

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DALMA EROZYON İŞLEMLERİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK  
PARAMETRELERİNİN GENETİK PROGRAMLAMA İLE BELİRLENMESİ**

**ÖZLEM SALMAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**Isparta, 2005**

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne  
Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI'nda  
YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : .....

Üye : .....

Üye : .....

ONAY

Bu tez ....../....../ 2005 tarihinde Enstitü Yönetim kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri  
üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

....../....../ 2005

Prof.Dr.Çiğdem SAVAŞKAN  
Enstitü Müdürü

**DALMA EROZYON İŞLEMLERİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK  
PARAMETRELERİNİN GENETİK PROGRAMLAMA İLE BELİRLENMESİ**

**ÖZLEM SALMAN**

**Yüksek Lisans Tezi  
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA 2005**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
EKLER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLGİSİ.....	4
2.1. Elektro Erozyon İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi İle İlgili Literatür İncelemesi.....	4
2.2. Yapay Zeka Yöntemleri Kullanılarak Yapılan EEİ Performansları İle İlgili Literatür İncelemesi.....	15
2.3. Elektro Erozyon İle İşleme (EEİ) Esasları.....	18
2.3.1. Elektro Erozyon İşlemi Temel Prensibi.....	19
2.3.2. Elektro Erozyon Makinesi Çalışma Prensibi .....	23
2.3.3. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) Yöntemi Çeşitleri.....	24
2.3.4. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ).....	26
2.3.5. Elektro Erozyon İşleminde İş Parçasında Fiziksel Durum.....	29
2.3.6. Elektro Erozyon İşleminde Elektrotta Fiziksel Durum.....	30
2.3.7. Elektro Erozyon İşleminde Dielektrik Sıvı ve Dolaşım Metotları.....	33
2.3.8. Elektro Erozyon İşleminin Avantajları.....	35
2.3.9. Elektro Erozyon İşleminin Dezavantajları.....	36
2.4. Yapay Zeka Teknikleri.....	37
2.4.1. Genetik Algoritma (GA) .....	38
2.4.2. Kodlama.....	41
2.4.3. Seçim.....	41
2.4.4. Çaprazlama.....	42

2.4.5. Mutasyon.....	42
2.4.6. Evrimsel Programlama (EP) .....	43
2.5. Yüzey Pürüzlülüğü.....	46
2.5.1. Ortalama Pürüzlülük, $R_a$ .....	52
2.5.2. En Yüksek Tepe-Çukur Pürüzlülük Yüksekliği $R_{max}$ , $R_y$ .....	53
2.5.3. On-nokta yüksekliği $R_z$ .....	53
3. MATERYAL VE METOD.....	54
3.1. Materyal.....	54
3.1.1. CNC Elektro Erozyon Makinesi.....	54
3.1.2. Dielektrik Sıvı.....	55
3.1.3. Toz Metal İş Parçası.....	55
3.1.4. Elektrot.....	57
3.1.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı.....	58
3.1.6. Deney Parametreleri.....	60
3.2. Metod.....	61
4. BULGULAR.....	63
4.1. Deneysel Ölçümler ve Karşılaştırmalar.....	63
4.1.1. Aralık Voltajın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	64
4.1.2. Boşalım Akımının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	65
4.1.3. Vurum Süresinin Elektrot Ağırlık Kaybına Etkisi.....	67
4.1.4. Bekleme Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	68
4.1.5. Deneysel Sonuçlarının Diğer Çalışmalar İle Kıyaslanması.....	69
4.2. Deney Sonuçlarının Evrimsel Programlanması.....	70
4.2.1. Yüzey Pürüzlülüğü ( $R_a$ ) Değerinin Evrimsel Programlama İle Modellenmesi.....	70
4.2.2. Elektrot Ağırlık Kaybı (gr) Değerinin Evrimsel Programlama İle Modellenmesi .....	77
4.2.3. Denklemlerle Hesaplanan Pürüzlülük Değerleri.....	79
4.2.4. EEİ İşlemi İle İş Parçası Sertlik ve Mikro Yapı Değişimi.....	85
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	91
6. KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	97

EKLER.....	98
EK 1. ....	93
EK 2. ....	106

**ÖZET****(DALMA EROZYON İŞLEMLERİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN GENETİK PROGRAMLAMA İLE BELİRLENMESİ)**

Bu çalışmada, talaşlı imalat üretim metotlarından biri olan elektro erozyon ile işleme parametreleri (akım, vurum süresi, bekleme süresi, aralık voltajı) Evrimsel Programlama ile modellenmiştir. Elektro Erozyon ile İşleme, sertleştirilmiş metal işlemede verimli üretim metotlarından biridir. Üretim sonucu, yüzey pürüzlülüğünün ve elektrot aşınma oranının hesaplanması matematiksel modellerle oldukça zordur. Bu çalışmada, Evrimsel Programlama kullanılarak yüzey pürüzlülüğünün ve elektrot aşınmasının işleme parametreleri ile ilişkisi bulunmuştur. Elektro Erozyon İşleme parametrelerinden aralık voltajı, vurum süresi, bekleme süresi ve akım değerleri yüzey pürüzlülüğünün ve elektrot ağırlık kaybının hesaplanması için kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, elektro erozyon parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü ve elektrot aşınması arasındaki ilişki C++ program kodu olarak elde edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER :** Elektro Erozyon ile İşleme, Evrimsel Programlama, Yüzey Pürüzlülüğü, Elektrot Ağırlık Kaybı

**ABSTRACT****(DETERMINATION SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS FOR ELECTRO DISCHARGE MACHINING WITH USING GENETIC PROGRAMMING)**

This thesis studied the application of a evolution programming (EP) methodology to modelling of electro-discharge machining parameters (current, pulse on time, pulse off time, gap voltage). Electro discharge Machining (EDM) has become one of the most competent, productive manufacturing method, for hard machining of die. Predicting of surface roughness and electrode wear rate are very diffucult with using mathematical equations. In this thesis Evolution Programming method is used for predicting surface roughness and electrode wear rate of machined surface with related to machining parameters. Gap voltage, on time, off time and current, of EDM operations are collected for predicting surface roughness and electrode wear rate. End of the study a lineer equation (C++) is found to predicted for surface roughness and electrode wear rate related to exprimental study.

**KEY WORDS:** Electrical Discharge Machining, Evolution Programming, Surface Roughness, Electrode Wear Rate



## TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince, yönlendirici kritiklerinden ve yardımlarından dolayı danışman hocam Sayın Yrd.Doç. Dr.M.Cengiz KAYACAN'a sonsuz şükranlarımı sunarım. Tez çalışmasının başından itibaren bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, bana her konuda destek veren CAD/CAM Araştırma ve Uygulama Merkezi personeli mesai arkadaşlarıma, Teknik Eğitim Fakültesi malzeme laboratuvarını açarak sertlik ölçümlerini yapmamı sağlayan Bölüm başkanı Sayın Prof.Dr.A.Kemal YAKUT ve Sayın Doç.Dr.Abdullah ÖZSOY başta olmak üzere Arş.Gör.Nihat YILMAZ ve Arş.Gör.Bekir YALÇIN'a, deney sonuçlarının incelenmesi sürecinde engin tecrübelerinden faydalandığım Sayın Prof.Dr.Remzi VAROL hocama, mikro yapı incelemesi için gerekli olan kimyasalların temini sağlayan Sayın Doç.Dr.Ata AKÇIL hocama, mikroyapıların görüntülenmesinde mikroskop olanağı sağlayan Sayın Prof.Dr.Nevzat ÖZGÜR hocama, Deneylerde kullanılan ASSAB79PM toz metal iş parçalarını vererek sertleştirme işlemlerini yapan AssabKorkmaz Çelik firmasına, bugüne gelmemde emeği geçen tüm büyüklerime ve aileme teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışması, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) tarafından 03YL787 numaralı "Dalma Erozyon İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülük Parametrelerinin Genetik Programla ile Belirlenmesi" isimli proje tarafından desteklenmiştir.

**SİMGELER DİZİNİ**

$R_a$	( $\mu\text{m}$ )	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
$R_z$	( $\mu\text{m}$ )	On-nokta yüksekliği
$R_{\text{max}}$	( $\mu\text{m}$ )	En yüksek tepe-çukur pürüzlülük yüksekliği
Akım	(A)	Elektrik akım şiddeti
$t_{\text{on}}$	( $\mu\text{s}$ )	Elektrik akımının vurum süresi
$t_{\text{off}}$	( $\mu\text{s}$ )	Vurum süresi sonrası bekleme süresi
V	(V)	Elektrot ve iş parçası arasında aralık voltajı

**KISALTMALAR DİZİNİ**

EEİ	Elektro Erozyon ile İşleme
EP	Evrimsel Programlama
GA	Genetik Algoritma
AA	Açıklama Ağacı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa no</b>
Şekil 2.1.1. Akım ve vuruş süresinin, yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	4
Şekil 2.1.2. Ra ve Boşalım akımı değişiminin deneysel sonuçları.....	8
Şekil 2.1.3. Akım ve vuruş süresinin pürüzlülüğe etkisi.....	9
Şekil 2.3.1.1. EEİ süreci başlangıç durumu.....	19
Şekil 2.3.1.2. Aralık voltajın uygulanarak en yüksek değerine ulaşması.....	19
Şekil 2.3.1.3. Anot ve katot arasında plazma kanalı oluşumu başlaması.....	20
Şekil 2.3.1.4. Uygulanan akımın artması ile voltaj düşmeye başlar.....	20
Şekil 2.3.1.5. Plazma kanalı içinde elektrik boşalımı.....	20
Şekil 2.3.1.6. Boşalım sonrası elektrik akımı ve voltaj sabitlenir.....	21
Şekil 2.3.1.7. Boşalım sonrası bekleme zamanı.....	21
Şekil 2.3.1.8. EEİ işlemi biter ve deiyonizasyon meydana gelir.....	22
Şekil 2.3.1.9. Akım, açık devre voltajı ve aralık voltajın üç-boyutlu görünüşü.....	22
Şekil 2.3.2.1. Elektro erozyon makinesi elemanları.....	23
Şekil 2.3.2.2. İş parçası ve elektrot arasındaki elektrik boşalım aralığı.....	24
Şekil 2.3.3.1. Tel elektrot ile erozyon işlemi.....	25
Şekil 2.3.3.2. Dalma elektro erozyon ile işleme.....	25
Şekil 2.3.3.3. Temel EEİ İşlemleri.....	25
Şekil 2.3.4.1. Elektrik boşalım kuvvetleri.....	26
Şekil 2.3.4.2. Elektrik boşalımı ile talaş kaldırma.....	27
Şekil 2.3.4.3. Elektronların kıvılcım olarak akışı.....	27
Şekil 2.3.4.4. Elektrik boşalması sonucu talaş oluşumu.....	28
Şekil 2.3.4.5. Vuruş süresince ( $t_{on}$ ) iş parçasının yüzey durumu.....	29
Şekil 2.3.5.1. Kaba ve hassas elektro erozyon işlemi sonrası tipik yüzey yapıları.....	30
Şekil 2.3.6.1. Çeşitli elektrotlar ile akım-yüzey pürüzlülüğü değişimi.....	31
Şekil 2.3.6.2. CuW elektrot ile farklı kutuplar için boşalım akımı ve $R_a$ değişimi.....	32
Şekil 2.3.6.3. Kutuplamanın elektrot aşınmasına etkisi.....	32
Şekil 2.3.7.1. Dielektrik sıvı normal akış.....	34
Şekil 2.3.7.2. Dielektrik sıvı tersine akış.....	35
Şekil 2.3.7.3. Dielektrik sıvı püskürtme akışı.....	35
Şekil 2.4.1.1. Genetik Algoritmada gen ve kromozom.....	40
Şekil 2.4.1.3.1. Tek noktalı çaprazlama.....	42
Şekil 2.4.1.4.1. Bir kromozomdaki mutasyon örneği.....	42
Şekil 2.4.2.1. Matematiksel açıklama ağacına (AA) bir örnek.....	45
Şekil 2.5.1. Yüzey pürüzlülüğünün üç boyutlu gösterilmesi.....	46
Şekil 2.5.2. Pürüzlü düz yüzey.....	47
Şekil 2.5.3. Pürüzlü dalgalı yüzey.....	47
Şekil 2.5.4. Farklı akım şiddetlerinde yüzeyde meydana gelen pürüzlülük değişimi.....	48
Şekil 2.5.5. EEİ sonrası oluşan katmanlar.....	49
Şekil 2.5.1.1. $R_a$ yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi.....	52
Şekil 2.5.2.1. $R_{max}$ yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi.....	53

Şekil 2.5.3.1. $R_z$ yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi.....	53
Şekil 3.1.1.1. Deneyde kullanılan CNC elektro erezyon makinesi.....	55
Şekil 3.1.4.1. Deneyde kullanılan bakır elektrotlar.....	58
Şekil. 3.1.5.1. Elektro erozyon ile işlenen iş parçaları.....	59
Şekil 3.1.5.2. EEİ sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin ölçümü.....	59
Şekil 4.1.1.1. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 6 $\mu s$ , Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu s$ .....	65
Şekil 4.1.1.2. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 12 $\mu s$ , Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu s$ .....	65
Şekil 4.1.2.1. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu s$ , Aralık voltajı 40 Volt.....	66
Şekil 4.1.2.2. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu s$ , Aralık voltajı 60 Volt.....	66
Şekil 4.1.3.1. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu s$ , Aralık voltajı 40 Volt.....	67
Şekil 4.1.3.2. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu s$ , Aralık voltajı 60 Volt.....	68
Şekil 4.1.4.1. Boşalım akımı 7 Amper, Aralık voltajı 40 Volt.....	69
Şekil 4.1.4.2. Boşalım akımı 7 Amper, Aralık voltajı 60 Volt.....	69
Şekil 4.2.1.1. Kurulan EP modelinde kullanılan $R_a$ pürüzlülük değeri hedef fonksiyon ve test verileri.....	71
Şekil 4.2.1.2. Modelleme ve deney $R_a$ ( $\mu m$ ) sonuçlarının karşılaştırılması	72
Şekil 4.2.2.1. Kurulan EP modelinde kullanılan ağırlık kaybı değeri hedef fonksiyon ve eğitim verileri.....	78
Şekil 4.2.3.1 Hesaplanan yüzey pürüzlülük değerlerinin vurum süresi ve voltaj ilişkisi .....	79
Şekil 4.2.3.2. Hesaplanan yüzey pürüzlülük değerlerinin bekleme süresi ve voltaj ilişkisi.....	81
Şekil 4.2.3.3. Hesaplanan yüzey pürüzlülük değerlerinin akım ve voltaj ilişkisi.....	83
Şekil 4.2.4.1. 7 A 50 $\mu s$ 12 $\mu s$ 80 V.....	86
Şekil 4.2.4.2. 12A 25 $\mu s$ 100 $\mu s$ 100V.....	86
Şekil 4.2.4.3. 12A 25 $\mu s$ 25 $\mu s$ 80V.....	86
Şekil 4.2.4.4. 12A 6 $\mu s$ 50 $\mu s$ 100V.....	87
Şekil 4.2.4.5. 12A 100 $\mu s$ 50 $\mu s$ 80V.....	87
Şekil 4.2.4.6. 22A 6 $\mu s$ 25 $\mu s$ 60V.....	87
Şekil 4.2.4.7. 22A 25 $\mu s$ 100 $\mu s$ 100V.....	87
Şekil 4.2.4.8. 42A 50 $\mu s$ 100 $\mu s$ 80V.....	88
Şekil 4.2.4.9. 42A 100 $\mu s$ 100 $\mu s$ 80V.....	88
Şekil 4.2.4.10. 42A 100 $\mu s$ 100 $\mu s$ 100V.....	88
Şekil 4.2.4.11. 7A 6 $\mu s$ 12 $\mu s$ 40V.....	89
Şekil 4.2.4.12. 7A 6 $\mu s$ 12 $\mu s$ 40V.....	89
Şekil 4.2.4.13. 7A 6 $\mu s$ 12 $\mu s$ 40V.....	89
Şekil 4.2.4.14. 22A 6 $\mu s$ 50 $\mu s$ 100V.....	90
Şekil 4.2.4.15. 22A 6 $\mu s$ 50 $\mu s$ 100V.....	90
Şekil 4.2.4.16. 22A 6 $\mu s$ 50 $\mu s$ 100V.....	90

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Çizelge 2.1.1. Deneylerde kullanılan parametreler ve sonuçlar.....	5
Çizelge 2.1.2. F-1110 çeliği deney parametreleri.....	6
Çizelge 2.1.3. Deney parametreleri ve Ra değerleri.....	6
Çizelge 2.1.4. CuBe alaşımlı iş parçası deney parametreleri.....	7
Çizelge 2.1.5. Deney parametreleri ve Ra değerleri.....	11
Çizelge 2.1.6. Deney parametreleri.....	12
Çizelge 2.2.1. Deney parametreleri .....	16
Çizelge 2.5.1. EEİ araştırma yayınlarının çalışma alanlarına ve sayılarına göre dağılımı.....	50
Çizelge 2.5.2. Çeşitli imalat yöntemleriyle elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Ra ( $\mu\text{m}$ ) .....	51
Çizelge 3.1.1.1. Deneyde kullanılan CNC Elektro Erozyon Makinesi Özellikleri.....	54
Çizelge 3.1.2.1. Deneyde kullanılan dielektrik sıvının özellikleri.....	55
Çizelge 3.1.3.1.(a) İş parçası Assab79PM nin kimyasal bileşimi.....	56
Çizelge 3.1.3.1.(b) Assab79PM nin Fiziksel özellikleri.....	56
Çizelge 3.1.4.1. EEİ malzemelerinin bazı fiziksel özellikleri.....	58
Çizelge 3.1.6.1. Deneylerde kullanılan parametreler ve değerleri.....	60
Çizelge 3.1.6.2. Deneylerdeki sabit çalışma parametreleri.....	60
Çizelge 3.1.6.3. Deneyde uygulanan frekans değerleri.....	60
Çizelge 3.1.6.4. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan deney parametrelerinden bazıları.....	61
Çizelge 3.2.1. Bakır-tungsten ve grafit elektrotlar ile yapılan EEİ parametreleri.....	62
Çizelge 4.1.1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan deney sonuçlarının bir kısmı.....	63
Çizelge 4.1.2. Bakır, grafit ve Bakır-tungsten elektrotlar ile EEİ sonrası yüzey pürüzlülükleri.....	64
Çizelge 4.1.5.1. Yapılan deneysel çalışmanın diğerleri ile karşılaştırılması...	70
Çizelge 4.2.1.1. Evrimsel Programlamada kullanılan eğitim verileri.....	73
Çizelge 4.2.1.2. Evrimsel programlamada kullanılan test verileri.....	77
Çizelge 4.2.3.1. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve bulunan Ra değerleri.....	80
Çizelge 4.2.3.2. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve hesaplanan Ra değerleri.....	82
Çizelge 4.2.3.3. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve bulunan Ra değerleri.....	84

**EKLER DİZİNİ**

	<b>Sayfa No</b>
<b>EK 1.</b> .....	98
Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları.....	98
<b>EK 2.</b> .....	106
Bakır Elektrot Kullanılarak Yapılan Deneylerin Sonuçları.....	106
Şekil 1. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 25 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu$ s.....	106
Şekil 2. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 50 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu$ s.....	106
Şekil 3. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 100 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu$ s.....	107
Şekil 4. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 6 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s.....	107
Şekil 5. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 12 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s.....	108
Şekil 6. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 25 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s.....	108
Şekil 7. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 50 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s.....	109
Şekil 8. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 100 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s.....	109
Şekil 9. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 6 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s.....	110
Şekil 10. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 12 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s.....	110
Şekil 11. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 25 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s.....	111
Şekil 12. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 50 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s.....	111
Şekil 13. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 100 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s.....	112
Şekil 14. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 6 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s.....	112
Şekil 15. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 12 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s.....	113
Şekil 16. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 25 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s.....	113
Şekil 17. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 50 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s.....	114
Şekil 18. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 100 $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s.....	114
Şekil 19. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt.....	115
Şekil 20. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt.....	115
Şekil 21. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt.....	116
Şekil 21. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt.....	116
Şekil 22. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt.....	117
Şekil 23. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt.....	117
Şekil 24. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt.....	118
Şekil 25. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt.....	118
Şekil 26. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt.....	119
Şekil 27. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt.....	119
Şekil 28. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt.....	120
Şekil 29. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt.....	120
Şekil 30. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt.....	121
Şekil 31. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt.....	121
Şekil 32. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt.....	122
Şekil 33. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt.....	122
Şekil 34. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt.....	123
Şekil 35. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt.....	123
Şekil 36. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt.....	124
Şekil 37. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt.....	124
Şekil 38. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt.....	125
Şekil 39. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s, Aralık voltajı 60 .....	125
Şekil 40. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s Aralık voltajı 80 Volt.....	126

Şekil 41. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50 $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt.....	126
Şekil 42. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt.....	127
Şekil 43. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt.....	127
Şekil 44. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt.....	128
Şekil 45. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100 $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt.....	128
Şekil 46. Boşalım akımı 7 Amper, Aralık voltajı 80 Volt.....	129
Şekil 47. Boşalım akımı 7 Amper, Aralık voltajı 100 Volt.....	129
Şekil 48. Boşalım akımı 12 Amper, Aralık voltajı 40 Volt.....	130
Şekil 49. Boşalım akımı 12 Amper, Aralık voltajı 60 Volt.....	130
Şekil 50. Boşalım akımı 12 Amper, Aralık voltajı 80 Volt.....	131
Şekil 51. Boşalım akımı 12 Amper, Aralık voltajı 100 Volt.....	131
Şekil 52. Boşalım akımı 22 Amper, Aralık voltajı 40 Volt.....	132
Şekil 53. Boşalım akımı 22 Amper, Aralık voltajı 60 Volt.....	132
Şekil 54. Boşalım akımı 22 Amper, Aralık voltajı 80 Volt.....	133
Şekil 55. Boşalım akımı 22 Amper, Aralık voltajı 100 Volt.....	133
Şekil 56. Boşalım akımı 42 Amper, Aralık voltajı 40 Volt.....	134
Şekil 57. Boşalım akımı 42 Amper, Aralık voltajı 60 Volt.....	134
Şekil 58. Boşalım akımı 42 Amper, Aralık voltajı 80 Volt.....	135
Şekil 59. Boşalım akımı 42 Amper, Aralık voltajı 100 Volt.....	135

## 1. GİRİŞ

Talaşlı imalat endüstrisinde kullanılan yöntemlerden biri olan Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) yöntemi, kesici takım kullanımı gerektirmemesi ve düşük maliyetlerde imalat olanağı sağlaması ile gittikçe yaygınlaşan bir talaşlı imalat türüdür. Kalıp ve talaşlı imalat işlemlerinde kullanılmak üzere işlenmesi gereken metal/sertleştirilmiş metal malzemelerin daha düşük bir maliyet ile istenen ölçü hassasiyeti ve doğruluğunda, geleneksel metotlarla işlenmesi zor yada imkansız olabilen karmaşık şekilli parçaların işlenmesine olanak sağlayan bir imalat yöntemidir.

Elektro erozyon ile işleme, özellikle kalıpcılık, uçak-uzay sanayinde kullanılan metal malzemeleri yüksek hassasiyetle işleme ve her sertlikteki elektrik iletkenliği olan malzemelerin ve metal alaşımlarının işlenmesinde kullanılmaktadır.

Gelişen teknolojiyle birlikte değişen metal malzeme özellikleri ile karmaşık şekillerin kalıplara işlenmesi, boşaltılacak hacmin tersi şeklindeki elektrotların üretimi ve kullanımı sonucu yapılacak elektro erozyon işlemiyle elde edilmektedir.

Günümüzde, kalıbın maruz kalacağı basma, çekme gibi kuvvetlerin göz önüne alınarak özel olarak üretilebildiği toz metalürji teknolojisiyle kalıp malzeme özellikleri gittikçe iyileşmekte ve buna paralel olarak işlenebilirliğinde de problemler ile karşılaşmaktadır. Elektro Erozyon İşlemi, malzeme sertliğine bağlı olmadan her sertlikteki elektrik ileten metal malzemedeki, çok karmaşık şekilleri işleyebilme kabiliyetinden dolayı çok tercih edilen yöntemlerdendir. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) elektriksel olarak iletken bir iş parçasına yüksek frekanslı elektrik boşalmalarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece iş parçasından küçük parçacıkların ergitilerek ve buharlaştırılarak koparılması prensibine dayanan bir işleme yöntemidir.

İş parçasını aşındırarak işleme yapan EEİ elektrot malzemesinin iyi elektrik iletmesi, ucuz olması ve kolay temin edilebilirliği gibi özelliklerinden dolayı bakır en fazla tercih edilen elektrot malzemelerindedir. Bakır elektrotların yanında, bakır-



tungsten, bakır-grafit, grafit, pirinç gibi malzemelerde kullanılmaktadır. Bakırdan sonra kolay işlenebilirli ile grafit tercih edilmektedir. Tungsten malzeme ise iletkenliğinin ve talaş kaldırma oranının yüksek olmasına rağmen, pahalı olması nedeniyle pek tercih edilmemektedir.

Talaşlı imalat yöntemiyle üretilen parçalarda kaliteyi belirleyen faktörlerden birisi yüzey pürüzlülüğüdür. EEİ işlemi sonrası istenen yüzey kalitesine ulaşmak için EEİ çalışma parametreleri (boşalım akımı, aralık voltajı, vuruş süresi, bekleme süresi gibi) doğru seçilmeli, zaman kaybına yada yüksek maliyete sebep olmamalıdır. Bu yüzden uygulanacak kaba işleme yada bitirme işlemine göre erozyon parametreleri seçilmelidir. Elektro erozyon için seçilecek çalışma koşulları, talaş kaldırma performansını oluşturacak olan elektrot aşınması, talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları ile değerlendirilmektedir.

Bir sistemi etkileyen parametreler çok ve aralarındaki ilişki doğrusal değil ise aralarında matematiksel ilişki kurmak oldukça güçtür. Ancak, son yıllarda mühendislik alanında kullanımı hızla yaygınlaşan yapay zeka yöntemleri non-lineer parametreler arasında ilişki kurmada da önemli mesafe kaydetmektedir. Elektro Erozyon ile İşleme parametreleri, hem zaman hem maliyet açısından optimum seviyede çalışması yada belirlenen herhangi bir hedef fonksiyonu gerçekleştirme amacıyla yapay zeka yöntemleri ile daha pratik ve etkin modellenebilmektedir.

Bu çalışma sırasında, EEİ yapılırken boşalım akım şiddetleri, aralık voltajı, vuruş süresi, bekleme süresi parametreleri aşındırılan iş parçası, elektrot malzemesi ve çalışma şartlarının işlenen yüzeyde oluşturduğu pürüzlülük ve elektrotta oluşan malzeme kaybı incelenmiştir.

Elektro Erozyon işlemi sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve elektrotta kaybolan malzeme miktarı tespit edilerek aralarındaki ilişki Genetik Programlama (Evrimsel Programlama) ile C++ program dilinde matematiksel fonksiyonu oluşturulmuştur. Elde edilen bağıntılar ile yapılması düşünülen farklı EEİ şartları sonucu elde edilecek yüzey pürüzlülüğü ve elektrot aşınma miktarı hesaplanabilecektir. Ayrıca, elektro

erozyon işlemine maruz kalan iş parçası yüzeyinden itibaren ısıdan etkilenmeyen metale doğru değişen sertlikler de tespit edilmiştir.

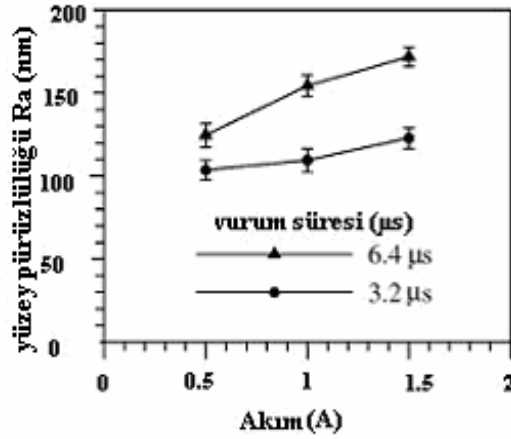
Bu çalışma, konuyla ilgili literatür incelemesi, elektro erozyon ile işleme esasları, yapay zeka uygulamaları, yüzey pürüzlülüğü, materyal ve yöntem, bulgular-tartışma ve sonuç bölümlerinden oluşmaktadır.

## 2. KAYNAK BİLGİSİ

EEİ ile ilgili literatür taraması, yüzey pürüzlülüğünü oluşturan Elektro erozyon çalışma parametrelerinin değişimlerini ve etkilerinin araştırıldığı literatür çalışmaları ve Elektro erozyon işlemlerinin yapay zeka teknikleri kullanılarak kontrol edildiği çalışmalar olmak üzere iki ana başlık altında yapılmıştır.

### 2.1. Elektro Erozyon İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi ile İlgili Literatür İncelemesi

Guu (2005), tarafından yapılan deneysel çalışmada, ısıtılarak 57 HRC ye sertleştirilmiş kalıp endüstrisinde kullanılan AISI D2 takım çeliği iş parçası olarak seçilmiştir. Dielektrik sıvı olarak gaz yağı ve vurum süresi 3.2, 6.4  $\mu$ s, bekleme süresi 20  $\mu$ s şartlarında negatif kutupta, bakır elektrot kullanarak 1mm derinlikte delikler delinmiştir. Deneysel sonucu, yüzey topolojisi, yüzey pürüzlülüğü (Şekil 2.1.1.) ve mikro-çatlakları, AFM (Atomic Force Microscope) mikroskobunda analiz edilmiştir. Deneysel sonucunda, yüksek boşalım enerjisi ile zayıf yüzey yapısının oluştuğunu, düşük boşalım enerjisinin kullanılması gerekliliği tespit edilmiştir.



Şekil 2.1.1. Akım ve vurum süresinin, yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Luis vd. (2005), seramik malzemelerden silikon karpit (SiSiC) iş parçasına negatif kutuplu bakır elektrotlar ile farklı parametrelerde elektro erozyon uygulanmış ve sonuçları Çizelge 2.1.1 de gösterilmiştir. Kullanılan parametreler ve simgeleri; akım

( $I$ ), vurum süresi ( $t_i$ ), kullanma faktörü ( $\eta$ ), açık devre voltajı ( $U$ ), dielektrik sıvı akış basıncı ( $P$ ), elektrot aşınması (EW), talaş kaldırma oranı (MRR) dır.

Çizelge 2.1.1. Deneylerde kullanılan parametreler ve sonuçlar

No	$I$	$t_i(\mu s)$	$\eta$	$U(V)$	$P(kPa)$	$EW(\%)$	$MRR(mm^3/min)$
1	3	30	0,4	-120	60	10,29	0,033
2	5	30	0,4	-120	20	7,34	0,104
3	3	70	0,4	-120	20	19,82	0,02
4	5	70	0,4	-120	60	10,01	0,116
5	3	30	0,6	-120	20	11,87	0,049
6	5	30	0,6	-120	60	9,83	0,091
7	3	70	0,6	-120	60	13,55	0,03
8	5	70	0,6	-200	20	12,16	0,136
9	3	30	0,4	-200	20	12,66	0,051
10	5	30	0,4	-200	60	7,40	0,312
11	3	70	0,4	-200	60	16,06	0,03
12	5	70	0,4	-200	20	7,91	0,267
13	3	30	0,6	-200	60	12,84	0,092
14	5	30	0,6	-200	20	11,63	0,344
15	3	70	0,6	-200	20	16,33	0,055
16	5	70	0,6	-200	60	9,29	0,354

Puertas vd. (2004), tarafından yapılan çalışmada, 92 HRA sertlik değerinde 94WC-6Co seramik malzeme, negatif kutupta bakır elektrot ile 3, 4, 5 Amper akımlarda, 10, 30, 50  $\mu s$  vurum süresi, 0.4, 0.5, 0.6 kullanma faktörü parametreleri ile elektro erozyon işlemi sonucu Ra yüzey pürüzlülüğü ile elektrot aşınması ve talaş kaldırma oranı aşağıdaki formüller ile tespit edilmiştir.

$$\text{Talaş kaldırma oranı} = \frac{\text{iş parçasından kaldırılan talaş miktarı (mm}^3\text{)}}{\text{işleme zamanı (dakika)}}$$

$$\text{Elektrot aşınması \%} = \frac{\text{elektrottan kaldırılan talaş miktarı (mm}^3\text{)}}{\text{iş parçasından kaldırılan talaş (mm}^3\text{)}}$$

Tungsten karpit malzemede, iyi bitirme yüzeyi elde etmek amacıyla, boşalım akımı ve vurum süresinin düşük değerlerde uygulanacağına veya bir diğer şekilde, önceki durumdan daha yüksek olmasına rağmen, düşük pürüzlülük değerleri elde etmek için yüksek akım değerleri ile düşük vurum süresinin kullanılacağı sonucuna varılmıştır.

Puertas ve Luis (2004), F-1110 çeliğini iş parçası malzemesi olarak belirlenilmiş ve bakır elektrot pozitif (+) kutuplama ile aşağıdaki akım, vurum ve bekleme sürelerinde işlenilmiş ve elde ettikleri pürüzlülük değerleri aşağıdaki Çizelge 2.1.2. de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1.2. F-1110 çeliği deney parametreleri

Akım (A)	$t_{on}$ ( $\mu s$ )	$t_{off}$ ( $\mu s$ )	Ra ( $\mu m$ )
0.5	4	8	3.69
6	4	8	1.78
0.5	16	8	2.95
6	16	8	2.49
0.5	4	12	3.90
6	4	12	2.07
0.5	16	12	3.06
6	16	12	2.48
2	10	10	2.27
2	10	10	2.77
2	10	10	2.47
2	10	10	2.37

Çoğun vd. (2004), değişik parametrelerle uygulanmış elektro erozyon işlemlerinde, iş parçalarının yüzey profilleri deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. İş parçası olarak Ç2080 takım çeliği kullanılmıştır. Çeşitli vurum süresi, boşalım akımı, dielektrik sıvı basıncında elde ettikleri Ra pürüzlülük değerlerinin bir kısmı aşağıdaki Çizelge 2.1.3. de gösterilmiştir. Deneylerden elde edilen, yüzey pürüzlülük değerleri geliştirilen bir yazılım ile sayısallaştırılarak Fourier serileri ile modellenmiş, oluşturulan serilerden birinin yüzey profilini iyi bir uyumla temsil ettiği saptanmıştır.

Çizelge 2.1.3. Deney parametreleri ve Ra değerleri

Numune No	Vurum Süresi ( $\mu s$ )	Boşalım Akımı (A)	Dielektrik Basıncı (bar)	Ra ( $\mu m$ )
104	25	12	1,50	6,80
106	50	12	1,00	5,36
110	100	12	1,00	5,26
116	200	12	1,50	9,43
117	25	18	0,75	5,49
124	50	18	1,50	9,09
125	100	18	0,75	4,23
132	200	18	1,50	8,73

Tamura ve Kobayashi (2004), tarafından yapılan çalışmada, EEİ ile talaş kaldırma mekaniği açıklanmıştır. İlk olarak elektrik boşalmasında boşalım enerjisini ölçülmüş, ikinci olarak ise hangi formda çukur (krater) oluştuğu incelenilmiştir. Sonuç olarak; elektro erozyon işleminde, aynı koşullar altında oluşan çukurların şeklinin kesinlikle kutuplara(+,-) bağlı olduğunu ayrıca çukurlukların şeklinin iş parçası ve elektrot arasındaki itme gücü tarafından etkilenmediği belirlenilmiştir.

Fuling vd. (2004), EEİ parametreleri olan boşalım akımı, iş parçası kutubu ve takım elektrotunun dönme hızının performans özellikleri olan talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi test edilmiştir. Elektro erozyon işleminde kullanılan dielektrik sıvı (kerosen) içerisine silikon tozu (powder-mixed) eklenmiş ve geleneksel EEİ sonuçlarıyla kıyaslanılmıştır. Sonuçlarda, silikon tozu eklenmiş elektro erozyon işlemi ile hem daha yüksek talaş kaldırma oranı hem daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağlandığı tespit edilmiştir.

Amorim ve Weingaertner (2004), Enjeksiyon kalıpları için takım endüstrisi tarafından uygulanan AISI P20 çeliği, bakır elektrotlar kullanılarak çeşitli elektro erozyon değişkenleri [ $t_{on}=1.6, 3.2, 6.4, 12.8, 25, 50, 100, 200$   $t_{off} = 1.6, 3.2, 6.4, 12.8, 25, 50, 100, 200$  boşalım akım= 1, 2, 3, 6, 8 amper, elektrot kutupları (+), (-) ] ile analiz edilmiştir. Maksimum talaş kaldırma oranı 8 Amper ve  $t_{on}$  50  $\mu s$  de pozitif elektrot ve minimum Ra = 0.6  $\mu m$  değerini 3 Amper akım ve  $t_{on}$  12.8  $\mu s$  de negatif elektrot kutubu kullanarak elde edilmiştir.

Amorim ve Weingaertner (2004), yaptıkları deneysel çalışmalarında, CuBe alaşımli iş parçasına bakır elektrot kullanılarak elektro erozyon işlemi uygulanmıştır. Uygulanan deney parametreleri sonucunda elde ettikleri Talaş Kaldırma Oranı (TKO) ( $mm^3/min$ ) değerleri Çizelge 2.1.4. de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1.4. CuBe alaşımli iş parçası deney parametreleri

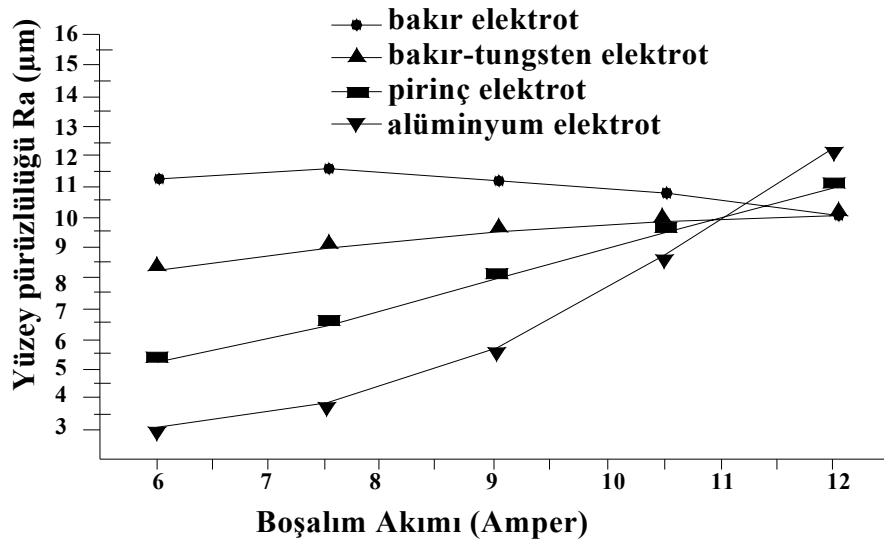
Akım (A)	Vurum süresi (ton)
21, 40, 64	10, 30, 100, 300, 500, 600
4, 8, 15	8, 10, 20, 30, 100, 300, 500
elektrot	bakır (+)
Kullanma faktörü	0.5

Çizelge 2.1.4. CuBe alaşımlı iş parçası deney parametreleri(devam)

$t_{on}(\mu s)$	$TKO(mm^3/dak)$	$TKO(mm^3/dak)$	$TKO(mm^3/dak)$
30	6	12	13
100	11	24	28
300	8	29	59
500	6	23	55
600	6	20	52
	(21 Amper)	(40 Amper)	(64 Amper)

Yahya ve Manning (2004), tarafından, elektro erozyon işleminde, talaş kaldırma oranında fiziksel ve elektriksel parametrelerin etkileri ölçüsel analizi kullanılarak tanımlanmıştır. Süreci etkileyen parametrelerin (aralık voltajı, boşalım akımı, vurum süresi, boşalım frekansı) matematiksel modelini kurulmuş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analizin geçerliliği, deneysel bulgular ile tahmin sonuçlarının tutarlılığı sonucu sağlanmıştır.

Shankar vd. (2004), Isıl işlem sonucu 55 Rc sertliğe ulaşan En-31 takım çeliği (IS: T105 Cr 1 Mn 60) pozitif kutuplanılarak, bakır, bakır-tungsten, pirinç ve alüminyum elektrot kullanılarak, 40 V voltaj ve 6, 7.5, 9, 10.5 , 12 Amper akımlarda elektro erozyon işlemi uygulanmıştır. Uygulanan erozyon sonucu Şekil 2.1.2. de görülen pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Bakır (Cu) ve Alüminyum (Al) elektrotları yüksek değerlerdeki akımlarda, iş parçası yüzeyinde yüksek pürüzlülük değerlerine ulaşmıştır.

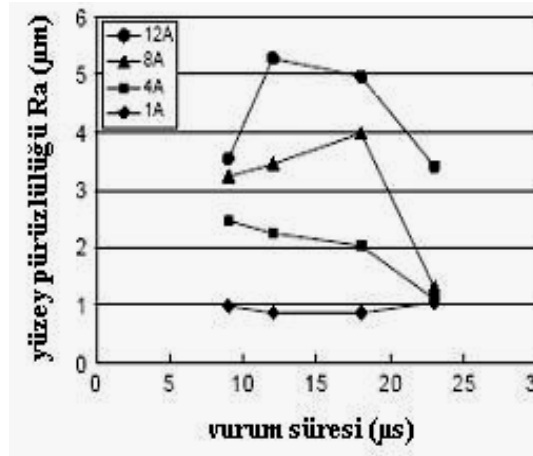


Şekil 2.1.2. Ra ve Boşalım akımı değişiminin deneysel sonuçları

Valentincic ve Junkar (2004), tarafından, EEİ ortalama elektrik boşalım voltajının, çeşitli şekillerdeki elektrotlarda aşınan yüzeyin boyutuna bağlılığı incelenilmiştir. Deneysel süresince işleme parametreleri sabittir, aşınan yüzeyin boyutu ve yüzeyin geometrisi çeşitlidir. Değişik elektrot yüzeylerinde ve değişik iş parçaları arasındaki elektrik voltaj sinyallerinde olması gereken ortalama elektrik boşalım akımı hesaplanılmıştır.

Hayakawa vd. (2004), tarafından, elektro erozyon işleminde iş parçası ve elektrot aralık mesafesinin yeni bir ölçüm metodu ile belirlenebilirliği araştırılmıştır. Amacı, kısa devrenin sebebinin anlaşılması ve işleme oranının artırılmasıdır. Yaptıkları deneysel araştırmaların sonuçları göstermiştir ki, kısa devrenin sebebi biriken talaş parçacıklarının aralık boşluğunda bir köprü oluşturmasıdır. Yeni iş parçası ve elektrot aralık kontrol metodunda, talaş parçaları ortamdaki uzaklaştırılarak ve bu mesafenin sürekli korunması ile problem çözülmüştür.

Lee vd. (2004), AISI 1045 karbon çeliğine bakır-tungsten elektrot ile elektro erozyon işlemi uygulaması sonucu yüzey pürüzlülük değerleri grafiği Şekil 2.1.3. de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Deneysel parametreleri; vurum süresi 9, 12, 18, 23 ( $\mu$ s), açık devre voltajı 200 V ve kullanma faktörü 0.5 dir.



Şekil 2.1.3. Akım ve vurum süresinin pürüzlülüğe etkisi

Peças ve Henriques (2003)'e göre EEİ geniş bir endüstriyel uygulama ile teknolojik bir süreçtir. Sürecin teknolojik yeterliliği yüzey kalitesiyle sınırlandırılmıştır. Yaptıkları çalışmada geleneksel ve silikon tozu eklenmiş dielektrik sıvı ile yapılmış



elektro erozyon işlemi sonrası oluşan yüzey pürüzlülüğünü karşılaştırılmıştır. Silikon tozu kullanılması ile zaman tasarrufunun sağlandığı ve pürüzlülüğün de azaldığı tespit edilmiştir.

