaya konulan bu yaklaşım da terk edilmiştir. Ancak görülmüştür ki ikinci yaklaşım sonucunda halen kaybolmayan çıkıntıların boyutları birinci yaklaşıma nispeten %12 ile %64 arasında küçülmüştür. Dolayısıyla A1 değerinde %15 ile %71 arasında, A3 değerinde %6 ile %51 arasında bir iyileşme gözlemlenmiştir.



Resim 5.3. İşleme sonrası elektrot ve iş parçası geometrisi

Son olarak da kalıp boşluğunda istenilen boyutların dışına çıkmadan (girinti oluşturmaksızın) en yakın değerlerde elde etmek üzere elektrotun alt yüzeyinde oluşturulan çıkıntının boyutlarını belirlemek için şekil 5.3.'de görüldüğü üzere daha önceden 36 adet çıkıntısız elektrotlarla yapılan deneyler sonucunda elde edilen aşınmış elektrotların her biri üzerinde k değerleri elde edilmiştir. Daha sonra da ikinci yaklaşımda oluşturulan çıkıntılar işleme sonrasında neredeyse kaybolmak üzere olduğundan bu

çıkıntı boyutlarına yakın boyuta sahip ve üçgen çıkıntıya nispeten imalatı daha kolay olan, boyutları k değerine bağlı, kare kesitli çıkıntılar oluşturulmuştur.



Şekil 5.3. k değerine bağlı olarak oluşturulan çıkıntı

Çıkıntılı elektrotlarla yapılan deneyler sonucunda elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.2.'de verilmiştir. Yapılan işlemler sonucunda, elektrotlar incelendiğinde oluşturulan çıkıntıların yok olduğu ve iş parçası üzerinde oluşturulmak istenilen kalıp boşluğunun istenilen boyutlara daha yakın olarak elde edildiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.2. k değerine bağlı çıkıntılı elektrotlarla yapılan deney sonuçları

Deney No	i_d (A)	t_s (μs)	H (mm)	Çıkıntı Boyu (mm)	k (mm)	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	A3 (mm ²)
1	25	200	5	0,45	0,64	0,12	0,32	0,5
2	25	200	10	0,48	0,68	0,68	0,4	1,1
3	25	200	15	0,51	0,72	1,13	0,54	1,25
4	25	200	20	0,58	0,82	1,75	0,63	1,4
5	25	200	25	0,64	0,91	1,82	0,84	1,52
6	25	400	5	0,49	0,69	0,14	0,37	0,58
7	25	400	10	0,52	0,74	0,71	0,51	1,13
8	25	400	15	0,56	0,79	1,19	0,6	1,31
9	25	400	20	0,67	0,95	1,75	0,72	1,76
10	25	400	25	0,7	0,99	1,87	0,91	1,99
11	25	800	5	0,34	0,48	0,16	0,41	0,66
12	25	800	10	0,38	0,54	0,71	0,57	1,15
13	25	800	14	0,5	0,71	1,13	0,59	1,26
14	25	800	18	0,55	0,78	1,29	0,69	1,62
15	25	1600	5	0,35	0,49	0,18	0,46	0,69
16	25	1600	10	0,42	0,59	0,73	0,61	1,15
17	25	1600	14	0,51	0,72	1,17	0,66	1,28
18	25	1600	18	0,6	0,85	1,38	0,75	1,65
19	50	200	5	0,43	0,61	0,17	0,44	0,82
20	50	200	10	0,54	0,76	0,99	0,95	1,64
21	50	200	15	0,61	0,86	1,36	0,99	1,88
22	50	200	20	0,69	0,98	1,89	1,24	2,04
23	50	200	25	0,74	1,05	2,01	1,35	2,2
24	50	400	5	0,46	0,65	0,19	0,5	0,89
25	50	400	10	0,55	0,78	1,12	1,03	1,79
26	50	400	15	0,64	0,91	1,49	1,17	1,95
27	50	400	20	0,71	1	1,94	1,32	2,18
28	50	400	25	0,75	1,06	2,04	1,44	2,26
29	50	800	5	0,51	0,72	0,23	0,55	0,93
30	50	800	10	0,58	0,82	1,25	1,25	1,7
31	50	800	14	0,71	1	1,61	1,29	1,86
32	50	800	18	0,78	1,1	1,68	1,32	2,04
33	50	1600	5	0,57	0,81	0,24	0,57	0,95
34	50	1600	10	0,65	0,92	1,37	1,28	1,74
35	50	1600	14	0,75	1,06	1,65	1,32	1,91
36	50	1600	18	0,83	1,17	1,69	1,34	2,14

Elektrot üzerinde oluşturulan çıkıntılarla öncelikle köşe aşınmasını minimuma indirmek hedeflemiştir. Bu nedenle de köşe aşınmasının olduğu A2'yi minimuma indirebilmek için bu alanın tersine bir çıkıntı oluşturulmuştur. Ardından yapılan deneyler sonucunda elde edilen iyileştirmeler

gözlemlenmiştir. Bununla birlikte A2'nin yanı sıra A1 ve A3 alanlarında da azalmaların olduğu gözlemlenmiştir.