Liu (2003), yaptığı çalışmada iletken TiN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramik kompozit malzemeyi elektro erozyon ile işleyerek malzemenin mikro-yapısı ve iletkenliği araştırılmıştır. Elektrot olarak pirinç ve bakır kullanılmıştır. Pirincin aşınma oranının bakırdan daha fazla olduğu ortaya çıkarılmıştır. Elektro erozyon ile işlenen yüzeyler SEM mikroskopuyla incelenilmiş, boşalım enerjisi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı(Ra) ve mikro-hasarların oluştuğu gözlemlenilmiştir.

Ghanem vd. (2003), Elektro erozyon işlemi ile, çelik tipinin yüzey doğruluğuna etkisi, iki sertleştirilebilir çelik (X155CrNiMo17-12-02, ferritik paslanmaz çelik X6Cr17) ve sertleştirilemez çelikte (östenitik paslanmaz çelik X2CrNiMo17-12-02 ve ferritik paslanmaz çelik X6Cr17) incelenilmiştir. Sertleştirilemez çeliklerde, metalurjik değişimler sonucu yalnızca beyaz katman oluşumu ile önemsiz derecede artan tane boyutu gözlemlenilmiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak X2CrNiMo17-12-02 çeliğinin sıcaklık ve gerilimi belirlenilmiş, deneysel ve hesaplanmış gerilim kıyaslanılmıştır. Hesaplanan değerlerin, elde edilen deneysel sonuçlardan fazla olduğu tespit edilmiştir.

Simao vd. (2003), tarafından yapılan çalışmada, bir kalıp için, hidrokarbon dielektrik sıvı içerisinde sinterlenmiş WC/Co elektrotları kullanarak AISI H13 sıcak takım çeliğine elektro erozyon işlemi uygulanmış, takım aşınması ve iş parçası yüzey sertliği ölçülmüştür. Sonuçta, yüzey mikrosertliğinin ~640 HK(0.025) dan 1319 HK(0.025) sertliğine ulaştığı tespit edilmiştir.

Tsai vd. (2003) tarafından, elektro erozyon işlemi için, aşınma ve korozyon dayanımını geliştirmek, yüzey kalitesini arttırmak amacıyla toz metal teknolojisiyle çeşitli oranlarda bakır tozları ile krom tozlarını içeren reçineyi harmanlayarak elektrot üretilmiştir. Üretilen elektrotların talaş kaldırma oranı, bakır elektrottan daha yüksek, oluşan beyaz katmanın daha ince ve daha az çatlaklı olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca, EEİ yapılan iş parçası yüzeyine Cr elementleri taşındığı için yüzeyde iyi bir korozyon dayanımı meydana getirilmiştir.

Guu vd. (2003), tarafından yapılan çalışmada, AISI D2 takım çeliğinin elektro erozyon ile işlenmesi sonucu oluşan yüzey özellikleri incelenilmiştir. İş parçası yüzeyi ve tekrar-katılacak katmanlar elektron mikroskopunda taranılmış ve yüzey pürüzlülüğü belirlenilmiştir.

Lee ve Tai (2003), tarafından, EEİ parametreleri ve yüzey çatlakları arasındaki ilişki değişik boşalım akımları ve vuruş sürelerinde incelenilmiştir. İş parçası malzemesi olarak D2 ve H13 çelikleri analiz edilmiştir. Elektrik boşalım voltajı 120 V değerinde, elektrik akım aralığı 12-16 A ve elektrik vuruş süresi 6-9  $\mu$ s uygulandığında yüzey çatlak oluşumundan korunmanın mümkün olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre de yüzey çatlak tahmin haritası kurulmuştur.

Özgedik ve Çoğun (2003), tarafından, elektro-erozyon ile işlemede elektrot aşınma hızı ve elektrot ön yüzey aşınmasının işleme parametreleri ile değişimi incelenilmiştir. Çelik iş parçası, silindirik bakır elektrot ve dielektrik sıvı gazyağı kullanılarak değişik dielektrik akış yöntemleri (püskürtme, emme ve sabit), boşalım akımları ve vuruş sürelerinde deneyler yapılmıştır. Deneyler neticesinde, işleme parametrelerinin ve dielektrik uygulama yöntemlerinin, elektrot aşınma hızı ve elektrot ön yüzey aşınması üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Lin vd. (2002), tarafından yapılan çalışmada, SKD11 alaşımlı çeliği bakır elektrot ile 10, 150, 300  $\mu$ s vuruş sürelerinde, 1.5, 4.0, 6.0 amper akımlarda ve 0.3, 0.5, 0.7 kullanma faktörü değerlerinde elektro erozyon yöntemi ile işlenilmiş ve elde ettikleri yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları Çizelge 2.1.5. de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1.5. Deney parametreleri ve Ra değerleri

Numara	Vuruş süresi ( $\mu$ s)	Kullanma faktörü	Boşalım akımı (A)	Ra ( $\mu$ m)	Ra ( $\mu$ m)	Ra ( $\mu$ m)
1	10	0.3	1.5	2.88	3.02	3.19
2	10	0.5	4.0	2.19	2.05	2.91
3	10	0.7	6.0	2.82	3.97	2.81

Çizelge 2.1.5. Deney parametreleri ve Ra değerleri (devam)

4	150	0.3	1.5	2.60	3.24	2.34
5	150	0.5	4.0	3.11	2.67	3.22
6	150	0.7	6.0	2.95	2.68	2.02
7	300	0.3	1.5	1.97	2.35	1.90
8	300	0.5	4.0	2.42	2.38	2.84
9	300	0.7	6.0	1.89	2.15	2.24

Li vd. (2001), tarafından, çeşitli oranlarda titanyum karpit (TiC) malzemedan oluşan iş parçaları sinterlemiş ve parçalar üzerinde bakır-tungsten elektrotlar kullanılarak elektro erozyon işlem performansı (yüzey pürüzlülüğü, en yüksek talaş kaldırma oranı) araştırılmıştır. %15 TiC, %85 Wolfram (W) bulunan iş parçasında en iyi yüzey kalitesi, en düşük takım aşınması ve en yüksek talaş kaldırma oranı tespit edilmiştir.

Lee vd. (2001), WC iş parçaları ile yaptıkları deneylerde işleme parametrelerinin işleme performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımının, gerilimin ve vurum süresinin artması ile arttığı, ancak, belli bir dielektrik sıvı basıncı ve vurum ara süresi için optimum değerlerin olduğu belirtilmiştir.

Lee ve Li (2001), bakır elektrot (- kutup) ve çeşitli akım değerlerinde yaptıkları EEİ çalışmalarında tungsten karpit iş parçası işlenilmiş ve Çizelge 2.1.6. da görülen talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir (diğer parametreler, 80 V aralık voltajı,  $t_{on}$  25  $\mu$ s,  $t_{off}$  200  $\mu$ s).

Çizelge 2.1.6. Deney parametreleri

Akım (A)	Ra	TKO(mm <sup>3</sup> /dak)
12	2	0.5
16	2.4	0.6
24	2.5	1.1
32	2.5	1.9
48	2.6	3.9
64	3.3	5.4

Marafona ve Wyhkes (2000), tarafından, bakır-tungsten elektrotlardan EEİ esnasında taşınan karbonun etkisi araştırılmıştır. İki farklı EEİ ayarı kullanarak iki aşamada işlem yapılmış ve bu yöntemle belirli bir takım aşınma oranı için talaş kaldırma oranı (çeşitli derinlik, boşalım akımı şiddetlerinde) arttırılmıştır.

Chow vd. (2000), Ti alaşımlı işparçaları ile yapılan deneyde gazyağı dielektrik sıvısına Alüminyum ve SiC tozu eklenilmiş, toz eklenilmemiş sıvılar ile karşılaştırılmış, toz eklenen sıvılarla yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir.

Chen vd. (2000), değişik boşalım akımı, vurum süresi ve vurum ara süresi değerlerinde deneyler yaparak yüzey pürüzlülüğü için aşağıdaki empirik ifade bulunmuştur;

$$R_{\max} = 1.5\pi(F_c i_e V_e t_i)^{1/3}$$

Burada,  $F_c$  malzeme, elektrot ve dielektrik sıvıya bağlı çarpım katsayısı ve  $V_e$  ortalama boşalım gerilimi,  $i_e$  boşalım akımı,  $t_i$  ile vurum süresi ifade edilmiştir.

Wang vd (1999), tarafından, bakır elektrot ve gazyağı dielektrik sıvı kullanılarak yapılan deneylerde 5, 10, 15 A boşalım akımı ve 100-600  $\mu$ s vurum süresi değerleri kullanılmış ve östemperlenmiş sünek demiri işleme hızı, elektrot aşınma hızı (kısaca “aşınma hızı”) ve yüzey pürüzlülüğü açısından incelenilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün uygulanan akım ve vurum süresi ile arttığı deneysel olarak bulunmuş ve aralarındaki ilişki aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$R_a = A(i_e)^B(t_i)^C [\mu\text{m}]$$

$$(A = 1.078166, B = 0.299662, C = 0.227414, R^2 = 0.93908)$$

Burada,  $i_e$  boşalım akımını,  $t_i$  vurum süresini, A, B, C sabitleri ve R ile regresyon katsayısı ifade edilmiştir.

Chen ve Mahdivan (1999), tarafından, elektro erozyon ile işlemenin elektrik boşalım akımı, vurum süresi, bekleme süresi, ölçü doğruluğu, yüzey kalitesi ve talaş kaldırma oranına etkisi araştırılmıştır. Sonuçta, elektro erozyon işleminde optimum vurum süresi ve bekleme süresi ile ya en yüksek erozyon oranının yada iyi yüzey kalitesinin elde edileceği tespit edilmiştir.

Gangadhar vd. (1991), tarafından yapılan çalışmada, EEİ sonrasında, yüzey katmanı değişiminin topografik, metalurjik ve fizikokimyasal özellikleri incelenilmiştir. EEİ vasıtasıyla mümkün olacak yüzey değişimi için fonksiyonel işlem parametreleri,

takım elektrotundan metal taşınması, iş parçası yüzeyinin X-ışınları ile analizi ve kimyasal analiz yapılarak incelenilmiştir.

Wong vd. (1998) ise AISI-O1, SKD-11, SKD61, SKH-51, SKH-54 takım çelikleri , grafit, Si ve MoS<sub>2</sub> tozlarının dielektrik sıvıya katılmasıyla, elektro erozyon yöntemiyle negatif elektrot kutup ile işlenilmiş ve SKH-51 takım çeliğinde çok düzgün aynaya yakın yüzeyler elde edilmiştir.

Samueli ve Philipt (1997), tarafından, EEİ de kullanılan geleneksel elektrotlar, toz metalurji yöntemi ile üretilen elektrotlarla kıyaslanılmıştır. Takım performansı, işlenen parçaların kalitesinin belirlenmesinde önemli faktörlerden biridir. Elektrotun özelliklerinin kontrolü ve üretimin kolay olmasından dolayı, toz metalurji tekniği ile üretimin avantajları belirtilmiş ve elektro erozyon işleminde toz metal elektrotların performansının daha iyi olduğu çeşitli yönleriyle gösterilmiştir.

Ming vd. (1995) tarafından yapılan çalışmada, hassas işlemede bazı iletken tozların(grafit, silikon karpit, alüminyum) gazyağına eklenmesi ile yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Lee vd. (1988) de yaptıkları çalışmaları ile AISI O1, A2, D2 ve D6 takım çeliklerinin EEİ den sonra yüzey değişimi ve oluşan hasar araştırılmıştır. Yüzey çatlaklarının derinliğinin beyaz katmanın kalınlığı ile ilişkili olduğu ve yüzeyde oluşan katmanın takım çeliği malzemesine bağlılığı tespit edilmiştir. Yüzey çatlaklarının yoğunluğunun, beyaz (recast) katmanın kalınlığı ile ilişkili olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, dielektrik sıvı akış şartları sabitlenerek, hasar gören katmanın takım çeliği malzemesine bakmaksızın kıvılcım atlama enerjisi ile ilişkili olduğu da saptanılmıştır.

Jilani vd. (1984), tarafından, elektro erozyon işlemi, dielektrik sıvı olarak saf su, çeşme suyu ve bu ikisinin karışımı bakır ve pirinç elektrotlar kullanılarak 4.5, 6, 7.5 A boşalım akımı ve 100-500 µs vurum süresi aralıklarında incelenilmiştir. Saf su ve çeşme suyu kullanıldığında bakır elektrot pirinç elektrottan daha düşük R<sub>maks</sub>

(maksimum tepe-çukur yükseklik pürüzlülüğü) değerleri alınmıştır.  $R_{maks} = 40-60$   $\mu\text{m}$  aralığı için çeşme suyunun gazyağına ve saf suya göre daha yüksek işleme hızları verdiği ortaya çıkarılmıştır. Her iki tip elektrot ve akım koşullarında vurum süresi arttığında  $R_{maks}$  değerlerinin arttığı tesbit edilmiştir.

Erden ve Temel (1978), tarafından, bakır elektrot ve çelik iş parçası ile yaptıkları deneysel çalışmada dielektrik sıvı olarak saf su, çeşme suyu, tuzlu ve gliserinli suyun işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü açısından gazyağına göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

## **2.2. Yapay Zeka Yöntemleri Kullanılarak Yapılan EEİ Performansları İle İlgili Literatür İncelemesi**

Kaneko ve Onodera (2004), kalıp yapmak için EEİ kullanımında iki girdi sinyali ile kendi kendini ayarlayan bir fuzzy (bulanık) kontrolün uygulanabilirliği incelenmiştir. Oluşturulan model ile elektro erozyon işleme hızı ve maksimum kesme derinliğinde dikkate değer gelişmeler elde edilmiştir.

Fenggou ve Dayong (2004), Yapay Sinir Ağı (YSA) uygulamalarının, EEİ sürecinde işlem parametreleri optimizasyonunda kullanılabileceği bir metot sunulmuştur. Deneysel sonuçlar ile hem küçük alanların EEİ ile işlenmelerinde hem de istenen ölçünün elde edilmesinde verimli bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

Valentincic ve Junkar (2004), elektro erozyon işleminde yüksek talaş kaldırma oranı ve düşük elektrot aşınma oranı için, aşınan yüzeyin boyutuna bağlı olarak on-line uygulanan elektrik akım şiddetini ayarlayan başarılı bir model oluşturulmuştur.

Wang vd.(2003), Elektrik boşalım yoluyla işlemin optimizasyon için genetik algoritma metodu ile yapay sinir ağının birlikte kullanılacağı hibrit modelleme uygulaması geliştirilmiştir. Nikel alaşımli iş parçası, grafit elektrot ile elektro erozyon yöntemiyle 10 amper akım, 40, 60, 80, 100  $\mu\text{s}$  vurum süresinde işlenilmiştir. Pürüzlülük değerleri Çizelge 2.2.1. de gösterildiği gibi tespit edilmiştir.

Sonuçlar ile hibrit modelleme kurulmuş ve üretim sürecinde varolan problemlere çözüm üretmesi amaçlanılmıştır.

Çizelge 2.2.1. Deney parametreleri

Vurum süresi ( $t_{on}$ ) ( $\mu s$ )	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) ( $\mu m$ )
40	4,9
60	6,1
80	7,9
100	8,4

Tsai ve Wang (2001), çalışmalarında, EEİ de işlenen değişik iş parçaları ve elektrot kutbunun değişimi ile bitirme yüzeylerini tahmin eden altı farklı sinir ağı ve bir sinir-bulanık (neuro-fuzzy) ağı modeli kurulmuştur. Kurulan dört sinir ağı modelindeki deneysel sonuçlar ve tahminlerin tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Tsai ve Wang (2001), elektrik boşalım yoluyla işlemede, uygun işleme parametreleri esas alınarak ölçü analizi için çeşitli malzemelerde yüzey-bitirme ölçüsünün yarı-deneysel modeli kurulmuştur. Modelin parametreleri, boşalım akımı, vurum süresi, elektrik kutupları ve malzeme özellikleri olarak seçilmiştir. Doğrusal olmayan optimizasyon modelleri tarafından en iyi-uygun parametreler ile yarı-deneysel model tahminlerinin, deneysel doğrular ile mutabık olduğu tespit edilmiştir.

Lin vd. (2000), Elektro erozyon işleminde çeşitli performans özelliklerinin optimize edilmesi için bulanık mantık ile Taguchi metodu uygulaması yapılmıştır. İşleme parametreleri (iş parçası kutubu, vurum süresi, açık devre voltajı, boşalım akımı, dielektrik sıvı) ve çeşitli performans özellikleri (elektrot aşınma ve talaş kaldırma oranı) göz önüne alınarak optimizasyon yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile uygulanan metodun verimliliği kanıtlanmıştır.

Kao ve Tarn (1997), EEİ sürecinin on-line denetlenmesinde kullanılmak amacıyla ileri beslemeli sinir ağı kurulmuştur. İş parçası-elektrot arasındaki aralık frekansları ve çeşitli frekans tipleri arasındaki ilişkileri geri yayımlı öğrenme algoritması aracılığıyla incelenilmiştir. Sonuçta, çeşitli işleme koşulları denetiminde kullanılmak için bu yaklaşımla verimli sonuçlar alındığı tespit edilmiştir.

Tarnag vd. (1997), tarafından, EEİ de vurum süresi için fuzzy set teorisi kullanılmıştır. Aralık voltajı ve akım ölçülerek EEİ de çeşitli elektriksel boşalım parametrelerinin sınıflaması yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile vurum süresinin, çeşitli kesme şartları altında hem hızlı hem de doğru olarak sınıflandırılabilceği gösterilmiştir.

Zhang vd. (1997), fuzzy teori ve uygulamalı fuzzy kontrol metodu kullanılarak, elektro erozyon işlem parametrelerinin en önemlilerinden biri olan aralık voltajı değişimi analiz edilmiştir. Sonuçlar ile EEİ çalışma derinliği değişiminden dolayı, elektrik boşalım koşulları kötü olduğunda girdi parametrelerinin düzenlenebileceği ve aralık boşalım koşullarının hızlıca yenilenebileceği sonucuna varılmıştır.



### 2.3. Elektro Erozyon İle İşleme (EEİ) Esasları

Elektro Erozyon Yoluyla İşlemenin temelleri 1770'lerde İngiliz kimyacı J.Priestly' in elektrik boşaltımı ve kıvılcımın aşındırıcı etkisini keşfetmesi ile ortaya çıkmıştır. Fakat ilk EEİ (Elektro Erozyon ile İşleme) uygulaması Mr. ve Mrs. Lazarenko tarafından II. Dünya Savaşı süreci içinde (1940) Moskova Teknik Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir (Puertas ve Luis, 2004). İlk denemeler ve yenilikler olmasına rağmen EEİ teknolojisi 1950'lere kadar yaygın olarak bilinmiyordu. 1970 yılında ise iş parçasında boşluk yaratmak için kullanılan elektrot sayısını azaltmak amacıyla bir rota etrafında hareket eden sistem icat edilmiştir. 1980'li yıllarda ise CNC EEİ Amerika da tasarlanarak tanıtılmıştır (Piotrowski, 1983).

Son zamanlarda EEİ hem Avrupa hem Amerika pazarında, herhangi sertlikteki iletken metallerin tüm tiplerinin (metalik alaşımlar, grafit, seramik v.b. gibi) yüksek-hassasiyette işlenmesi amacıyla geniş çapta kullanılmaktadır.

EEİ, kalıp ve döküm endüstrisinde geleneksel olmayan üretim şekillerinden en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu işlemin en önemli avantajı, işlenen malzemenin mekanik özelliklerinden bağımsız olması ve kesme kuvveti gerektirmemesidir. Böylece, yüksek sertlikte, gevrek ve kesmede zorluk olan malzemeler kolaylıkla ve istenen şekillerde işlenebilmektedir (Tsai vd. 2003).

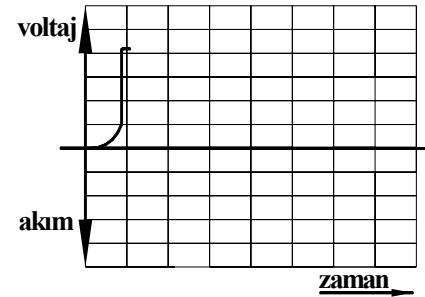
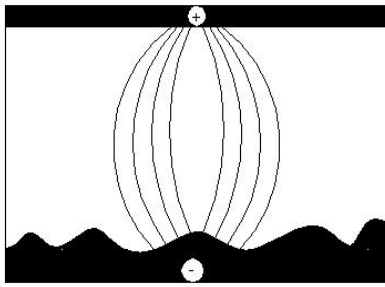
Bu bölümde, Elektro Erozyon makinesinin çalışma prensibi, elektrik boşaltımı yoluyla işleme tekniği, elde edilecek yüzey pürüzlülüğünü etkileyen çalışma parametreleri, iş parçası-elektrot malzemeleri, dielektrik sıvı özellikleri ve hareketi incelenmiştir.

### 2.3.1. Elektro Erozyon İşlemi Temel Prensibi

İş parçası yüzeyinden Elektro Erozyon yöntemiyle talaş kaldırma sırasında elektrot- iş parçası arasındaki akım-voltaj değişimleri ile plazma kanalı oluşumu ve talaş kaldırılması aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

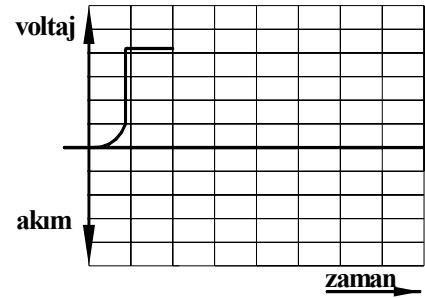
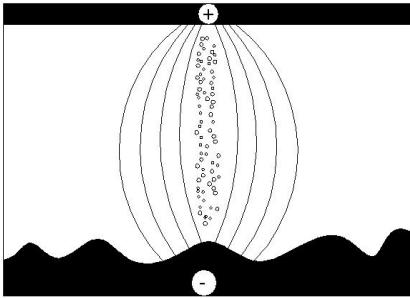
EEİ makinesinde elektrot iş parçası yüzeyine yaklaştırılmalı ve erozyon yapılacak yüzeyleri kapanana kadar iş tankı dielektrik sıvı ile doldurulmalıdır. Bu sıvı iyi bir yalıtkan olmalıdır ki yeterli elektriksel potansiyel oluşmadan elektrot ve iş parçası arasında akım akmasın. Sıvının, elektriksel boşalmaya yardımcı sıvının iyonizasyonu ile olur, diğer zamanlarda yalıtkan görevi görmelidir.

Elektriksel alan elektrot ile iş parçası arasındaki en yakın mesafede güçlenir voltaj artar fakat akım 0 (sıfır) değerindedir (Şekil 2.3.1.1.).



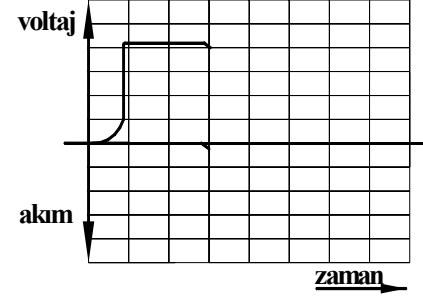
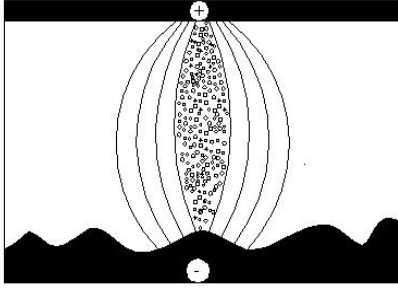
Şekil 2.3.1.1. EEİ süreci başlangıç durumu

Dielektrik sıvı iyonlaşmaya başlar (Şekil 2.3.1.2.), sıvının yalıtkan özelliği kuvvetli elektriksel alanın orta kısmındaki dar kanala doğru azalmaya başlar. Voltaj tepe değerine ulaşır fakat akım hala sıfırdır.



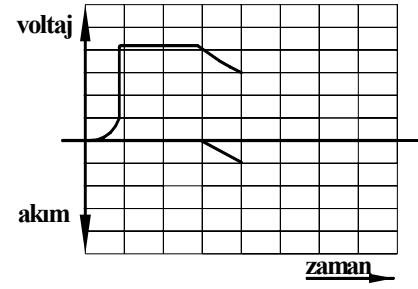
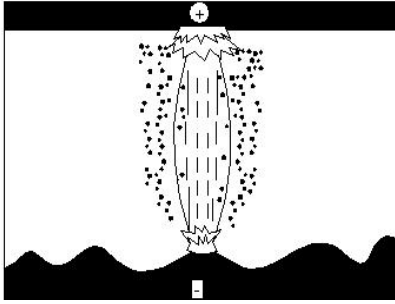
Şekil 2.3.1.2. Aralık voltajın uygulanarak en yüksek değerine ulaşması

Elektrik akımı, sıvının yalıtımı en aza indiğinde akmaya başlar (Şekil 2.3.1.3.). Isıl enerji, katot ve anot kutupları arasında elektronların hareketi ile 6000-10000 °C arasında değişen sıcaklıklarda bir plazma kanalı yaratmaktadır [Shobert, 1983].



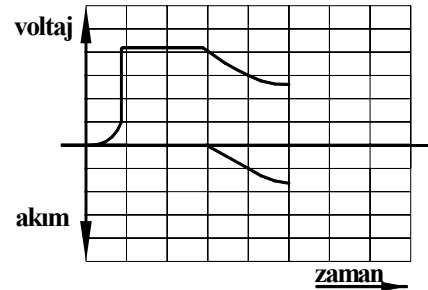
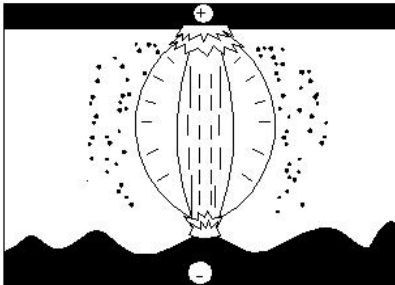
Şekil 2.3.1.3. Anot ve katot arasında plazma kanalı oluşumu başlaması

Boşalım akımının artışı ile voltaj düşmeye başlar (Şekil 2.3.1.4.). Plazma kanalı ile oluşan yüksek ısı, sıvının, iş parçasının ve elektrotun bir kısmını buharlaştırır.



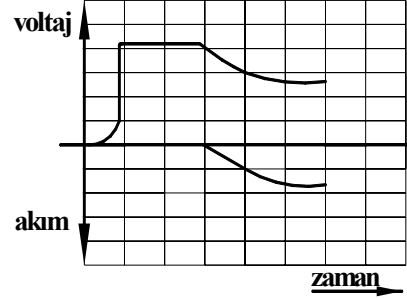
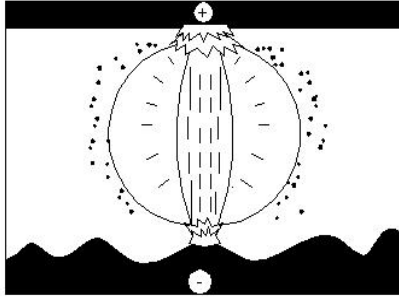
Şekil 2.3.1.4. Uygulanan akımın artması ile voltaj düşmeye başlar

Buhar kabarcıkları dışarıya doğru genişler fakat bu genişleme boşalma kanalındaki iyonların yoğunluğu ile sınırlıdır (Şekil 2.3.1.5.). Bu iyonlar çok güçlü elektromanyetik alan tarafından çekilirler.



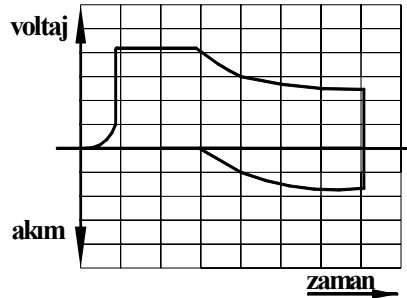
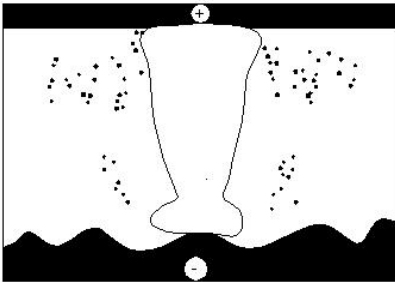
Şekil 2.3.1.5. Plazma kanalı içinde elektrik boşalımı

Erozyon işleminin sonuna doğru akım ve voltaj sabitlenir (Şekil 2.3.1.6.). Yüksek ısı ve basınç içindeki buhar kabarcıkları çıkmaya, bazı katılaştıran malzeme parçacıkları uzaklaştırılmaya başlanır. Boşalma kanalı, buharlaşmış metal, dielektrik sıvı ve karbondan oluşmuş çok sıcak bir plazma ile buradan geçen güçlü bir akımdan oluşur.



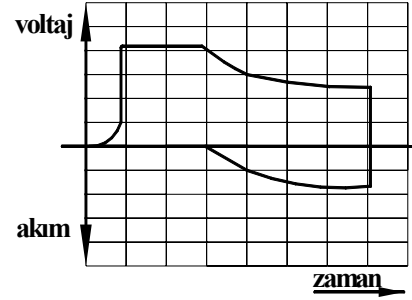
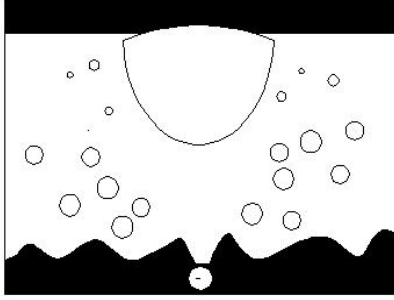
Şekil 2.3.1.6. Boşalım sonrası elektrik akımı ve voltaj sabitlenir

Elektrik boşalım fazı bittikten sonra bekleme zamanı başlar (Şekil 2.3.1.7.). Akım ve voltaj sıfıra düşer. Isı dielektrik sıvının akışı ile hızla azalır elektrot iş parçası yüzeyinden yukarı doğru belirlenen mesafede hareket eder ve kopartılan malzeme parçacıkları (talaş) çöker.



Şekil 2.3.1.7. Boşalım sonrası bekleme zamanı

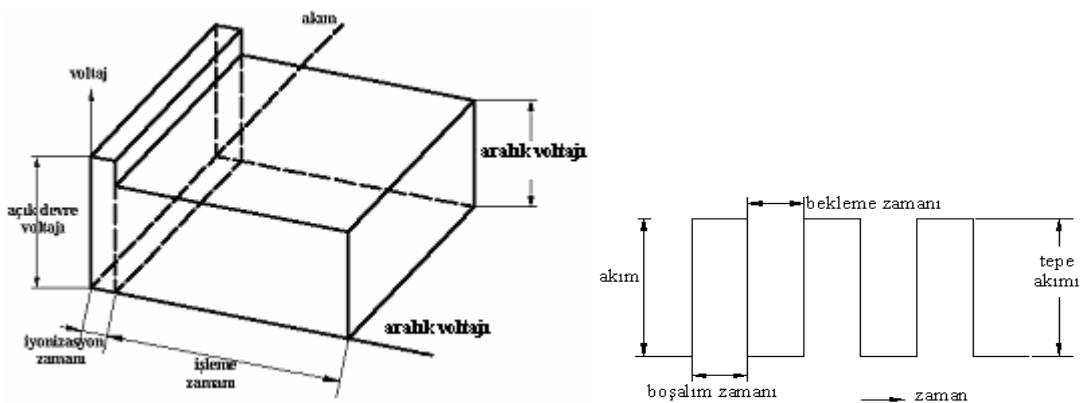
Devir-daim ile gelen temiz dielektrik sıvının yoğunluğu artar ve talaşlar erozyona uğrayan yüzeyden taşınır (Şekil 2.3.1.8.). Bu işlemlerin olduğu bekleme süresi yetersiz olursa, ortamda kalan talaşlar bir sonraki kıvılcımı düzgün oluşturamaz ve istenmeyen yüzeyler ve formlar elde edilir. Elektrottan koparılan parçacıklar ile metal yüzeyden uzaklaştırılan parçacıklar, dielektrik sıvının içine dağılırlar, oluşan buhar kabarcıkları yüzeye yükselir.



Şekil 2.3.1.8. EEİ işlemi biter ve deiyonizasyon meydana gelir

Şekilde görüldüğü gibi birbirine en yakın iki nokta aşınmıştır. Seçilen parametrelere bağlı olarak elektrottaki aşınma iş parçasındaki aşınmaya oranla daha azdır. Bu işlem döngüsü istenilen mesafesine kadar devam eder (Furkan Mühendislik).

Yukarıda açıklanan EEİ olayı Şekil 2.3.1.9. da, akım, açık devre voltajı ve aralık voltajının üç-boyutlu ifadesi şeklinde görülmektedir. Elektrik boşalımı olmadan önce akımın sıfır "0" voltajın en yüksek olduğu, iyonizasyon zamanını takip eden işleme zamanında voltaj önceden belirlenen aralık voltaj değerine düşerken akım en yüksek değerine ulaşmaktadır. Açık devre voltajı dışında, akım, vurum süresi ( $t_{on}$ ), aralık voltajı ve deiyonizasyon için bekleme süresi ( $t_{off}$ ) operatör tarafından tecrübe ile belirlenmektedir. Uygulanan tüm bu parametre değerleri işlem hızını, kalitesini, elektrot ve iş parçası aşınma miktarlarını etkileyen parametrelerdir.

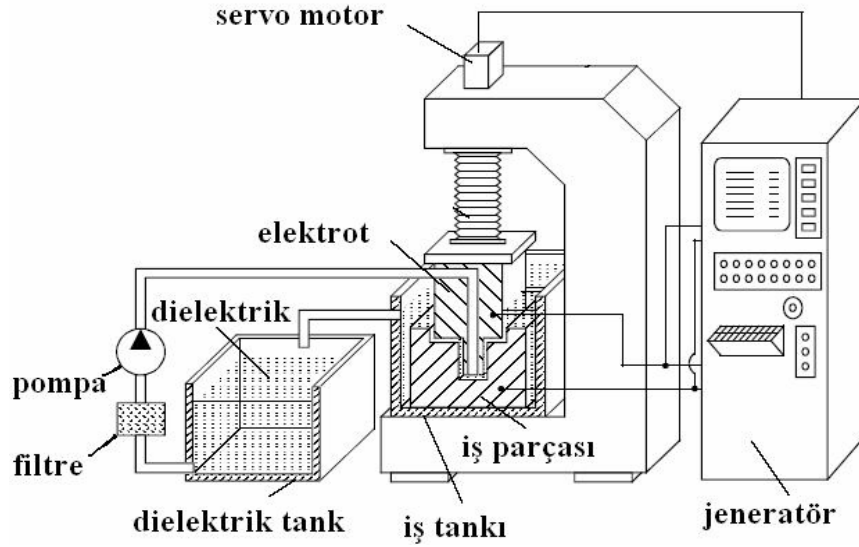


Şekil 2.3.1.9. Akım, açık devre voltajı ve aralık voltajın üç-boyutlu görünüşü

### 2.3.2. Elektro Erozyon Makinesi Çalışma Prensibi

Elektriksel boşalımı yolu ile işlemenin yapıldığı Elektro Erozyon makinesi, iş parçası ve elektrotun dielektrik sıvı içinde bulunduğu iş tankı, dielektrik sıvının filtrelendiği ve tekrar sisteme basıldığı dielektrik sıvı tankı, erozyon işlemi için gerekli enerjiyi üreten jeneratörden oluşmaktadır. Dielektrik sıvı içerisine batırılmış elektrot ve iş parçası arasında meydana gelen elektrik boşalmaları bir jeneratör tarafından sağlanmaktadır. Birçok eksen hareketi (x,y,z,u) olan Elektro Erozyon makinesi, servo kontrol altında dik ekseninde gösterilmektedir (Şekil 2.3.2.1.).

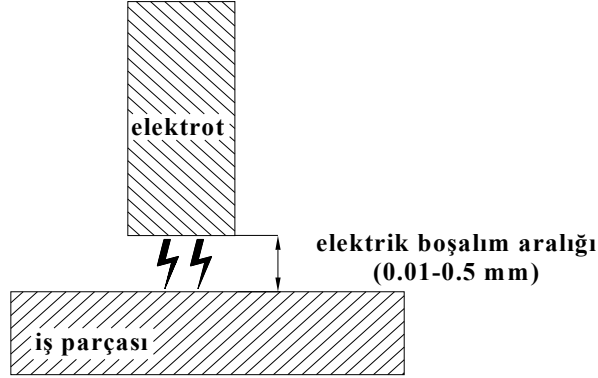
İş parçası ve elektrot sıvı dolu bir tank içindedir. Sıvı, devir daim pompası tarafından belli bir basınçta iş tankı içerisindeki aşındırma bölgesine dielektrik sıvı tankı ve filtre içinde dolaştırılır.



Şekil 2.3.2.1. Elektro erozyon makinesi elemanları

İş parçası ve elektrot arasında erozyon esnasında temasın olmaması önemlidir. Aksi halde kısa devre meydana gelerek hem iş parçası hem elektrot yüzeyinde hasar oluşacaktır. Elektro erozyon makinesinde, erozyon sonucu iş parçası ve elektrot aralığının aşınmadan dolayı artması sonucu bir süre sonra elektrik boşalımı yapılamaz hale gelecektir. Elektrotlar arasındaki sabit erozyon aralığının 0.01-0.5 mm de (Şekil 2.3.2.2.) otomatik olarak devam ettirilmesi servo-kontrol mekanizması ile gerçekleştirilir. Bu mekanizma, erozyon devam ederken elektrotun iş parçasına doğru

ilerlemesini-geri çekilmesini sağlamaktadır. İş parçası ve elektrot aralığında, çalışma parametresi olarak belirlenen aralık voltaj değerine ulaşıldığında elektrik boşalımı süreci başlar.



Şekil 2.3.2.2. İş parçası ve elektrot arasındaki elektrik boşalım aralığı

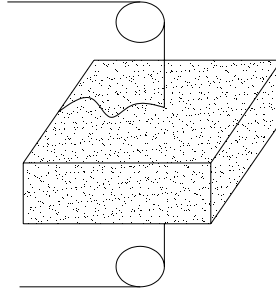
Ortamdaki basınçlı dielektrik sıvı dolaşımı, arkın oluşmasını sağlayarak erozyon sonrası kopartılan parçacıkların ortamdan uzaklaştırılmasını ve açığa çıkan yüksek ısının azaltılmasını sağlar. Verimli bir erozyon işlemi için boşalım aralık mesafesinin kontrolü gereklidir. Bu mesafe çok büyük olursa dielektrik iyonlaşmaz ve erozyon meydana gelmez. Boşluk çok küçük ise iş parçası ve elektrot birbirine kaynak olabilir. İşleme aralığının hassas kontrolü güç kaynağı içinde bir devre ile daha önceden seçilmiş referans voltaj ile ortalama boşalım aralık voltajını karşılaştırır. Elektrotun dik eksenindeki hareketini kontrol etmek ve elektrotun yatay hareketini gerektiren tezgah tablası hareketi için de servo ilerleme kontrol mekanizması kullanılmaktadır(Şahin, 2001).

### 2.3.3. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) Yöntemi Çeşitleri

Elektro erozyon işlemi, elektrot olarak belirlenen iletken metalin üzerinden akımın, hem elektrottan hem iş parçasından talaş kaldırması olayı olduğuna göre bu elektriksel özellik çeşitli şekillerde uygulanabilir. Bunlar, elektrik boşalımı yolu ile çalışan, Tel EEİ, Dalma EEİ ve Elektro erozyon freze olarak üç tür EEİ mevcuttur (Lauwers, 2000).

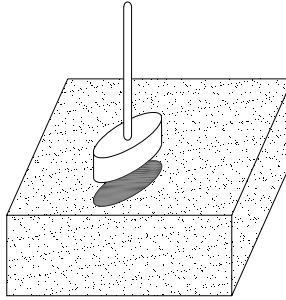
Tel EEİ' de alt ve üst iki çene arasında, uygulanan elektrik iletimini sağlayacak bir

telin iş parçasına ( $\mu\text{m}$ ) boyutunda yaklaşıp, kesilecek takım yolunu takip ederek iş parçasının kesilmesi işlemidir (Şekil 2.3.3.1.).



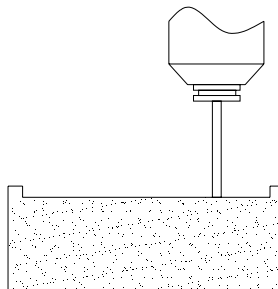
Şekil 2.3.3.1. Tel elektrot ile erozyon işlemi

Elektro erozyon ile işleme ise istenen oyuğa ters bir şekilde yapılmış takım elektrotunun erozyon yaptığı iş parçası yüzeyini aşındırması prensibine dayanır (Şekil 2.3.3.2.). EEİ işlemi için beş eksenle erozyon yapma imkanı sağlayan EEİ makineleri mevcuttur.



Şekil 2.3.3.2. Dalma elektro erozyon ile işleme

EEİ freze, elektro erozyonun geliştirilmiş halidir. Bu yöntemde istenen şekil silindirik elektrotların belirlenmiş takım yolunu takip etmesi ve talaş kaldırması ile oluşturulur (Şekil 2.3.3.3.). Bu işlemin normal frezeden farkı kesici yerine silindirik elektrot kullanılmasıdır.

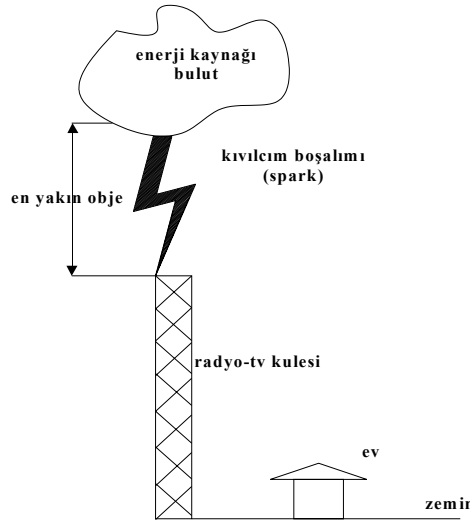


Şekil 2.3.3.3. Temel EEİ İşlemleri



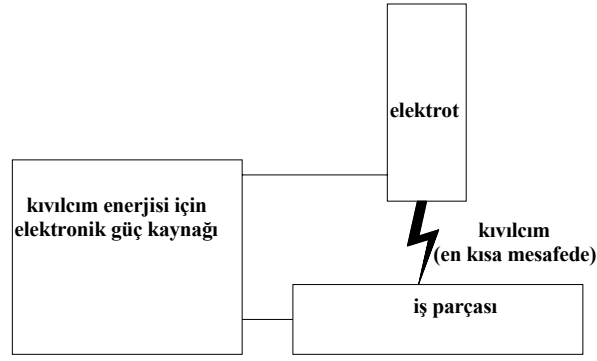
### 2.3.4. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ)

Elektro erozyon makinesinde yapılan, elektrik akım enerjisinin elektrot üzerinden geçmesi ile iş parçasından malzeme kaybına neden olan bu işleme en basit örnek herkesin yağmurlu havalarda karşılaştığı “yıldırım düşmesi” olayıdır. Yıldırım düşmesi, oldukça beklenmedik bir olaydır. Büyük bir elektriksel güce sahip olan yıldırım düşmesi çok önemli zararlara sebep olabilir. Yıldırım düşmesinde enerji, bulutlardan (elektrot) havada (dielektrik ortam) oluşan bir yol ile yeryüzüne (iş parçasına) boşalır (Şekil 2.3.4.1.)(Jameson, 1983).