5.3. Çıkıntılı Elektrotlar ile Çıkıntısız Elektrotlarda A1, A2, A3 Değerlerinin Karşılaştırılması

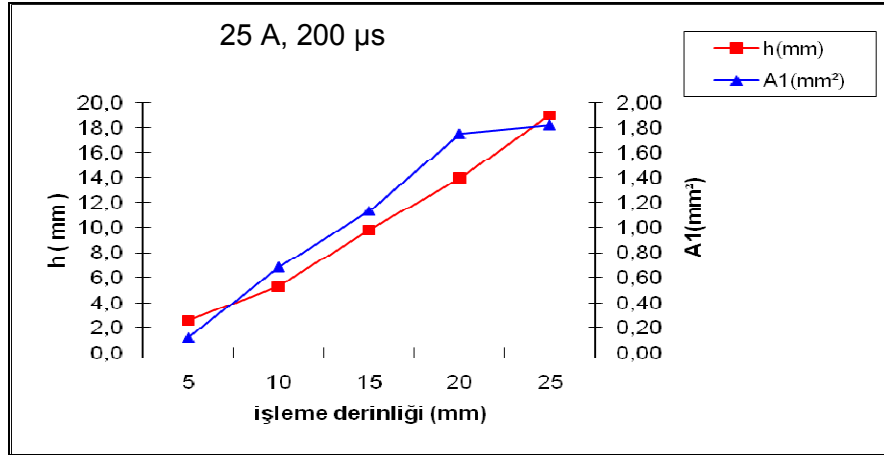
Çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarla yapılan deneyler sonucunda çıkıntısız elektrotlara kıyasla çıkıntılı elektrotlarda aşınmalar sonucu oluşan A1, A3 ve özellikle köşe aşınması sonucu meydana gelen A2 değerlerinde önemli bir azalma meydana gelmiştir. Böylece işparçası üzerinde oluşturulmak istenen kalıp boşluğuna çok daha yakın bir geometri elde edilmiştir (Çizelge 5.3.).

Çizelge 5.3. Çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarla yapılan deney sonuçları

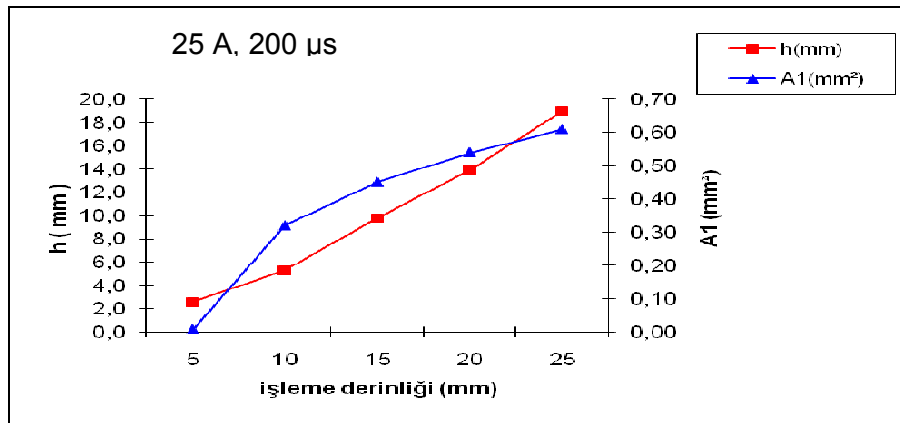
Deney No	i_d (A)	t_s (μs)	H (mm)	k (mm)	ÇIKINTILI İŞLEMELER				ÇIKINTISIZ İŞLEMELER				% ΣA İYİLEŞMESİ
					A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	A3 (mm ²)	ΣA (mm ²)	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	A3 (mm ²)	ΣA (mm ²)	
1	25	200	5	0,64	0,01	0,04	0,28	0,32	0,12	0,32	0,50	0,94	65,44
2	25	200	10	0,68	0,32	0,11	0,62	1,05	0,68	0,40	1,10	2,18	51,92
3	25	200	15	0,72	0,45	0,55	1,35	2,35	1,13	0,54	1,25	3,55	33,81
4	25	200	20	0,82	0,54	0,69	1,64	2,87	1,75	0,63	1,40	3,65	21,37
5	25	200	25	0,91	0,61	0,74	1,67	3,02	1,82	0,84	1,52	3,74	19,25
6	25	400	5	0,69	0,01	0,25	0,19	0,45	0,14	0,37	0,58	1,09	58,86
7	25	400	10	0,74	0,23	0,34	0,64	1,21	0,71	0,51	1,13	2,35	48,49
8	25	400	15	0,79	0,31	0,67	1,12	2,10	1,19	0,60	1,31	3,09	32,07
9	25	400	20	0,95	0,66	1,16	1,54	3,36	1,75	0,72	1,76	4,22	20,45
10	25	400	25	0,99	0,77	1,44	1,68	3,89	1,87	0,91	1,99	4,77	18,41
11	25	800	5	0,48	0,03	0,13	0,35	0,51	0,16	0,41	0,66	1,23	58,60
12	25	800	10	0,54	0,34	0,42	0,56	1,32	0,71	0,57	1,15	2,44	45,84
13	25	800	14	0,71	0,51	0,69	1,02	2,22	1,13	0,59	1,26	2,97	25,36
14	25	800	18	0,78	0,65	0,86	1,34	2,85	1,29	0,69	1,62	3,60	20,75
15	25	1600	5	0,49	0,05	0,16	0,36	0,57	0,18	0,46	0,69	1,33	57,18
16	25	1600	10	0,59	0,36	0,44	0,59	1,39	0,73	0,61	1,15	2,49	44,11
17	25	1600	14	0,72	0,51	0,71	1,08	2,30	1,17	0,66	1,28	3,11	26,16
18	25	1600	18	0,85	0,65	0,88	1,51	3,04	1,38	0,75	1,65	3,78	19,56
19	50	200	5	0,61	0,05	0,11	0,41	0,57	0,17	0,44	0,82	1,42	59,98
20	50	200	10	0,76	0,11	0,26	1,46	1,83	0,99	0,95	1,64	3,58	48,84
21	50	200	15	0,86	0,24	0,39	1,97	2,60	1,36	0,99	1,88	4,22	38,46
22	50	200	20	0,98	0,65	0,87	2,31	3,83	1,89	1,24	2,04	5,17	25,88
23	50	200	25	1,05	0,78	0,96	2,98	4,72	2,01	1,35	2,20	5,56	15,04
24	50	400	5	0,65	0,08	0,16	0,46	0,70	0,19	0,50	0,89	1,59	55,99
25	50	400	10	0,78	0,19	0,38	1,76	2,33	1,12	1,03	1,79	3,94	40,93

Çizelge 5.3. (Devam) Çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarla yapılan deney sonuçları

Deney No	i_d (A)	t_s (μ s)	H (mm)	k (mm)	ÇIKINTILI İŞLEMELER				ÇIKINTISIZ İŞLEMELER				% ΣA İYİLEŞMESİ
					A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	A3 (mm ²)	ΣA (mm ²)	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	A3 (mm ²)	ΣA (mm ²)	
26	50	400	15	0,91	0,31	0,51	2,32	3,14	1,49	1,17	1,95	4,61	31,84
27	50	400	20	1,00	0,71	0,91	2,51	4,13	1,94	1,32	2,18	5,44	24,09
28	50	400	25	1,06	0,82	1,13	3,14	5,09	2,04	1,44	2,26	5,74	11,25
29	50	800	5	0,72	0,25	0,42	0,54	0,78	0,23	0,55	0,93	1,71	42,45
30	50	800	10	0,82	0,43	0,61	1,75	2,53	1,25	1,25	1,70	4,19	38,43
31	50	800	14	1,00	0,65	1,11	2,34	4,13	1,61	1,29	1,86	4,76	23,43
32	50	800	18	1,10	0,79	1,29	2,88	4,23	1,68	1,32	2,04	5,03	14,56
33	50	1600	5	0,81	0,14	0,27	0,67	1,08	0,24	0,57	0,95	1,76	38,61
34	50	1600	10	0,92	0,31	0,64	1,98	2,93	1,37	1,28	1,74	4,38	33,16
35	50	1600	14	1,06	0,43	0,79	2,68	3,90	1,65	1,32	1,91	4,87	20,00
36	50	1600	18	1,17	0,61	0,92	3,02	4,55	1,69	1,34	2,14	5,17	12,05



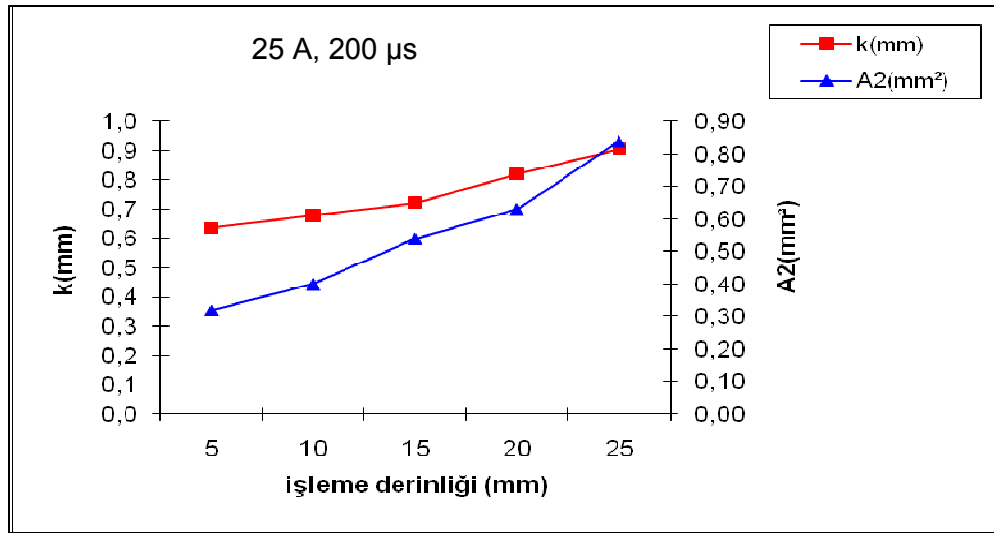
(a)