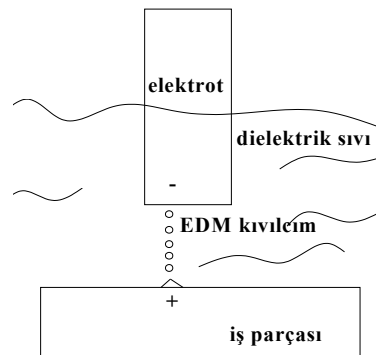
Şekil 2.3.4.1. Elektrik Boşalım Kuvvetleri

Yıldırımın şiddetine bağlı olarak yeryüzünde tahribat (aşınma) meydana gelir. Şekil 2.3.4.2. de yıldırım düşmesi şeklinde kıvılcım meydana gelişi (EEİ) gösterilmiştir. EEİ elektrik kıvılcımları; tahmin edilebilir ve her bir kıvılcımın enerjisi kontrol edilebilir. Enerji boşalması, elektronik kontrollü plazma kanalları (iş parçası ve elektrot arası en kısa mesafe) ile sağlanır ve mikro-saniye düzeyinde gerçekleşir. Elektrik güç kaynağı, elektrik boşalımını, bekleme zamanını mikro-saniye ( $\mu s$ ) ve her kıvılcımın boşalım akımını (amper) kontrol eder. Elektro erozyon ile işleme (EEİ) elektriksel olarak iletken bir iş parçasına yüksek frekanslı elektrik boşalımlarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece iş parçasından küçük parçacıkların ergitilerek ve buharlaştırılarak koparılması prensibine dayanır.



Şekil 2.3.4.2. Elektrik Boşalımı ile Talaş Kaldırma

Gerilimin uygulanmasını takiben elektrot ve iş parçası arasındaki en yakın iki nokta arasında bir kanal iyonlaşır. İyonize kanal içinde elektronlar, elektrottan iş parçası yüzeyine akarak çarpar ve enerjileri ısı formunda serbest kalır. Oluşan elektrik boşalımı temas ettiği elektrot ve iş parçası yüzeylerinin ergimesine ve buharlaşmasına neden olur. Sonuçta, iş parçasında küçük kraterler oluşacak şekilde malzemeler yüzeyden kopar ve dielektrik sıvı sirkülasyonu tarafından ortamdan uzaklaştırılır. EEİ yönteminde oluşan yüzeyler kratersi yapıdadır (Şekil 2.3.4.3.). Birbirine mikron-metre mesafesinde yakın olan ama temas etmeyen iki yüzey arasında meydana gelen elektron akışının yalnızca bu iki yüzey arasında olmasını sağlamak amacıyla elektrik iletmeyen (dielektrik) sıvı içinde EEİ işlemi gerçekleştirilmektedir.

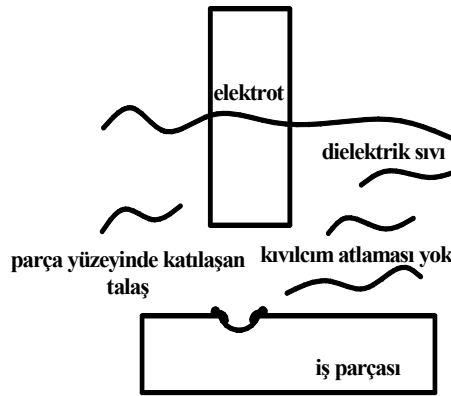


Şekil 2.3.4.3. Elektronların kıvılcım olarak akışı

EEİ tezgahında elektrot ile iş parçası arasına bir voltaj (aralık voltajı) uygulanır ve elektrot iş parçasına bir servo mekanizma tarafından yaklaştırılır. Elektrot ve iş

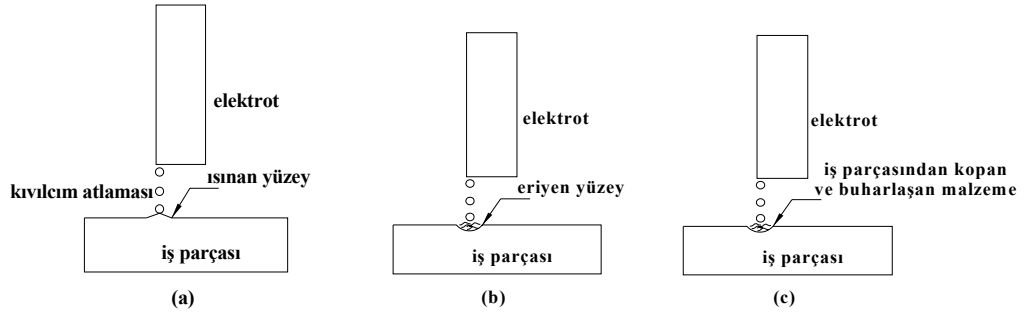
parçası arasında en yakın olan noktada dielektrik kırılır ve iyonlaşır. Buradan akım geçişi (ark-enerji boşalması) başlar. Dielektrik sıvı basıncı oluşan arkı dar bir alanda hapseder. Yüksek akım geçişi ve iyon bombardımanı ile iş parçası ve elektrot üzerinde yüksek miktarlarda 8000 ila 12000 °C ısı oluşur (Ho ve Newman 2003). Bu ısı iki elektrotta da bir kısım metalin buharlaşmasına bir kısmının erimesine neden olur.

Tezgahın elektronik kontrolü ile akım kesilerek erozyon işlemi bitirilir. Elektrot, erozyon işleminin tersine yukarı kalkma mesafesi ile hareket eder. İyonlaşmış bölgeye hücum eden dielektrik sıvının erimiş metale teması ile eriyen metal tanecikleri katılaşıp sıvı içinde yüzmeye başlarlar (Şekil 2.3.4.4.).



Şekil 2.3.4.4. Elektrik boşalması sonucu talaş oluşumu

Böylece iş parçasından bir miktar talaş kaldırılmış ve iş parçası-elektrot arasındaki en yakın iki nokta uzaklaşmış olur (Şekil 2.3.4.5.). Elektrik akımının sürekli uygulanıp-kesilmesi ile sürekli bir elektro erozyon dizisi oluşturularak her defasında iş parçasından farklı bir nokta kopartılarak elektrotun tersi hacim boşaltılır. Elektrot ve iş parçası pozitif ve negatif kutuplanarak erozyon yapılabilir. Negatif elektrot kutubu seçildiğinde pozitif elektrot kutubuna göre, talaş kaldırma oranında artış, nisbi aşınma oranında düşüş ve daha iyi yüzey pürüzlülükleri elde edilmektedir (Lee ve Li 2001).



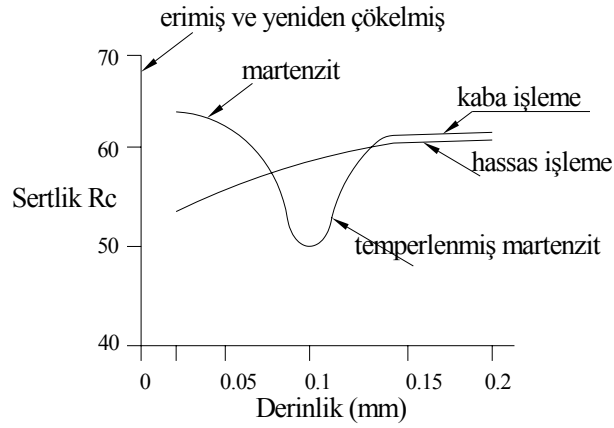
Şekil. 2.3.4.5. Vurum süresince ( $t_{on}$ ) iş parçasının yüzey durumu

### 2.3.5. Elektro Erozyon İşleminde İş Parçasında Fiziksel Durum

EEİ ile talaş kaldırılacak iş parçası yada kalıp malzemesinden beklenen tek özellik elektrik iletkenliğini sağlayan bir metal olmasıdır. Malzemenin sertliği ve diğer mekanik özellikleri erozyon işlemi için bir engel teşkil etmemektedir. EEİ nin en önemli özelliği kalıp, otomotiv, uçak-uzay sanayi ve cerrahi bileşenlerin üretiminde kullanılan tüm sertliklerdeki elektrik iletkenliği olan parçaları ısıl enerjiyi kullanarak işleyebilmesidir (Ho ve Newman, 2003).

Elektro erozyon sürecinde elektrik boşalım sıcaklığı 6000-10000 °C seviyesinde olduğundan iş parçasının yüzey tabakalarının yapısı bu sıcaklıktan etkilenir. Şekil 2.3.5.1. de bitirme işleminde, bu tabakanın kalınlığı 0,002 mm den daha kalın olmayabilir ancak kaba bir işlemde 0,2 mm ye ulaşabilir. Her malzeme için ısıdan etkilenen bölgenin derinliği, boşalım enerjisine ve çalışma parametrelerine bağlıdır. Tipik olarak, işlenmiş yüzeyler, yüksek enerji boşalımına maruz kaldıktan sonra üç tabakadan oluşur.

- Erimiş metal parçacıkların parça yüzeyine yeniden çökmesi ile oluşan yeniden dökülmüş tabaka, ki bu tabaka esas metalden daha sert olabilir.
- Erime noktasına kadar ulaşan ancak dağılmayan ve yeniden dökülmüş gibi kalan tabaka.
- Sertliği esas metalden daha düşük olan temperlenmiş bir tabaka.



Şekil 2.3.5.1. Kaba ve hassas elektro erozyon işlemi sonrası tipik yüzey yapıları

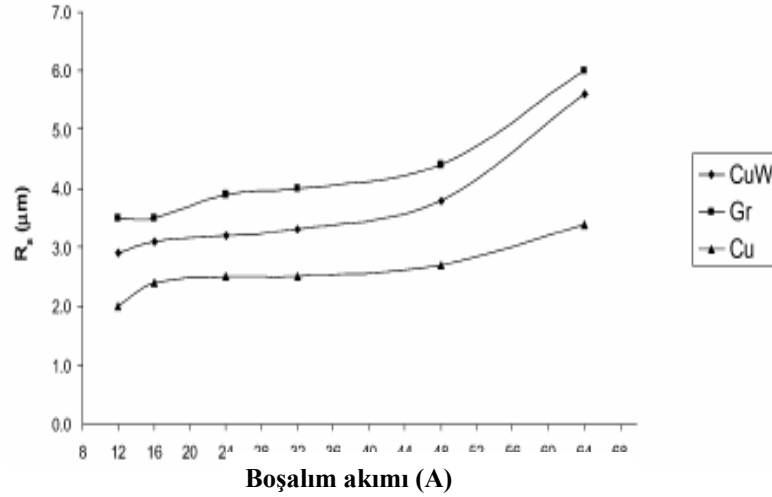
Talaş kaldırma oranı, elektrot aşınması ve yüzey pürüzlülüğü gibi elektro erozyon işleme performansını geliştirme ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır ve yapılmaktadır.

### 2.3.6. Elektro Erozyon İşleminde Elektrotta Fiziksel Durum

Elektro erozyon yöntemi ile işlemede, en çok bilinen ve kullanılan elektrot malzemesi bakırdır. Pirinç ve alüminyum da tercih edilmektedir. Bakır malzeme yüksek elektrik ve ısı iletkenliğe sahiptir. Elde edilebilirliği kolaydır, kaliteli ve düşük maliyetlidir. Bakır, pirinç ve alüminyum a göre en yüksek erime noktasına sahip malzemedir. Isıl iletkenliğin yüksek olması ve yüksek ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemesi bu süreçte daha az eriyerek ve daha az aşınıp daha uzun süre kullanılabilir. Bu da kullanılacak elektrot sayısını ve maliyeti düşürmektedir.

Elektrot, elektriği iyi ileten bir malzemenin (tungsten, bakır-tungsten, gümüş tungsten, pirinç, çinko alaşımları, tungsten karpit, bakır, grafit gibi) oluşmalıdır. Elektrot malzemesi seçimi EEİ uygulama koşullarına bağlıdır. Yüksek voltajlarda EEİ uygulanacağı zaman bakır elektrot, düşük elektrot aşınması ve yüksek talaş kaldırma oranı gerektiren uygulamalarda grafit elektrot tercih edilmektedir. Ayrıca, metalik elektrotların bekleme süreleri iri taneli grafit elektrotlardan daha kısadır. Kullanılacak elektrotlarda dikkat edilmesi gereken faktörlerden biri de, elektro erozyon sırasında iyonizasyon süresi kısa olan malzemenin seçilmesidir (Carter ve Jergas, 1983).

Lee ve Li (2001), yaptıkları deneysel çalışmada tungsten-karpit iş parçası üzerinde, grafit, bakır ve bakır-tungsten olmak üzere 3 farklı elektrot malzemesi kullanmışlar ve en az pürüzlülüğü bakır elektrot kullanılarak elde etmişlerdir. Aşağıdaki Şekil 2.3.6.1. de, Voltaj 80 Volt,  $t_{on}$  25  $\mu$ s,  $t_{off}$  200 $\mu$ s, sıvı akış basıncı 50 kPa ve elektrot kutupları negatif değerlerdedir.

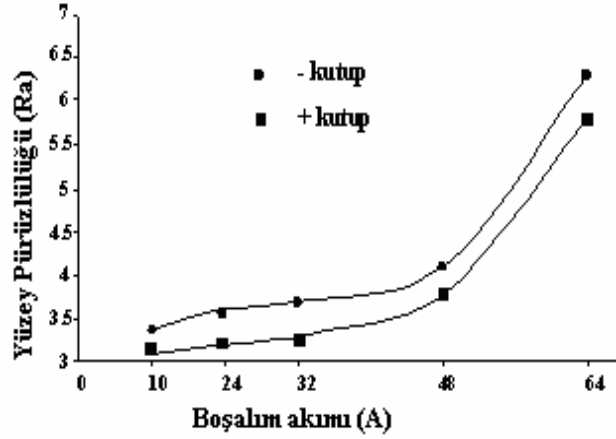


Şekil 2.3.6.1. Çeşitli elektrotlar ile akım-yüzey pürüzlülüğü değişimi

Son zamanlarda ürünlerin boyutlarının küçülmesi ile micro-EEİ araştırmaları dikkati çekmektedir. Micro-EEİ, yalnızca micro-delikler (5 $\mu$ m) ve micro milleri değil karışık 3 boyutlu micro-boşluklu yapıları da işleyebilme yeteneğine sahiptir. Çok ince ve hassas olan bu elektrotların üretiminde hızlı modelleme (Rapid Prototyping, RP) teknikleri kullanılmaktadır. Bu elektrotların üretimi için metal tozları lazerle (sintering) birleştirilmektedir (Ho ve Newman, 2003).

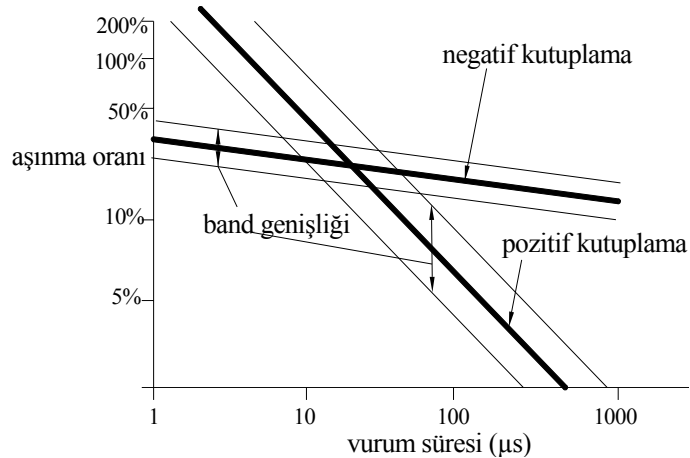
Yüzey bitirme işlemlerinde, düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek amacıyla, genelde elektrot (-) katot, iş parçası (+) anot olarak seçilmektedir. Tersine elektrot (+) anot ve iş parçası (-) katot olarak kullanıldığında, daha yüksek talaş kaldırma oranları ve pürüzlü bir yüzey elde edilir (Lee ve Li, 2001). En iyi erozyon koşulları, Elektro Erozyon işleminin temelleri göz önüne alınarak her bir işlem için denenerek bulunabilir. Genelde, düşük elastisite modülü, yüksek enerji, düşük ısıl genleşme, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek buharlaşma ısısı, yüksek erime ve kaynama noktası ile elektrot malzemelerinin aşınma oranları daha da düşmektedir.

Elektro erozyon işlemlerinde elektrot kutuplarını seçmek önemli bir faktördür. Lee ve Li (2001), yaptıkları çalışmada, negatif (-) elektrot kutbunun pozitif elektrot kutbunun oluşturduğu yüzey pürüzlülüğünden daha az pürüzlülük meydana getirdiğini tespit etmiştir Şekil. 2.3.6.2.



Şekil 2.3.6.2. CuW elektrot ile farklı kutuplar için boşalım akımı ve  $R_a$  değişimi

Kutiplamanın seçimi, elektro erozyon işlemlerinde elektrot aşınması üzerindeki etkisi çok belirgindir. Bunun etkinliği, %1 karbonlu çelik üzerinde 25mm çaplı bir grafit elektrot kullanılarak yapılan bir işlem için Şekil 2.3.6.3. de gösterilmiştir. Her bir durumdaki dağılım bandı, bekleme süresi için farklı çalışma şartlarının seçilmesinden kaynaklanmıştır (Anık vd. 1994).



Şekil 2.3.6.3. Kutiplamanın elektrot aşınmasına etkisi

### 2.3.7. Elektro Erozyon İşleminde Dielektrik Sıvı ve Dolaşım Metotları

Elektrot ve iş parçasının EEİ süresince içinde bulunduğu dielektrik sıvının ana görevi, kıvılcım atlamasının elektrotlar çok kısa mesafedeyken ve oksijen geçişi olmadan gerçekleşebilmesi için elektrotları birbirine karşı izole etmektir. Diğer bir görevi ise yüksek enerji yoğunluğu oluştuğunda iş parçası ve elektrot arasındaki ısı kaybını önlemektir. Ayrıca dielektrik sıvı iyi iyonlaşabilmeli ve düşük gecikme zamanı ile yüksek kıvılcım verimiyle yüksek sıcaklık elde edilmelidir. EEİ sonrası gerilim ve akımın kesilmesi ile hızlı iyonlaşma olmalıdır. Dielektrik sıvı, elektrot ve iş parçası arasındaki gerilim düşerek akım tepe değerine ulaşana kadar bir yalıtkan gibi davranır sonra, dielektrik iyonize olur ve iş parçası boyunca boşalım akımının iletimine izin verir. Akım sonrası bekleme zamanına geçildiğinde devir daim eden dielektrik sıvı hareketi ile sistemdeki katılaştıran parçacıkların (talaş) taşınması görevini de gerçekleştirir.

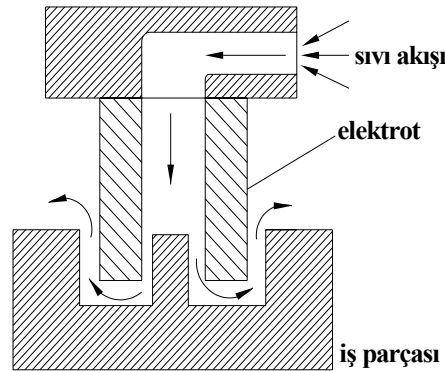
EEİ de birkaç tip dielektrik sıvı kullanılmaktadır. Bunlar, karbon tetrachloride, su temelli sıvılar, triethylene glycol ve ethylene glycol ün monoethyl eteridir. Bu sıvıların kalite ve performanslarını belirleyen dielektrik etkililik faktörlerini, izole edici elementleri içerir. Hidrokarbonların dielektrik sıvı içinde kullanımı, işlenen parçada düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha küçük ısıdan etkilenmiş bölgenin oluşumu için bir avantaj sağlar (Rehbein vd., 2004). Sıvı yüzey (interfacial) gerilimi, dağıtıcı faktörler, dielektrik etkililiği, buharlaşma oranı ve viskozite, elektro erozyon ile işlemenin tüm kesme koşullarında ve iyonizasyon sürecinde önemli rolü olan parametrelerinden bazılarıdır. Ayrıca, talaş kaldırma oranı ve elektrot aşınmasında, sıvı iyonizasyon-deiyonizasyon oranı da önemlidir. Sıvı dielektrik etkililiğini, daha düşük sıvı buharlaşma oranı ve daha hızlı iyonizasyon-deiyonizasyon oranı oluşturmaktadır. Diğer bir faktör viskozite ise EEİ alanında kaldırılan talaş miktarını etkileyen önemli bir özelliktir. Düşük viskoziteli sıvı, EEİ süresince daha iyi sıvı akışı ve soğutma şartı sağlayacaktır. Optimum viskozite seviyesi uygulanacak elektro erozyon koşullarına bağlıdır. Diğer dielektrik sıvı özellikleri, özgül ağırlık, yoğunluk, kaynama noktası, donma noktası, renk, buhar basıncı ve buhar yoğunluğudur (Higuerey E., 1998).



Dielektrik sıvıların kimyasal ve fiziksel özellikleri kadar sıvının iş parçası-elektrot arasında dolaşımının da işlem verimliliğinde büyük etkisi vardır. Çok derin, karmaşık yada sıvı akışının zor olduğu bazı işlem koşullarında uygulanacak çeşitli dolaşım metotları mevcuttur.

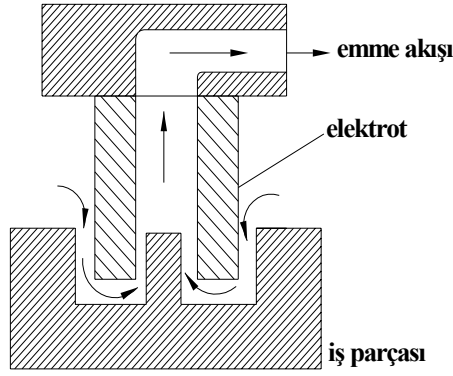
Elektro Erozyon İşlemlerinde talaş kaldırma oranının artması, takım aşınma oranının azalması, işlem süresinin kısalarak maliyetin düşmesi ve düşük yüzey pürüzlülüğü için sıvının kimyasal işlevini ve dolaşımının sağlanması gerekmektedir. Elektrot-iş parçası şekillerine ve EEİ uygulanacak derinliğe bağlı olarak çeşitli dolaşım metotları mevcuttur. En verimli EEİ işleminin olacağı metot seçilerek uygulanmalıdır.

EEİ uygulamalarının çoğunda, sıvı basınç ile iş parçası ve elektrot arasında akar. Akış boşluğu, geniş alanlarda derin delikler delme işlerinde sabit kesme koşullarının sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Elektrot içinden aşağıya doğru püskürtme (Şekil 2.3.7.1.) Elektrot içine bir veya birkaç delik delinir. Dielektrik sıvı, iş parçası ve elektrot arasına basınçla gönderilir. Böylece, EEİ sonrasında katılan malzeme parçacıkları ortamdaki uzaklaştırılır.



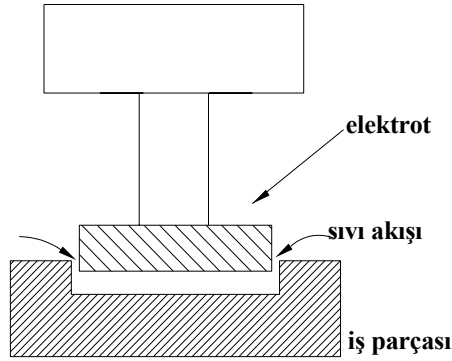
Şekil 2.3.7.1. Dielektrik sıvı normal akış

Dielektrik sıvının iş parçası içinden yukarıya doğru hareketiyle devir daimin sağlandığı metottur (Şekil 2.3.7.2.). İyonizasyon sonunda sıvının vakum oluşturarak emilmesi ile katılan talaş parçacıkları ortamdaki uzaklaştırılır. Çok derin boşlukların oluşturulmasında kullanışlı değildir.



Şekil 2.3.7.2. Dielektrik sıvı tersine akış

Püskürtme akışı ise her erozyon işleminden sonra elektrotun yukarı kalkması ile katılaştıran parçacıkları ortamdaki uzaklaştıracak basınçta olup diğer erozyon işlemine temiz bir yüzey bırakır (Şekil 2.3.7.3.). Ayrıca, elektrotun yukarı kalkma hareketi vakum etkisi yaratarak talaşın taşınmasını sağlar.



Şekil 2.3.7.3. Dielektrik sıvı püskürtme akışı

### 2.3.8. Elektro Erozyon İşleminin Avantajları

- Elektrot ve iş parçası arasında temas olmadığı için mikro-elektrotlar ile kalıp içi boşluklar ve kaliteli yüzeyler elde etmek mümkündür,
- Karmaşık geometriye sahip kalıp içi boşlukları oluşturma imkanı vardır,
- EEİ ile işleme sonucu talaş kaldırma oranı, işlenen metalin erime noktasıyla ilişkili olmasına rağmen, iş parçasının sertliğinden etkilenmez (sert malzemelerin işlenmesi için oldukça uygun bir metottür),
- İşlenebilirliği kötü malzemeler (sementit tungsten karpit ve sertleştirilmiş takım çelikleri gibi) EEİ ile kolaylıkla işlenebilir,

- Kesme kuvveti gerektirmez.

EEİ, metal kalıp ve dökme endüstrisinde bir çok şekilde uygulanmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıpları, pres döküm, dövme, ekstrüzyon, kesme kalıpları, basma kalıpları, üretiminde çok yönlü olarak kullanılmaktadır.

Uygulama alanı geniştir, çünkü bütün elektrik iletebilen malzemeler üzerinde çalışabilir. İşlenecek malzemenin şekil ve sertliği işlemi engellemez. İş bitimi elde edilecek olan form ve yüzey kalitesi önceden belirlenebilir. Diğer tezgahlarla yapılan parçalı kalıplardaki parçalar arası çizgiler bu tezgahın yaptığı yekpare kalıplarda oluşmaz. Servo motor ile hareket tek ekseninde olduğundan işlem basittir. İş parçasına ve bağlama elemanlarına uygulanan kuvvetler ihmal edilebilir. İş parçası ısı işlem ile sertleştirilip sonra işlenebileceği için sertleştirme sırasındaki çarpılma, bozulma gibi olumsuz etkilerden uzak kalınır.

EEİ nin kullanım alanları oldukça geniştir; Genel takım üretimi, Kesme ve ezme kalıpları, Plastik kalıpları , Dövme kalıpları ,Soğuk şekillendirme kalıpları,Toz metal endüstrisi, Aparat yapımı ve hassas mühendislik uygulamaları, Cam ve lastik kalıpları, sert malzemelerin işlenmesi gibi çeşitli talaşlı imalat alanlarında kullanılmaktadır.

### **2.3.9. Elektro Erozyon İşleminin Dezavantajları**

Elektro erozyon işleminin de avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi, eğer iyi yüzey elde edilecekse elektro erozyon süresi yavaş ve uzundur (düşük akım ve düşük vurum süresi uygulanacağı için), dielektrik sıvının buharlaşması sağlık açısından tehlikeli olabilmektedir, teneffüs edilmemelidir. Ayrıca, kullanılan elektrotun keskin köşeleri bozularak, yuvarlatma çapları (radyüs) değişecek yada elektrot eriyerek boyu kısılacak ve ömrü bitecektir. Bu etkenler göz önüne alınarak uygulanacak parametrelere göre birden fazla elektrot yapılarak kaba işlem ve bitirme işlemi farklı elektrotlar ile yapılmalıdır.

## 2.4. Yapay Zeka Teknikleri

Günümüzün rekabetçi ortamında başarılı olabilmek için bilgi yoğun sistemlerin kullanılması artık kaçınılmaz bir gerçektir. Bilgi yoğun sistemler, amaca ulaşmayı hızlandıran ve özellikle rekabet gücünün artmasına neden olan doğru karar vermede önemli bir unsurdur. Artık sanayi toplumları yerini, bilgi çağında, bilgi toplumlarına bırakmaktadır. Bilginin doğru ve amaçlara uygun olarak kullanılması ancak bilgi teknolojisinin ortaya çıkarttığı metot ve yöntemlerin kullanılması ile gerçekleştirilebilir.

Günümüzde bilgi teknolojisinin en önemli yaklaşımlarından biri de önemi gittikçe artan yapay zeka uygulamalarıdır. Yapay zekanın belirlenmiş ve üzerinde herkesçe fikir birliğine varılmış tek bir tanımı yoktur. Farklı yaklaşımlardaki kişilerin, yapay zekayı algılayışları da farklıdır. Örneğin, belirli konularda özelleşmiş ve yalnızca bu konuda bir “zeka”ya sahip programları, yapay zeka olarak adlandırılanlar vardır. Ancak, bu tür programların “uzman sistemler” olarak kabul edilmesi gerektiğini söyleyenler çoğunluktadır. Bu kişilere göre bir insan önceden hiç rastlamadığı bir durum karşısında nasıl karar veriyorsa, bir sistemin de yapay zeka olarak tanımlanabilmesi için aynı yetiye sahip olması gereklidir. Diğer bir ifadeyle, bazı karmaşık hesaplamaları yapabilen yada önceden tanımlanmış belirli soruları sorduğumuzda yanıtlayabilen bir sistem, tam anlamıyla yapay zeka kavramı içinde tanımlanmaktadır. Burada önemli nokta, insan tarafından yapıldığında zeka olarak adlandırılan davranışların bilgisayar tarafından taklit edilebilmesidir. Bugün bu davranışlar, karar verme, problem çözme, yorumlama, planlama, kontrollü sistematik olarak sınıflama, tanıma vb. ile sınırlıdır. Bir sistemin gerçekten yapay zeka olabilmesi için, çözüm algoritmaları kesin çizgileriyle kendisine verilmeden, problemleri çözmek amacıyla kendi kullanacağı kavram ve teknikleri geliştirebilmelidir. Bunu yapabilmek için, öncelikle insanların bir olay karşısında karar vermeye ve o olaya çözüm getirmeye çalışırken nasıl bir düşünce yolu izlediklerini belirlemek ve onu taklit etmek gereklidir. İnsanların izledikleri düşünce yolu dendiğinde işin içine duygu, karakter ve özgün düşünce de girmektedir. Bunlar ise tanımlanması güç özellikler olduğundan yapay zeka çalışmalarının önünde birer

engel olarak durmaktadır. Bütün bunlara rağmen “yapay zeka” yolunda çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Bugüne kadar geliştirilen yapay zeka sistemlerinin karakteristik özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Sayısal bilgiler yerine sembolik bilgileri işlerler.
- Belirli algoritmalar kullanarak problemleri çözmek yerine sezgisel ve tecrübeye dayalı yaklaşımlarla problemleri çözerler.
- Eksik ve belirsiz bilgileri işleyebilme özelliğine sahiptirler.
- Bilinen teknikler ile matematiksel modeli kurulamayan problemlerle uğraşırlar.
- Öğrenebilme yetenekleri vardır.
- Hata yapabilirler.

Yukarıda belirtilen özelliklerin hepsinin bir yapay zeka sisteminde bulunması mümkün olmayabilir. Çünkü değişik teknolojiler, değişik özelliklerin öne çıkmasını sağlarlar. Bu yüzden bir çok yöntemi birlikte kullanan hibrit sistemler, oldukça karışık problem çözümlerinde kaçınılmaz hale gelmiştir.

Yapay zeka teknolojisi hızla gelişmekte olup, birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlardan; sosyal bilimler, sağlık bilimleri ve fen bilimleri alanlarında yapay zeka uygulamaları kullanılmaktadır. Özellikle mühendislik alanında en yoğun kullanılan alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunların dışında her alanda kullanılacak mimariye sahip, yapay sinir ağları, bulanık mantık, genetik algoritmalar ve karınca kolonisi gibi yöntemler bugünkü yapay zeka uygulamalarının uygulama alanlarını genişletmektedir (Dayık 2005).

#### **2.4.1. Genetik Algoritma**

Genetik algoritmalar, doğal seçme ve genetik kurallarına dayanmaktadırlar. Bu kurallar, en fazla uyum sağlayan canlının hayatına devam etmesi ve uyum sağlayamayan canlının da elenmesi olarak algılanabilir. Canlılar nesilden nesile genlerini aktarırken, bu genler de doğal genetik kurallara göre başka genlerle eşleşir,

değişir yeni genleri oluştururlar. Genetik algoritmalar da doğadaki bu iki oluşumu birleştirerek, en iyiyi (optimal noktayı) arar. Bir önceki nesilin en uygun elemanlarının parçaları ve “bit” leri kullanarak yeni nesilin üyeleri oluşturulur. Bu üyelerin uygunlukları test edilerek, en iyilerinden hareketle yeniden başka elemanlar türetilir. Genetik algoritmalarda olasılığın rolü olmasına karşın, rast gele bir arama metodu değildir. Genetik algoritmaların bir diğer önemli özelliği de bir grup çözüm ile uğraşmasıdır. Bu sayede çok sayıda çözümün içinden iyileri seçilip kötülerini elenebilir.

Genetik Algoritmanın çalışma algoritması aşağıdaki belirtildiği gibidir.

1. Başla
2. İterasyon sayısı belirlenir
3. Kromozomlar rastgele oluşturulur
4. her bir kromozomun uygunlukları belirlenir
5. uygunluklarına göre kromozomlar sıralanır
6. Ebeveyn kromozomlar belirlenir
7. Kromozomlar belirlenen çaprazlama olasılığında çaprazlanır
8. Kromozomlar belirlenen mutasyon olasılığında mutasyona uğratılır
9. Uygunluklarına göre kromozomlar sıralanır
10. Kromozomların %50 si elenir
11. Evet, algoritma durdurulur
12. Hayır, ebeveyn kromozomlar belirlenmek üzere tekrar başlanır

Genetik algoritma defalarca çalıştırılarak çok sayıda toplum oluşturulup hesaplanır. Toplumların hesaplanması sırasında en iyi bireyler saklandığı için o ana kadar bulunmuş en iyi çözüm sonuç çözümü oluşturur.

Genetik algoritmaları diğer optimizasyon programlarından ayıran en önemli özelliklerden birisi de seçmedir. Genetik algoritmalarda çözümün uygunluğu onun seçilme şansını artırır, ancak bunu garanti etmez. Seçim de ilk grubun oluşturulması gibi rasgeledir. Ancak bu rasgele seçimde seçilme olasılıklarını çözümlerin uygunluğu belirler.

Genetik algoritmaların esasını temsil eden biyolojik sistemler, dikkatli bir inceleme ile yeni ufuklar açabilecek sırlara sahiptir. Bugün için en iyi adaptasyon, doğada var olan adaptasyondur. Genetik algoritmalar, basit hesaplamalar gerektirir. Ancak işlemlerin basitliği, etkinliğini azaltmaz. Diğer pek çok en iyiyi arama yönteminde görülen, süreklilik, türev bilgisi, tek bir minimum yada maksimumun varlığı gibi kabuller, bu yöntem için geçerli değildir.

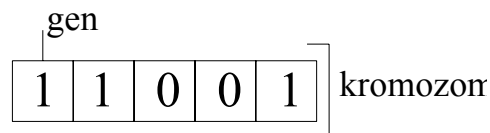
Genetik Algoritmanın başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Genetik algoritmada, parametreler kodlanarak kullanılırlar. Genellikle kodlama biçimi ikilik sayı sistemindedir.
2. Genetik algoritmada tek bir nokta yerine noktalar topluluğundan hareket edilir. Bu da global optimizasyona ulaşmayı kolaylaştırır.
3. Genetik algoritmada sadece hedef fonksiyonunun değeri kullanılır. Türev ve integral gibi daha farklı bilgilere gerek yoktur. Bu da yöntemi belirli kabul ve şartlardan uzak tutar.
4. Genetik algoritma belirlilik değil, olasılık kurallarına dayanır. Seçim işlemi bu olasılık doğrultusunda gerçekleştirilir.

Genetik Algoritmada kullanılan çeşitli kavramlar aşağıda tanımlanmıştır.

Gen: kendi başına anlamlı genetik bilgi taşıyan en küçük genetik yapıdır.

Kromozom: Birden fazla genin bir araya gelerek oluşturduğu diziye denir (Şekil 2.4.1.1.). Kromozomlar, alternatif aday çözümleri gösterirler.



Şekil 2.4.1.1. Genetik Algoritmada gen ve kromozom

Popülasyon: Kromozomlardan oluşan topluluğa denir. Popülasyon, geçerli alternatif çözüm kümesidir. Popülasyondaki birey sayısı (kromozom) genellikle sabit tutulur.

Genetik algoritmada popülasyondaki birey sayısı ile ilgili genel bir kural yoktur.

Allel (Allele): Bir özelliği temsil eden bir genin alabileceği değişik değerlere denilir.

Locus: Kromozom üzerindeki her bitin yerine verilen isimdir.

Genotip (Genotype): Kodlanmış çözümden eski haline dönüştürülen çözümdür.

Fenotip (Phenotype): Kodlanan çözümdür.

Algoritma ilk olarak popülasyon diye tabir edilen bir çözüm(kromozomlarla ifade edilir) seti ile başlatılır. Bir popülasyondan alınan sonuçlar bir öncekinden daha iyi olacağı beklenen yeni bir popülasyon oluşturmak için kullanılır. Yeni popülasyon oluşturulması için seçilen çözümler uyumluluklarına göre seçilir. Çünkü uyumlu olanların daha iyi sonuçlar üretmesi olasıdır. Bu istenen çözüm sağlanıncaya kadar devam ettirilir.

Algoritma başlangıçta kromozomlarla ifade edilen popülasyon diye tabir edilen bir çözüm seti ile başlatılır. Popülasyonun büyüklüğü problemin karmaşıklığına göre değişir (Engin ve Fığlalı, 2002). Genetik algoritmanın operatörleri kullanılarak daha iyi sonuçlar vermesi beklenen yeni popülasyonlar oluşturulur. Her yeni popülasyonun oluşturulması işlemine “iterasyon” denir. İterasyon işlemine istenen çözüm sağlanıncaya kadar veya daha önceden belirlenen iterasyon sayısına kadar devam ettirilir

#### **2.4.1.1. Kodlama**

Her bir kromozom bir diziden oluşur. Bu diziyi oluşturan her bir birime gen denir. Her bir gen çözümlün bir karakterine sahip olabilir.

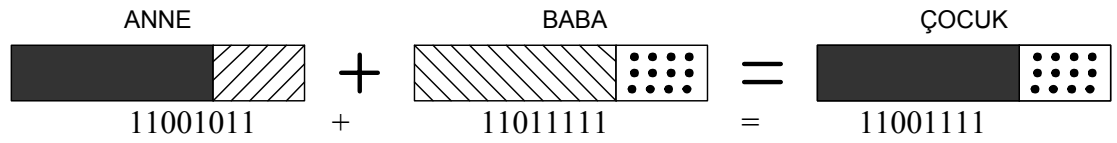
#### **2.4.1.2. Seçim**

Burada amaç, uygunlukları küçük olan kromozomların elenip uygunlukları büyük olan kromozomların ağırlıklarını hissettirerek yeni bir nesil oluşturmaktır. Seçim işlemi, uygunlukları büyük kromozomlar uygunlukları küçük kromozomlar üzerine tekrar yazılarak yapılır. Kromozomların karakterleri sahip oldukları uygunluk değerlerine göre saptanır. Rulet Çarkı, Sıralı Seçim, Düzenli Durum Seçimi ve Elitizm Seçimi gibi farklı seçme yöntemleri vardır.



### 2.4.1.3. Çaprazlama

Kromozomların nasıl temsil edileceğine karar verildikten sonra çaprazlama yapılabilir. Çaprazlama ebeveynlerden bazı genleri alarak yeni bireyler oluşturma işlemidir. Burada amaç, eldeki nesilden farklı nesiller elde etmektir. Çaprazlama yapılacak konum rasgele seçilir. Oluşan yeni birey ebeveynlerin bazı özelliklerini almış ve bir bakıma ikisinin kopyası olmuştur (Şekil 2.4.1.3.1.). Daha iyi performans almak amacıyla değişik çaprazlamalar kullanılabilir.

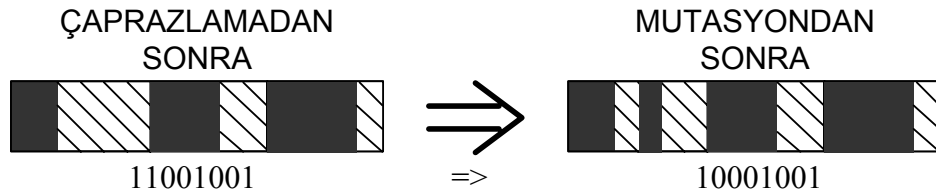


Şekil 2.4.1.3.1. Tek noktalı çaprazlama

### 2.4.1.4. Mutasyon

Genetik algoritmada tam anlamı ile rast gele işlem, mutasyondur. Mutasyon, bir bireyin içerdiği bilginin (genin) rast gele olarak değiştirilmesi işlemidir (Şekil 2.4.1.4.1.). Bu şekilde her bireye bir sayı gözü ile bakıldığında, mutasyon sonucunda oluşabilecek sayı, bireylerin her birinin içerdiği değerden bağımsız olacaktır. Çaprazlamadaki kısıtlama bu işlemde bulunmamaktadır. Mutasyon, genetik algoritmanın yerel bir en iyi noktaya takılmasını engeller. Önemli olan, mutasyon olasılığının uygun seçimidir.

Bu olasılık, yöntemin yerel bir noktaya takılmasını engelleyecek derecede yüksek, ancak çaprazlama ve çoğullama işlemlerinin getirdiği en iyi noktaya gidişi engellemeyecek ölçüde düşük seçilmelidir.



Şekil 2.4.1.4.1. Bir kromozomdaki mutasyon örneği

### 2.4.2. Evrimsel Programlama (EP)

Evrimsel Programlama Algoritması bilgisayar programı tarafından yeniden oluşturulabilen sabit sayıda ve uzunlukta lineer kromozomlardan oluşur. Oluşturulan kromozomlar ‐Açıklama Ağaçları‐ (AA) şeklinde EP’ nin operatör ve işlemcileri sayesinde farklı şekil ve boyutlarda ifade edilebilmektedirler. EP algoritması, Genetik Algoritma (Genetic Algorithm GA) ve Genetik Programlama (Genetic Programming GP) algoritmaları gibi bir veya daha çok genetik operatör kullanarak rasgele elde edilen yeni kromozomlardan hedef fonksiyon ve değerlere (Fitnes) ulaşır. Elde edilen yeni popülasyonlar hedef değerlere en uygun fonksiyonu veren algoritmadır (Ferreira, 2001).

GA ve GP de kullanılan genetik operatörlerin çoğu küçük değişiklikler ile EP de kullanılmıştır. GP gibi, GEP de temel 5 bileşen vardır: fonksiyon ayarı, sabitler, uygunluk fonksiyonu, kontrol parametreleri ve durma koşulu. Bir problem çözümünde GEP kullanıldığında bu bileşenlere karar verilmelidir. GEP, sunduğu çözümlerde sabit uzunlukta karakter dizileri kullanır, sonradan uygunlukları evrimleştirildiğinde, farklı boyut ve şekiller de açıklama ağacı olarak ifade edilirler.

EP Algoritması, Genetik Algoritma (GA) ve Genetik Programlama (GP) algoritmalarının bir bileşkesi olarak geniş bir fonksiyon taraması yapar. EP her iki algoritmanın avantajlarını bünyesine birleştirmiştir.

Yapısal olarak bu üç algoritmanın arasındaki farklılıklar ve benzerlikler şu şekilde sıralanabilir:

Genetik Algoritmalarının karakteristiği, sabit uzunluktaki kromozomlardan oluşan lineer dizidir. Bu lineer diziler basit lineer problemler için genetik operatörlerle kolayca çözüm üretmesine rağmen karmaşık, non-lineer problemlerde fonksiyonel değildirler. Genetik Algoritma genellikle fonksiyonların genel optimizasyonlarında kullanılır. Genetik algoritma aynı zamanda genetik programlama ve genetik tabanlı makine eğitiminde de kullanılabilir.