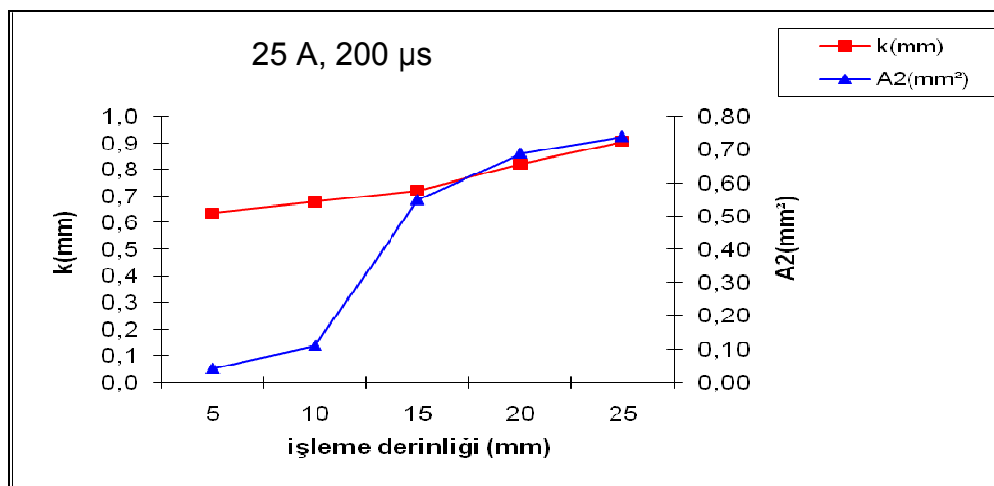
(b)

Şekil 5.4. 25A, 200 μ s'de çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarda h ve A1 değerlerinin işleme derinliği ile değişimi
 (a) çıkıntısız elektrot (b) çıkıntılı elektrot

Şekil 5.4.a ve Şekil 5.4.b'de görüldüğü üzere 25A i_d ile 200 μ s t_s değerlerinde çıkıntısız ve çıkıntılı elektrotlarda işleme derinliği arttıkça toplam alan değerleri (ΣA) sürekli olarak artış göstermektedir. Bununla birlikte aynı işleme derinliğinde çıkıntılı olan elektrotla yapılan deneyler sonucunda çıkıntısız elektrotlarla yapılan deney sonuçlarına göre 25A i_d değeri için %19 ile %65 arasında 50A i_d değeri için %11 ile %60 arasında bir iyileşme gerçekleşmektedir (Çizelge 5.3.).



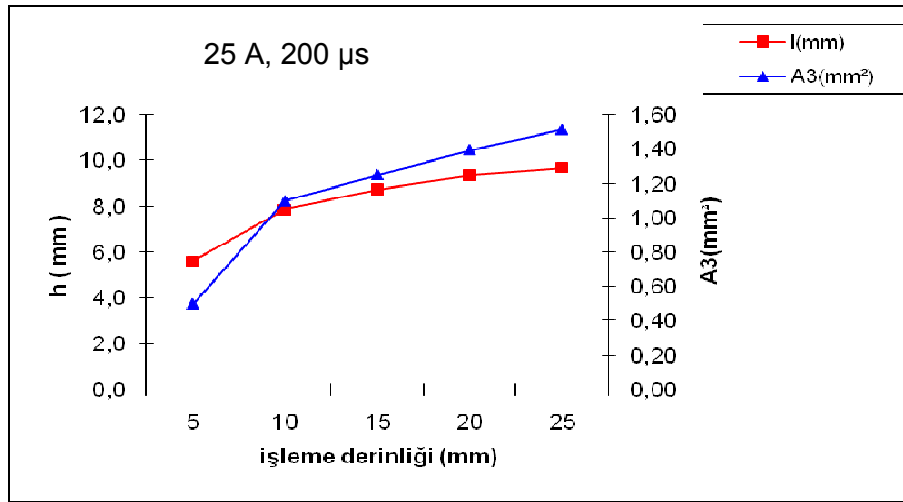
(a)



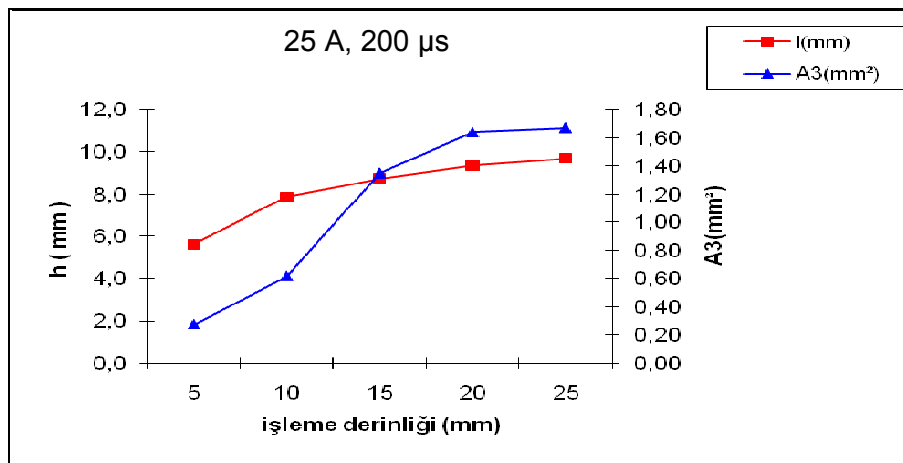
(b)

Şekil 5.5. 25A, 200 μ s'de çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarda k ve A2 değerlerinin H ile değişimi
(a) çıkıntısız elektrot (b) çıkıntılı elektrot

Şekil 5.5.a ve Şekil 5.5.b'de görüldüğü üzere aynı i_d ve t_s değerlerinde H arttıkça buna bağlı olarak da k ve A_2 değerleri de sürekli olarak artış göstermektedir. Ancak şekil 5.5.a. ve şekil 5.5.b incelendiğinde A_2 değerinde meydana gelen azalma kadar olmasa da aynı H değerinde çıkıntılı olan elektrotla yapılan deneyler sonucunda çıkıntısız elektrotlarla yapılan deney sonuçlarına göre %12 ile %87 arası daha düşük A_2 değerleri elde edildiği görülmektedir.