Genetik Programing Algoritmaları Genetik Algoritmalarından farklı olarak değişik boyut ve şekillerdeki non-liner değişkenler arasındaki ilişkileri ifade etmek için oluşturdukları “ayrıştırma ağaçları” (parse tree) ile uygun çözüme ulaşmaya çalışırlar. GP karmaşık ve non-lineer problemlerde istenen sonuçların elde edilmesinde yetersiz kalmaktadır.

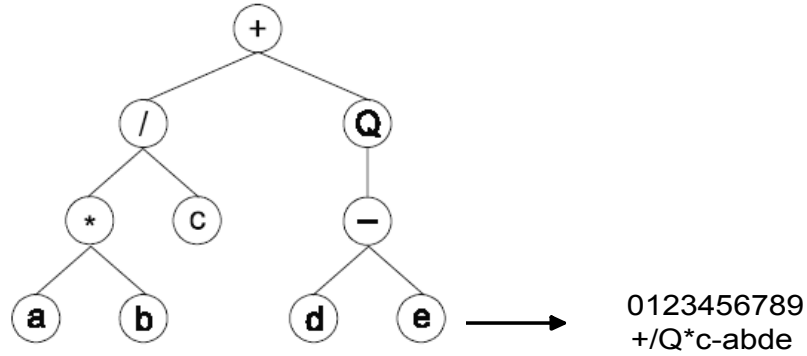
Evrimsel Programlama Algoritmasında ise GA ve GP Algoritmalarının avantajları birleştirilmiştir. Karakteristik olarak sabit sayı ve uzunluktaki çok sayıda non-liner değişken genetik operatörler ve işlemciler kullanılarak farklı boyut ve şekilde lineer dizinlere dönüştürülerek uygun fonksiyon türetilir. EP Algoritması makine öğrenme gibi kompleks yapıda non-lineer ifadelerin ilişkilerin kurulması ve ifade edilmesinde de kullanılabilir (Ferreira, 2002).

GEP Algoritması çalışma algoritması aşağıdaki gibidir.

1. İlk Popülasyon kromozomları oluşturulur
2. Kromozomlar Çaprazlanır
3. GEP algoritması çalıştırılır
4. Uygunluk değeri hesaplanır
5. Hesaplanan uygunluk değeri istenen değer ile karşılaştırılır.
6. Eğer uygunluk değeri istenen sonuç değere uyuşuyorsa program durdurulur.  
İstenen sonuç elde edilemediğinde işleme devam edilir.
7. En iyi programlar belirlenir
8. Bunların içinden en iyisi seçilir
9. Kopyalama yöntemi ile yeniden kromozomlar oluşturulur.
10. Mutasyonla yöntemi ile yeniden kromozomlar oluşturulur.
11. Sıralı genlerin yer değiştirme yöntemi ile yeniden kromozomlar oluşturulur.
12. Kök transferi yöntemi ile yeniden kromozomlar oluşturulur.
13. Gen transferi yöntemi ile yeniden kromozomlar oluşturulur.
14. Yeni Kuşak için programın hazırlanması
15. Kromozomların çaprazlanması işlemine devam edilir.

EP Algoritmasında en basitten en karmaşığa kadar tüm problemler açıklama ağaçları şeklinde ifade edilmektedir. Açıklama ağaçları, operatörler, fonksiyonlar, sabitler, ve değişkenlerden oluşur. Örneğin bir kromozom listesinde {+, -, \*, /, sqrt, 1, a, b, c, d, sin, cos} gibi EP değişkenleri olabilir. Burada; sqrt.\*.+.\*.a.\*.sqrt.a.b.c./1.-.c.d şeklinde bir kromozom oluşturulduğunda; bu kromozomda; nokta “.” her bir geni ayırmak ve kolay okumak için, “sqrt” karekök operasyonunu, “1” sabit bir sayıyı, “+,-,\*” cebirsel ifadeleri, “a, b, c, d” değişkenlere verilen isimleri ifade eder.

Değişkenler arasındaki ilişkiler EP algoritmasını geliştiren Candida Ferreira tarafından Karva notasyonları şeklinde ifade edilmiştir. Karva notasyonları “açıklama ağacı” (AA) ile ifade edilir. Evrimsel Programlama genine ait Karva notasyonu ile oluşturulmuş açıklama ağacı Şekil 2.4.2.1.’de gösterilmiştir (Ferreira, 2002).



Şekil 2.4.2.1. Matematiksel Açıklama Ağacına (AA) bir örnek

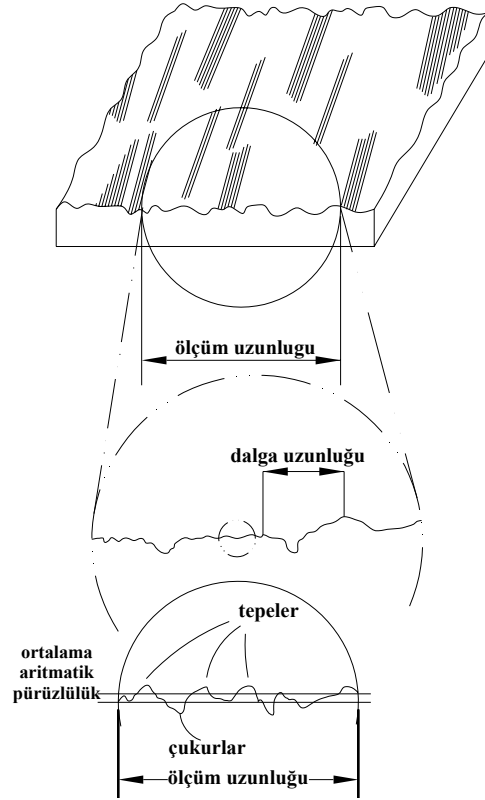
Şekil 2.4.2.1. de ifade edilen Açıklama Ağacının matematiksel olarak ifadesi;

$$\frac{a \cdot b}{c} + \sqrt{d - e}$$

şeklindedir.

## 2.5. YüzeY Pürüzlülüğü

YüzeY pürüzlülüğü, çeşitli talaşlı üretim yöntemleri ile imal edilen iş parçasının, işlenen yüzeYinde meydana gelen geometrik düzensizlikler olarak tanımlanmaktadır (Field vd., 1997). Bu geometrik düzensizliklere, kesme parametreleri, takım tezgahı rijitliği, kesici takım geometrisi ve kesme ısısı gibi faktörler neden olmaktadır. Talaşlı işleme sonrası, üç boyutlu bir yüzeY şekli ve profili Şekil 2.5.1. de gösterilmiştir.

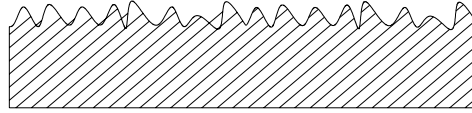


Şekil 2.5.1. YüzeY pürüzlülüğünün üç boyutlu gösterilmesi

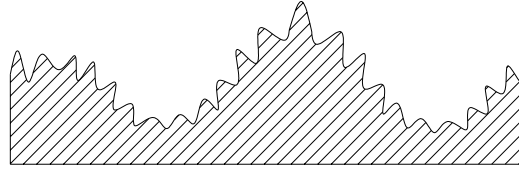
ANSI ve ISO standartlarına göre yüzeY kalitesi, kabalık, dalgalık, izler ve hatalar olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır. Pürüzlülük veya kabalık; İmalat işlemlerinden kaynaklanan genellikle daha ince düzensizliklerden oluşur (örneğin, torna freze işlemlerinde oluşan ilerleme izleri).

Dalgalık, Pürüzlülük örnekleme uzunluğundan daha büyük olan geniş aralıklı düzensizlikleri kapsar. Dalgalık, tezgah-iş parçasında istenmeden oluşan dönme, titreşim, ısıl davranış veya kullanılan kesici takımın (torna, freze) aşınmasından

meydana gelebilir. Pürüzlülük, dalgalı bir yüzey üzerinde konumlanmış olabilir yani her ikisinde aynı anda görülebilir. Bir yüzeyin dalgalılığı oldukça uzun dalga boyu düzensizliklerinin çukur ve tepeler arasındaki dik mesafesi olup, kısa dalga boyu düzensizliklerine karşı tepe- çukur yüksekliği ise yüzey pürüzlülüğüdür (Şekil 2.5.2. ve 2.5.3.).



Şekil 2.5.2. Pürüzlü düz yüzey



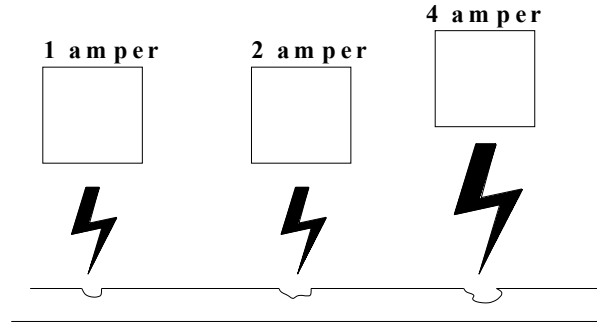
Şekil 2.5.3. Pürüzlü dalgalı yüzey

İzler, yüzeyde oluşan izler kullanılan üretim metodu ile ilgili olarak meydana gelir. Hatalar, yüzey üzerinde bulunan bu kusurları, çatlaklar, delikler, artıklar, çizgiler oluşturmaktadır.

Tüm talaşlı imalat ile işlenmiş malzemeler için hedeflenen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesi her zaman önemli bir parametredir. Yüzey pürüzlülüğü pek çok önemli parametreyi içine alan bir terim olup, bunlar özetle yüzey bitimi ve çatlaklardan arınma, kimyasal değişim, yanma, dönüşme ve aşırı temperleme şeklinde ısıl hasar ve kalıcı çekme gerilmesi olarak sayılabilir. Bunlardan ilki yani bitirme yüzeyi talaş kaldırma işleminde en önemlisidir (Şahin, 2001).

Pürüzlülük, imalat işlemlerinden kaynaklanan, kesici takım izlerinden, titreşimden kaynaklanabilir. Elektro erozyon işleminde meydana gelen pürüzlülük, doğrudan doğruya elektriksel boşalım enerjisi seviyesi ile ilgilidir (Şekil 2.5.4.). Erozyon yapılan yüzeyde boşalım enerjisi sonucu küçük kraterler oluşur. Bu kraterler de pürüzlülüğü oluşturur.

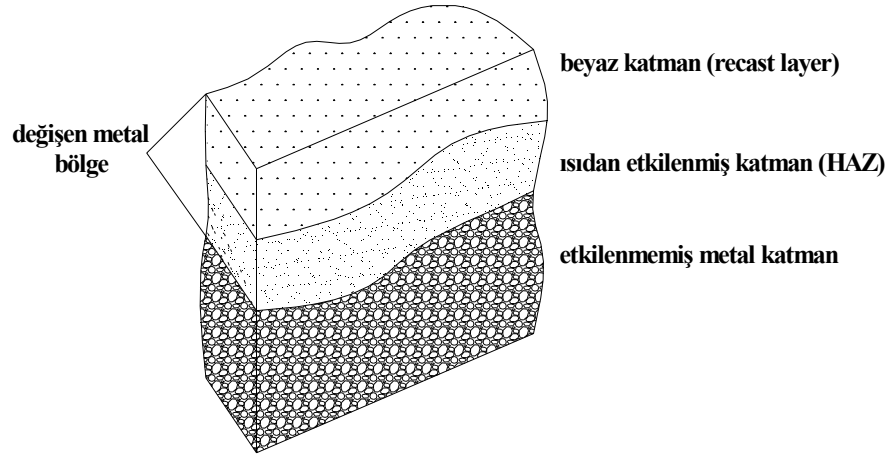
Herhangi bir elektro erozyon operasyonunda çalışma parametrelerindeki bir değişiklik üretilen parçanın bitirme yüzeyi üzerine oldukça farklı etkiye sahip olabilmektedir. Akım değeri arttıkça oluşan krater çukurları da derinleşmekte ve pürüzlülük artmaktadır.



Şekil 2.5.4. Farklı akım şiddetlerinde yüzeyde meydana gelen pürüzlülük değişimi

Farklı EEİ koşulları altında yapılan deneyler sonucu farklı yüzey pürüzlülük değerleri meydana gelmektedir. Yüzey bütünlüğü hem yüzey pürüzlülüğünü hem yüzeyin malzeme yapısını içerir. Yüzey kalitesi, EEİ işleminde iş parçası yüzeyinin kimyasal düzenini ve yapısını değiştirmektedir. Değişik alanlar ayırt edilebilir hale gelmektedir. İş parçasının üst yüzeyinde erimiş ve yeniden katılaşmış bir alan oluşur. Buna erimiş bölge veya beyaz katman denir. Bu alanın altında ısıya maruz kalan bölge (heat effected zone) bulunur (Şekil 2.5.5.). Bu alanın altında da ana madde bulunmaktadır. En üstteki beyaz katmanda birçok yarıklar bulunmaktadır. EEİ metalurjik bir işlem başlattığı için yüzey pürüzlülüğü iş parçası malzemesine de bağlıdır. EEİ yüzey bitirme işlemi yapılmış iş parçası Ra değeri 0.2 ile 12.5  $\mu\text{m}$  arasında ve boşalım enerjisine bağlı olarak da oluşan çukur boyutları değişmektedir. Oluşacak katmanların kalınlığını, sertliğin değişimi ve metalurjik özellikler etkilemektedir. Katman, beyaz katman ve ısıdan etkilenmiş bölgeye ayrılabilir. Mikro çatlaklar ve diğer kusurlar beyaz katmanda olmaktadır.

Beyaz katman, ısıdan etkilenmiş bölgenin en dışında yer alır ve malzemenin üst yüzeyinde EEİ sonrasında eriyerek ve tekrar katılaşarak yüzeye paralel şekilde meydana gelir. Bu katmanın gözle görülmesi çok zordur, optik mikroskopla gözlemlendiğinde beyaz görülmektedir.



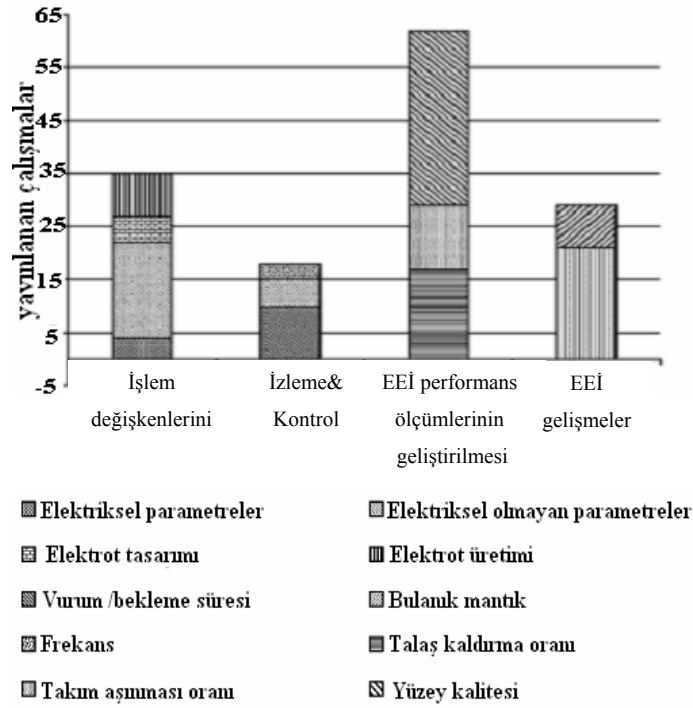
Şekil 2.5.5. EEİ sonrası oluşan katmanlar

Malzeme içerisine karbon girmesi ve dielektriğin etkilerinin azaltılmasından dolayı iyi aşınma-dayanımı ve yüksek sertlik, beyaz katmanın mekanik özellikleri şartlarını meydana getirir. Bu nedenle, EEİ ürünlerinin kalitesinin gelişmesi için, EEİ parametreleri ve sonucundaki yüzey pürüzlülüğü, beyaz katman, yüzey çatlakları ve gerilim arasındaki ilişkinin anlaşılması gerekmektedir. Fakat, EEİ ürünlerinin yüzey bütünlüğü elektrot malzemesine de bağlıdır (Lee vd., 2003)

Beyaz katman, malzemenin erime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda kimyasal değişim olduğundan dolayı ve EEİ sürecinin ısı tarafından etkilenmesi ile faz dönüşüm bölgesini meydana getirir. Faz dönüşüm bölgesi genelde birkaç katmandan oluşur fakat ayırt etmek çok zordur. Bu bölge malzemeye bağlı olarak residual gerginlik, dislokasyonlar, düz çizgiler ve mikro-çatlaklar içerebilir (Amorim ve Weingaertner, 2004).

Elektro erozyon işlem performansında en çok araştırılan çalışma alanlarından biri işlem sonucu yüzey pürüzlülüğüdür. Aşağıdaki Çizelge 2.5.1. de yayınlanmış çalışmaların hangi alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir (Ho ve Newman 2003). Üçüncü sütunda yer alan EEİ performansından yüzey kalitesi yapılan çalışmaların büyük bir kısmını kapsamaktadır. Daha sonra sırasıyla elektrot üretimi, elektriksel olmayan parametreler, talaş kaldırma oranı, vuruş süresi, işlenebilirlik ve bulanık mantık alanındaki çalışmaların yapıldığı görülmektedir.





Çizelge 2.5.1. EEİ araştırma yayınlarının çalışma alanlarına ve sayılarına göre dağılımı

Çeşitli üretim metotları sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük aralıkları Çizelge 2.5.2. de verilmiştir (Field vd., 1997). Çeşitli işleme teknikleri ile daha iyi yüzey bitirme değerleri elde edilebilir. Geleneksel işleme teknikleri (tornalama, frezeleme) ve aşındırma işlemleri (taşlama, parlatma, yüzey bitirme), talaş kaldırma görevini içerir. Yüzey bitirme çeşitleri; EEİ, ECM (elektro kimyasal işleme) veya lazer ışınlarıyla işleme gibi geleneksel olmayan teknikler ile üretilebilir.



### 2.5.1. Ortalama Pürüzlülük, $R_a$

Talaşlı imalat işlemleri tamamlandıktan sonra istenilen ölçü doğruluğuna ve pürüzlülüğe ulaşıldığı kontrol edilmektedir. Ortalama pürüzlülük, yüzeyin genel kalitesini göstermek için kullanılan geniş bir terimdir. “İyi yüzey” düşük pürüzlülük değerini ve tersi de her zaman “yüksek pürüzlülük” değerlerini gösterir.

Yüzeyin yapısı ve gösterimi ISO ve ANSI standartlarında belirtildiği gibi semboller ile de gösterilmektedir. Pürüzlülük, Şekil 2.5.1.1. de gösterildiği gibi, ortalama merkez doğrusundan mikro-meter ( $1 \mu\text{m} = 0.00001 \text{ m}$ ) olarak ifade edilen Amerikan standardı, yüzeyden aritmetik ortalama sapması (AA) yada İngiltere de ortalama merkez doğrusu (CLA) olarak tanımlanmaktadır (Şahin 2001).

$R_a$ , merkez doğrusu ve yüzey izleri arasındaki hattın alt ve üst eşdeğer alanı olarak alınır (Şekil 2.5.1.1.).  $R_a$ , uluslararası benimsenmiş sembol olup pürüzlülük değerini gösterir. Ölçme aletleri pürüzlülük merkezinden ortalama ayrılmayı kullanır.  $R_a$ , ortalama profil doğrusundan y aritmetik ortalama olarak sapmasıdır. Birbiri ardı sıra birkaç tane örnekleme uzunluğu ( $L$ ) sonuçlarının ortalaması alınarak belirlenir.

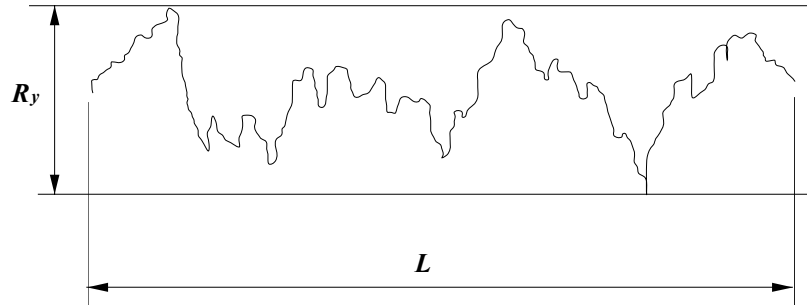
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx$$



Şekil 2.5.1.1.  $R_a$  yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi

### 2.5.2. En Yüksek Tepe-Çukur Pürüzlülük Yüksekliği $R_{max}$ , $R_y$

$R_{max}$ ; ölçüm yapılan mesafe üzerinde ölçüm ucunun girip çıktığı en yüksek tepe ve en derin çukur arasındaki mesafe  $R_{max}$  değerini oluşturmaktadır (Şekil 2.5.2.1.).

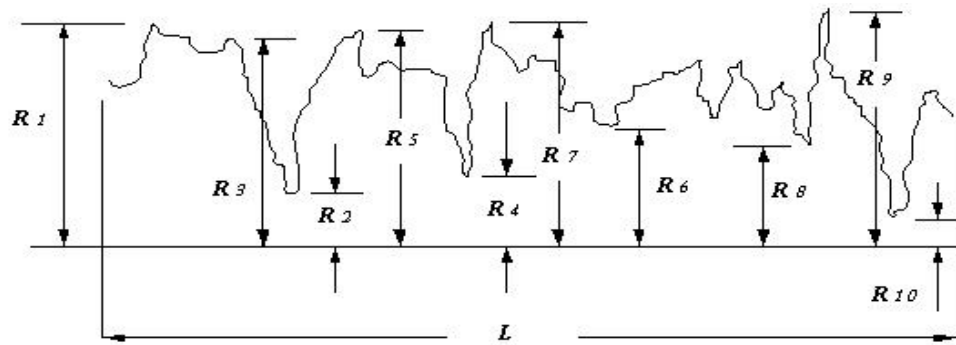


Şekil 2.5.2.1.  $R_{max}$  yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi

### 2.5.3. On-nokta yüksekliği $R_z$

$R_z$ ; 10 nokta yüksekliği olup örnekleme uzunluğu içinde beş en yüksek tepe ve beş en derin çukurun arasındaki ortalama mesafedir (Şekil 2.5.3.1.).

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5}$$



Şekil 2.5.3.1.  $R_z$  yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi

### 3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde deneylerde kullanılan aşınan ve aşındırıcı materyaller cihaz, sistemler ve elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler açıklanmıştır.

#### 3.1. Materyal

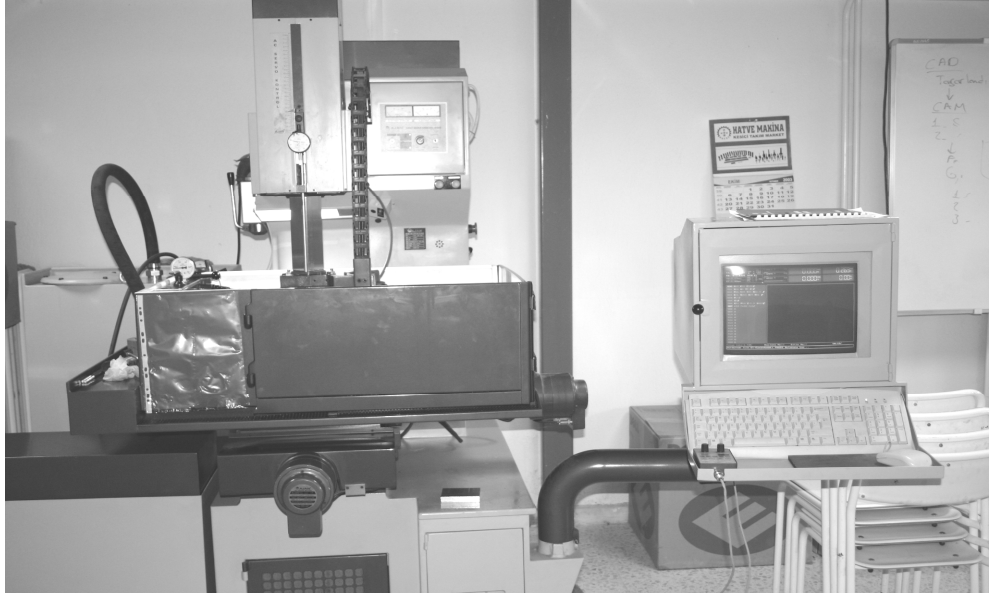
Deneyin yapımında CAD/CAM Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan Ajan marka C eksenli CNC Elektro Erozyon makinesi ve hidro karbon bileşiklerinden oluşan dielektrik sıvı kullanılmıştır. 10 mm çaplı bakır, bakır-tungsten ve grafit elektrot malzemeleri, sertleştirilmiş Assabkorkmaz 79PM toz metal iş parçası kullanılan materyallerdir. Aşağıda bu materyaller hakkında detaylı bilgiler verilmiştir (Çizelge 3.1.1.).

##### 3.1.1. CNC Elektro Erozyon Makinesi

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde kullanılan CNC Elektro Erozyon Makinesi (Şekil 3.1.1.1.) ve özellikleri aşağıdaki çizelge de verilmiştir (Çizelge 3.1.1.1.).

Çizelge 3.1.1.1. Deneyde kullanılan CNC Elektro Erozyon Makinesi Özellikleri

<u>Çalışma Tablası</u>	<u>Boyut</u>	<u>Birim</u>
İş tablası ölçüleri	510 x 315	mm
X ve Y eksen hareketi	370 x 270	mm
<u>Çalışma Başlığı</u>		
Maksimum Hareket Hızı	600	mm/mm <sup>3</sup>
Dielektrik Sistemi		
Kapasite	300	lt
<u>Jeneratör</u>		
Ortalama elektrot akımı	50	A
Darbe Gerilimi	75-150	V
Eksenler	4 eksen	x, y, z, u



Şekil 3.1.1.1. Deneyde kullanılan CNC Elektro Erezyon Makinesi

### 3.1.2. Dielektrik Sıvı

Deneylerde kullanılan dielektrik sıvının özellikleri aşağıdaki çizelge de gösterilmiştir(Çizelge 3.1.2.1.).

Çizelge 3.1.2.1. Deneyde kullanılan dielektrik sıvının özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Renk	Berrak	-
Yoğunluk 20 °C	0,809	g/cm <sup>3</sup>
Viskozite 40 °C	2,3	CSt
Alevalma Noktası	>130	°C
Akma Noktası	-23	°C
Kaynama Başlangıcı	240	°C
Kaynama Bitimi	263	°C

### 3.1.3. Toz Metal İş Parçası

Toz metalurjisi (T/M), metal işleme teknolojileri arasında çok büyük farklılık gösteren bir üretim tekniğidir. İlk toz metalurjisi uygulamaları kimyasal olarak elde

edilmiş platin ve iridyum gibi yüksek sıcaklıkta eriyen malzemelerden oluşmaktadır. 1826 da Rusya’da tedavüle çıkarılan platin para toz metalurjisinin ilk endüstriyel uygulaması olmuştur. Toz metalurjisini cazip kılan, ekonomik açıdan, çok yüksek hassasiyette karmaşık şekilli, yüksek kalitede parça üretiminin mümkün olmasıdır.

Bu deneyde iş parçası olarak, sertleştirilmiş Assab79PM (57-58 Rc ) toz metal soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Yüksek sertlikteki iş parçasının elektro erozyon ile işlenmesinin amacı toz metal olan bu malzemenin yüzey pürüzlülüğü özelliklerini tanımlamak ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırarak sertliğin yada toz metal malzemenin işlenebilirliğini de ortaya çıkarmaktır.

Kullanılan toz metal malzeme DIN 1.2379, AISI D2 çeliklerinin aynı kimyasal bileşimine sahiptir (Çizelge 3.1.3.1.a.). Malzemenin fiziksel özellikleri de Çizelge 3.1.3.1.b. de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1.3.1.(a) İş parçası Assab79PM nin kimyasal bileşimi

%C	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%Si
1.55	0.40	11.80	0.80	0.80	0.30

Çizelge 3.1.3.1.(b) Assab79PM nin Fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikleri	20 °C	200 °C	400 °C
Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	7.70	7.65	7.60
Isıl iletkenlik, W/m °C	20.0	21.0	23.0
Elastisite Modülü, MPa	210.000	200.000	180.000
Özgül Isı, J/kg °C	460		

İş parçaları, deney numunesi boyutlarına JS-EDM marka tel erezyon tezgahında 0.25 mm çaplı pirinç tel kullanılarak getirilmiştir.

İş parçası boyutları 130x22x15 mm olup, 10mm çaplı bakır elektrotların erezyon yapabileceği boyutlara getirilmiştir. Kesilen parçalar AssabKorkmaz firmasına ait

Vakum fırınında 1 saat 520°C yüksek sıcaklık menevişleme işlemi sonrasında, malzeme sertlikleri 57 - 58 HRc aralığı sertlik seviyesine ulaşmıştır. Isıl işlem sonucu sertleşen iş parçalarına elektro erozyon işlemi uygulanmıştır.

Assab79PM malzemesi AISI D2 çeliği ile aynı kimyasal bileşime sahip olmasının yanında, yüksek tokluk, yüksek aşınma direnci, yüksek basma dayanımı, yüksek sertleşebilirlik, yüksek meneviş direnci, ısıl işlemde mükemmel boyutsal kararlılık, nitrürleme ve PVD gibi yüzey işlemlerine uygunluk özelliklerini göstermektedir.

Malzemenin çeşitli uygulama alanları, yüksek tokluk istenen kesme ve hassas kesme uygulamaları, koparma, eğme, bükme, ezme kalıpları, sıvama, derin çekme kalıpları, soğuk dövme ve soğuk ekstrüzyon takımları, Alüminyum, çinko tüp imalatı takımları, ovalama tarakları, markalama takımları, Profil ve boru imal makaraları, aşındırıcı ve katkılı plastik kalıpları, plastik kesme-ufalama bıçaklarıdır.

#### **3.1.4. Elektrot**

Elektro erozyon deneyinin yapılacağı bakır elektrot numuneleri 10 mm çapında 300mm lik çubuklar şeklinde alınmış ve JS-EDM Tel erezyon makinesinde kesilerek deney için uygun boyutlara getirilmiştir. 10 mm çapında 300 mm lik bakır çubuklar tel erezyon cihazında boyları 10mm olacak şekilde kesileceği için 8 adet bakır çubuğun birbirine paralel iki sıra halinde bağlanacağı bir aparat yapılmış (Şekil 3.1.4.1.), tel erezyon cihazı tablasına bağlanmış ve 0.25 mm çapında pirinç tel kullanılarak kesilmiştir. Böylece, tüm deneysel çalışmada kullanılan toplam 320 adet bakır çubuğun çapları 10mm ve boyları da 10mm olmuştur. Yapılacak deney sonucunda elektrot ağırlık kaybını tespit etmek maksadı ile kesilen elektrotlar 0.001 hassasiyette hassas terazi ile deney öncesinde ve sonrasında tartılmıştır. Tüm elektrotların tel erezyon ile kesilen iki yüzeyi zımpara ile deney öncesinde parlatılmıştır. Bir yüzeyine elektrotların karışmaması amacıyla deney numaraları 1 den 320 ye kadar yazılmıştır. Elektrotları yine karışmaması ve deney sonrasında da muhafaza edilmek amacıyla 20 mm kalınlığında ahşap plaka 10.5 mm çaplı matkap ile delinmiş ve üstlerine numaraları yazılmıştır (Şekil 3.1.4.1.). Çalışmada Taguchi

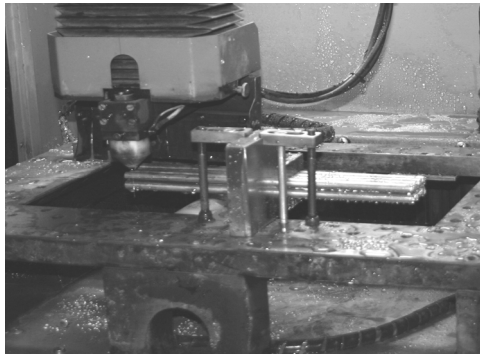


metodu uygulanarak yapılan elektro erozyon deneylerinde ise 10 mm çaplı 9 adet tanecik büyüklüğü 5  $\mu\text{m}$  olan grafit elektrot malzemesi ve 9 adet bakır-tungsten elektrot malzemesi kullanılmış ve bu elektrotların kesilmesi de tel erozyon cihazında yapılmış ve yüzeyler zımparalandıktan sonra deneyler yapılmıştır.

Kullanılan elektrotların özellikleri aşağıda verilmiştir(Çizelge 3.1.4.1.).

Çizelge 3.1.4.1. EEİ malzemelerinin bazı fiziksel özellikleri

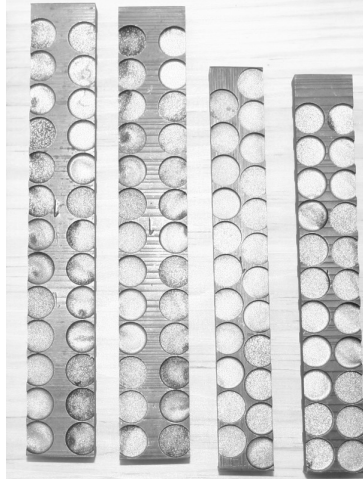
Malzeme	Yoğunlu k gr/cm <sup>3</sup>	Erime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Elektriksel direnci ( $\mu\Omega\text{cm}$ )
Bakır	8.904	1083	2580	9
Tungsten-bakır	15.2	3500	5930	5.5
Grafit	1.811	3350	4000	1400



Şekil 3.1.4.1. Deneyde kullanılan bakır elektrotlar

### 3.1.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

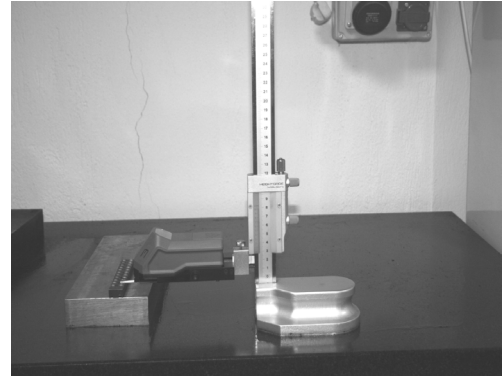
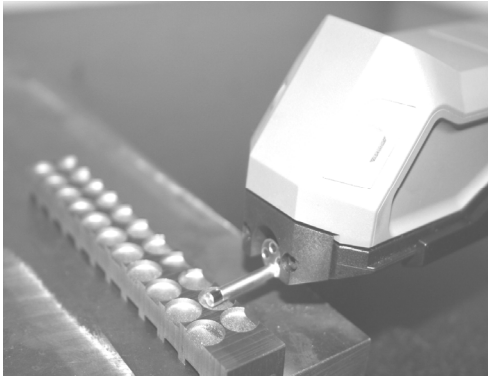
İş parçası malzemesi üzerine elektro erozyon işlemlerinin yapılmasının sonunda, pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi için kullanılacak cihazın ölçüm ucunun parça yüzeyine temasının sağlanması amacı ile iş parçasının yanlarından 2mm kalınlığında malzeme tel erozyon makinesinde kesilmiş (Şekil. 3.1.5.1.) ve ucun yüzeye teması sağlanmıştır.



Şekil. 3.1.5.1. Elektro erozyon ile işlenen iş parçaları

Elektro Erozyon işlemleri sonucu iş parçası yüzeyinde oluşan yüzey pürüzlülüklerini ölçmek için 0.01  $\mu\text{m}$  hassasiyette ölçüm yapan, elmas uçlu HommelWerke T-500 adlı yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı, ölçüm ayarları örnekleme uzunluğu (Lc) 0,25 mm, ölçme uzunluğu (Lm) 1,25 mm (5.Lc), travers uzunluğu (Lt) 1,5 mm olarak seçilerek kullanılmıştır.

Mihengir üzerinde bulunan ölçüm aparatına bağlanmış (Şekil 3.1.5.2.) ve elektro erozyon uygulanmış yüzey üzerine pürüzlülük ölçüm cihazının ucu değdirilmiş, cihaz ekranında görülen paralellik koşulu sağlandığında cihaz ile ölçüm yapılmıştır. Ölçüm yapılacak yüzey üzerinde üç farklı yerden ölçüm alınarak ortalama pürüzlülük değerleri sonuç olarak alınmıştır.



Şekil 3.1.5.2. EEİ sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin ölçümü

### 3.1.6. Deney Parametreleri

EEİ, deney parametreleri için boşalım akımı, Elektrik vurum süresi, Bekleme süresi, aralık voltajı değişken parametreler olarak alınmıştır (Çizelge 3.1.6.1.- 3.1.6.2.- 3.1.6.3.).

Çizelge 3.1.6.1. Deneylede kullanılan parametreler ve değerleri

Deney Parametresi	Değer	Birim
Boşalım akımı (A)	7, 12, 22, 42	Amper
Elektrik vurum süresi ( $t_{on}$ )	6, 12, 25, 50, 100	$\mu s$
Bekleme süresi ( $t_{off}$ )	12, 25, 50, 100	$\mu s$
Aralık voltajı (V)	40, 60, 80, 100	Volt
Bakır elektrot kutbu	Pozitif (+)	
$f = 1 / (t_{on} + t_{off})$ Çalışma frekansı	5000-55555	Hertz
$\tau = t_{on} / (t_{on} + t_{off})$ Kullanma faktörü	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9	$\mu s / \mu s$

Çizelge 3.1.6.2. Deneyledeki sabit çalışma parametreleri

Deney Parametresi	Değer	Birim
Açık devre voltajı	150	Volt
Dielektrik sıvı akış basıncı	50	Pascal
Erozyon ile ulaşılacak z derinliği	-2	mm

Çizelge 3.1.6.3. Deneyde uygulanan frekans değerleri

Deneyde uygulanan frekans değerleri (f) (hertz)						
55555	41666	32258	27027	20000	17857	16129
13333	10000	9434	8928	8000	6666	5000

Elektro Erozyon makinesinde belirlenen z derinliğinde (2mm) ve değişen parametreler için bir CNC program kodu hazırlanmıştır. Tüm deneyler için çalışma parametreleri değiştirilerek deneyler hazırlanan program kodu kullanılarak yapılmıştır.

EEİ için hazırlanan ve kullanılan program kodu;

G90 E50 F60

G54 X0 Y0 Z5

PW2 TA4 TB5 RD4

ET2 GV40 AS9 AR2

PL+

Z5

E51 F60 Z-2

E50 F600 Z10

Deneyleerde uygulanan parametrelerden bir kesit aşağıdaki izelge 3.1.6.4. de verilmiştir. Parametrelerin tamamı Ek-1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1.6.4. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan deney parametrelerinden bazıları

Deney No	Akım (A)	$t_{on}$ ( $\mu s$ )	$t_{off}$ ( $\mu s$ )	Voltaj (V)
34	12	50	12	80
69	42	50	12	60
91	7	6	25	80
139	22	50	25	100
197	12	12	50	100
317	42	12	100	100

### 3.2. Metod

Bu çalışmada, yapılan tüm deneyleerde sertleştirilmiş Assab79 PM kullanılmıştır. İlk aşamada, evrimsel modelleme için kullanılacak yeterli veri sayısını sağlayacak 320 adet bakır elektrot ile izelge 3.2.1. de belirtilen deneyleer yapılmıştır. Deney sonucunda pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve elektrot ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Evrimsel Programlama metodu ile bir tek çıktı parametresi olan modellemeler yapılabildiği için elektro erozyon deney sonuçları, pürüzlülük değerleri ( $R_a$ ) ve ağırlık kaybı (gr) için Automatic Problem Solver (APS) paket programında iki ayrı modelleme yapılmış, matematiksel fonksiyonları oluşturulmuş ve fonksiyon hesaplama sonuçları gerçek deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.

İkinci aşamada ise, deneysel çalışmalarda genel çalışma performansını oluşturmak için uygulanan Taguchi metoduna göre bakır-tungsten ve grafit elektrot malzemeleri kullanılmıştır.

Bakır elektrot ile yapılan 320 tane deney iş parçasının ve elektrotun genel özelliğini araştırmak için oldukça uzun zaman almıştır. Bunun yanında bakır-tungsten elektrot malzemesi, Taguchi metodu kullanılarak belirlenen elektro erozyon çalışma parametreleri ile iş parçasına uygulanmış ve sonuçta elektrot-iş parçası genel özellikleri belirlenmiştir.

Taguchi metodu, performans özelliklerini optimize edebilen, deney tasarımı metotları arasında tercih edilen bir metottur. Fakat, Taguchi uygulamaları ile yapılmış çoğu çalışma, bir performans özelliğinin optimizasyonu ile ilgilenmiştir (Lin vd. 2000).

Bakır elektrotlarla yapılan deneyde kullanılan aynı özelliklere sahip sertleştirilmiş toz metal malzeme D2 çeliği kimyasal özelliklerini gösteren Assab79PM iş parçasının, grafit ve bakır-tungsten (%25-75 bakır-tungsten) elektrotlar kullanılarak yapılan elektro erozyon deneyinde Taguchi metoduna göre yapılan 3 seviye 4 faktör deney parametreleri aşağıda Çizelge 6.2.1. de belirtilmiştir.

Çizelge 3.2.1. Bakır-tungsten ve grafit elektrotlar ile yapılan EEİ parametreleri

Boşalım akımı (A)	Vurum süresi ( $\mu$ s)	Bekleme süresi ( $\mu$ s)	Aralık Voltajı (V)
7	6	12	40
7	50	50	60
7	100	100	100
22	6	50	100
22	50	100	40
22	100	12	60
42	6	100	60
42	50	12	100
42	100	50	40

#### 4. BULGULAR

Elektro erozyon ile işleme yönteminin sertleştirilmiş toz metal iş parçası üzerine çeşitli çalışma parametrelerinde (akım, vuruş süresi, bekleme süresi, aralık voltajı), bakır, bakır-tungsten ve grafit elektrotlar kullanarak uygulanması sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü araştırılmış ve bulunan sonuçlar aşağıda şekiller ve çizelgelerle gösterilmiştir.

##### 4.1. Deneysel Ölçümler ve Karşılaştırmalar

Çeşitli çalışma parametrelerinde bakır elektrot kullanılarak yapılan deneyler sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü ve elektrot malzeme kaybı oranlarının bir kısmı Çizelge 4.1.1. de tamamı Ek 1. de gösterilmiştir. Bakır elektrot ile bakır-tungsten ve grafit elektrotlarının performanslarının karşılaştırılması ise Çizelge 4.1.2. de gösterilmiştir. Bakır elektrot deneylerinin sonuçları; Aralık voltajın yüzey pürüzlülüğüne etkisi, Boşalım akımının yüzey pürüzlülüğüne etkisi, Bekleme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi, Vuruş süresinin elektrot ağırlık kaybına etkisi başlıkları altında açıklanmıştır.

Çizelge 4.1.1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan deney sonuçlarının bir kısmı

Deney No	Akım (A)	$t_{on}$ ( $\mu s$ )	$t_{off}$ ( $\mu s$ )	Voltaj (V)	Elektrot ağırlık kaybı (gr)	Ra ( $\mu m$ )
42	22	12	12	40	0,675	3,31
43	22	25	12	40	0,358	4,19
44	22	50	12	40	0,155	4,65
45	22	100	12	40	0,015	4,8
46	22	6	12	60	0,902	3,06
81	7	6	25	40	0,211	1,5
82	7	12	25	40	0,064	1,68
83	7	25	25	40	0,018	1,93
190	12	100	50	60	0	3,45
191	12	6	50	80	0,868	2,03
192	12	12	50	80	0,389	2,24
193	12	25	50	80	0,096	2,52
311	42	6	100	80	0,351	4
312	42	12	100	80	1,96	4,24
313	42	25	100	80	1,079	4,46

Taguchi metoduna göre belirlenen sayı ve parametrelerde yapılan, grafit ve bakır-tungsten elektrot kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 4.1.2. de gösterilmiştir. Bakır, grafit ve bakır-tungsten elektrotlar kullanılarak yapılan elektro erozyon işlemi sonuçları karşılaştırılmış, bakır elektrot (+ kutup) ile yapılan elektro erozyon işleminde elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin genel itibariyle daha düşük olduğu görülmüştür.

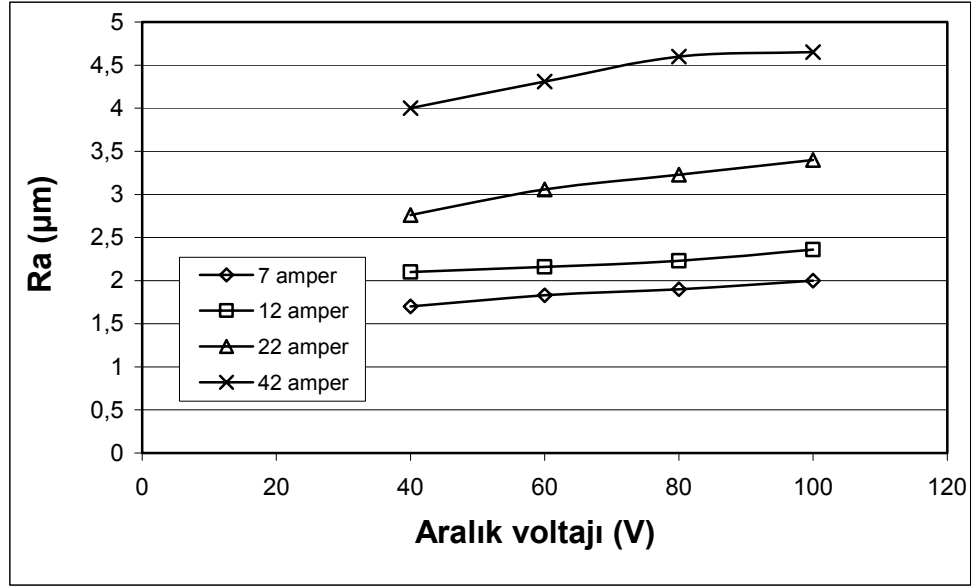
Çizelge 4.1.2. Bakır, grafit ve Bakır-tungsten elektrotlar ile EEİ sonrası yüzey pürüzlülükleri

Boşalım akımı	Vurum süresi	Bekleme süresi	Aralık Voltajı	Bakır-tungsten elektrot $R_a$	Bakır elektrot $R_a$	Grafit elektrot $R_a$
7	6	12	40	1,86	1,7	1,79
7	50	50	60	2,93	2,24	2,41
7	100	100	100	2,64	2,67	3,14
22	6	50	100	2,60	3,24	1,8
22	50	100	40	3,60	3,6	3,44
22	100	12	60	4,04	5,29	4,08
42	6	100	60	2,28	3,71	1,30
42	50	12	100	3,60	6,02	4,18
42	100	50	40	4,85	5,3	5,04

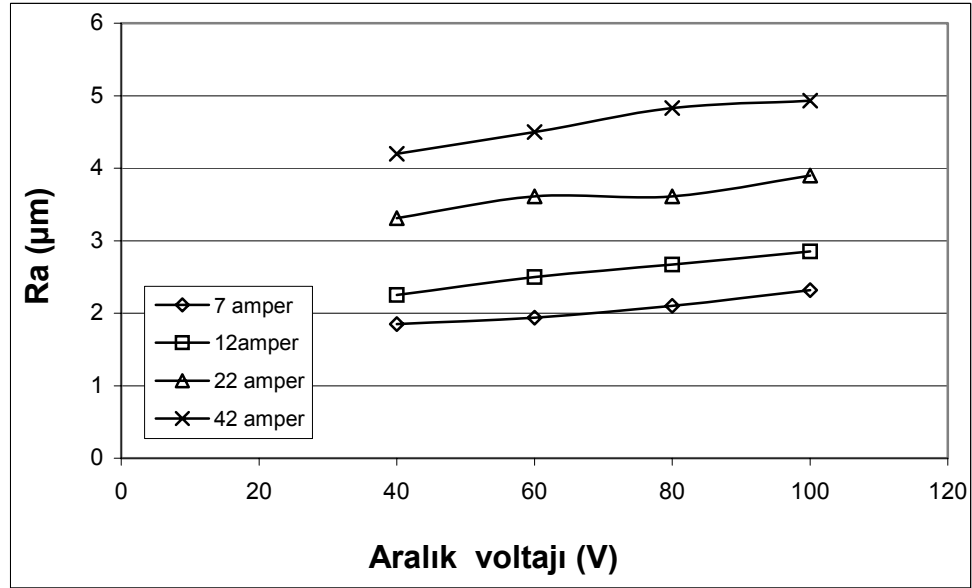
#### 4.1.1. Aralık Voltajın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Elektro erozyon işleminin en etken parametrelerinden aralık voltajı, iş parçası ve elektrot arasındaki boşlukta elektrik boşalımı öncesi voltaj değeridir. Şekildeki pürüzlülük değişiminin elde edildiği makine çalışma şartları içinde vurum süresi ( $t_{on}$ ) ve bekleme süresi ( $t_{off}$ ) sabit tutulmuş ve deney için belirlenen tüm tepe akımı (7, 12, 22,42 amper) değerleri için ölçülen pürüzlülük değişimini göstermektedir.

Her farklı akım değeri için pürüzlülük artışının olması, uygulanan aralık voltajının pürüzlülüğe etkisinin olduğunu göstermektedir (Şekil 4.1.1.1.). Aralık voltajın yanında akım değerinin de artması ile pürüzlülüğün arttığı ve kaba talaş kaldırma işleminin olduğu söylenebilir (Şekil4.1.1.2.).



Şekil 4.1.1.1. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 6  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s



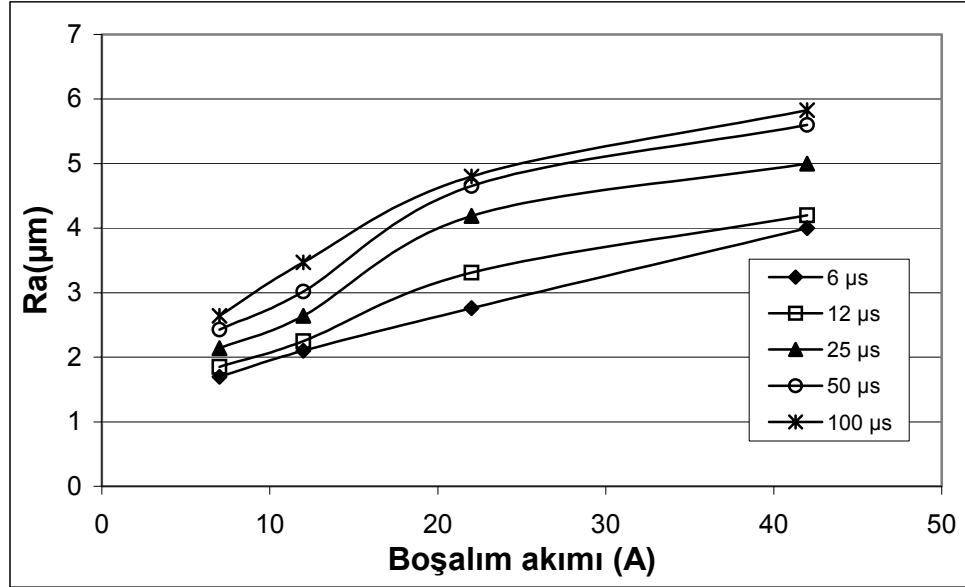
Şekil 4.1.1.2. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 12  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s

#### 4.1.2. Boşalım Akımının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Boşalım akımı, elektro erozyon işleminde pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranını ve elektrot aşınmasını en çok etkileyen parametredir. Boşalım akımı ve vurum süresi işlem performansını birinci derecede belirleyen etkenler olduğuna göre elektro erozyonda hedeflenen çalışma koşulları da çok dikkatli seçilmelidir.

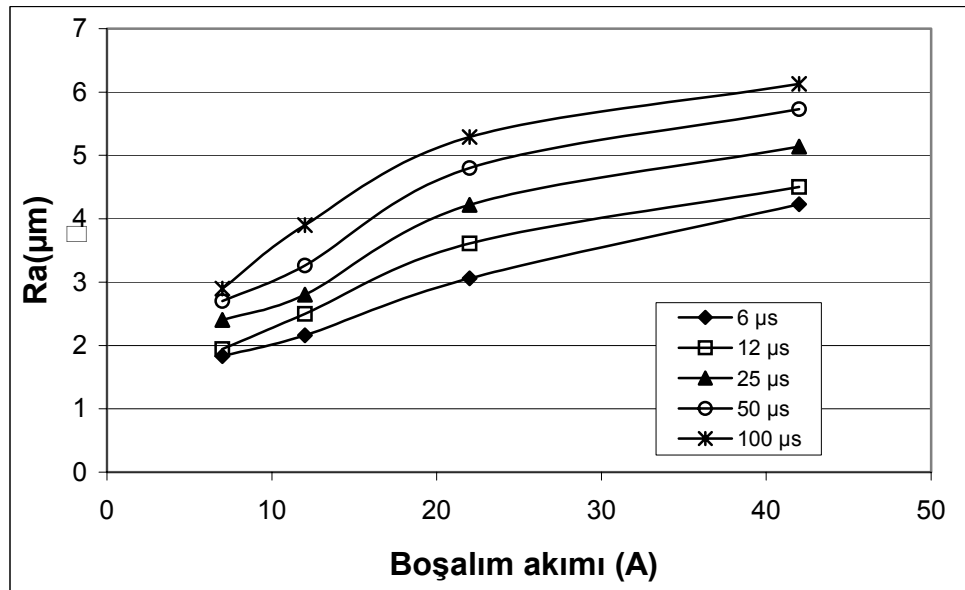


Şekillerde, düşük boşalım akımının olduğu bölgede,  $R_a$  yüzey pürüzlülüğünün az olduğu ve akımın artması ile artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.1.2.1.).



Şekil 4.1.2.1. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 12  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 40 Volt

Farklı bekleme süresi ve aralık voltaj değerleri ( $t_{\text{off}}$  12  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 60 Volt) uygulandığı zaman da pürüzlülüğün yine akım ile orantılı olarak değiştiği Şekil 4.1.2.2. de görülmektedir.

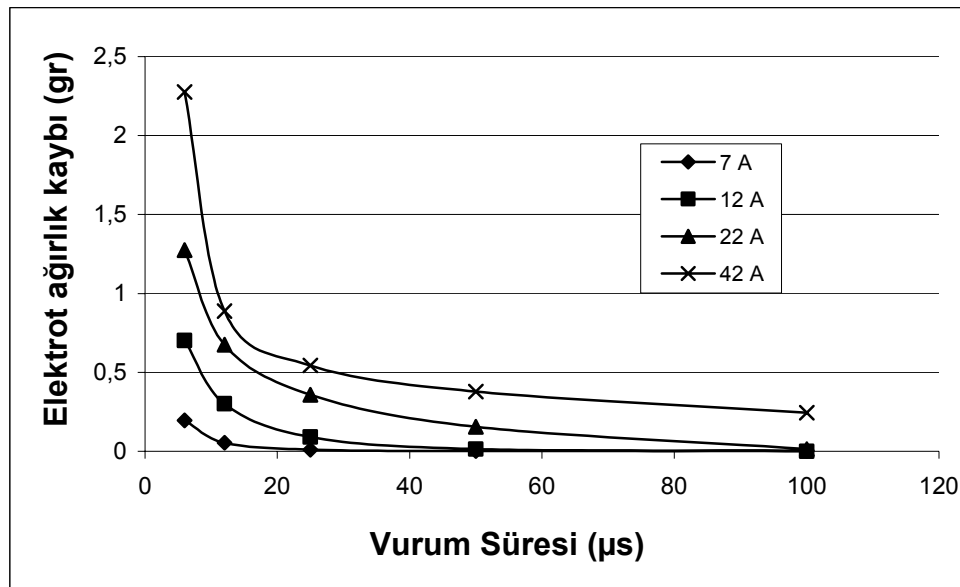


Şekil 4.1.2.2. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 12  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 60 Volt

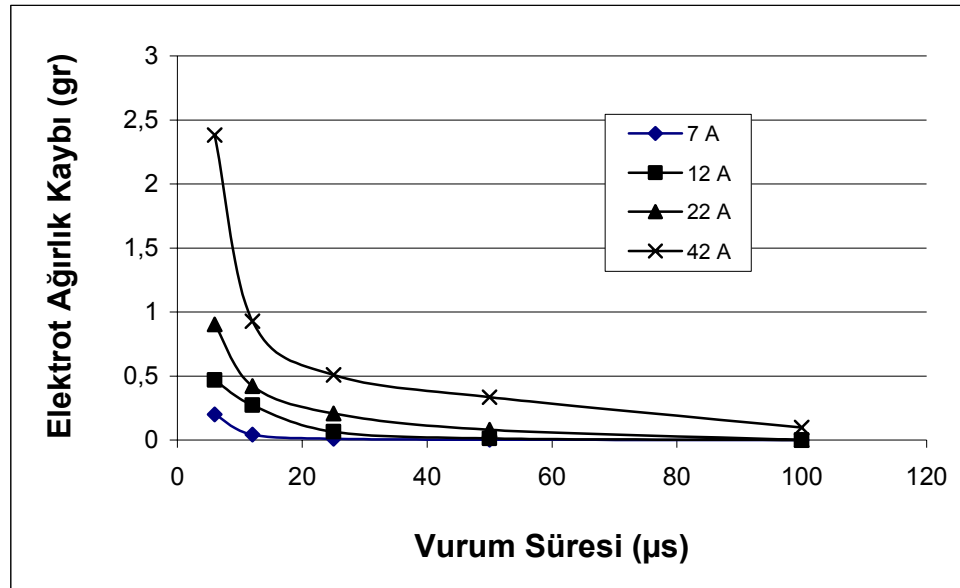
### 4.1.3. Vurum Süresinin Elektrot Ağırlık Kaybına Etkisi

Vurum süresi, elektro erozyon işlemlerinde talaş kaldırma oranı, elektrot aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü gibi işlem performansını belirleyen ve çalışma parametrelerinden bu değerlerin değişimini boşalım akımına bağlı olarak en fazla etkileyen parametredir. Şekil 4.1.3.1. de bekleme süresi 12  $\mu$ s, Gap voltaj da 40 Volt olarak sabitlenmiş ve belirli tepe akımı değerlerinin uygulandığı vurum süresi değişimi sonucunda elektrottan olan kayıp incelenmiştir. Bu çalışma içerisinde vurum süresi olarak alınan deneysel değerler 6 ve 100  $\mu$ s arasında değişmiştir ve farklı akım değerlerinde bile vurum süresinin arttıkça elektrot ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir.

Şekil 4.1.3.2. de bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s ve aralık voltajı 60 Volt olduğunda uygulanan boşalım akımının artması ile elektrot ağırlık kaybının arttığı ve elektrotun çok aşındığı görülmektedir. Vurum süresi arttıkça ağırlık kaybı azalmaktadır.



Şekil 4.1.3.1. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt



Şekil 4.1.3.2. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12 µs, Aralık voltajı 60 Volt

#### 4.1.4. Bekleme Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Elektro erozyon sürecinde uygulanan elektrik akımının uygulanma süresinden sonra bir sonra olacak olan işlemin tam performans ile gerçekleşmesi için yeterli bekleme süresinin uygulanması gereklidir. bekleme süresi olması gerekenden az yada çok olursa elektro erozyon işlem performansı da olumsuz yönde değişecektir. Aşağıdaki Şekil 4.1.4.1. ve 4.1.4.2. de bekleme süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermektedir ve bu şekillerin altında yazılan boşalım akımı, aralık voltajı değerleri sabit tutulmuştur. Bekleme süresinin artışı ile pürüzlülüğün azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.1.5.1. Yapılan deneysel çalışmanın diğerleri ile karşılaştırılması

Akım (A)	$t_{on}$ ( $\mu s$ )	$t_{off}$ ( $\mu s$ )	Aralık voltajı (V)	iş parçası malzemesi	malzeme/kutup	Ra ( $\mu m$ )	Kaynakça
10	20	20	100	D2 takım çeliği	bakır(+)	7,5	Y.H. Guu (2003)
7	25	25	100	sertleştirilmiş PM takım çeliği	bakır (+)	2,14	<i>Deneysel parametre</i>
12	25	200	120	tungsten-carbide	bakır (-)	2	S.H.Lee (2001)
12	25	100	100	sertleştirilmiş PM takım çeliği	bakır (+)	2,68	<i>Deneysel parametre</i>
24	25	200	120	tungsten-carbide	bakır (-)	2,4	S.H.Lee (2001)
22	25	100	100	sertleştirilmiş PM takım çeliği	bakır (+)	3,6	<i>Deneysel parametre</i>
12	25	25	80	2080 takım çeliği	bakır (+)	5,72	C.Çoğun (2004)
12	25	25	80	sertleştirilmiş PM takım çeliği	bakır (+)	2,66	<i>Deneysel parametre</i>
12	50	25	80	2080 takım çeliği	bakır (+)	6,31	C.Çoğun (2004)
12	50	25	80	sertleştirilmiş PM takım çeliği	bakır (+)	3,21	<i>Deneysel parametre</i>

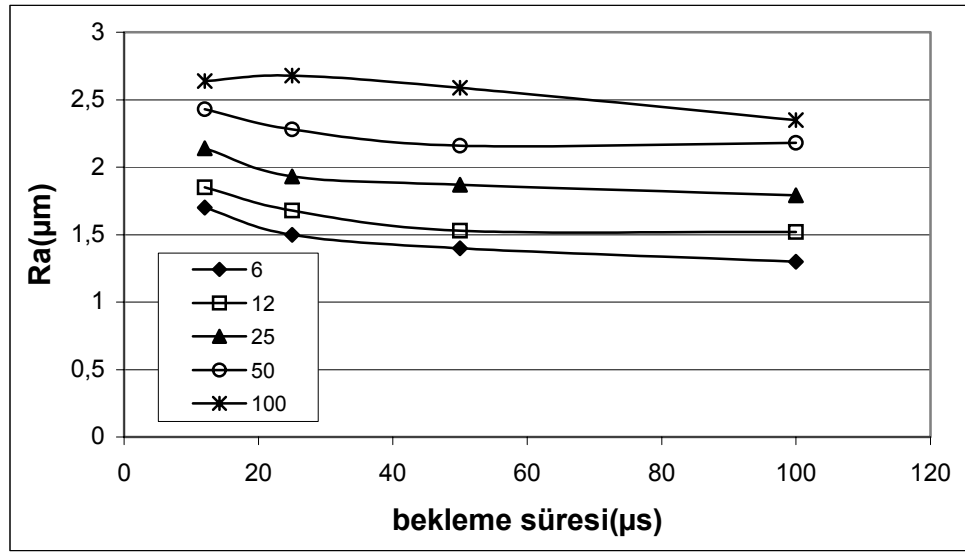
#### 4.2. Deney Sonuçlarının Evrimsel Programlanması

Farklı çalışma parametreleri ile her bir elektro erozyon deneyi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve elektrot ağırlık kaybı değerleri Evrimsel programlama ile başarı ile modellenmiştir. Evrimsel programlama sonucu deney parametreleri arasındaki ilişki C++ program kodu halinde ifade edilmiş ve bu ifadeye göre de yeni deney parametreleri sonuçları hesaplatılmıştır.

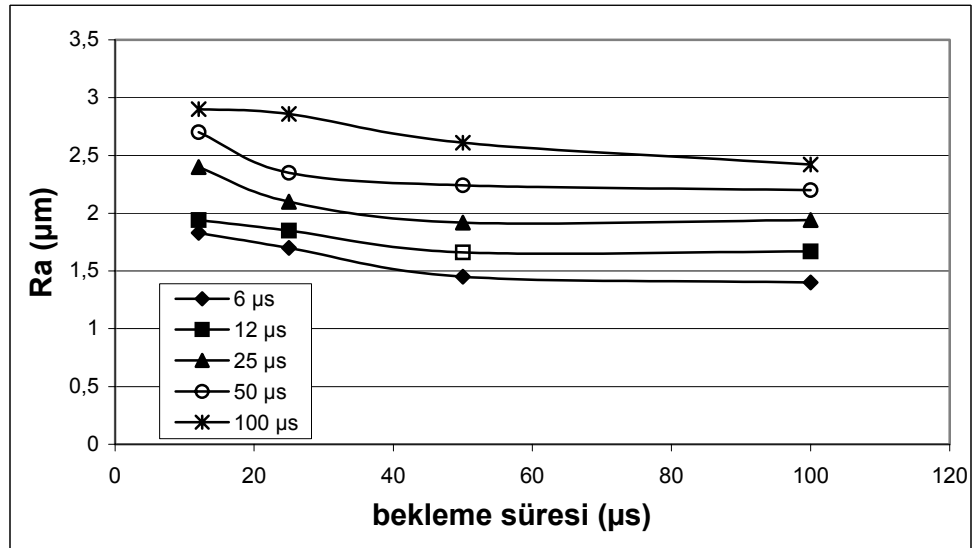
##### 4.2.1. Yüzey Pürüzlülüğü ( $R_a$ ) Değerinin Evrimsel Programlama İle Modellenmesi

Toplam yapılan 320 adet deneyin 256 tanesi eğitim, 50 tanesi test verisi ve 14 tanesi de evrimsel modelleme ile belirlenen nihai çözüm modelinin çıktı parametresi olan pürüzlülük değerlerini hesaplatmak ve gerçek deneysel verilerle kıyaslandığında hata oranını bulmak amacıyla kullanılmıştır.

Akım, vuruş süresi, bekleme süresi, aralık voltajı evrimsel modellemenin giriş parametrelerini, her bir deney sonucu meydana gelen yüzey pürüzlülük değerleri ( $R_a$ ) ise çıkış parametresini ifade etmektedir. Evrimsel programlamanın yapılacak olduğu APS programı için girdi parametreleri 0 ve 1 arasında sayısal değerlerden oluşması



Şekil 4.1.4.1. Boşalım akımı 7 Amper, Aralık voltajı 40 Volt



Şekil 4.1.4.2. Boşalım akımı 7 Amper, Aralık voltajı 60 Volt

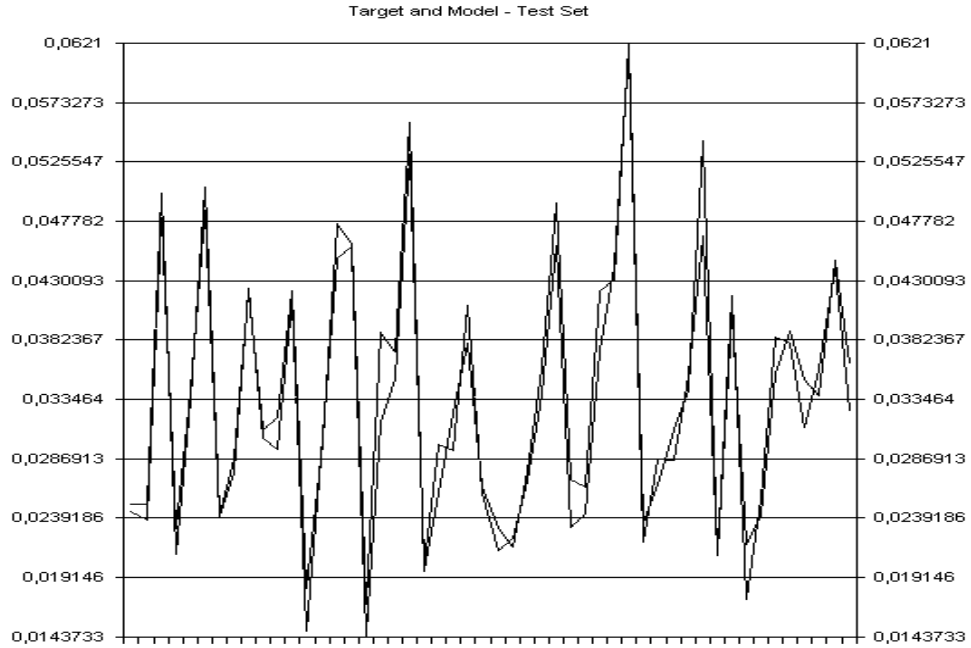
#### 4.1.5. Deneysel Sonuçlarının Diğer Çalışmalar İle Kıyaslanması

Bakır elektrot kullanılarak yapılan deneyler, literatürde yer alan diğer bazı çalışmalar ile Çizelge 4.1.5.1. de kıyaslanmıştır. Kıyaslanan çalışmalarda, aynı parametre değerleri seçilmemiş olsa da (benzer parametreler seçilmiş) sertleştirilmiş Assab79 toz metal malzemenin bakır elektrot ile işlenmesi sonucu oluşan pürüzlülük değerleri diğer çalışmalara göre çok daha az olduğu anlaşılmaktadır.

gerektiği için eğitim için kullanılacak parametreler 100'e bölünmüş ve o şekilde Çizelge 4.2.1.1. de, test için kullanılan parametreler Çizelge 4.2.1.2. de gösterilmiştir. Evrimsel programlama ile bir çok model kurulmuş fakat en iyi eğitimin sağlandığı model, çözüm olarak seçilmiştir. Birçok model oluşturulurken, evrimsel programlamanın ayarlar (settings) kısmındaki bazı oranlar değiştirilerek en iyi çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır.

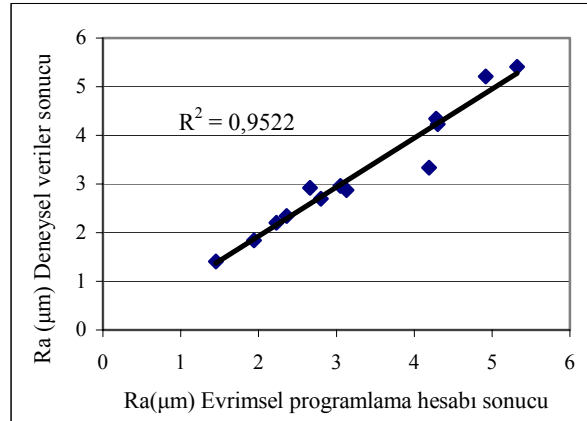
Modellemenin yapılmasında denemeler sonucu 0,95 oranı ile en iyi eğitimin sağlandığı program aşağıda belirtilmiştir.

Evrimsel program ayarlamaları yapıldıktan sonra kullanılan hedef fonksiyon ve test verilerinin birbirleri ile çok uyumlu olduğu çizgilerin çok az sapmalarla birbirlerinden ayrıldıkları ve daha sonra da yapılan testler ile eğitimin çok verimli olduğu Şekil 4.2.1.1. de görülmektedir.



Şekil 4.2.1.1. Kurulan EP modelinde kullanılan  $R_a$  pürüzlülük değeri hedef fonksiyon ve test verileri

EP ile kurulan çözüm modelinin güvenilirliğini test etmek amacıyla sonuçları bilinen eğitim ve testte kullanılmayan 14 tane deney parametresi girdi olarak verilmiştir. Bu parametrelerin pürüzlülük değerler EP modelinde oluşturulan fonksiyonla hesaplanmıştır. Modelleme sonucu elde edilen değerler ile gerçek deney sonuçlarının karesel hata oranının % 95 olduğu Şekil 4.2.1.2. de görülmektedir.



Şekil 4.2.1.2. Modelleme ve deney  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) sonuçlarının karşılaştırılması

Bu çalışmada, kurulan modeller içinden ortalama karesel hatanın ( $R^2$ ) 0,95 olan Evrimsel Programlama modelinin C++ program kodu aşağıdaki gibidir.

C++ program kodu :

```
double APSCfunction(double d[])
{
    double dblTemp = 0;
    dblTemp += sin((d[0]/fabs(pow(pow(10,pow(10,d[0])),cos(d[1])))));
    dblTemp += sin((d[0]/(pow(10,(d[0]/d[0]))+pow((d[1]/d[0]),d[1]))));
    dblTemp += ((d[1]/pow(10,(pow(d[2],d[0])+(d[0]+d[1]))))*d[3]);
    return dblTemp;
}
```

d[] , Yüzey pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ ),  
d[0], Akım (A),  
d[1], Vurum Süresi-  $t_{on}$  ( $\mu\text{s}$ )  
d[2], Bekleme süresi-  $t_{off}$  ( $\mu\text{s}$ )  
d[3], Voltaj (V)

Evrimsel programlama sonucu elde edilen C++ program kodunun matematiksel formülü yukarıda parametrelerin kısaltılmış ifadeleri kullanılarak aşağıdaki gibi formülize edilebilir.

$$\sin\left(\frac{A}{(10^{10^A})^{\cos t_{on}}}\right) + \sin\left(\left(\frac{A}{10^{(A/A)}}\right) + \left(\frac{t_{on}}{A}\right)^{t_{on}}\right) + \left(\left(\frac{t_{on}}{10^{(t_{off})^A}}\right) + \left(\frac{A}{t_{on}}\right)\right) \times V$$

Çizelge 4.2.1.1. Evrimsel Programlamada kullanılan eğitim verileri

Akım	Vurum Süresi	Bekleme Süresi	Voltaj	Ra	Akım	Vurum Süresi	Bekleme Süresi	Voltaj	Ra
0,07	0,06	0,12	0,4	0,017	0,07	0,12	0,25	0,4	0,0168
0,07	0,12	0,12	0,4	0,0185	0,07	0,25	0,25	0,4	0,0193
0,07	0,25	0,12	0,4	0,0214	0,07	0,5	0,25	0,4	0,0228
0,07	0,5	0,12	0,4	0,0243	0,07	1	0,25	0,4	0,0268
0,07	1	0,12	0,4	0,0264	0,07	0,12	0,25	0,6	0,0185
0,07	0,12	0,12	0,6	0,0194	0,07	0,25	0,25	0,6	0,021
0,07	0,25	0,12	0,6	0,024	0,12	1	0,25	0,6	0,0377
0,07	1	0,12	0,6	0,029	0,12	0,06	0,25	0,8	0,0212
0,07	0,06	0,12	0,8	0,019	0,12	0,12	0,25	0,8	0,0246
0,07	0,12	0,12	0,8	0,021	0,12	0,5	0,25	0,8	0,0321
0,07	0,5	0,12	0,8	0,0269	0,12	1	0,25	0,8	0,0382
0,12	0,12	0,12	0,8	0,0267	0,12	0,06	0,25	1	0,0226
0,12	0,25	0,12	0,8	0,0288	0,12	0,12	0,25	1	0,0263
0,12	0,5	0,12	0,8	0,033	0,12	0,25	0,25	1	0,0277
0,12	1	0,12	0,8	0,0396	0,12	1	0,25	1	0,0394
0,12	0,12	0,12	1	0,0285	0,22	0,06	0,25	0,4	0,027
0,12	0,25	0,12	1	0,032	0,22	0,12	0,25	0,4	0,0315
0,12	1	0,12	1	0,0403	0,22	0,5	0,25	0,4	0,0422
0,22	0,06	0,12	0,4	0,0276	0,22	1	0,25	0,4	0,0472
0,22	0,12	0,12	0,4	0,0331	0,22	0,06	0,25	0,6	0,0296
0,22	0,5	0,12	0,4	0,0465	0,22	0,25	0,25	0,6	0,04
0,22	1	0,12	0,4	0,048	0,22	0,5	0,25	0,6	0,0433
0,22	0,06	0,12	0,6	0,0306	0,22	1	0,25	0,6	0,0487
0,22	0,12	0,12	0,6	0,0361	0,22	0,12	0,25	0,8	0,0356
0,22	0,5	0,12	0,6	0,048	0,22	0,25	0,25	0,8	0,0407
0,42	0,5	0,12	0,4	0,056	0,22	0,5	0,25	0,8	0,0452
0,42	1	0,12	0,4	0,0583	0,22	1	0,25	0,8	0,0521
0,42	0,12	0,12	0,6	0,045	0,22	0,06	0,25	1	0,0338
0,42	0,25	0,12	0,6	0,0514	0,22	0,25	0,25	1	0,0421
0,42	0,5	0,12	0,6	0,0573	0,22	0,5	0,25	1	0,0476
0,07	1	0,12	0,8	0,03	0,42	0,06	0,25	0,4	0,0395
0,07	0,06	0,12	1	0,02	0,42	0,12	0,25	0,4	0,0425
0,07	0,12	0,12	1	0,0232	0,42	0,25	0,25	0,4	0,0492



Çizelge 4.2.1.1. Evrimsel Programlamada kullanılan eğitim verileri (devam)

Akım	Vurum Süresi	Bekleme Süresi	Voltaj	Ra	Akım	Vurum Süresi	Bekleme Süresi	Voltaj	Ra
0,07	0,06	0,12	0,4	0,017	0,07	0,12	0,25	0,4	0,0168
0,07	0,12	0,12	0,4	0,0185	0,07	0,25	0,25	0,4	0,0193
0,07	0,25	0,12	0,4	0,0214	0,07	0,5	0,25	0,4	0,0228
0,07	0,5	0,12	0,4	0,0243	0,07	1	0,25	0,4	0,0268
0,07	1	0,12	0,4	0,0264	0,07	0,12	0,25	0,6	0,0185
0,07	0,12	0,12	0,6	0,0194	0,07	0,25	0,25	0,6	0,021
0,07	0,25	0,12	0,6	0,024	0,12	1	0,25	0,6	0,0377
0,07	1	0,12	0,6	0,029	0,12	0,06	0,25	0,8	0,0212
0,07	0,06	0,12	0,8	0,019	0,12	0,12	0,25	0,8	0,0246
0,07	0,12	0,12	0,8	0,021	0,12	0,5	0,25	0,8	0,0321
0,07	0,5	0,12	0,8	0,0269	0,12	1	0,25	0,8	0,0382
0,12	0,12	0,12	0,8	0,0267	0,12	0,06	0,25	1	0,0226
0,12	0,25	0,12	0,8	0,0288	0,12	0,12	0,25	1	0,0263
0,12	0,5	0,12	0,8	0,033	0,12	0,25	0,25	1	0,0277
0,12	1	0,12	0,8	0,0396	0,12	1	0,25	1	0,0394
0,12	0,12	0,12	1	0,0285	0,22	0,06	0,25	0,4	0,027
0,12	0,25	0,12	1	0,032	0,22	0,12	0,25	0,4	0,0315
0,12	1	0,12	1	0,0403	0,22	0,5	0,25	0,4	0,0422
0,22	0,06	0,12	0,4	0,0276	0,22	1	0,25	0,4	0,0472
0,22	0,12	0,12	0,4	0,0331	0,22	0,06	0,25	0,6	0,0296
0,22	0,5	0,12	0,4	0,0465	0,22	0,25	0,25	0,6	0,04
0,22	1	0,12	0,4	0,048	0,22	0,5	0,25	0,6	0,0433
0,22	0,06	0,12	0,6	0,0306	0,22	1	0,25	0,6	0,0487
0,22	0,12	0,12	0,6	0,0361	0,22	0,12	0,25	0,8	0,0356
0,22	0,5	0,12	0,6	0,048	0,22	0,25	0,25	0,8	0,0407
0,42	0,5	0,12	0,4	0,056	0,22	0,5	0,25	0,8	0,0452
0,42	1	0,12	0,4	0,0583	0,22	1	0,25	0,8	0,0521
0,42	0,12	0,12	0,6	0,045	0,22	0,06	0,25	1	0,0338
0,42	0,25	0,12	0,6	0,0514	0,22	0,25	0,25	1	0,0421
0,42	0,5	0,12	0,6	0,0573	0,22	0,5	0,25	1	0,0476
0,07	1	0,12	0,8	0,03	0,42	0,06	0,25	0,4	0,0395
0,07	0,06	0,12	1	0,02	0,42	0,12	0,25	0,4	0,0425
0,07	0,12	0,12	1	0,0232	0,42	0,25	0,25	0,4	0,0492
0,07	0,25	0,12	1	0,0271	0,42	1	0,25	0,4	0,057
0,07	1	0,12	1	0,0321	0,42	0,06	0,25	0,6	0,0411
0,12	0,06	0,12	0,4	0,021	0,42	0,12	0,25	0,6	0,0443
0,12	0,12	0,12	0,4	0,0225	0,42	0,5	0,25	0,6	0,0556
0,12	0,5	0,12	0,4	0,0302	0,42	1	0,25	0,6	0,059
0,12	1	0,12	0,4	0,0347	0,42	0,06	0,25	0,8	0,0433
0,12	0,06	0,12	0,6	0,0216	0,42	0,12	0,25	0,8	0,0455
0,12	0,25	0,12	0,6	0,028	0,42	0,25	0,25	0,8	0,0513
0,12	0,5	0,12	0,6	0,0326	0,07	1	0,25	0,6	0,0286
0,12	1	0,12	0,6	0,039	0,07	0,06	0,25	0,8	0,0165
0,42	1	0,12	0,6	0,0613	0,07	0,12	0,25	0,8	0,0186

Çizelge 4.2.1.1. Evrimsel Programlamada kullanılan eğitim verileri (devam)

0,42	0,12	0,12	0,8	0,0483	0,07	0,5	0,25	0,8	0,0241
0,42	0,25	0,12	0,8	0,0522	0,07	1	0,25	0,8	0,0292
0,42	0,5	0,12	0,8	0,0562	0,07	0,06	0,25	1	0,017
0,42	0,06	0,12	1	0,0465	0,07	0,12	0,25	1	0,0196
0,42	0,12	0,12	1	0,0493	0,07	0,25	0,25	1	0,0214
0,42	0,25	0,12	1	0,0541	0,07	1	0,25	1	0,0305
0,42	0,5	0,12	1	0,0602	0,12	0,06	0,25	0,4	0,0201
0,42	1	0,12	1	0,065	0,12	0,12	0,25	0,4	0,0216
0,07	0,06	0,25	0,4	0,015	0,12	0,25	0,25	0,4	0,024
0,12	0,5	0,25	0,4	0,03	0,42	0,12	0,5	1	0,0454
0,12	0,06	0,25	0,6	0,0209	0,42	0,25	0,5	1	0,0487
0,12	0,12	0,25	0,6	0,0235	0,42	0,5	0,5	1	0,053
0,12	0,25	0,25	0,6	0,0266	0,42	1	0,5	1	0,0588
0,42	1	0,25	0,8	0,0597	0,07	0,06	1	0,4	0,013
0,42	0,06	0,25	1	0,0453	0,07	0,12	1	0,4	0,0152
0,42	0,12	0,25	1	0,0481	0,07	0,25	1	0,4	0,0179
0,42	0,25	0,25	1	0,0528	0,07	1	1	0,4	0,0235
0,42	0,5	0,25	1	0,0572	0,07	0,06	1	0,6	0,014
0,42	1	0,25	1	0,0617	0,07	0,12	1	0,6	0,0167
0,07	0,06	0,5	0,4	0,014	0,07	0,5	1	0,6	0,022
0,07	0,12	0,5	0,4	0,0153	0,07	1	1	0,6	0,0242
0,07	0,25	0,5	0,4	0,0187	0,07	0,06	1	0,8	0,0144
0,07	0,5	0,5	0,4	0,0216	0,07	0,12	1	0,8	0,0174
0,07	1	0,5	0,4	0,0259	0,07	0,25	1	0,8	0,0214
0,07	0,12	0,5	0,6	0,0166	0,07	0,5	1	0,8	0,0232
0,07	0,25	0,5	0,6	0,0192	0,07	0,06	1	1	0,0153
0,07	0,5	0,5	0,6	0,0224	0,07	0,12	1	1	0,0191
0,07	1	0,5	0,6	0,0261	0,07	0,25	1	1	0,0219
0,07	0,06	0,5	0,8	0,0152	0,07	1	1	1	0,0267
0,12	0,12	0,5	0,6	0,0218	0,12	0,06	1	0,4	0,0187
0,12	0,25	0,5	0,6	0,0241	0,12	0,12	1	0,4	0,0198
0,12	1	0,5	0,6	0,0345	0,12	0,5	1	0,4	0,0269
0,12	0,06	0,5	0,8	0,0203	0,12	1	1	0,4	0,0316
0,12	0,12	0,5	0,8	0,0224	0,12	0,06	1	0,6	0,0187
0,12	0,25	0,5	0,8	0,0252	0,12	0,25	1	0,6	0,0248
0,12	0,5	0,5	0,8	0,0297	0,12	0,5	1	0,6	0,027
0,12	1	0,5	0,8	0,036	0,12	1	1	0,6	0,0332
0,12	0,06	0,5	1	0,021	0,12	0,06	1	0,8	0,0197
0,12	0,12	0,5	1	0,0233	0,12	0,25	1	0,8	0,0257
0,12	0,5	0,5	1	0,0318	0,12	0,5	1	0,8	0,0284
0,12	1	0,5	1	0,037	0,12	0,06	1	1	0,0194
0,22	0,06	0,5	0,4	0,0263	0,12	0,12	1	1	0,0232
0,22	0,12	0,5	0,4	0,0302	0,12	0,25	1	1	0,0268
0,22	0,25	0,5	0,4	0,0341	0,12	1	1	1	0,0346

Çizelge 4.2.1.1. Evrimsel Programlamada kullanılan eğitim verileri (devam)

0,22	0,5	0,5	0,4	0,0376	0,22	0,06	1	0,4	0,0254
0,22	1	0,5	0,4	0,043	0,22	0,12	1	0,4	0,0286
0,22	0,12	0,5	0,6	0,0326	0,22	0,5	1	0,4	0,036
0,22	0,25	0,5	0,6	0,0353	0,22	1	1	0,4	0,04
0,22	0,5	0,5	0,6	0,0386	0,22	0,12	1	0,6	0,031
0,22	1	0,5	0,6	0,0436	0,22	0,25	1	0,6	0,0334
0,22	0,12	0,5	0,8	0,0341	0,22	1	1	0,6	0,0412
0,22	0,25	0,5	0,8	0,0378	0,22	0,06	1	0,8	0,0281
0,22	0,5	0,5	0,8	0,0413	0,22	0,25	1	0,8	0,035
0,22	1	0,5	0,8	0,0485	0,22	0,5	1	0,8	0,038
0,22	0,12	0,5	1	0,0358	0,22	1	1	0,8	0,0423
0,42	0,25	0,5	0,6	0,0446	0,22	0,06	1	1	0,0303
0,42	0,5	0,5	0,6	0,0491	0,22	0,12	1	1	0,0339
0,42	1	0,5	0,6	0,0564	0,22	0,5	1	1	0,039
0,42	0,12	0,5	0,8	0,0448	0,22	1	1	1	0,0443
0,42	0,25	0,5	0,8	0,047	0,42	0,06	1	0,4	0,0361
0,42	0,5	0,5	0,8	0,0497	0,42	0,12	1	0,4	0,0376
0,42	1	0,5	0,8	0,0572	0,42	0,25	1	0,4	0,0396
0,42	1	1	0,4	0,0445	0,07	0,12	0,5	0,8	0,0181
0,42	0,06	1	0,6	0,0371	0,07	0,25	0,5	0,8	0,0213
0,42	0,25	1	0,6	0,0423	0,07	1	0,5	0,8	0,0286
0,42	0,5	1	0,6	0,0445	0,07	0,06	0,5	1	0,0164
0,42	0,06	1	0,8	0,04	0,07	0,12	0,5	1	0,0186
0,42	0,12	1	0,8	0,0424	0,07	0,25	0,5	1	0,0215
0,42	0,5	1	0,8	0,0465	0,07	0,5	0,5	1	0,0247
0,42	1	1	0,8	0,0501	0,07	1	0,5	1	0,0297
0,42	0,12	1	1	0,0445	0,12	0,06	0,5	0,4	0,018
0,42	0,25	1	1	0,0465	0,12	0,25	0,5	0,4	0,0226
0,42	1	1	1	0,0516	0,12	0,5	0,5	0,4	0,026
0,12	1	0,5	0,4	0,0324	0,12	0,06	0,5	0,6	0,0198
0,22	0,06	0,5	0,8	0,029	0,22	1	0,12	0,6	0,0529
0,22	0,25	0,5	1	0,0387	0,22	0,06	0,12	0,8	0,0323
0,22	0,5	0,5	1	0,043	0,22	0,12	0,12	0,8	0,0361
0,22	1	0,5	1	0,0487	0,22	0,25	0,12	0,8	0,0434
0,42	0,12	0,5	0,4	0,0406	0,22	1	0,12	0,8	0,0553
0,42	0,25	0,5	0,4	0,0441	0,22	0,06	0,12	1	0,034
0,42	0,5	0,5	0,4	0,0478	0,22	0,25	0,12	1	0,0467
0,42	1	0,5	0,4	0,053	0,22	0,5	0,12	1	0,0512
0,42	0,06	0,5	0,6	0,0393	0,22	1	0,12	1	0,059
0,42	0,06	0,12	0,4	0,04					
0,42	0,12	0,12	0,4	0,042					