(a)



(b)

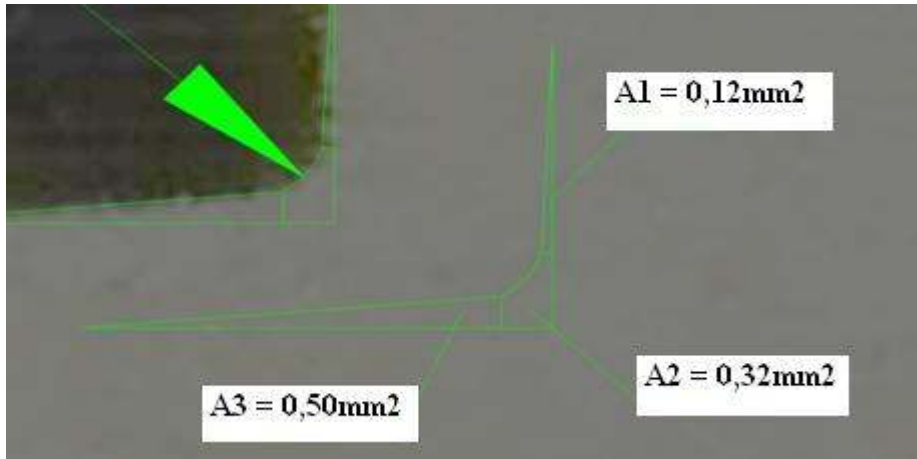
Şekil 5.6. 25A, 200 μ s'de çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarda I ve A3 değerlerinin H ile değişimi

(a) çıkıntısız elektrot

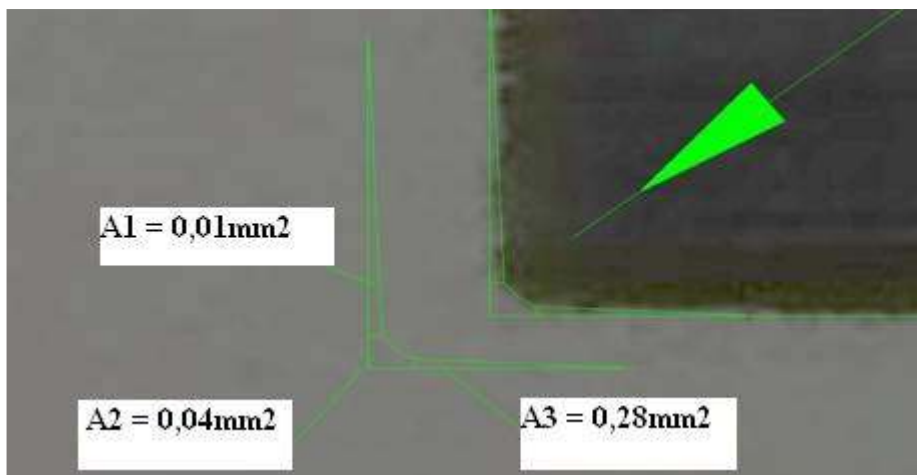
(b) çıkıntılı elektrot

Şekil 5.6.a ve Şekil 5.6.b'de görüldüğü üzere $25A$ i_d ve $200\mu s$ t_s değerlerinde H arttıkça buna bağlı olarak da I ve $A3$ değerleri de sürekli artmaktadır. Ancak, aynı H değerinde çıkıntılı olan elektrotla yapılan deneyler sonucunda çıkıntısız elektrotlarla yapılan deney sonuçlarına göre %10 ile %55 arası daha düşük $A3$ değerleri elde edildiği görülmektedir (Çizelge 5.3.).

Çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarla işlemler neticesinde; $25A$ i_d ve $200\mu s$ t_s ve $5mm$ H işleme parametre değerleri için $A1$, $A2$ ve $A3$ geometrileri ve Resim 5.4'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Resim 5.4. $200\mu s$ t_s , $25A$ i_d ve $5mm$ H değerlerinde işleme sonrası görüntüleri
a) çıkıntılı elektrotlarla b) çıkıntısız elektrotlarla

Resim 5.4 incelendiğinde, çıkıntısız elektrotlarla yapılan deneyler sonucunda elde edilen alan değerlerine göre çıkıntılı elektrotlarla yapılanlarda önemli bir azalma gözlemlenmiştir.

5.4. Çıkıntı Geometrisinin Matematiksel Olarak Modellenmesi ve Modelin Denenmesi

5.4.1. Modelleme

Bu çalışmada kuvvet fonksiyonu kullanılarak, 1040 çeliğinin elektro erozyon ile işlenmesinde elektrot üzerine ilave edilen çıkıntıların boyutlarını matematiksel olarak belirlemek amacıyla deneysel verilere regresyon analizi uygulanarak bağımsız girdi değişkenlerine bağlı matematiksel bir model oluşturulmuştur.