Çizelge 4.2.1.2. Evrimsel programlamada kullanılan test verileri

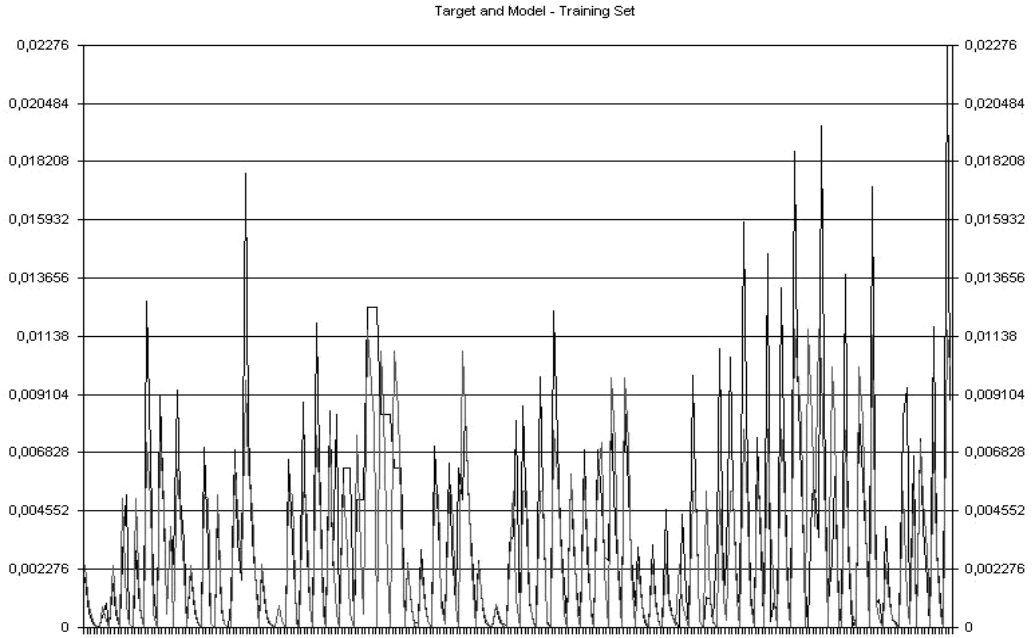
Akım	Vurum Süresi	Bekleme Süresi	Voltaj	Ra	Akım	Vurum Süresi	Bekleme Süresi	Voltaj	Ra
0,07	0,25	0,12	0,8	0,025	0,12	0,25	0,12	0,4	0,0264
0,12	0,12	0,12	0,6	0,025	0,22	0,25	0,12	0,6	0,0422
0,42	0,25	0,12	0,4	0,05	0,42	0,06	0,12	0,6	0,0431
0,07	0,25	0,25	0,8	0,021	0,42	1	0,12	0,8	0,0621
0,12	1	0,25	0,4	0,0335	0,07	0,5	0,25	0,6	0,0235
0,42	0,25	0,25	0,6	0,0505	0,07	0,5	0,25	1	0,0266
0,07	0,5	0,5	0,8	0,0241	0,12	0,5	0,25	0,6	0,031
0,22	0,06	0,5	0,6	0,0287	0,12	0,5	0,25	1	0,0342
0,42	0,06	0,5	0,8	0,0421	0,42	0,5	0,25	0,4	0,0542
0,12	0,5	1	1	0,031	0,12	0,12	1	0,6	0,021
0,22	0,12	1	0,8	0,032	0,42	0,12	1	0,6	0,0403
0,42	0,06	1	1	0,0422	0,07	0,5	1	0,4	0,0218
0,07	0,06	0,12	0,6	0,0183	0,07	0,5	1	1	0,0241
0,07	0,5	0,12	1	0,03	0,12	0,5	0,12	1	0,0355
0,22	0,5	0,12	0,8	0,0476	0,22	0,12	0,12	1	0,039
0,42	0,06	0,12	0,8	0,046	0,22	0,12	0,25	0,6	0,035
0,07	0,06	0,25	0,6	0,017	0,12	1	1	0,8	0,0338
0,22	0,25	0,25	0,4	0,0389	0,42	0,25	1	0,8	0,0446
0,22	0,12	0,25	1	0,0373	0,22	0,5	1	0,6	0,0363
0,42	0,5	0,25	0,8	0,0557	0,12	0,12	1	0,8	0,0216
0,12	0,12	0,5	0,4	0,0196	0,22	0,06	1	0,6	0,0277
0,12	0,25	0,5	1	0,0259	0,22	0,25	1	1	0,036
0,22	0,06	0,5	1	0,0324	0,42	0,5	1	1	0,0492
0,42	0,06	0,5	0,4	0,038	0,07	0,5	0,12	0,6	0,027
0,07	1	1	0,8	0,0264	0,12	0,25	1	0,4	0,0232

#### 4.2.2. Elektrot Ağırlık Kaybı (gr) Değerinin Evrimsel Programlama İle Modellenmesi

Yapılan 320 adet deneyin 256 tanesi eğitim, 50 tanesi test verisi ve 14 tanesi de evrimsel modelleme ile belirlenen nihai çözüm modelinin çıktı parametresi olan pürüzlülük değerlerini hesaplamak ve gerçek deneysel verilerle kıyaslandığında hata payını bulmak amacıyla kullanılmıştır.

Akım, vurum süresi, bekleme süresi, aralık voltajı evrimsel modellemenin giriş parametrelerini, her bir deney sonucu elektrottaki ağırlık kaybı ise çıkış parametresini ifade etmektedir. Evrimsel programlama ile bir çok model kurulmuş olup içlerinden en iyi eğitimin sağlandığı model, çözüm olarak seçilmiştir. Her model oluşumunda, evrimsel programlamanın ayarlar (settings) kısmındaki bazı oranlar değiştirilerek en

iyi çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Modellemenin yapılmasında denemeler sonucu 0,57 oranı ile en iyi eğitimin sağlandığı program şartları aşağıda belirtilmiştir. Evrimsel programlama ayarları yapılarak kurulan modelin eğitilmesinde kullanılan hedef fonksiyon ve eğitim verileri Şekil 4.2.2.1. de gösterilmiştir.



Şekil 4.2.2.1. Kurulan EP modelinde kullanılan ağırlık kaybı değeri hedef fonksiyon ve eğitim verileri

APS (Automatic Program Solver) bilgisayar programı ile yapılan evrimsel programlama aşağıda görüldüğü gibi modellemeyi oluşturan girdi parametreleri ve sonuç arasında C++ program kodu vermektedir. Ağırlık kaybı için elde edilen C++ program kodu aşağıda açıklandığı gibidir.

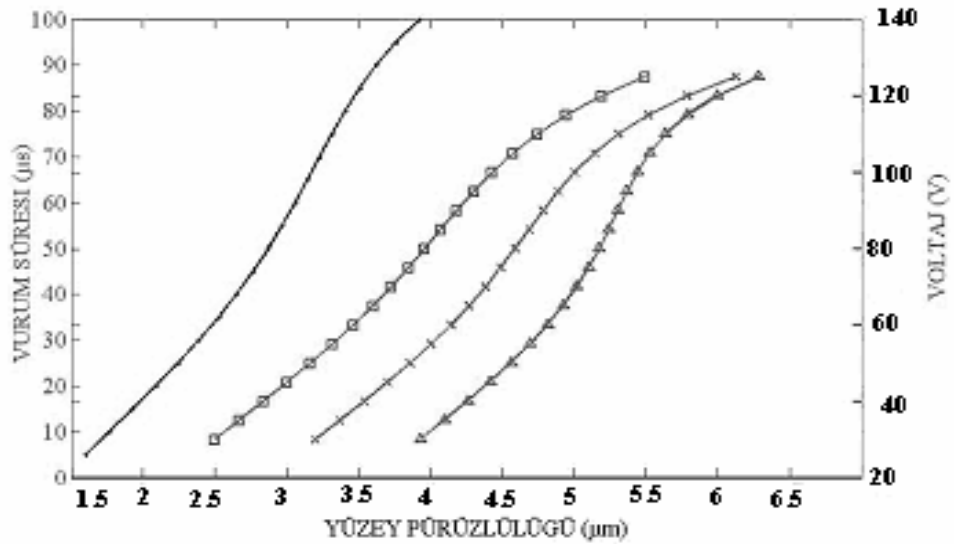
```
C++ program kodu _____ :
double APSCfunction(double d[])
{
    double dblTemp = 0;
    dblTemp += (d[1]*log10(cos((log10((d[2]>=d[1]?d[2]:d[1]))*fmod(d[0],d[3])))));
    dblTemp += sin(fabs(log10(cos((log10((d[1]>d[0]?d[1]:d[0]))*tan(d[0])))));
    dblTemp += sin(fabs(log10(cos(((fmod(d[0],d[1])-d[0])*log10(d[0])))));
    return dblTemp;
}
```

C++ program kodunda yer alan ifadelerin açıklamaları aşağıda belirtilmiştir.  
d[], Ağırlık Kaybı (gr), d[0], Akım(A), d[1], Vurum Süresi-  $t_{on}$  ( $\mu$ s), d[2], Bekleme süresi-  $t_{off}$  ( $\mu$ s), d[3], Voltaj (V)

### 4.2.3. Denklemlerle Hesaplanan Pürüzlülük Değerleri

Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ile kurulan  $R_a$  evrimsel programlama modeli ile deneyde yer almayan parametrelerin oluşturacağı pürüzlülükler hesaplatılmıştır. Elde edilen pürüzlülük fonksiyonu kullanılarak hesaplanan yüzey pürüzlülük değerinin hata oranı % 5 tir, yani %95 gibi oldukça yüksek doğruluk oranında hesaplama yeteneğine sahiptir. Fonksiyon kullanılarak deneyde kullanılmayan farklı parametreler seçilerek (Çizelge 4.2.3.1.), hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.2.3.1. de çizilmiştir.

Şekil dikkatli incelendiğinde düşük akım düşük voltaj ve düşük vurum süresinde pürüzlülük değerinin düşük olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca şekle göre 10 amper ile 20-40 amperlik boşalım akımlarının pürüzlülük açısından ciddi ayrılıkları dikkati çekmektedir. 10 Amperdeki pürüzlülük eğrisinin eğimi oldukça yüksek olmasına rağmen diğerlerinde az ve birbirlerine benzemektedir. Ayrıca 20-40 Amper için pürüzlülük eğrisi 100 Volt ve 70  $\mu$ s lik vurum süresinden sonra pürüzlülük eğiminde hızlı bir düşüş oluşmaktadır. Bütün bunlara ilavete 20- 40 amper uygulanan akım değerleri arasında 100 Volt ve 70  $\mu$ s lik vurum süresinden sonra pürüzlülük farkının azaldığı belirgin fark olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.2.3.1 Hesaplanan yüzey pürüzlülük değerlerinin vurum süresi ve voltaj ilişkisi (bekleme süresi 25  $\mu$ s (sabit) ve Akım, ●=10 A, □=20 A, +=30 A, Δ=40 A)

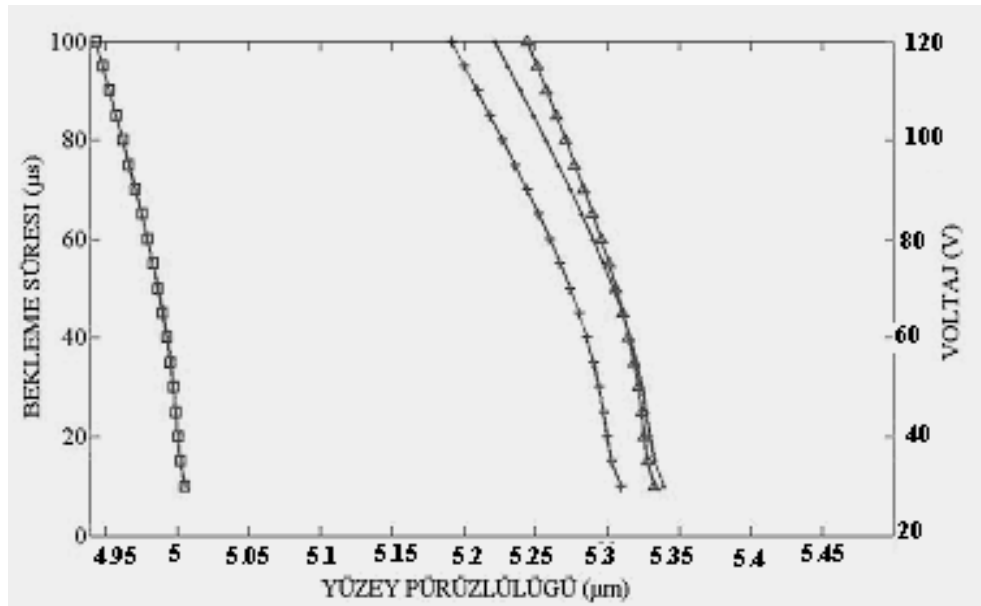
Çizelge 4.2.3.1. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve bulunan Ra değerleri

Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Ra	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Ra
10	5	25	30	1,607	20	90	25	115	4,946
10	10	25	35	1,765	20	95	25	120	5,192
10	15	25	40	1,927	20	100	25	125	5,494
10	20	25	45	2,088	30	5	25	30	3,200
10	25	25	50	2,243	30	10	25	35	3,368
10	30	25	55	2,389	30	15	25	40	3,536
10	35	25	60	2,526	30	20	25	45	3,701
10	40	25	65	2,651	30	25	25	50	3,859
10	45	25	70	2,766	30	30	25	55	4,006
10	50	25	75	2,871	30	35	25	60	4,143
10	55	25	80	2,968	30	40	25	65	4,268
10	60	25	85	3,0583	30	45	25	70	4,383
10	65	25	90	3,144	30	50	25	75	4,4899
10	70	25	95	3,228	30	55	25	80	4,589
10	75	25	100	3,314	30	60	25	85	4,686
10	80	25	105	3,406	30	65	25	90	4,784
10	85	25	110	3,508	30	70	25	95	4,889
10	90	25	115	3,624	30	75	25	100	5,005
10	95	25	120	3,761	30	80	25	105	5,142
10	100	25	125	3,925	30	85	25	110	5,309
20	5	25	30	2,499	30	90	25	115	5,518
20	10	25	35	2,665	30	95	25	120	5,785
20	15	25	40	2,835	30	100	25	125	6,127
20	20	25	45	3,003	40	5	25	30	3,934
20	25	25	50	3,165	40	10	25	35	4,100
20	30	25	55	3,320	40	15	25	40	4,263
20	35	25	60	3,465	40	20	25	45	4,419
20	40	25	65	3,601	40	25	25	50	4,565
20	45	25	70	3,726	40	30	25	55	4,699
20	50	25	75	3,846	40	35	25	60	4,820
20	55	25	80	3,960	40	40	25	65	4,927
20	60	25	85	4,071	40	45	25	70	5,022
20	65	25	90	4,183	40	50	25	75	5,104
20	70	25	95	4,301	40	55	25	80	5,177
20	75	25	100	4,429	40	60	25	85	5,243
20	80	25	105	4,574	40	65	25	90	5,306

Çizelge 4.2.3.1. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve bulunan Ra değerleri (devam)

20	85	25	110	4,744	40	85	25	110	5,641
40	70	25	95	5,370	40	90	25	115	5,792
40	75	25	100	5,442	40	95	25	120	5,998
40	80	25	105	5,529	40	100	25	125	6,282

Bakır elektrotlar ve sertleştirilmiş toz metal iş parçası için yapılan deney parametrelerinin dışında Çizelge 4.2.3.2. de verilen parametreler, modelleme ile elde edilen deklemin kullanılması sonucu yüzey pürüzlülük değerlerini Şekil 4.2.3.2. deki gösterildiği gibi hesaplamıştır.



Şekil 4.2.3.2. Hesaplanan yüzey pürüzlülük değerlerinin bekleme süresi ve voltaj ilişkisi (Akım 50 A(sabit) ve Vurum süresi  $\square=10 \mu\text{s}$ ,  $\triangle=30 \mu\text{s}$ ,  $\bullet=60 \mu\text{s}$ ,  $\Delta=90 \mu\text{s}$ )

Düşük bekleme süresi, düşük voltaj ve yüksek akım değerlerinde uygulanacak pürüzlülüğün fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca şekle göre, 10  $\mu\text{s}$  uygulanan vurum süresinin 30, 60 ve 90  $\mu\text{s}$  vurum sürelerine göre daha düşük pürüzlülük oluşturduğu dikkati çekmektedir. 60 ve 90  $\mu\text{s}$  vurum sürelerinin meydana getirdiği pürüzlülük grafik eğimleri 50  $\mu\text{s}$  bekleme süresi sonrasında değişmiştir. 60  $\mu\text{s}$  vurum süresinin oluşturacağı pürüzlülük 90  $\mu\text{s}$  nin oluşturacağı pürüzlülüğün fazla



görülmektedir. Çok belirgin bir şekilde 10  $\mu$ s vurum süresinin eğimini düzenli devam ettirdiği ve pürüzlülüğün bekleme süresi arttıkça azaldığı görülmektedir.

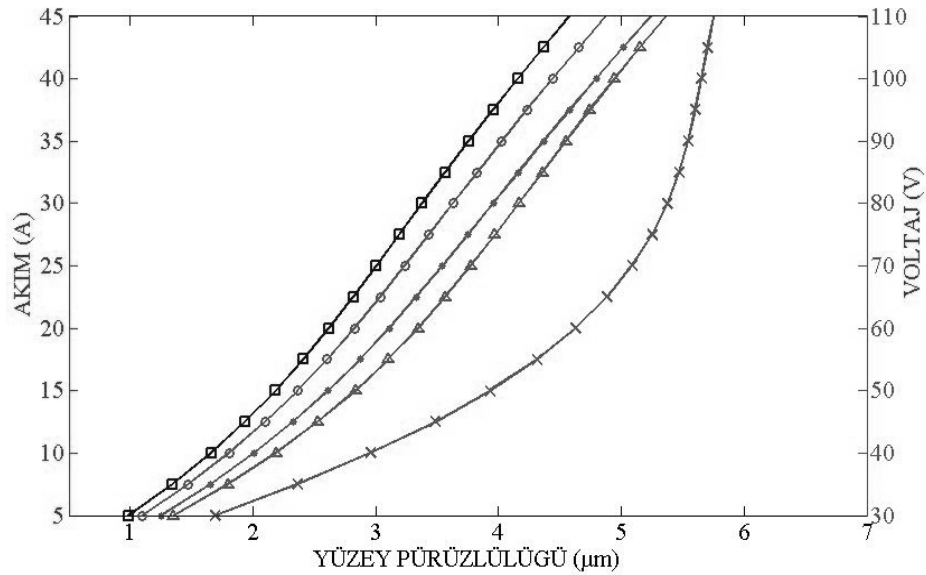
Çizelge 4.2.3.2. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve hesaplanan Ra değerleri

Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Ra	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Ra
50	10	10	30	5,005	50	30	80	100	5,257
50	10	15	35	5,002	50	30	85	105	5,248
50	10	20	40	5,000	50	30	90	110	5,239
50	10	25	45	4,999	50	30	95	115	5,230
50	10	30	50	4,997	50	30	100	120	5,221
50	10	35	55	4,995	50	60	15	35	5,303
50	10	40	60	4,993	50	60	20	40	5,300
50	10	45	65	4,990	50	60	25	45	5,297
50	10	50	70	4,986	50	60	30	50	5,294
50	10	55	75	4,983	50	60	35	55	5,290
50	10	60	80	4,979	50	60	40	60	5,285
50	10	65	85	4,975	50	60	45	65	5,280
50	10	70	90	4,971	50	60	50	70	5,274
50	10	75	95	4,966	50	60	55	75	5,267
50	10	80	100	4,962	50	60	60	80	5,260
50	10	85	105	4,957	50	60	65	85	5,252
50	10	90	110	4,957	50	60	70	90	5,244
50	10	95	115	4,947	50	60	75	95	5,235
50	10	100	120	4,943	50	60	80	100	5,227
50	30	10	30	5,339	50	60	85	105	5,218
50	30	15	35	5,333	50	60	90	110	5,209
50	30	20	40	5,330	50	60	95	115	5,200
50	30	25	45	5,327	50	60	100	120	5,191
50	30	30	50	5,324	50	90	10	30	5,333
50	30	35	55	5,320	50	90	15	35	5,328
50	30	40	60	5,315	50	90	20	40	5,326
50	30	45	65	5,310	50	90	25	45	5,324
50	30	50	70	5,304	50	90	30	50	5,321
50	30	55	75	5,297	50	90	35	55	5,318
50	30	60	80	5,290	50	90	40	60	5,315
50	30	65	85	5,282	50	90	45	65	5,311
50	30	70	90	5,274	50	90	50	70	5,306
50	30	75	95	5,265	50	90	55	75	5,301

Çizelge 4.2.3.2. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve hesaplanan Ra değerleri (devam)

50	90	60	80	5,295	50	90	90	110	5,257
50	90	65	85	5,290	50	90	95	115	5,251
50	90	70	90	5,283	50	90	100	120	5,244
50	90	75	95	5,277	50	60	10	30	5,307
50	90	80	100	5,271	50	90	85	105	5,264

Şekil 7.2.3.3. de yüzey pürüzlülüğünün 6, 12, 25, 50  $\mu\text{s}$  vurum sürelerinde akım ve voltaj değeri arttıkça arttığı fakat 100  $\mu\text{s}$  vurum süresinin diğer değerlerden farklı bir eğim ile arttığı görülmektedir. Bekleme süresi 50  $\mu\text{s}$  sabit ve sırası ile 6  $\mu\text{s}$  en düşük daha sonra 12, 25, 50  $\mu\text{s}$  vurum sürelerinin oluşturduğu pürüzlülük gittikçe artmıştır. 100  $\mu\text{s}$  vurum süresinde 5 Amper akım ve 30 V voltajdan itibaren pürüzlülük gittikçe artmış ve bu elektro erozyon şartlarında en yüksek değerine ulaşmıştır. Hesaplama için kullanılan çalışma parametreleri Çizelge 7.2.3.3. de gösterilmiştir.



Şekil 4.2.3.3. Hesaplanan yüzey pürüzlülük değerlerinin akım ve voltaj ilişkisi

(Bekleme süresi 50  $\mu\text{s}$  (sabit) ve vurum süresi  $\square=6\mu\text{s}$ ,  $\circ=12\mu\text{s}$ ,  $\bullet=25\mu\text{s}$ ,  $\Delta=50\mu\text{s}$ ,  $\times=100\mu\text{s}$ )

Çizelge 4.2.3.3. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve bulunan Ra değerleri

Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Ra	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Ra
5	6	50	30	0,984	20	25	50	60	3,108
7,5	6	50	35	1,343	22,5	25	50	65	3,330
10	6	50	40	1,659	25	25	50	70	3,543
12,5	6	50	45	1,937	27,5	25	50	75	3,751
15	6	50	50	2,186	30	25	50	80	3,956
17,5	6	50	55	2,41	32,5	25	50	85	4,162
20	6	50	60	2,619	35	25	50	90	4,369
22,5	6	50	65	2,816	37,5	25	50	95	4,581
25	6	50	70	3,00	40	25	50	100	4,797
27,5	6	50	75	3,192	42,5	25	50	105	5,017
30	6	50	80	3,378	45	25	50	110	5,241
32,5	6	50	85	3,567	5	50	50	30	1,355
35	6	50	90	3,759	7,5	50	50	35	1,798
37,5	6	50	95	3,956	10	50	50	40	2,188
40	6	50	100	4,159	12,5	50	50	45	2,532
42,5	6	50	105	4,366	15	50	50	50	2,834
45	6	50	110	4,579	17,5	50	50	55	3,104
5	12	50	30	1,097	20	50	50	60	3,346
7,5	12	50	35	1,475	22,5	50	50	65	3,568
10	12	50	40	1,807	25	50	50	70	3,775
12,5	12	50	45	2,101	27,5	50	50	75	3,973
15	12	50	50	2,365	30	50	50	80	4,165
17,5	12	50	55	2,604	32,5	50	50	85	4,356
20	12	50	60	2,826	35	50	50	90	4,549
22,5	12	50	65	3,035	37,5	50	50	95	4,745
25	12	50	70	3,235	40	50	50	100	4,946
27,5	12	50	75	3,432	42,5	50	50	105	5,155
30	12	50	80	3,628	45	50	50	110	5,364
32,5	12	50	85	3,826	5	100	50	30	1,693
35	12	50	90	4,027	7,5	100	50	35	2,361
37,5	12	50	95	4,232	10	100	50	40	2,958
40	12	50	100	4,441	12,5	100	50	45	3,481
42,5	12	50	105	4,656	15	100	50	50	3,931
45	12	50	110	4,875	17,5	100	50	55	4,311
5	25	50	30	1,250	20	100	50	60	4,627
7,5	25	50	35	1,655	22,5	100	50	65	4,884
10	25	50	40	2,012	25	100	50	70	5,089
12,5	25	50	45	2,329	27,5	100	50	75	5,249
15	25	50	50	2,614	30	100	50	80	5,373
17,5	25	50	55	2,871	32,5	100	50	85	5,468

Çizelge 4.2.3.3. Deney parametrelerinden farklı alınan veriler ve bulunan Ra değerleri (devam)

35	100	50	90	5,542	42,5	100	50	105	5,701
37,5	100	50	95	5,600	45	100	50	110	5,754
40	100	50	100	5,6520					

#### 4.2.4. EEİ İşlemi İle İş Parçası Sertlik ve Mikro Yapı Değişimi

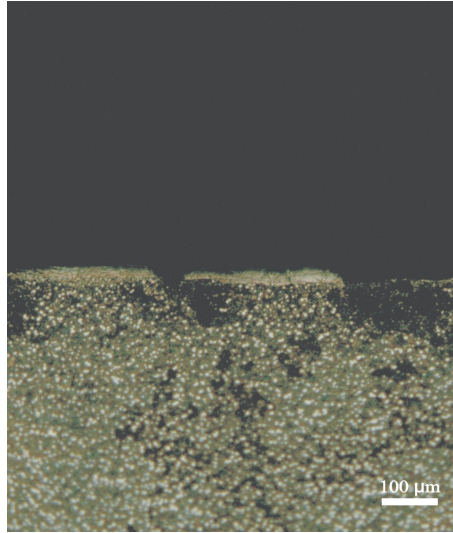
Bakır, bakır-tungsten ve grafit elektrotların çizelge 4.2.4.1 de belirtilen parametreler ile yapılan elektro erozyon işlemi sonrasında yapılan sertlik değişimleri gösterilmiştir. EEİ işlemi yapılarak oluşan beyaz katmandan, ısıdan etkilenmiş katmana doğru 1µm ve 2,5µm aralıklarında alınan sertlik değerlerinin, yüzeyden esas metale doğru azalmakta olduğu tespit edilmiştir. Esas metal sertliği 57-58 HRC değerindedir. Düşük değerlerde akım şiddeti uygulandığında sertliğin yüksek akım değerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.2.4.1. EEİ sonrası sertlik değişimi tablosu

Boşalım akımı	Vurum süresi (µs)	Bekleme süresi (µs)	Aralık Voltajı (V)	EEİ Sonrası sertlik HV (1µm)	EEİ Sonrası sertlik HV (2,5µm)
<b>Bakır Elektrot</b>					
7	6	12	40	700	680
12	6	50	100	720	700
12	25	100	100	739	720
12	25	25	80	754	740
12	100	50	80	771	755
22	25	100	100	780	750
42	50	100	80	822	798
42	100	100	80	840	825
42	100	100	100	858	843
<b>Bakır-Tungsten Elektrot</b>					
7	6	12	40	708	693
22	6	50	100	756	745
42	100	50	40	786	783
<b>Grafit Elektrot</b>					
7	6	12	40	740	726
22	6	50	10	760	728
42	100	50	40	823	814

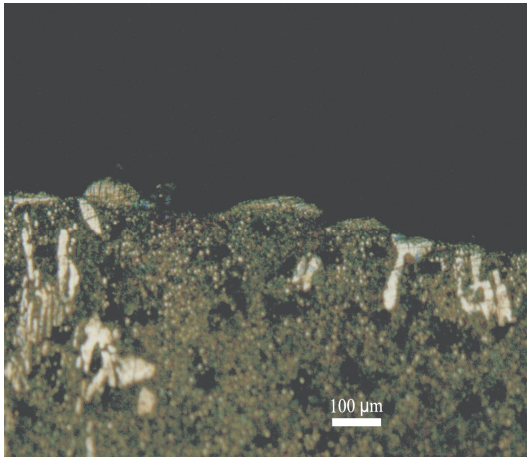
Bakır elektrotlar ile yağılan deneyler sonucu yüzeyde meydana gelen katmanlar ve tane yapılarının gözlemlenmesi amacı ile 100 ml HCl, 10 ml metil Alkol ve 1 gr

pikrik asit karışımı hazırlanarak parlatılmış iş parçası yüzeyi dağlanmış ve 100x mikroskopta mikroyapı fotoğraf çekimleri yapılmıştır. Şekil 4.2.4.1. de bakır elektrot kullanılarak 7 amper akım, 50 $\mu$ s vurum süresi, 12  $\mu$ s bekleme süresi ve 80 V Voltaj ile yapılmış elektro erozyon işlemi sonrası yüzey yapısının katmanlardan oluştuğu görülmektedir. Süreklilik arz etmeyen bir beyaz katman yapısı mevcuttur.

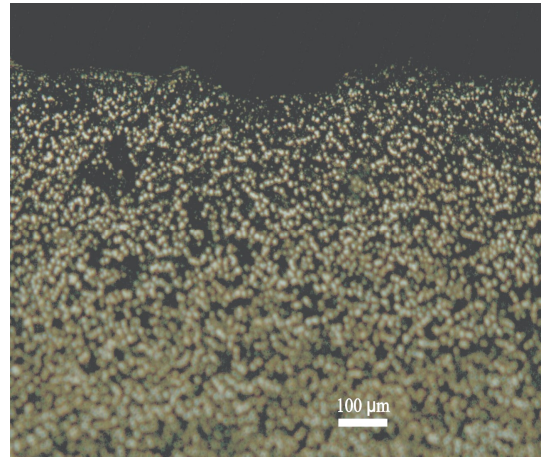


Şekil 4.2.4.1. 7 A 50 $\mu$ s 12 $\mu$ s 80 V

Şekil 4.2.4.2. ve Şekil 4.2.4.3. de bakır elektrotlar kullanılarak aynı akım ve vurum sürelerinde (12 amper ve 25 $\mu$ s) farklı bekleme ve voltaj değerlerinde katmanın farklı kalınlıklarda oluştuğu gözlemlenmektedir. Bakır elektrot ile 12A 25 $\mu$ s 25 $\mu$ s 80V parametreleri uygulanarak Şekil 4.2.4.3. deki yüzey yapısı elde edilmiş ve beyaz katman gözlemlenmemiştir.

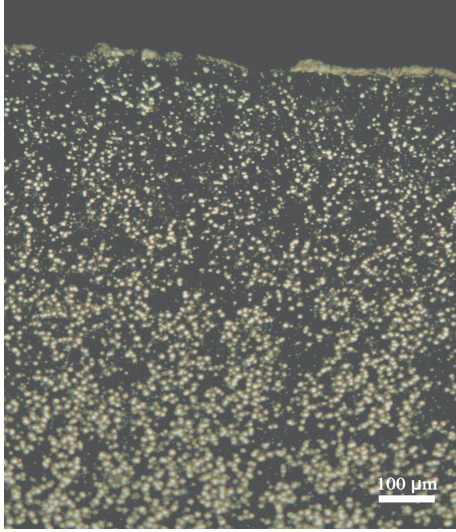


Şekil 4.2.4.2. 12A 25 $\mu$ s 100 $\mu$ s 100V

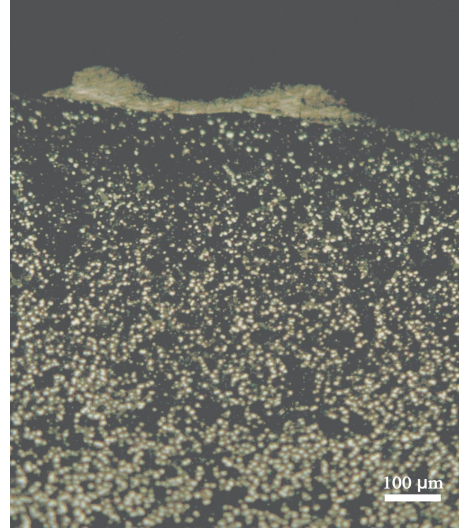


Şekil 4.2.4.3. 12A 25 $\mu$ s 25 $\mu$ s 80V

Bakır elektrot kullanılan Şekil 4.2.4.4. ve Şekil 4.2.4.5. karşılaştırıldığında vurum süresinin artması ile yüzeyde oluşan beyaz tabakanın kalınlığının arttığı tespit edilmiştir.

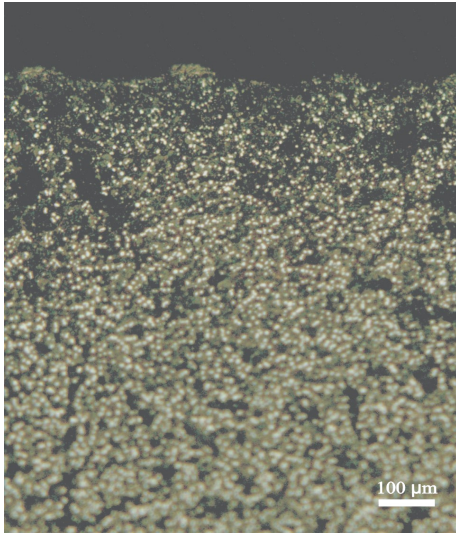


Şekil 4.2.4.4. 12A 6µs 50µs 100V

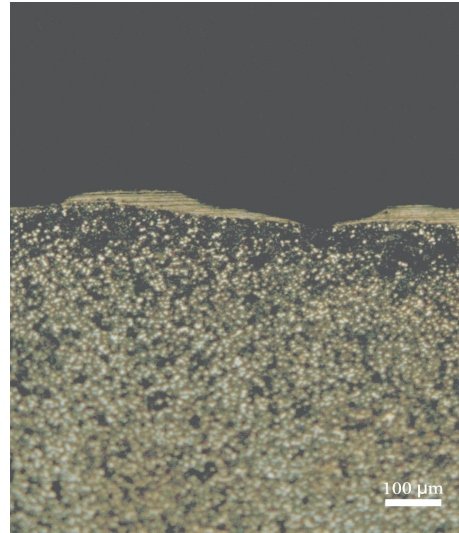


Şekil 4.2.4.5. 12A 100µs 50µs 80V

Şekil 4.2.4.6. ve Şekil 4.2.4.7. de yukarıdaki şekillerde olduğu gibi vurum süresi arttıkça çatlakların ve kusurların yer aldığı beyaz katman yapısının kalınlaştığı gözlemlenmektedir. Bakır elektrotlar kullanılmıştır.

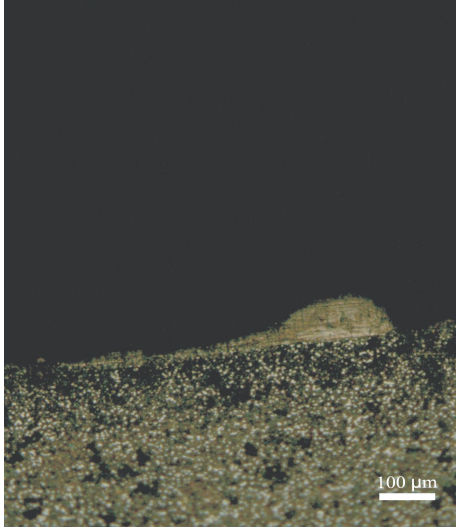


Şekil 4.2.4.6. 22A 6µs 25µs 60V

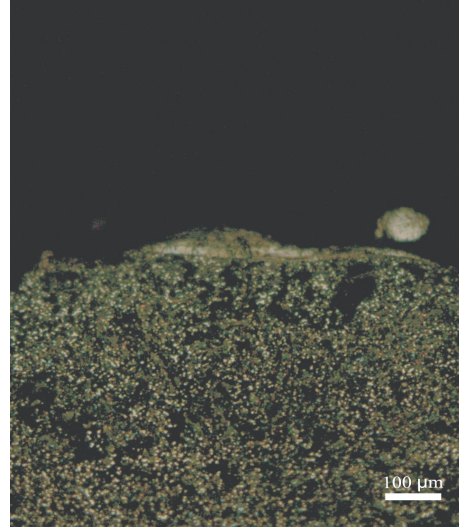


Şekil 4.2.4.7. 22A 25µs 100µs 100V

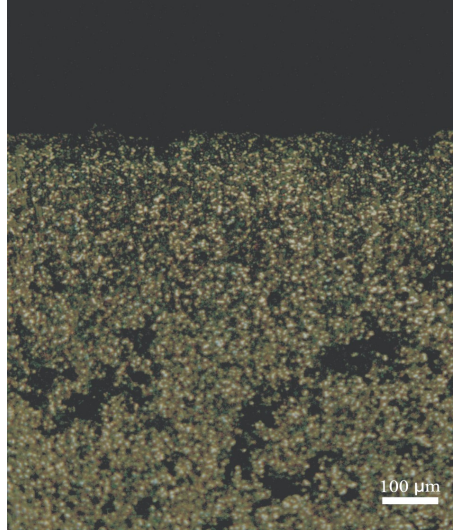
50  $\mu$ s ve 100  $\mu$ s vurum sürelerinin bakır elektrot üzerine uygulandığı Şekil 4.2.4.8. ile Şekil 4.2.4.9. karşılaştırıldığında beyaz katmanda süreklilik, Şekil 4.2.4.10. da ise aynı akım değeri ve en yüksek vurum süresi 100 $\mu$ s uygulandığında beyaz katman oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.2.4.8. 42A 50 $\mu$ s 100 $\mu$ s 80V

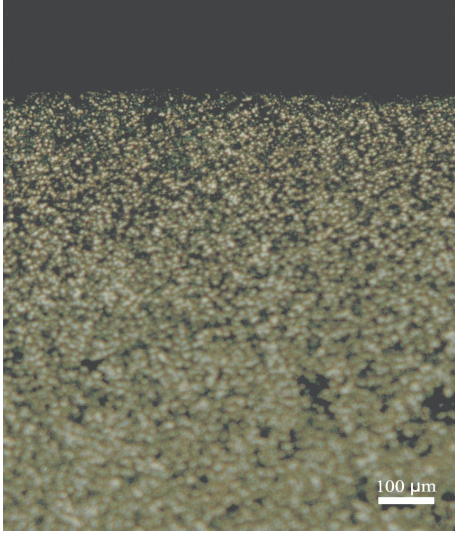


Şekil 4.2.4.9. 42A 100 $\mu$ s 100 $\mu$ s 80V

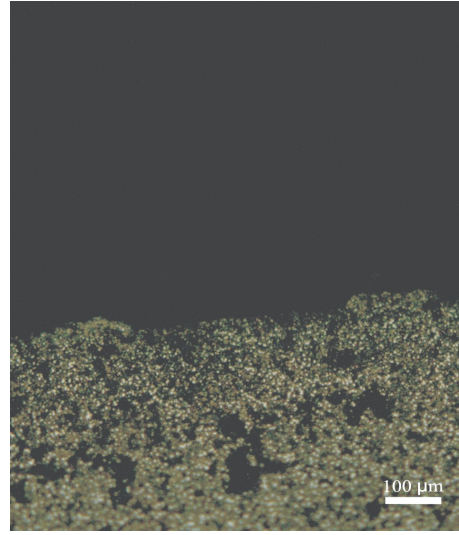


Şekil 4.2.4.10. 42A 100 $\mu$ s 100 $\mu$ s 100V

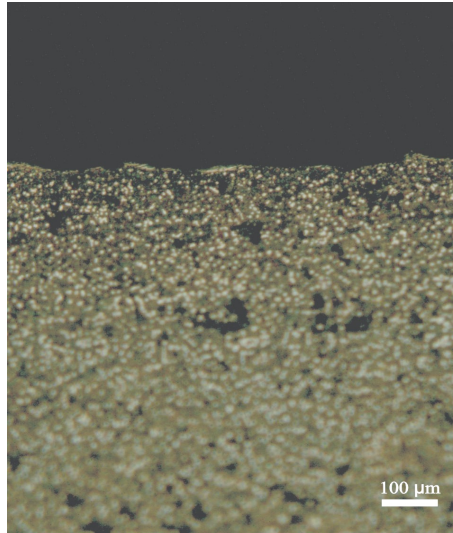
7 amper akım, 6 $\mu$ s vurum süresi, 12 $\mu$ s bekleme süresi ve 40 V voltaj uygulanarak Şekil 4.2.4.11.de grafit elektrot, Şekil 4.2.4.12. bakır-tungsten elektrot ve Şekil 4.2.4.13. bakır elektrot ile işlenen yüzey yapıları incelenmiştir. Yalnızca, bakır elektrot ile işlenen yüzeyde beyaz katman tabakası gözlemlenmektedir.