Endüstriyel uygulamalarda ikinci dereceden modeller oldukça yaygındır. Eğer deneylerde etken limitler uygun bir şekilde belirlenmişse ve/veya çoklu regresyon analizinde girdi ve çıktılar arasında bir dönüşüm mevcutsa bu durumda daha yüksek dereceden bir modele gerek yoktur. Bu çalışmada matematiksel modeli geliştirmenin amacı işleme parametreleri ile performans çıktı değişkenleri arasında bağıntı kurulmasıdır.

Matematiksel model kuvvet fonksiyonu olarak;

$$k = a i_d^b t_s^c h^d \quad (5.1.)$$

şeklinde ifade edilir. Burada k performans çıktısı, a, b, c, d katsayılar, i_d boşalım akımı, t_s vurum süresi, H işleme derinliğidir.

Kuvvet fonksiyonları, boşalım akımının, vurum süresinin ve işleme derinliğinin ayrı ayrı k değerine etkisi açısından çok terimli (polinom) ve

parabolik fonksiyona göre daha iyi olması ile birlikte üstel fonksiyona göre daha doğrudan ifade edilebildiğinden diğer fonksiyonlara göre uygundur.

Regresyon analizi deneysel veriler sonucunda işlem girdileri ile çıktılar (sonuçlar) arasında ilişki kurarak çıktıları optimize etmeye yarayan matematiksel ve istatistiksel işlemlerin birleşimidir [25]. Çıkıntılı ve çıkıntısız elektrotlarla yapılan deneyler sonucunda elde edilen alan değerlerinden faydalanarak işleme yapmadan önce bu alan değerlerini yaklaşık olarak belirlemek amacıyla Matlab 2007-a bilgisayar programı kullanılmıştır. Böylece kuvvet serisi kullanılarak elektrot üzerinde oluşturulacak çıkıntının boyutlarını belirlemede kullanılabilecek k eşitliği deneysel verilerden,

$$k = 0.06 i_d^{0,316} t_s^{0,05} H^{0,321} \quad (5.2.)$$

şeklinde bulunmuştur.

5.4.2. Sonuçların İstatistiksel Analizi

Çizelge 5.4. Sonuçların İstatistiksel Analizi

R	R ²	P değeri	F değeri
0,9702	0,9414	1,1336 e ^{-0,12}	54,4785

Oluşturulan deklemin (denklem 5.2) yeterliliği ve uygunluğu F testi uygulanarak belirlenmiştir [24]. Model için hesaplanan R² (0.9414) değeri (determinasyon katsayısı), Denklem 5.2'deki i_e, t_i ve h değişkenlerinden belirlenebilen k değerindeki değişimin %94 olduğunu ifade etmektedir. Hesaplanan R değerinin 0.9702 olması bağımlı değişkenlerle bağımsız değişkenler arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ifade etmektedir [24].

Ortalama karesel hata olarak da isimlendirilen tahminin standart hatası hata teriminin standart sapması ve ortalama kare farkının kareköküdür. Bu çalışmada, olasılık değeri olan p değeri “anlamlılık seviye testi”(ile incelenmiştir. İleri sürülen modelin ANOVA analizi sonucunda p=1.1336 e^{-0,12}

($p < 0,0001$) bulunmuştur. P değeri 0,01 den küçük olduğundan istatistiksel olarak ölçülen ve hesaplanan çıktı değerleri arasında 99% güvenilirlikte bir ilişki olduğu ve modelin istatistiksel olarak geçerli olduğu anlaşılmaktadır.

Hesaplanan F değerinin (54,4785) büyük olması (Ekler) işlem değişkenlerinin (i_d , t_s ve H) performans çıktısı (k) üzerinde etkisinin büyük olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.5. Deneysel ve teorik k değerleri

Deney no	i_d (A)	t_s (μs)	H (mm)	Deneysel k değeri (mm)	Teorik k değeri (mm)	Sapma (%)
1	25	200	5	0,64	0,64	1,39%
2	25	200	10	0,68	0,66	-3,03%
3	25	200	15	0,72	0,71	-0,14%
4	25	200	20	0,82	0,80	-1,36%
5	25	200	25	0,91	0,90	-0,78%
6	25	400	5	0,69	0,65	-5,67%
7	25	400	10	0,74	0,72	-2,49%
8	25	400	15	0,79	0,71	-9,87%
9	25	400	20	0,95	0,93	-1,71%
10	25	400	25	0,99	0,96	-2,17%
11	25	800	5	0,48	0,49	2,24%
12	25	800	10	0,54	0,48	-10,43%
13	25	800	14	0,71	0,74	5,21%
14	25	800	18	0,78	0,79	2,13%
15	25	1600	5	0,49	0,45	-7,93%
16	25	1600	10	0,59	0,56	-4,61%
17	25	1600	14	0,72	0,70	-2,42%
18	25	1600	18	0,85	0,81	-4,81%
19	50	200	5	0,61	0,59	-2,69%
20	50	200	10	0,76	0,76	0,91%
21	50	200	15	0,86	0,84	-1,65%
22	50	200	20	0,98	0,94	-3,70%
23	50	200	25	1,05	0,98	-6,60%
24	50	400	5	0,65	0,64	-0,62%
25	50	400	10	0,78	0,76	-1,96%
26	50	400	15	0,91	0,90	-0,55%
27	50	400	20	1,00	0,97	-2,25%
28	50	400	25	1,06	0,99	-6,64%
29	50	800	5	0,72	0,70	-2,42%
30	50	800	10	0,82	0,80	-1,99%

Çizelge 5.5'de görüldüğü üzere deneysel ve teorik k değerleri arasında maksimum %10,43 sapma gözükmemektedir.

5.4.3. Modelin Denenmesi

Modelden elde edilen k değerlerine karşılık gelen çıkıntı boyutları belirlenmiş ve elektrotlara ilave edilmiştir (Çizelge 5.6). Daha sonra ise bu elektrotlarla işlemler yapılarak modelin tutarlılığı denenmiştir.

Çizelge 5.6. Teorik k değerine bağlı oluşturulan çıkıntılarla yapılan işlemler

i_d (A)	t_s (μs)	H (mm)	Deneysel k değeri	Teorik k değeri	Teorik k değerine karşılık gelen Alan Değerleri (mm ²)		
25	200	25	0,91	0.90	1,86	0,87	1,62
25	400	20	0,95	0.93	1,81	0,83	1,79
25	800	18	0,78	0.79	1,21	0,60	1,58
25	1600	18	0,85	0.81	1,48	0,83	1,72
50	200	25	1,05	0.98	2,21	1,45	2,30
50	400	20	1,00	0.97	1,98	1,41	2,27
50	800	18	1,10	0.99	1,74	1,44	2,25
50	1600	14	1,06	0.99	1,74	1,42	2,11

Çizelge 5.6'dan görüldüğü üzere teorik olarak hesaplanan k değerine uygun çıkıntılı elektrotlarla yapılan işlemler sonucunda A1-A3 değerlerinde azalmaların olduğu görülmüştür. A1-A3 değerlerinin elektrotlarla yapılan işlemler sonucu elde edilen alanlara yakın sonuçlar elde edilmiştir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, EEI'de, bakır elektrotta oluşan köşe, ön ve yan yüzey aşınmaları belirlenmiş ve bu aşınmaları minimuma indirmek için elektrot üzerinde değişik geometrilerde çıkıntılar oluşturularak elde edilmek istenen kalıp boşluğu geometrisinde iyileştirilmeler yapılmaya çalışılmıştır.

Elektrotlara üçgen ve kare geometrilerine sahip çıkıntılar eklenmesi için yapılan ön deneyler yardımıyla uygun çıkıntı boyutları belirlenmiştir. Elektrot üzerine bu değere uygun kare kesitinde çıkıntılar verilmek suretiyle işlemler yapılmış ve oluşan aşınma alanları (A1, A2 ve A3) minimuma indirilmeye çalışılmıştır.

Deneyssel olarak elde edilen k değeri uygulanan akım, vurum süresi ve işleme derinliği gibi işleme parametrelerine bağlı kuvvet fonksiyonu cinsinden ifade edilmiştir. Fonksiyon sonucu elde edilen k değerine göre çıkıntılar elektrot üzerinde oluşturulmuştur. Bu elektrotlarla işlemler yapılmış ve geometrik aşınmayı azaltmada olumlu sonuçlar alınmıştır.

KAYNAKLAR

1. Pandey, P.C., Shan, H.S., "Modern Machining Processes", **Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited**, New Delhi, 84-114, (1980).
2. McGeough, J.A., "Advanced Methods of Machining", **London New York Chapman and Hall**, 128-147, (1980).
3. Springborn, R.K., "Non-Traditional Machining Processes", **American Society of Tool and Manufacturing Engineers**, Dearborn, Michigan, 105-133, (1967).
4. Her, M.-G., Weng, F.-T., 2001, "Micro-hole machining of copper using the electro-discharge machining process with a tungsten carbide electrode compared with a copper electrode", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 17: 715-719, (2001).
5. Ishida, T., Takeuchi Y., 2002, "L-Shaped curved hole creation by means of electrical discharge machining and an electrode curved motion generator", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 19: 260-265, (2002).
6. Mohri, N., Saito, N., Suzuki, M., Takawashi, T., "Surface modification by EDM-an innovation in EDM with semi-conductive electrodes", **The American Society of Mechanical Engineers, Research and Technological Developments in Nontraditional Machining**, 34: 21-30, (1988).
7. Mohri, N., Saito, N., Tsunekawa, Y., "Metal surface modification by electrical discharge machining with composite electrode", **Annals of the CIRP**, 42(1): 219-222, (1993).
8. Saito, K., Kishinami, T., Konno, H., Sato, M., "Development of numerical contouring control electric discharge machining (NCC-EDM)", **Annals of the CIRP**, 35(1): 117-120, (1986).
9. Chen, S.L., Yan, B.H., Huang, F.Y., "Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V", **Journal of Materials Processing Technology**, 87: 107-111, (1999).