Şekil 4.2.4.11. 7A 6 $\mu$ s 12 $\mu$ s 40V



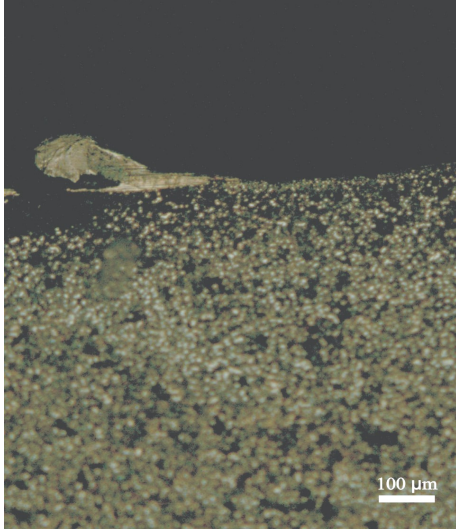
Şekil 4.2.4.12. 7A 6 $\mu$ s 12 $\mu$ s 40V



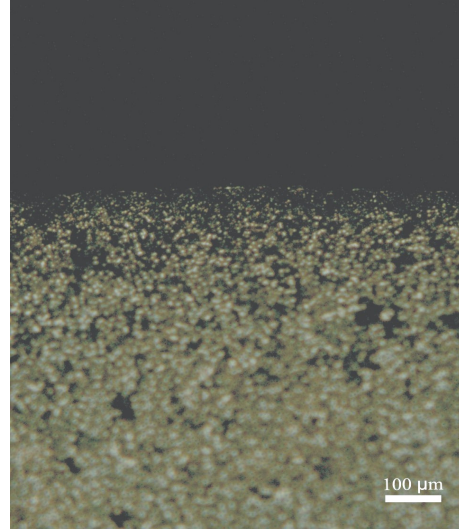
Şekil 4.2.4.13. 7A 6 $\mu$ s 12 $\mu$ s 40V



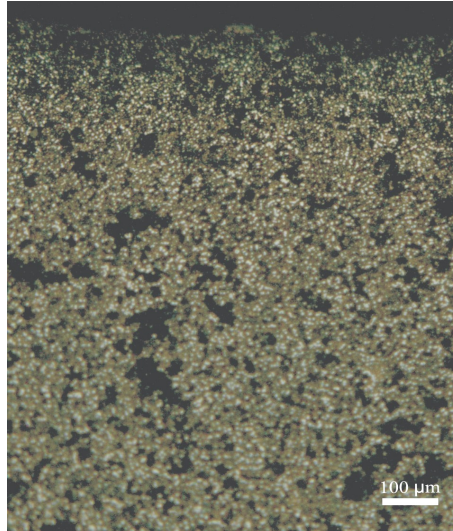
Şekil 4.2.4.14. de Bakır, Şekil 4.2.4.15. de Grafit ve Şekil 4.2.4.16. da Bakır-Tungsten elektrolar ile yapılan elektro erozyon işlemlerinde meydana gelen yüzey yapıları içinde bakır elektrot ile işlenen yüzeyde beyaz katman yapısının oluştuğu tespit edilmiştir. Beyaz katman oluşmaması, mikro yapıda yüzey çatlaklarının ve gözeneklerini içeren katmanın oluşmadığı bir yüzeyin meydana gelmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.2.4.14. 22A 6µs 50µs 100V



Şekil 4.2.4.15. 22A 6µs 50µs 100V



Şekil 4.2.4.16. 22A 6µs 50µs 100V

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Özellikle hassasiyeti yüksek karmaşık parçaların işlenmesinde tercihen kullanılan EEİ, gittikçe sanayide kullanımı yaygınlaşan alaşımli toz metal parçaların aşındırma yöntemiyle işlenmesi deneyleri ve yapay zeka teknikleriyle modellenmesi yapılmıştır. Özellikle yapay zeka teknikleriyle oluşturulacak modellerde diğer yöntemler göre oldukça fazla deney yapılması gerektiğinden yeteri sayıda (320) deney yapılmıştır. Bu deney sayısı deneysel çalışmalarda en yaygın kullanılan Taguchi metodu deney sayısı ile kıyaslandığında oldukça fazladır. Çalışmanın bir kısmını bakır elektrotlar bir kısmını ise bakır-tungsten ve grafit elektrotları ile yapılmış deneyler oluşturmuştur.

Bu çalışmayla, toz metalden imal edilen kalıp malzemelerinin elektro erozyon ile işlenmesinde, başka malzemelerle yapılan karşılaştırmalar sonucu pürüzlülük değerlerinin daha iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmanın en önemli sonuçlarından biri yüzey pürüzlülüğünün Evrimsel Programlama yöntemi kullanılarak oluşturulan modelden elde edilen matematiksel ilişkisidir. Elde edilen matematiksel ilişki ile benzer malzemelerin, benzer elektrotlarla farklı parametrelerdeki işleme sonucu oluşacak pürüzlülük değerleri yüksek doğruluk oranında tahmini yapılabilmektedir.

### **İleriki çalışmalar için öneriler;**

- Yapay zeka tekniklerinden, yapay sinir ağları, veri madenciliği, bulanık mantık gibi hibrit sistemlerin de kullanılması ile performans ve tahminlerin doğruluğu geliştirilebilir.
- Bu modelleme yaklaşımı, değişik toz malzemeler içinde deneyler yapılarak dahada genelleştirilebilir.
- Toz metal parçanın pürüzlülüğünün araştırılmasında Dielektrik sıvı türü ve dielektrik püskürtme basıncı dikkate alınarak deneyler yapılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Amorim, F.L., Weingaertner, W.L., 2004. Die-Sinking Electrical Discharge Machining of a High-Strength Copper-Based Alloy for Injection Molds, *Journal of the Brazilian Social of Mechanical Science & Engineering*, XXVI, 137-144 .
- Amorim, F.L., Weingaertner, W.L., 2004. The Influence of Generator Actuation Mode and Process Parameters on the Performance of Finish EDM of a Tool Steel, *Journal of Materials Processing Technology* (In Press)
- Ank, S., Dikicioğlu A., Vural M., 1994. İmal Usulleri. Birsen Yayınevi, İstanbul, 328s.,
- Carter, G.A., Jergas, I., 1983. Choice of EDM Tooling. *Electrical Discharge Machining Tooling, Methods and Applications*. (Jameson E.C., 57-61, Society of Manufacturing Engineers, Michigan.)
- Chen Y., Mahdivian S.M., 2000. Analysis of Electro- Discharge Machining Process and its Comparison with Experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, 104, 150-157.
- Chen, Y., Mahdavian, S.M., 1999. Parametric Study into Erosion Wear in a Computer Numerical Controlled Electro-Discharge Machining Process, *Wear* 236, 350-354.
- Chow H.M., Yan B.H., Huang F.Y., Hung J.C. 2000. Study of Added Powder in Kerosene for the Micro-Slit Machining of Titanium Alloy Using Electro-Discharge Machining, *Journal of Material Processing Technology*, 101, 95-103.
- Çoğun C., Kocabaş B., Özgedik A., 2004. Elektro Erozyon İle İşlemede (EEİ) İş Parçası Yüzey Pürüzlülük Profilinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fakültesi Dergisi* 19, 97-106.
- Dayık M., 2005. Dokumada Çözgü Gerginliği Değişiminin Optimizasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 220s., Isparta
- Engin, O., Fığlalı, A., 2002. Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma Yardımı ile Çözümünde Uygun Çaprazlama Operatörünün Belirlenmesi, *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 6, 27-35.
- Erden A., Temel D., 1978. Investigation on the Use of Water as a Dielectric Liquid İn EDM, *Journal of Pure and Applied Sciences*, METU, 437-440.
- Fenggou, C., Dayong, Y., 2004. The Study of High Efficiency and Intelligent Optimization System in EDM Sinking Process, *Journal of Materials Processing Technology* 149(1-3), 83-87.

Ferreira, C., 2002. Mutation, Transposition, and Recombination: An Analysis of the Evolutionary Dynamics, 4th International Workshop On Frontiers In Evolutionary Algorithms, Pages 614-617, Research Triangle Park, North Carolina, USA.

Ferreira C., 2001., Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems, *Complex Syst* 13 (2), 87– 129.

Field, M., F.Kahles, J., Koster, W.P., 1997., *ASM Handbook Machining* 16, 19-36.

Fuling, Z., Zhozhu, L., Baorang, Z., 2004. Study on the Technological Characteristics of Powder-Mixed Electrical Discharge Machining, 3.International Conference and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds, Bursa Turkey, 240-244.

Furkan Mühendislik, 2002. Elektro-Erozyon Tezgahları (I), *Kalıp Dünyası Dergisi*, 15, 45-48.

Gangadhar, A., Shunmugam, M.S., Philip, P.K., 1991. Surface Modification in Electrodischarge Processing with a Powder Compact Tool Electrode, *Wear* 143(1), 45-55.

Ghanem, F., Braham, C., Sidhom, H., 2003. Influence of Steel Type on Electrical Discharge Machined Surface Integrity, *Journal of Materials Processing Technology* 142(1), 163-173.

Guu Y.H., 2005. AFM Surface Imaging of AISI D2 Tool Steel Machined by the EDM Process, *Applied Surface Science* 242, 245–250.

Guu, Y.H., Hocheng, H., Chou C.Y., Deng, C.S., 2003. Effect of Electrical Discharge Machining on Surface Characteristics and Machining Damage of AISI D2 Tool Steel, *Materials Science and Engineering A358*, 37-43.

Hayakawa S., Takahashi M., Itoigawa F., Nakamura T., 2004, Study on EDM Phenomena with in-Process Measurement of Gap Distance, *Journal of Materials Processing Technology* 149, 250–255.

Higuerey, E., 1998. Neural Network Modelling of Process Parameters for Electrical Discharge Machining, *Lehigh Üniversitesi Makine Mühendisliği Doktora Tezi*, Bethlehem, Pennsylvania

Ho K.H., Newman S.T., 2003. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM), *International Journal of Machine Tools&Manufacture* 43, 1287-1300.

Jilani T. S., Pandey P.C., 1984. Experimental Investigation into the Performance of Water as Dielectric in EDM, *International Journal of Machining and Tool Design Research*, 24, 31- 43.

Kaneko, T., Onodera, T., 2004. Improvement in Machining Performance of Die-Sinking EDM By Using Self-Adjusting Fuzzy Control, *Journal of Materials Processing Technology* 149(1-3), 204-211.

Kao, J.Y., Tarng, Y.S., 1997. A Neural-Network Approach for the on-Line Monitoring of the Electrical Discharge Machining Process, *Journal of Materials Processing Technology* 69(1-3), 112-119.

Lauwers, B., 2000. Günümüzde ve Gelecekte EDM İşleme Yöntemi, *Proceeding of the International Seminar on Tool Steels for Mould and Dies, İstanbul-Turkey*, 86-104.

Lee, H.T., Tai, T.Y., 2003. Relationship Between EDM Parameters and Surface Crack Formation, *Journal of Materials Processing Technology* 142(3), 676-683.

Lee, L.C., Lim, L.C., Narayanan, V., Venkatesh, V.C., 1988. Quantification of Surface Damage of Tool Steels After EDM, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 28(4), 359-372.

Lee, T., Hsu F.C., Tai, T.Y., 2004. Study of Surface Integrity Using the Small Area EDM Process with a Copper-Tungsten Electrode, *Materials Science and Engineering A364*, 346-356.

Lee S.H., Li X.P., 2001. Study of the Effect of Machining Parameters on the Machining Characteristics in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide, *Journal of Material Processing Technology*, 115, 344-358.

Li Li, Y.S., Wong, J.Y.H., Fuh, Li Lu 2001. Effect of TiC in Copper-Tungsten Electrodes on EDM Performance, *Journal of Materials Processing Technology* 113(1-3), 563-567.

Lin C.L., Lin J.L., Ko T.C., 2002. Optimisation of the EDM Process Based on the Orthogonal Array with Fuzzy Logic and Grey Relational Analysis Method, *International Journal Advanced Manufacturing Technology* 19, 271-277.

Lin, J.L., Wang, K.S., Yan, B.H., Tarng, Y.S., 2000. Optimization of the Electrical Discharge Machining Process Based on the Taguchi Method With Fuzzy Logics, *Journal of Materials Processing Technology* 102(1-3), 48-55.

Luis C.J., Puertas I., Villa G., 2005. Material Removal Rate and Electrode Wear Study On the EDM of Silicon Carbide, *Journal of Materials Processing Technology* (In Press)

Marafona, J., Wykes, C., 2000. A New Method of Optimising Material Removal Rate Using EDM with Copper-Tungsten Electrodes, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 153-164.

Ming Q.Y., He L.Y., 1995. Powder-Suspension Dielectric Fluid for EDM, *Journal of Material Processing Technology*, 52, 44-54.

Özgedik A., Çoğun C., 2003. Elektro Erozyon ile İşlemede Elektrot Ön Yüzey Aşınmasının Deneysel İncelenmesi, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 521.

Peças, P., Henriques, E., 2003. Influence of Silicon Powder-Mixed Dielectric on Conventional Electrical Discharge Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 1465-1471.

Piotrowski, R., 1983. EDM Centers and Conventional CNC EDM. *Electrical Discharge Machining Tooling, Methods and Applications*. (Jameson E.C., 57-61, Society of Manufacturing Engineers, Michigan.)

Puertas I., Luis C.J., Álvarez L., 2004. Analysis of the Influence of EDM Parameters on Surface Quality, MRR and EW of WC-Co, *Journal of Materials Processing Technology* 153–154, 1026–1032.

Puertas, I., Luis, C.J., 2004. A Study on the Machining Parameters Optimisation of Electrical Discharge Machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 521-526.

Rehbein, W., Schulze, H.P., Mecke, K., Wollenberg, G., Storr M., 2004. Influence of Selected Groups of Additives on Breakdown in EDM Sinking, *Journal of Materials Processing Technology* 149, 58-64.

Roy, R., Köppen, M., Ovaska, Furuhashi, S., T. and Hoffmann, F., 2002. Gene Expression Programming in Problem Solving, *Soft Computing and Industry – Recent Applications*, 635-654.

Samueli, M.P., Philipt, P.K., 1997. Power Metallurgy Tool Electrodes for Electrical Discharge Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 37, 1625-1633.

Santos, J.M., and Zapico, A., 2003. Combinatorial Optimization by Gene Expression Programming: Inversion Revisited *Proceedings of the Argentine Symposium on Artificial Intelligence*, Santa Fe, Argentina, 160-174.

Simao, J., Lee, H.G., Aspinwall, D.K., Dewes, R.C., Aspinwall, E.M., 2003. Workpiece Surface Modification Using Electrical Discharge Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 121-128.

Shankar S., Maheshwari S., Pandey P.C., 2004. Some Investigations into the Electric Discharge Machining of Hardened Tool Steel Using Different Electrode Materials, *Journal of Materials Processing Technology* 149, 272–277.

Shobert E.I., 1983. What Happens in EDM, Electrical Discharge Machining Tooling, Methods and Applications. (Jameson E.C., 3-4, Society of Manufacturing Engineers, Michigan)

Şahin, Y., 2001. Talaş Kaldırma Prensipleri Cilt 1-Cilt 2 I. Basım

Tamura, T., Kobayashi, Y., 2004. Measurement of Impulsive Forces and Crater Formation in Impulse Discharge, Journal of Materials Processing Technology 149(1-3), 212-216.

Tarng, Y.S., Tseng, C.M., Chung, L.K., 1997. A Fuzzy Pulse Discriminating System for Electrical Discharge Machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture 37(4), 511-522.

Tsai, K.M., Wang, P.J., 2001. Predictions on Surface Finish in Electrical Discharge Machining Based Upon Neural Network Models, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 1385-1403.

Tsai, K.M., Wang, P.J., 2001. Semi-Empirical Model of Surface Finish on Electrical Discharge Machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 1455-1477.

Tsai, H.C., Yan, B.H., Huang, F.Y., 2003. EDM Performance of Cr/Cu-Based Composite Electrodes, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 245-252.

Valentincic, J., Junkar, M., 2004. A Model for Detection of the Eroding Surface Based on Discharge Parameters, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 175-181.

Valentincic, J., Junkar, M., 2004. On-Line Selection of Rough Machining Parameters, Journal of Materials Processing Technology 149, 256-262.

Yahya A., Manning C.D., 2004. Determination of Material Removal Rate of An Electro-Discharge Machine Using Dimensional Analysis, Journal of Physics D: Applied Physics 37, 1467-1471.

Wang, K., Gelgele, H.L., Wang, Y., Yuan, Q., Fang, M., 2003. A Hybrid Intelligent Method for Modelling the EDM Process, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 995-999.

Wang, C.C., Yan, B.H., Chow, H.M., Suzuki, Y., 1999. Cutting Austempered Ductile Iron Using An EDM Sinkers, Journal of Materials Processing Technology, 88, 83-89.

Wong Y.S., Lim L.C., Rahuman I., Tee W.M., 1998. Near-Mirror-Finish Phenomenon in EDM Using Powder-Mixed Dielectric, Journal of Material Processing Technology, 79, 30-40.

**ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı : Özlem SALMAN

Doğum Yeri : Uluborlu/ISPARTA

Doğum Yılı : 10.11.1979

Medeni Hali : Bekar

**Eğitim ve Akademik Durumu:**

Lise 1993 – 1996 Fethiye Lisesi, Fethiye-Muğla

Lisans 1997– 2001 Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,  
Tesisat Öğretmenliği Bölümü

Yabancı Dil : İngilizce

**İş Deneyimi :**

Araştırma Görevlisi 2002- Süleyman Demirel Üniversitesi  
CAD/CAM Araştırma ve Uygulama Merkezi



EK 1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları

Deney	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Elektrot ağırlık kaybı	Ra
No	(A)	(μs)	(μs)	(V)	(gr)	(μm)
1	7	6	12	40	0,196	1,7
2	7	12	12	40	0,054	1,85
3	7	25	12	40	0,011	2,14
4	7	50	12	40	0,003	2,43
5	7	100	12	40	0,004	2,64
6	7	6	12	60	0,155	1,83
7	7	12	12	60	0,042	1,94
8	7	25	12	60	0,092	2,4
9	7	50	12	60	0,061	2,7
10	7	100	12	60	0	2,9
11	7	6	12	80	0,172	1,9
12	7	12	12	80	0,052	2,1
13	7	25	12	80	0,014	2,5
14	7	50	12	80	0,002	2,69
15	7	100	12	80	0	3
16	7	6	12	100	0,216	2
17	7	12	12	100	0,061	2,32
18	7	25	12	100	0,016	2,71
19	7	50	12	100	0,003	3
20	7	100	12	100	0	3,21
21	12	6	12	40	0,702	2,1
22	12	12	12	40	0,301	2,25
23	12	25	12	40	0,092	2,64
24	12	50	12	40	0,0149	3,02
25	12	100	12	40	0	3,47
26	12	6	12	60	0,468	2,16
27	12	12	12	60	0,272	2,5
28	12	25	12	60	0,065	2,8
29	12	50	12	60	0,0125	3,26
30	12	100	12	60	0	3,9
31	12	6	12	80	0,543	2,23
32	12	12	12	80	0,276	2,67
33	12	25	12	80	0,517	2,88
34	12	50	12	80	0,0153	3,3
35	12	100	12	80	0	3,96
36	12	6	12	100	0,742	2,36
37	12	12	12	100	0,3	2,85
38	12	25	12	100	0,076	3,2
39	12	50	12	100	0,075	3,55
40	12	100	12	100	0	4,3

EK 1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları (devam)

Deney	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Elektrot ağırlık kaybı	Ra
No	(A)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)	(V)	(gr)	( $\mu$ m)
41	22	6	12	40	1,274	2,76
42	22	12	12	40	0,675	3,31
43	22	25	12	40	0,358	4,19
44	22	50	12	40	0,155	4,65
45	22	100	12	40	0,015	4,8
46	22	6	12	60	0,902	3,06
47	22	12	12	60	0,421	3,61
48	22	25	12	60	0,208	4,22
49	22	50	12	60	0,08	4,8
50	22	100	12	60	0	5,29
51	22	6	12	80	0,738	3,23
52	22	12	12	80	0,391	3,61
53	22	25	12	80	0,18	4,34
54	22	50	12	80	0,063	4,76
55	22	100	12	80	0	5,53
56	22	6	12	100	1,176	3,4
57	22	12	12	100	0,565	3,9
58	22	25	12	100	0,309	4,67
59	22	50	12	100	0,1	5,12
60	22	100	12	100	0	5,9
61	42	6	12	40	2,276	4
62	42	12	12	40	0,887	4,2
63	42	25	12	40	0,545	5
64	42	50	12	40	0,379	5,6
65	42	100	12	40	0,245	5,83
66	42	6	12	60	0,482	4,31
67	42	12	12	60	0,928	4,5
68	42	25	12	60	0,509	5,14
69	42	50	12	60	0,333	5,73
70	42	100	12	60	0,10	6,13
71	42	6	12	80	1,17	4,6
72	42	12	12	80	0,693	4,83
73	42	25	12	80	0,339	5,22
74	42	50	12	80	0,184	5,62
75	42	100	12	80	0,029	6,21
76	42	6	12	100	1,775	4,65
77	42	12	12	100	0,777	4,93
78	42	25	12	100	0,345	5,41
79	42	50	12	100	0,22	6,02
80	42	100	12	100	0,046	6,5

EK 1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları (devam)

Deney	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Elektrot ağırlık kaybı	Ra
No	(A)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)	(V)	(gr)	( $\mu$ m)
81	7	6	25	40	0,211	1,5
82	7	12	25	40	0,064	1,68
83	7	25	25	40	0,018	1,93
84	7	50	25	40	0,007	2,28
85	7	100	25	40	0	2,68
86	7	6	25	60	0,449	1,7
87	7	12	25	60	0,085	1,85
88	7	25	25	60	0,024	2,1
89	7	50	25	60	0,013	2,35
90	7	100	25	60	0,002	2,86
91	7	6	25	80	0,25	1,65
92	7	12	25	80	0,077	1,86
93	7	25	25	80	0,018	2,1
94	7	50	25	80	0,012	2,41
95	7	100	25	80	0,025	2,92
96	7	6	25	100	0,306	1,7
97	7	12	25	100	0,093	1,96
98	7	25	25	100	0,026	2,14
99	7	50	25	100	0,005	2,66
100	7	100	25	100	0	3,05
101	12	6	25	40	0,708	2,01
102	12	12	25	40	0,411	2,16
103	12	25	25	40	0,117	2,4
104	12	50	25	40	0,028	3
105	12	100	25	40	0	3,35
106	12	6	25	60	0,644	2,09
107	12	12	25	60	0,313	2,35
108	12	25	25	60	0,088	2,66
109	12	50	25	60	0,019	3,1
110	12	100	25	60	0	3,77
111	12	6	25	80	0,656	2,12
112	12	12	25	80	0,333	2,46
113	12	25	25	80	0,077	2,66
114	12	50	25	80	0,042	3,21
115	12	100	25	80	0	3,82
116	12	6	25	100	0,88	2,26
117	12	12	25	100	0,387	2,63
118	12	25	25	100	0,084	2,77
119	12	50	25	100	0,024	3,42
120	12	100	25	100	0	3,94

EK 1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları (devam)

Deney No	Akım (A)	t <sub>on</sub> (μs)	t <sub>off</sub> (μs)	Voltaj (V)	Elektrot ağırlık kaybı (gr)	Ra (μm)
121	22	6	25	40	1,192	2,7
122	22	12	25	40	0,661	3,15
123	22	25	25	40	0,423	3,89
124	22	50	25	40	0,102	4,22
125	22	100	25	40	0,017	4,72
126	22	6	25	60	0,846	2,96
127	22	12	25	60	0,463	3,5
128	22	25	25	60	0,243	4
129	22	50	25	60	0,833	4,33
130	22	100	25	60	0	4,87
131	22	6	25	80	0,625	3,05
132	22	12	25	80	0,625	3,56
133	22	25	25	80	0,625	4,07
134	22	50	25	80	0,625	4,52
135	22	100	25	80	0	5,21
136	22	6	25	100	0,500	3,38
137	22	12	25	100	0,500	3,73
138	22	25	25	100	0,500	4,21
139	22	50	25	100	0,500	4,76
140	22	100	25	100	0,500	5,32
141	42	6	25	40	1,250	3,95
142	42	12	25	40	1,250	4,25
143	42	25	25	40	1,250	4,92
144	42	50	25	40	1,250	5,42
145	42	100	25	40	1,250	5,7
146	42	6	25	60	0,833	4,11
147	42	12	25	60	0,833	4,43
148	42	25	25	60	0,833	5,05
149	42	50	25	60	0,833	5,56
150	42	100	25	60	0,833	5,9
151	42	6	25	80	0,625	4,33
152	42	12	25	80	0,625	4,55
153	42	25	25	80	0,625	5,13
154	42	50	25	80	0,625	5,57
155	42	100	25	80	0,625	5,97
156	42	6	25	100	0,500	4,53
157	42	12	25	100	0,8585	4,81
158	42	25	25	100	0,4467	5,28
159	42	50	25	100	0,289	5,72
160	42	100	25	100	0,052	6,17

EK 1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları (devam)

Deney	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Elektrot ağırlık kaybı	Ra
No	(A)	(μs)	(μs)	(V)	(gr)	(μm)
161	7	6	50	40	0,262	1,4
162	7	12	50	40	0,08	1,53
163	7	25	50	40	0,016	1,87
164	7	50	50	40	0,005	2,16
165	7	100	50	40	0	2,59
166	7	6	50	60	0,002	1,45
167	7	12	50	60	0,079	1,66
168	7	25	50	60	0,019	1,92
169	7	50	50	60	0,012	2,24
170	7	100	50	60	0,01	2,61
171	7	6	50	80	0,327	1,52
172	7	12	50	80	0,088	1,81
173	7	25	50	80	0,108	2,13
174	7	50	50	80	0,012	2,41
175	7	100	50	80	0	2,86
176	7	6	50	100	0,392	1,64
177	7	12	50	100	0,115	1,86
178	7	25	50	100	0,026	2,15
179	7	50	50	100	0,016	2,47
180	7	100	50	100	0	2,97
181	12	6	50	40	0,818	1,8
182	12	12	50	40	0,437	1,96
183	12	25	50	40	0,937	2,26
184	12	50	50	40	0,026	2,6
185	12	100	50	40	0	3,24
186	12	6	50	60	0,67	1,98
187	12	12	50	60	0,363	2,18
188	12	25	50	60	0,81	2,41
189	12	50	50	60	0,017	2,8
190	12	100	50	60	0	3,45
191	12	6	50	80	0,868	2,03
192	12	12	50	80	0,389	2,24
193	12	25	50	80	0,096	2,52
194	12	50	50	80	0,025	2,97
195	12	100	50	80	0	3,6
196	12	6	50	100	0,981	2,1
197	12	12	50	100	0,51	2,33
198	12	25	50	100	0,113	2,59
199	12	50	50	100	0,024	3,18
200	12	100	50	100	0	3,7

EK 1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları (devam)

Deney	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Elektrot ağırlık kaybı	Ra
No	(A)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)	(V)	(gr)	( $\mu$ m)
201	22	6	50	40	1,239	2,63
202	22	12	50	40	0,726	3,02
203	22	25	50	40	0,378	3,41
204	22	50	50	40	0,159	3,76
205	22	100	50	40	0,016	4,3
206	22	6	50	60	1,721	2,87
207	22	12	50	60	0,601	3,26
208	22	25	50	60	0,314	3,53
209	22	50	50	60	0,1	3,86
210	22	100	50	60	0,027	4,36
211	22	6	50	80	1,38	2,9
212	22	12	50	80	0,692	3,41
213	22	25	50	80	0,279	3,78
214	22	50	50	80	0,072	4,13
215	22	100	50	80	0	4,85
216	22	6	50	100	1,54	3,24
217	22	12	50	100	0,696	3,58
218	22	25	50	100	0,306	3,87
219	22	50	50	100	0	4,3
220	22	100	50	100	0,035	4,87
221	42	6	50	40	2,133	3,8
222	42	12	50	40	0,84	4,06
223	42	25	50	40	0,58	4,41
224	42	50	50	40	0,359	4,78
225	42	100	50	40	0,159	5,3
226	42	6	50	60	1,723	3,93
227	42	12	50	60	0,751	4,28
228	42	25	50	60	0,49	4,46
229	42	50	50	60	0,275	4,91
230	42	100	50	60	0,26	5,64
231	42	6	50	80	0,681	4,21
232	42	12	50	80	0,834	4,48
233	42	25	50	80	0,392	4,7
234	42	50	50	80	0,252	4,97
235	42	100	50	80	0,068	5,72
236	42	6	50	100	1,986	4,3
237	42	12	50	100	0,893	4,54
238	42	25	50	100	0,533	4,87
239	42	50	50	100	0,276	5,3
240	42	100	50	100	0,084	5,88

EK 1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları (devam)

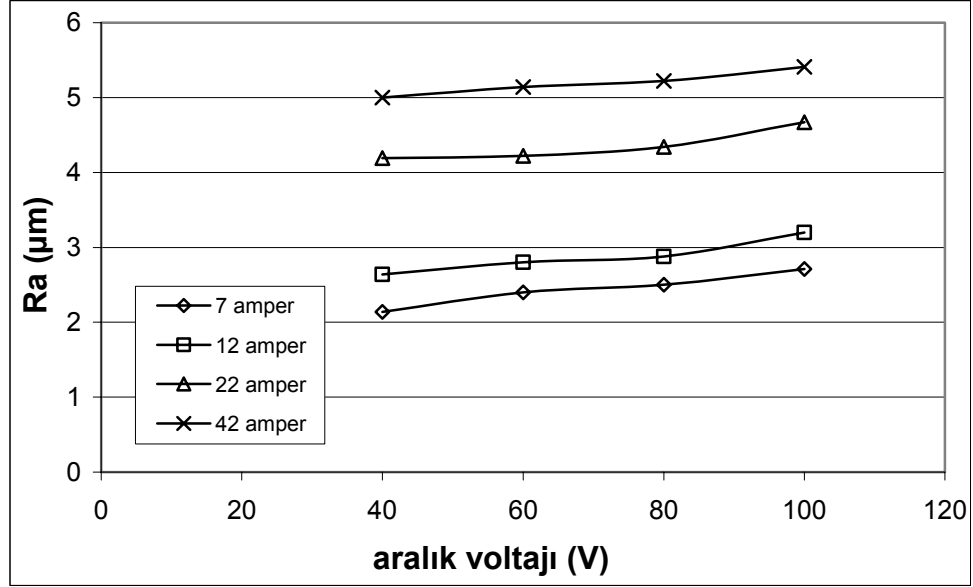
Deney	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Elektrot ağırlık kaybı	Ra
No	(A)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)	(V)	(gr)	( $\mu$ m)
241	7	6	100	40	0,315	1,3
242	7	12	100	40	0,092	1,52
243	7	25	100	40	0,016	1,79
244	7	50	100	40	0	2,18
245	7	100	100	40	0	2,35
246	7	6	100	60	0,324	1,4
247	7	12	100	60	0,112	1,67
248	7	25	100	60	0,02	1,94
249	7	50	100	60	0,01	2,2
250	7	100	100	60	0	2,42
251	7	6	100	80	0,461	1,44
252	7	12	100	80	0,124	1,74
253	7	25	100	80	0,038	2,14
254	7	50	100	80	0,024	2,32
255	7	100	100	80	0,005	2,64
256	7	6	100	100	0	1,53
257	7	12	100	100	0,44	1,91
258	7	25	100	100	0,13	2,19
259	7	50	100	100	0,005	2,41
260	7	100	100	100	0	2,67
261	12	6	100	40	0,983	1,87
262	12	12	100	40	0,55	1,98
263	12	25	100	40	0,113	2,32
264	12	50	100	40	0,021	2,69
265	12	100	100	40	0	3,16
266	12	6	100	60	0,12	1,87
267	12	12	100	60	0,415	2,1
268	12	25	100	60	0,11	2,48
269	12	50	100	60	0,019	2,7
270	12	100	100	60	0,34	3,32
271	12	6	100	80	1,091	1,97
272	12	12	100	80	0,492	2,16
273	12	25	100	80	0,131	2,57
274	12	50	100	80	0,26	2,84
275	12	100	100	80	0,015	3,38
276	12	6	100	100	1,057	1,94
277	12	12	100	100	0,525	2,32
278	12	25	100	100	0,148	2,68
279	12	50	100	100	0,042	3,1
280	12	100	100	100	0,08	3,46

EK 1. Bakır elektrotlar kullanılarak yapılan tüm deney parametreleri ve sonuçları (devam)

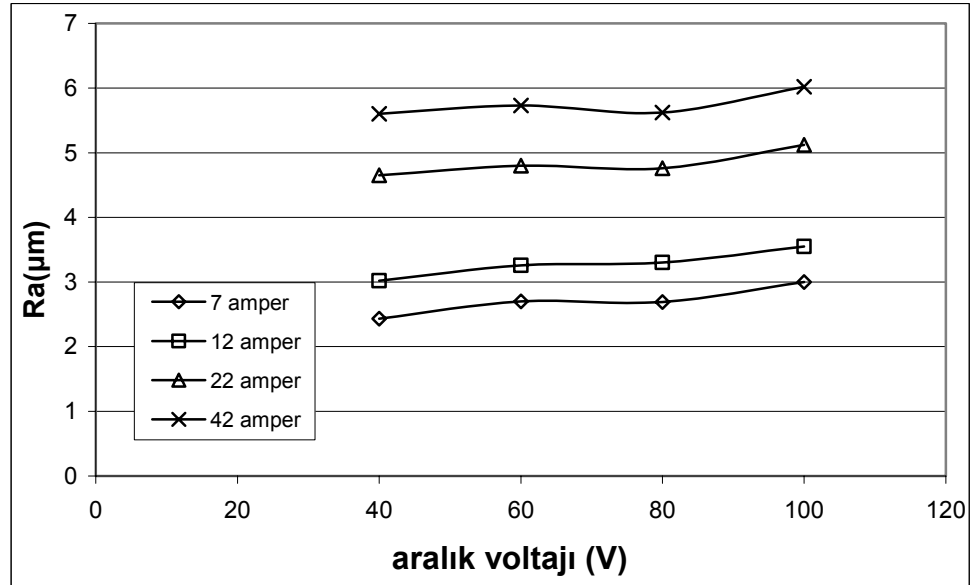
Deney	Akım	t <sub>on</sub>	t <sub>off</sub>	Voltaj	Elektrot Ağırlık kaybı	Ra
No	(A)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)	(V)	(gr)	( $\mu$ m)
281	22	6	100	40	1,584	2,54
282	22	12	100	40	0,858	2,86
283	22	25	100	40	0,34	3,13
284	22	50	100	40	0,133	3,6
285	22	100	100	40	0,011	4
286	22	6	100	60	1,386	2,77
287	22	12	100	60	0,743	3,1
288	22	25	100	60	0,29	3,34
289	22	50	100	60	0,116	3,63
290	22	100	100	60	0,011	4,12
291	22	6	100	80	1,46	2,81
292	22	12	100	80	0,695	3,2
293	22	25	100	80	0,025	3,5
294	22	50	100	80	0,11	3,8
295	22	100	100	80	0,004	4,23
296	22	6	100	100	1,329	3,03
297	22	12	100	100	0,75	3,39
298	22	25	100	100		3,6
299	22	50	100	100	0,133	3,9
300	22	100	100	100	0,001	4,43
301	42	6	100	40	1,86	3,61
302	42	12	100	40	1,039	3,76
303	42	25	100	40	0,579	3,96
304	42	50	100	40	0,446	4,3
305	42	100	100	40	0,161	4,45
306	42	6	100	60	0,952	3,71
307	42	12	100	60	0,911	4,03
308	42	25	100	60	0,517	4,23
309	42	50	100	60	0,536	4,45
310	42	100	100	60	0,135	4,92
311	42	6	100	80	0,351	4
312	42	12	100	80	1,96	4,24
313	42	25	100	80	1,079	4,46
314	42	50	100	80	0,488	4,65
315	42	100	100	80	0,094	5,01
316	42	6	100	100	2,11	4,22
317	42	12	100	100	0,263	4,45
318	42	25	100	100	0,59	4,65
319	42	50	100	100	0,349	4,92
320	42	100	100	100	0,098	5,16



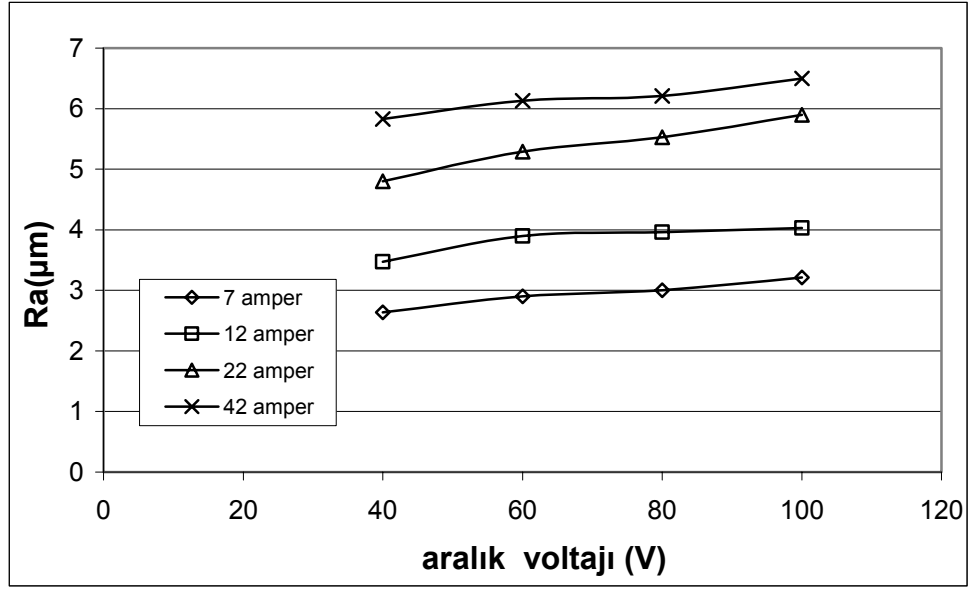
## EK 2. Bakır Elektrot Kullanılarak Yapılan Deneylerin Sonuçları



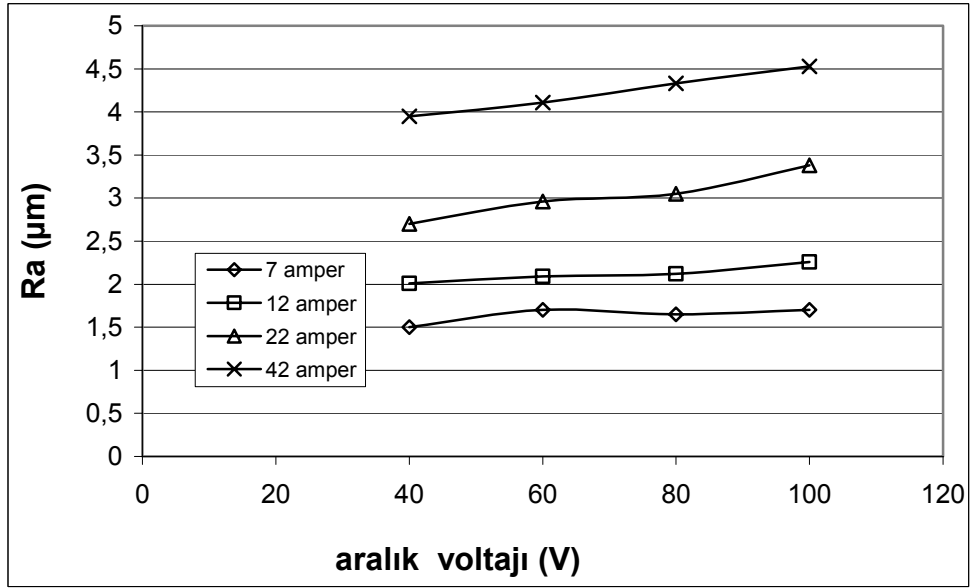
Şekil 1. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 25  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s



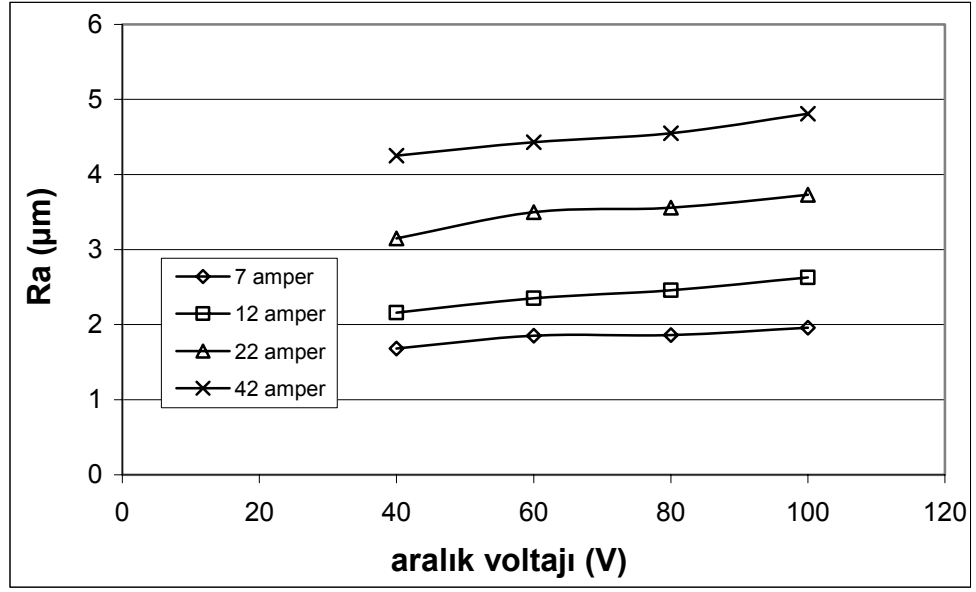
Şekil 2. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 50  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s



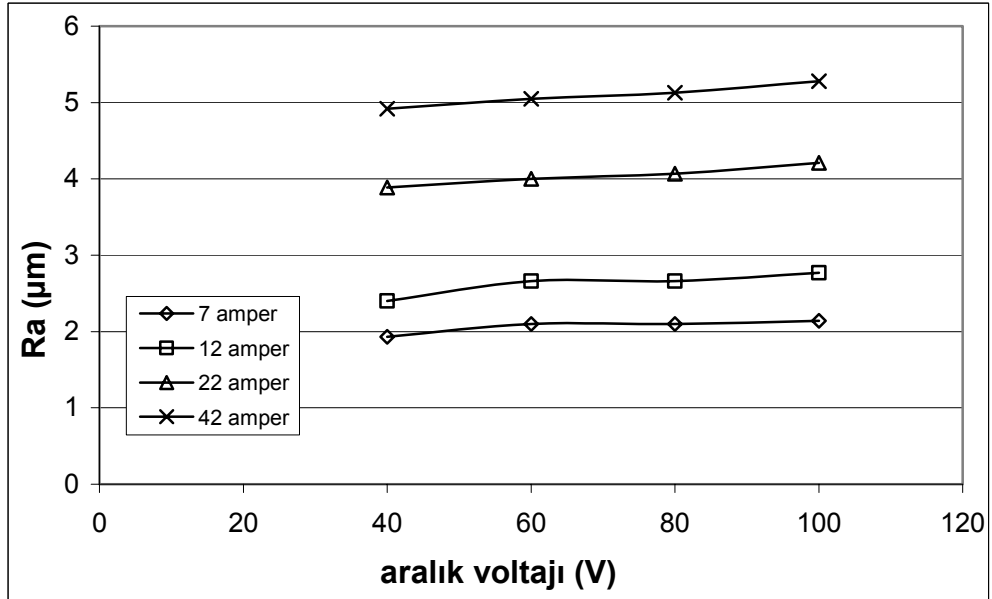
Şekil 3. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 100  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s



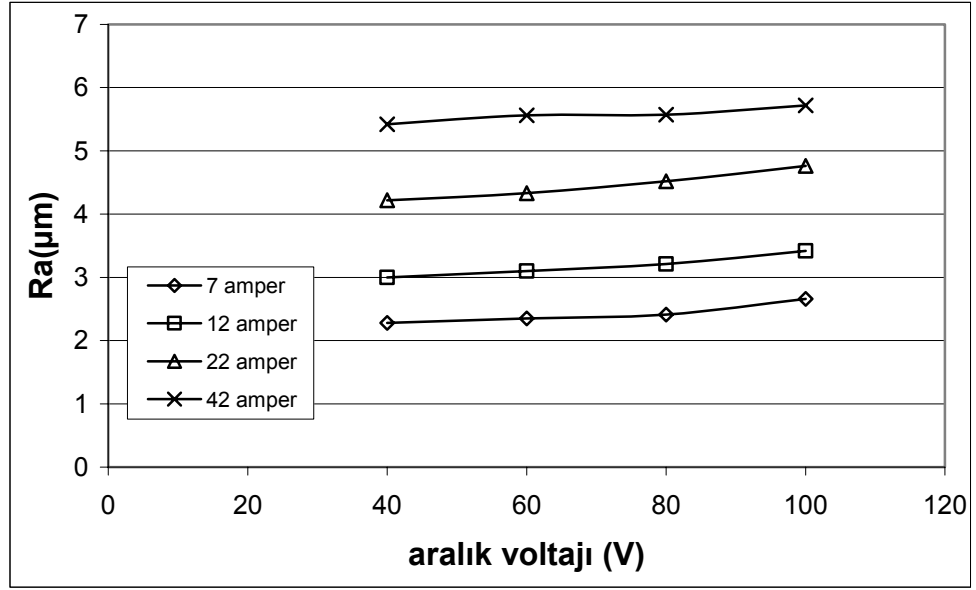
Şekil 4. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 6  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s