10. Bayramoğlu, M., "Dalma elektro erozyon tezgahları ve nümerik kontrol", **Makina & Metal Teknolojisi**, 45: 157-160, (1995).
11. Masuzawa, T., Heuvelman, C.J., "A self flushing method with spark erosion machining", **Annals of the CIRP**, 32(1): 109-111, (1983).
12. Bayramoğlu, M., "Elektro erozyon tezgahlarında işlenen parçaların yüzey kalitesi", **6. Denizli Malzeme Sempozyumu**, 105-118, (1995).
13. Ozgedik, A. and Çoğun C., "An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**", 27(5-6): 488-500, (2006).
14. Çoğun, C., "Keeping electric discharge machining under control", **Machine Design**, 26: 105-108, (1990).
15. Schumacher, B.M., "About the role of debris in the gap during electrical discharge machining", **Annals of the CIRP**, 39(1): 197-199, (1990).
16. 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).
17. Mohri, N., Takezawa, H., Saito, N., "On-the-machine measurement in EDM process by a calibration system with polyhedra", **Annals of the CIRP**, 43(1): 203-206, (1994).
18. Crookall, J.R., Fereday, R.J., "An experimental determination of the degeneration of electrode shape in EDM", **Microtecnic**, 17(4): 197-200, (1973).
19. Koenig, W., Weill, R., Wertheim, R., Jutzler, W.I., "The flow fields in the working gap with electro-discharge-machining", **Annals of the CIRP**, 25(1): 71-76, (1977).
20. Jeswani, M.L., "Dimensional analysis of tool wear in electrical discharge machining", **Wear**, 55: 153-161, (1979).

21. Longfellow, J., Wood, J.D., Palme, R.B., 1968, "The effects of electrode material properties on the wear ratio in spark-machining", ***Journal of the Institute of Metals***, 96: 43-48, (1988).
22. Crookall, J.R., Fereday, R.J., 1973, An experimental determination of the degeneration of electrode shape in EDM, ***Microtecnic***, 17(4): 197-200, (1973).
23. Tlusty, G., "Nontraditional Manufacturing Methods", ***Manufacturing Processes and Equipment***, 859-862, (2000).
24. Montgomery D. C., "Design and Analysis of Experiments", 5th ed., ***Wiley***, 100-145, NewYork, (2001).
25. Gangopadhyay S., B.R. Sarkar and B. Bhattacharyya, "Modelling and Analysis of EDMed job surface integrity", ***Journal of Materials Processing Technology***, 189: 169-177, (2007).

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.

$$Z = AX^bY^c \quad (1)$$

Z üstel fonksiyonun doğal logaritması alınarak doğrusal hale dönüştürülmesi mümkündür.

$$\ln Z = \ln A + b \ln X + c \ln Y \quad (2)$$

Söz konusu denklemin A, b ve c katsayıları birbirinden bağımsız X, Y ve Z'in değerlerinden yaralanarak 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.

$$\sum \ln Z = na + b \sum \ln X + c \sum \ln Y \quad (3)$$

$$\sum \ln X \ln Z = a \sum \ln X + b \sum \ln X^2 + c \sum \ln X \ln Y \quad (4)$$

$$\sum \ln Y \ln Z = a \sum \ln Y + b \sum \ln Y \ln X + c \sum \ln Y^2 \quad (5)$$

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

$$\ln z = \ln Z - \ln \bar{Z} \quad (6)$$

$$\ln x = \ln X - \ln \bar{X} \quad (7)$$

$$\ln y = \ln Y - \ln \bar{Y} \quad (8)$$

EK-1.(Devam) Üstel Fonksiyonların Regresyon Analizi

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

$$\sum \ln z = na + b \sum \ln x + c \sum \ln y \quad (9)$$

$$\sum \ln x \ln z = a \sum \ln x + b \sum \ln x^2 + c \sum \ln x \ln y \quad (10)$$

$$\sum \ln y \ln z = a \sum \ln y + b \sum \ln y \ln x + c \sum \ln y^2 \quad (11)$$

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

$$\sum \ln x \ln z = b \sum \ln x^2 \quad (12)$$

$$\sum \ln y \ln z = c \sum \ln y^2 \quad (13)$$

Söz konusu eşlenikler b ve c katsayıları için çözülürse

$$b = \frac{\sum \ln x \ln z}{\sum \ln x^2} \quad (14)$$

$$c = \frac{\sum \ln y \ln z}{\sum \ln y^2} \quad (15)$$

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

$$\ln \bar{Z} = a + b \ln \bar{X} + c \ln \bar{Y} \quad (16)$$

Bu denklem a katsayısına göre çözülürse,

$$a = \sum \ln \bar{z} - b \sum \ln \bar{x} - c \ln \sum \ln \bar{y} \quad (17)$$

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.

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum (Z_{gerçek} - Z_{hesaplanan})^2}{n - k}} \quad (1)$$

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 bulunduğuundan k=3’tür.

EK-3. Korelasyon

Bulunan Z fonksiyonun mevcut X ve Y değerlerine göre uyumunu, uyum derecesi ve yönünün belirlemek amacıyla çoklu korelasyon analizini gerçekleştirilir. Çoklu korelasyonda aşağıdaki formül kullanılır.

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

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 olur.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DENİZ, Tayfun Çağlar
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.09.1981 Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (312) 389 22 75
 e-mail : tcdeniz@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Y. Lisans	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü	2009
Lisans	Makine Mühendisliği Bölümü Kırıkkale Üniversitesi / Makine Mühendisliği Bölümü	2004
Lise	Anadolu Tapu ve Kadastro Meslek Lisesi	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2008	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma görevlisi
2008 -	Devlet Malzeme Ofisi Genel Müdürlüğü	Makine mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. DENİZ, T.,Ç., ÇOĞUN, C., ÖZGEDİK, A., "Elektro Erozyon ile İşlemede İşleme Parametrelerinin Matematiksel Modellenmesi", **ODTU Makine Tasarım ve İmalat Dergisi**, 9(1): 1-5, (2007) .