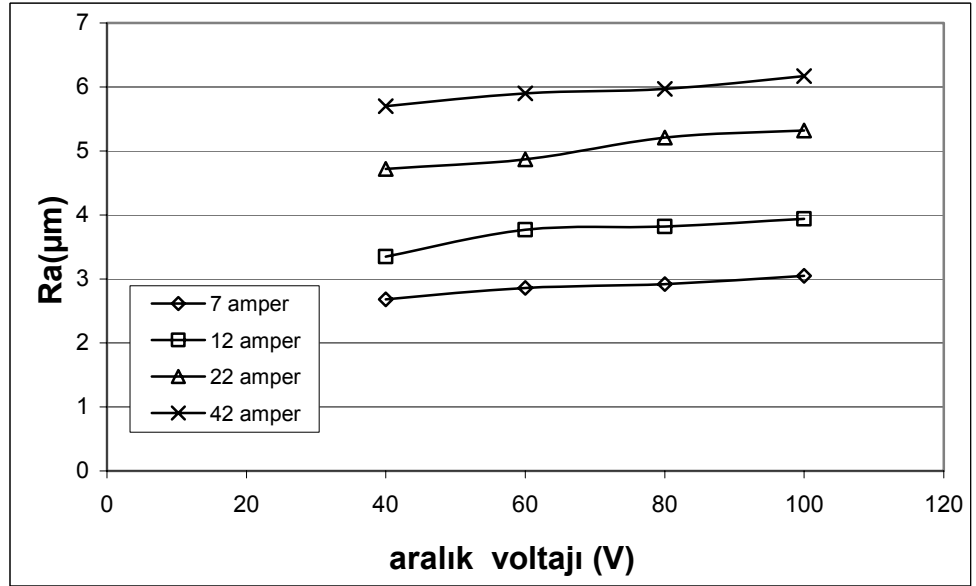
Şekil 5. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 12  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s



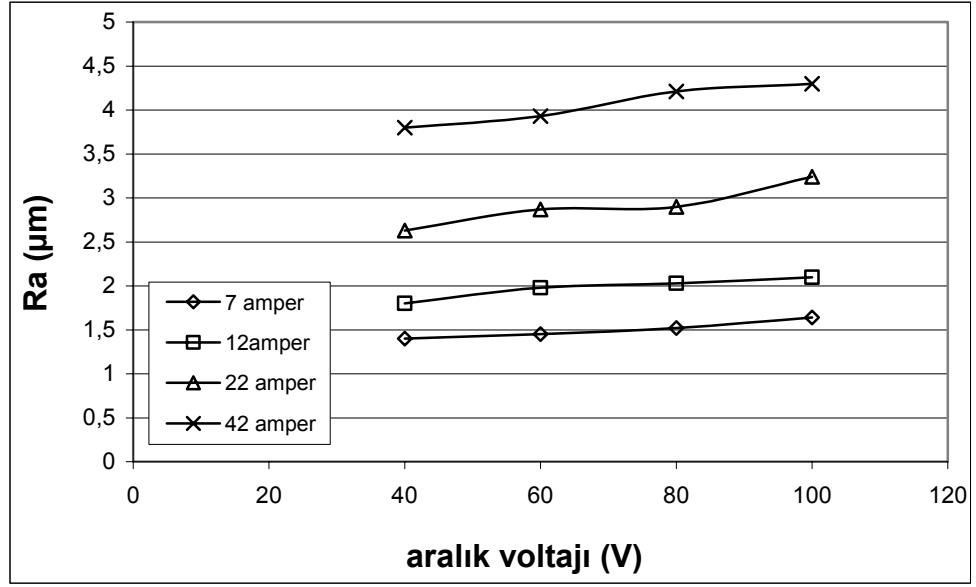
Şekil 6. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 25  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s



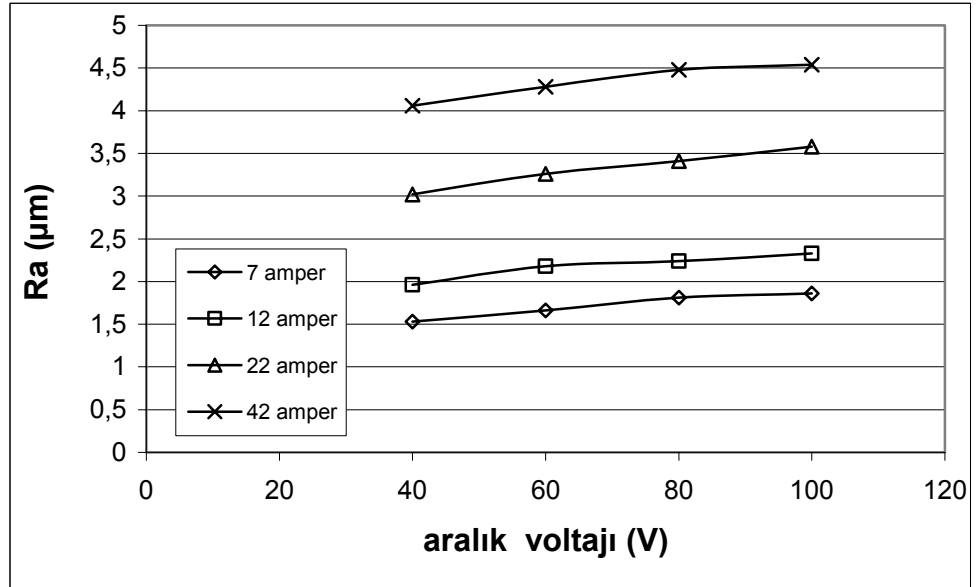
Şekil 7. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 50  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s



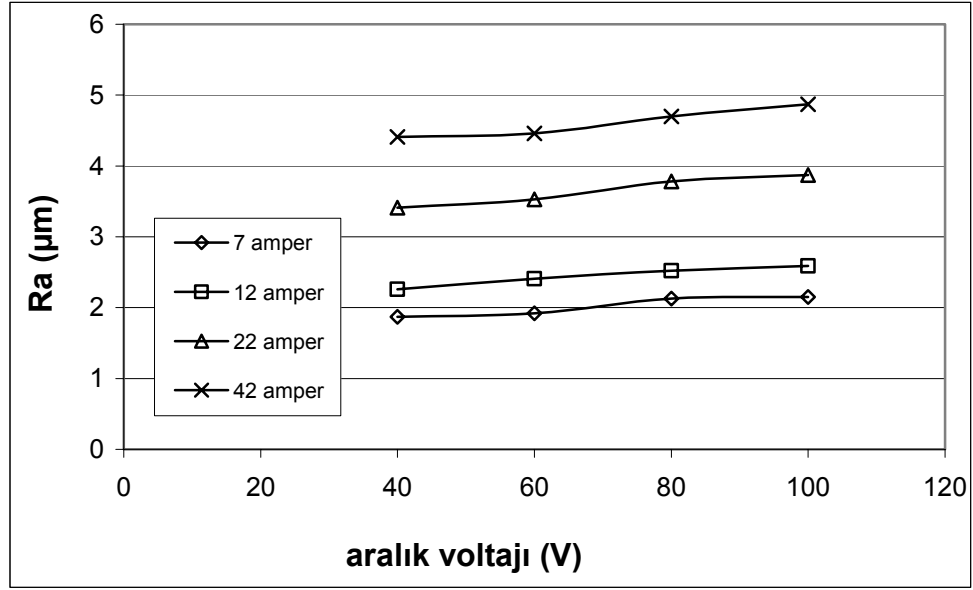
Şekil 8. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 100  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s



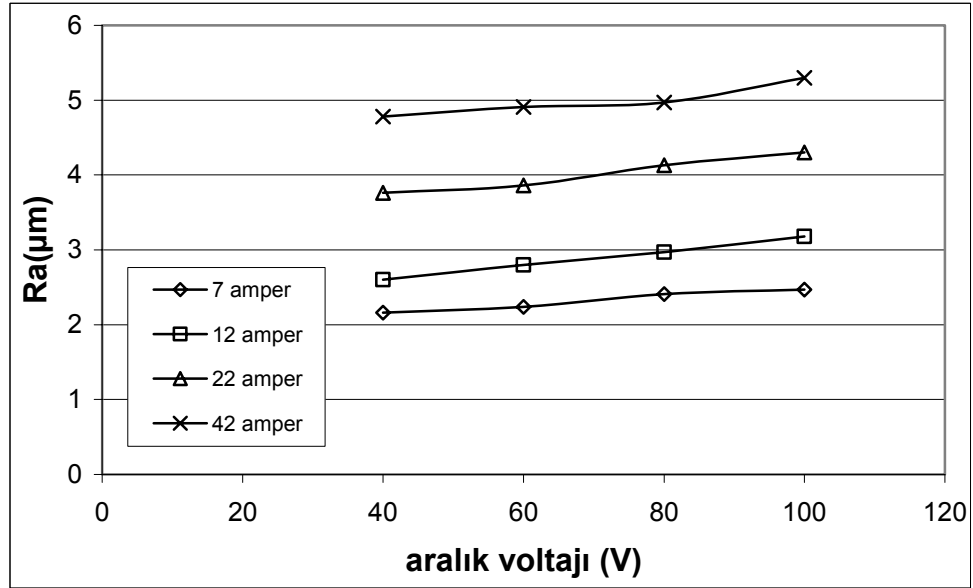
Şekil 9. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 6  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s



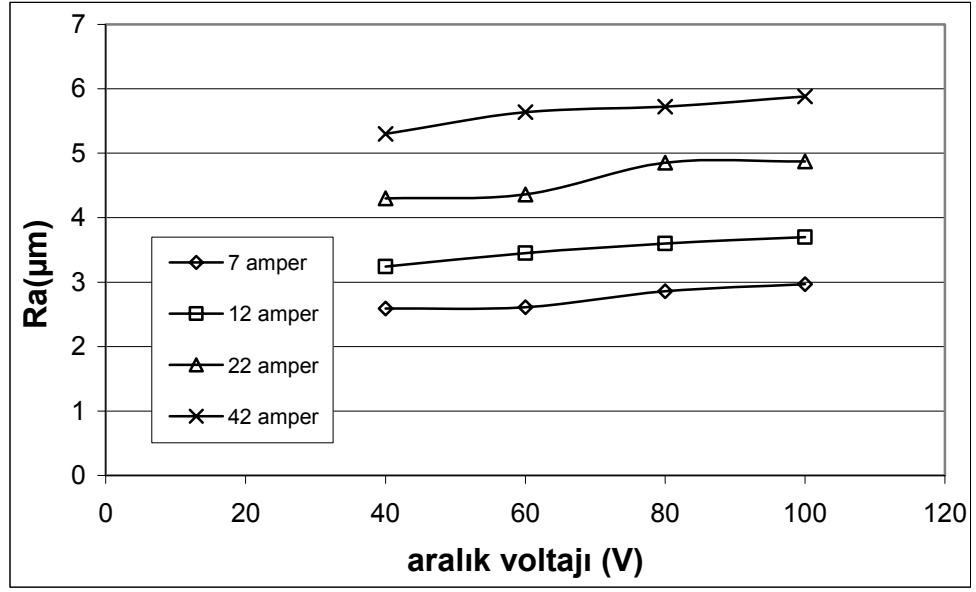
Şekil 10. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 12  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s



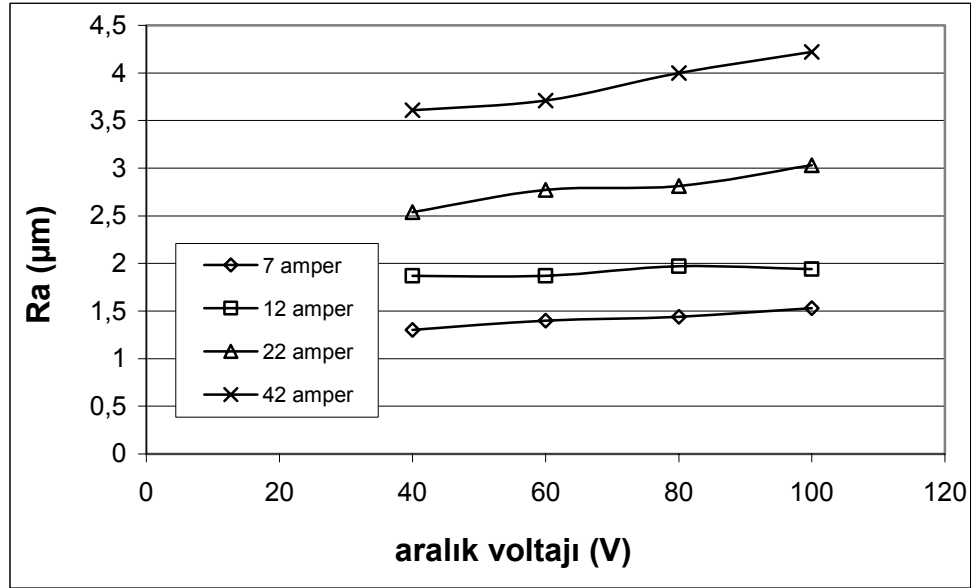
Şekil 11. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 25  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s



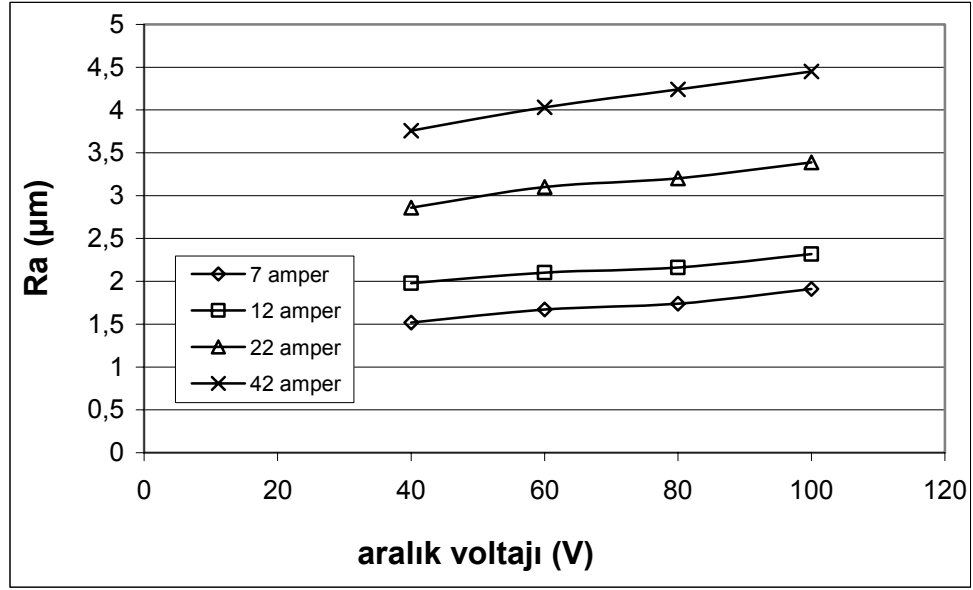
Şekil 12. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 50  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s



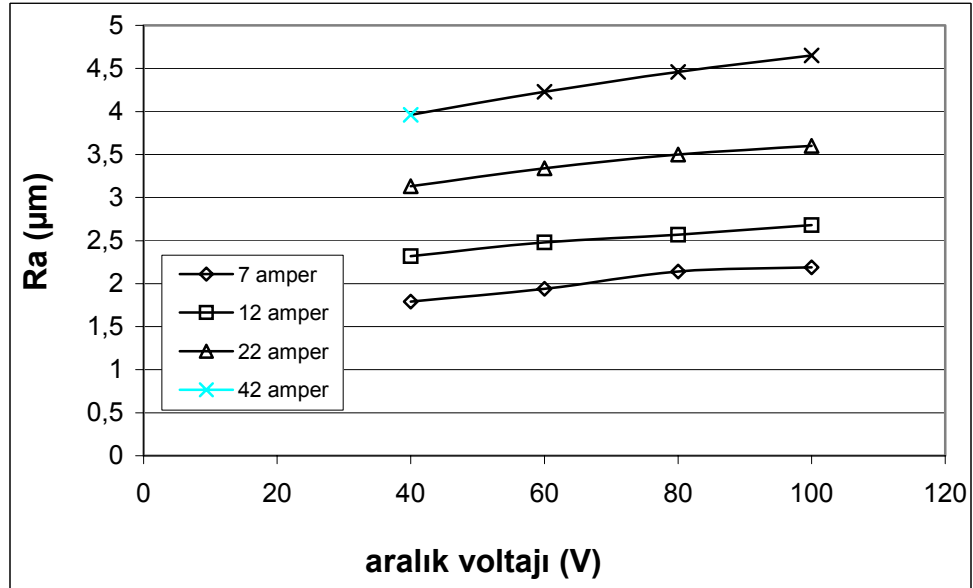
Şekil 13. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 100  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s



Şekil 14. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 6  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s

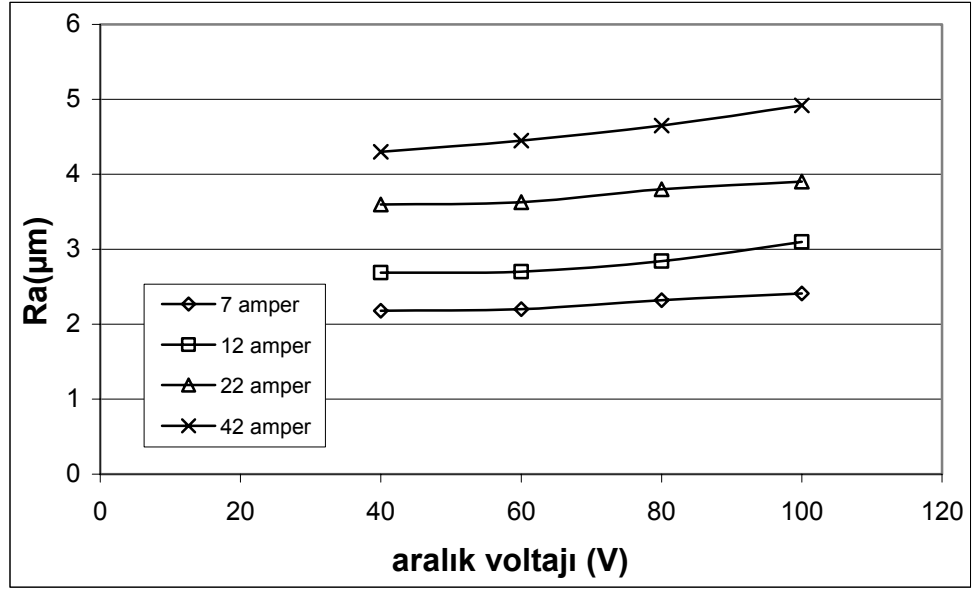


Şekil 15. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 12  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s

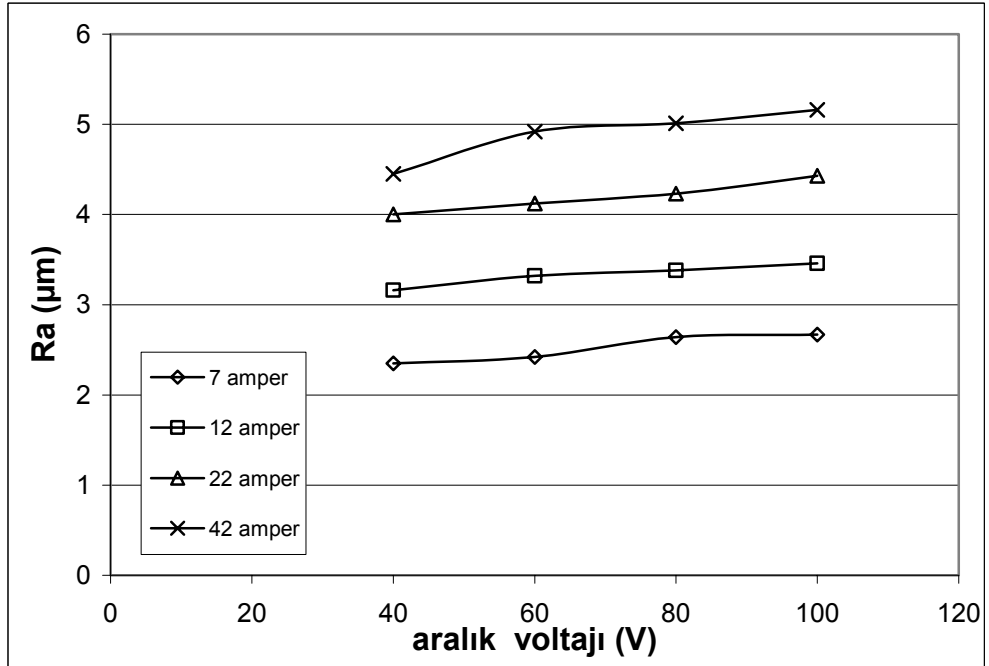


Şekil 16. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 25  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s

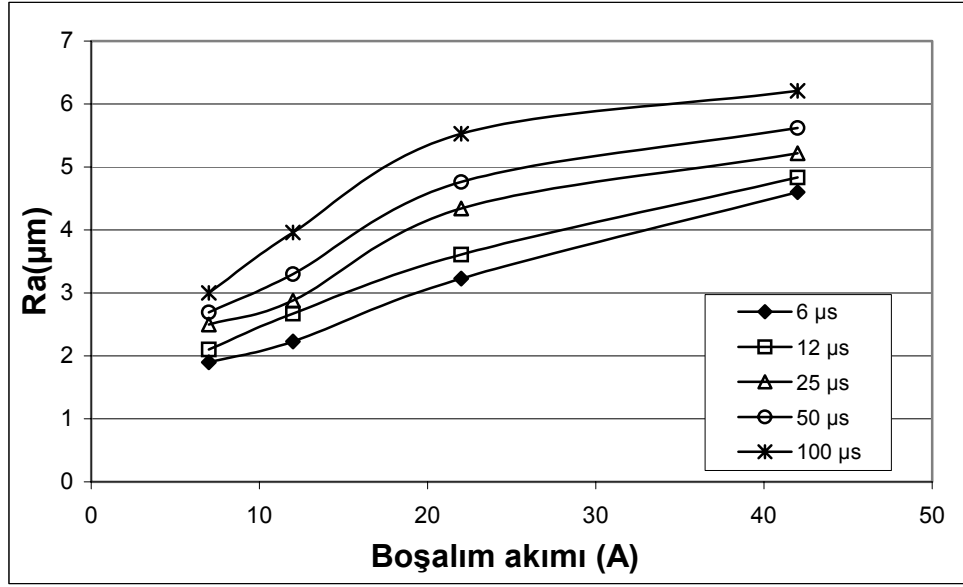




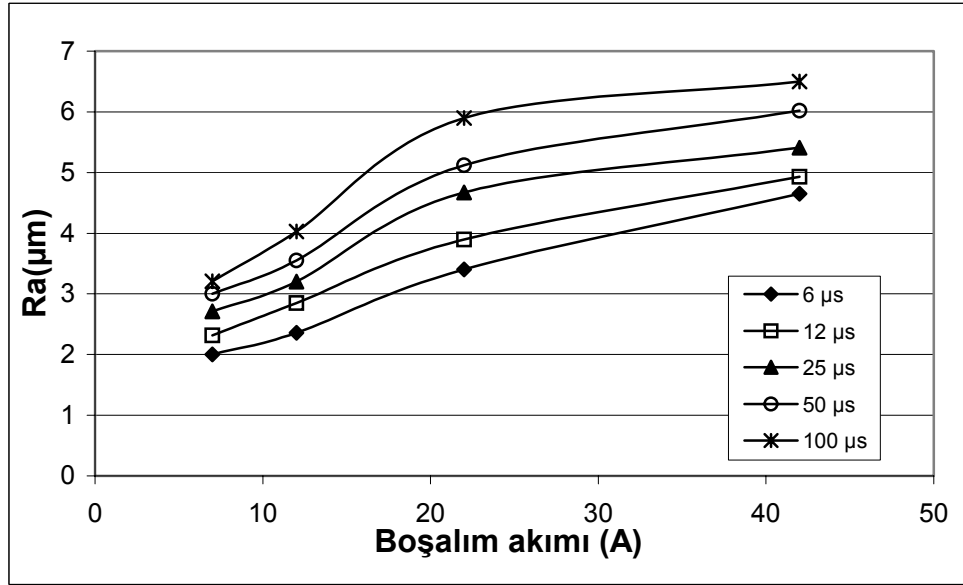
Şekil 17. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 50  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s



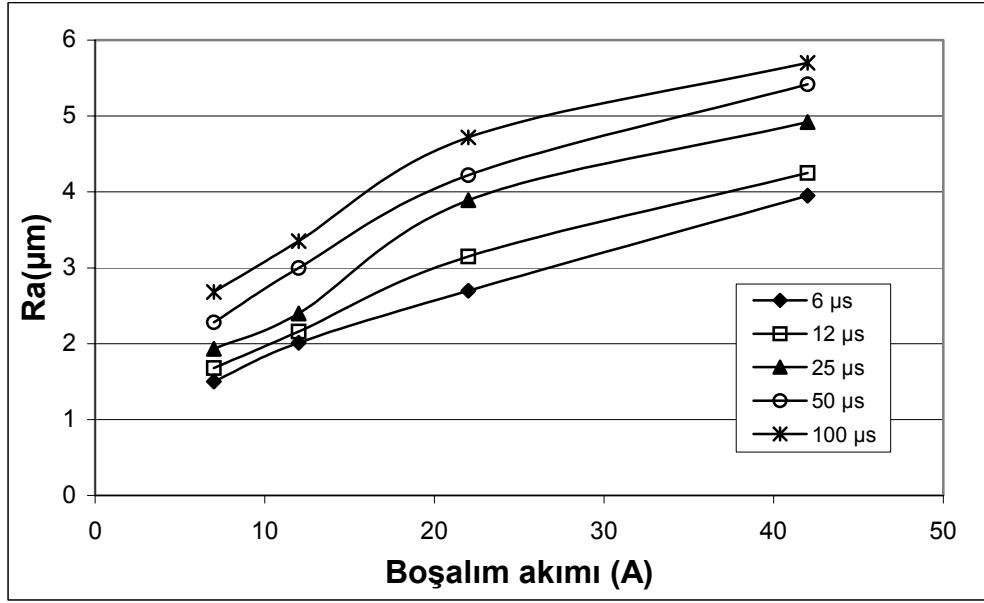
Şekil 18. Vurum süresi ( $t_{on}$ ) 100  $\mu$ s, Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s



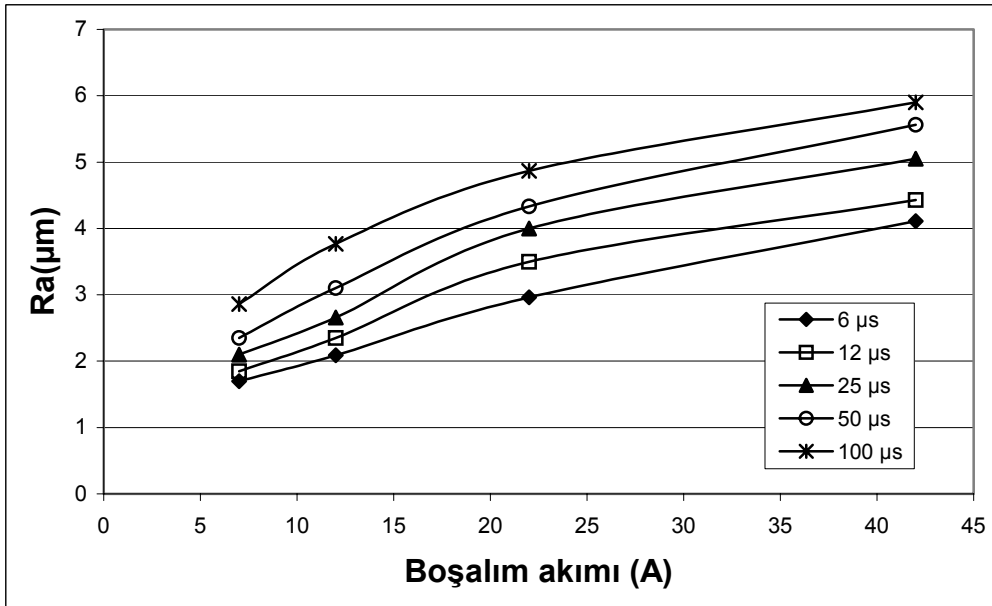
Şekil 19. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt



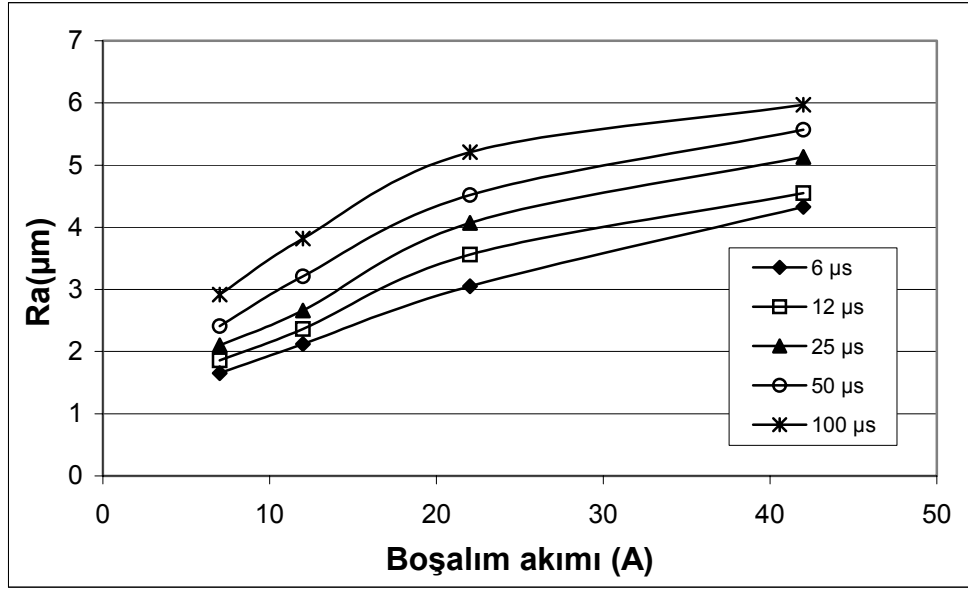
Şekil 20. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 12  $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt



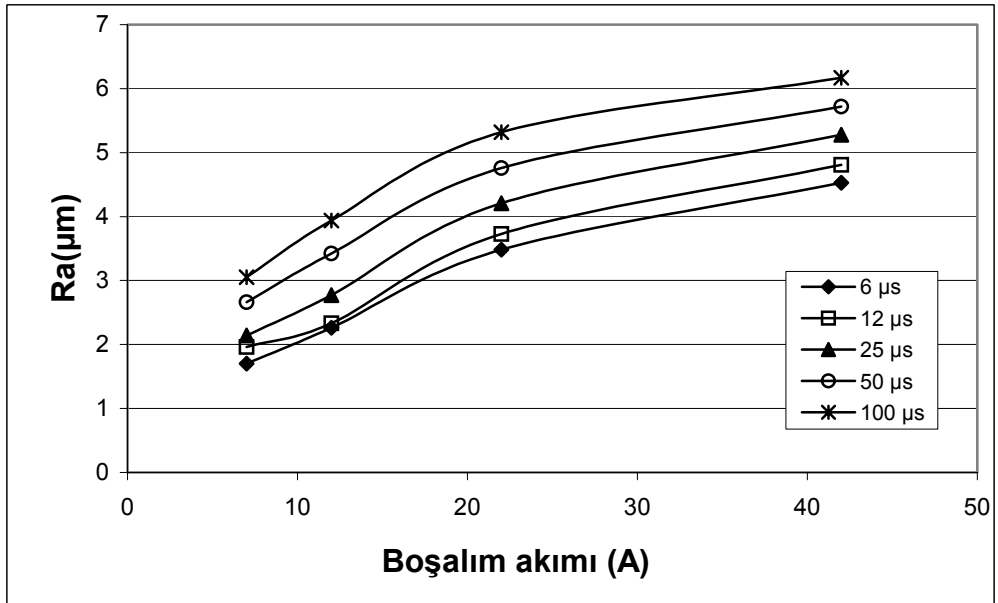
Şekil 21. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt



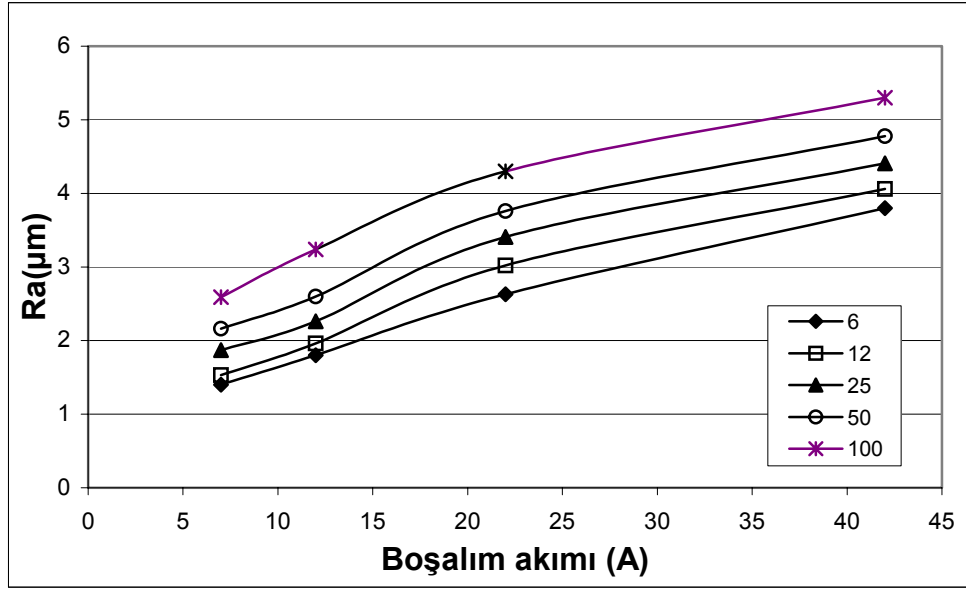
Şekil 21. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt



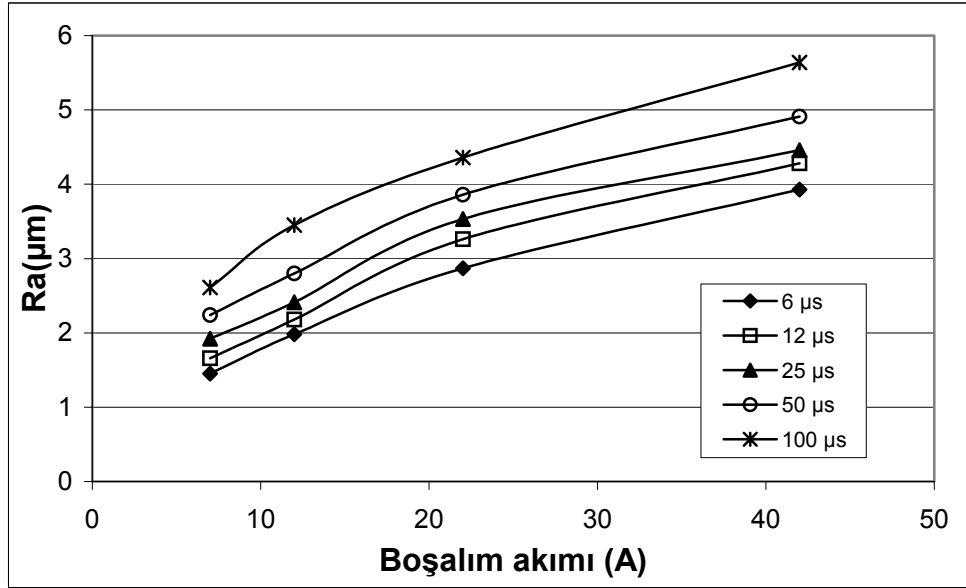
Şekil 22. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt



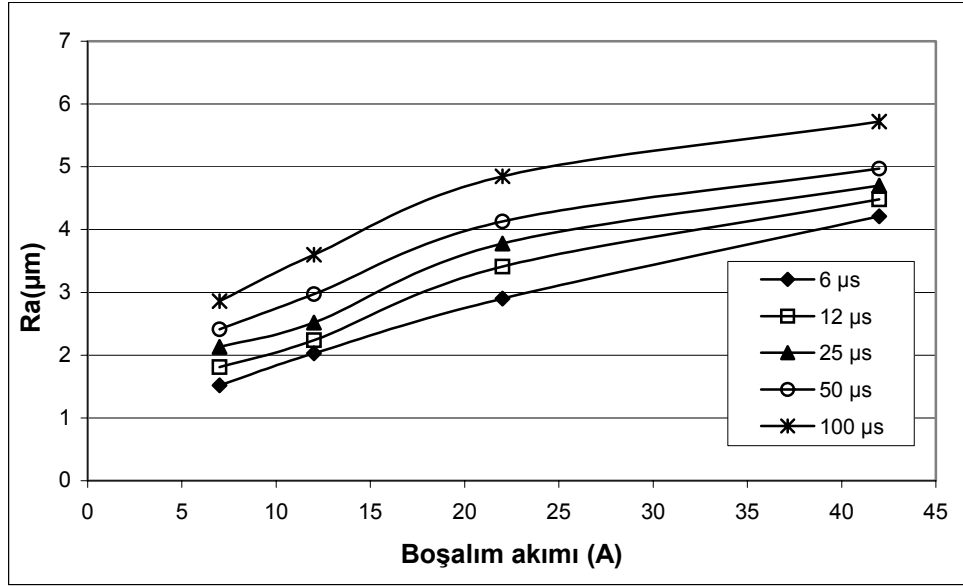
Şekil 23. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt



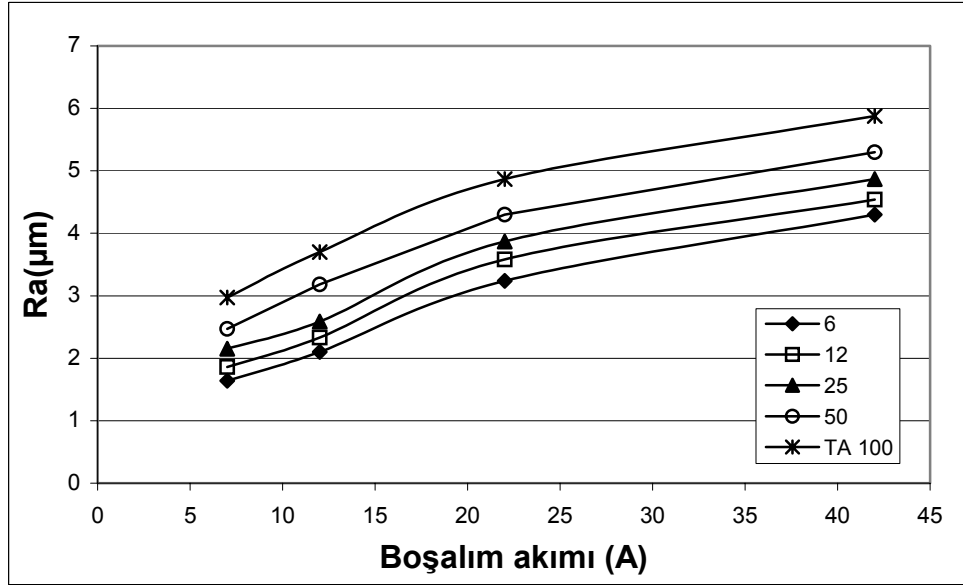
Şekil 24. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt



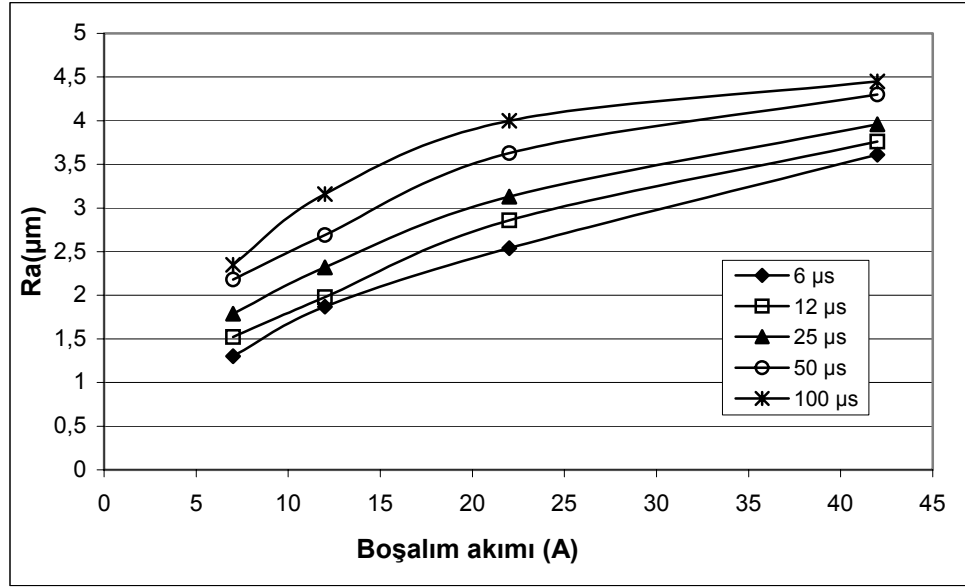
Şekil 25. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt



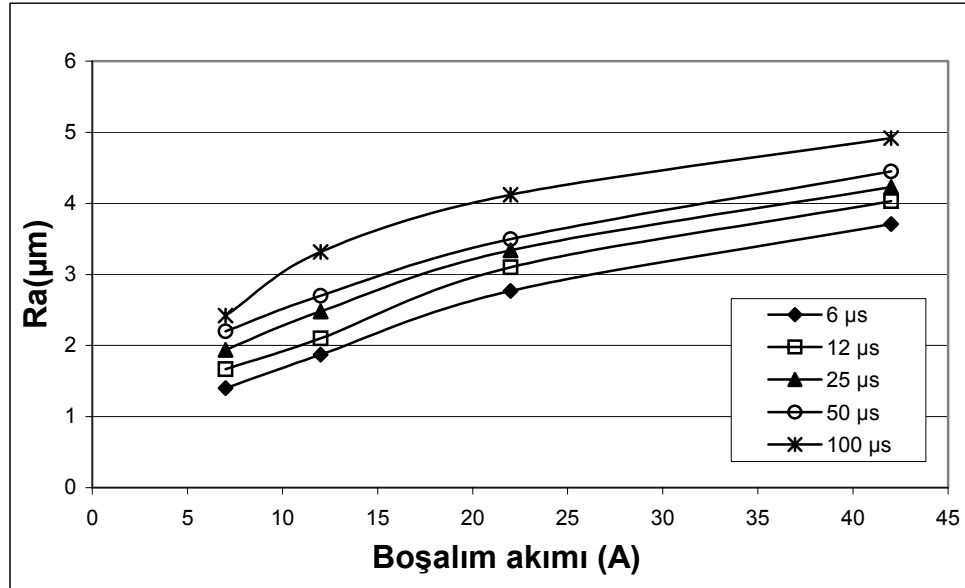
Şekil 26. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt



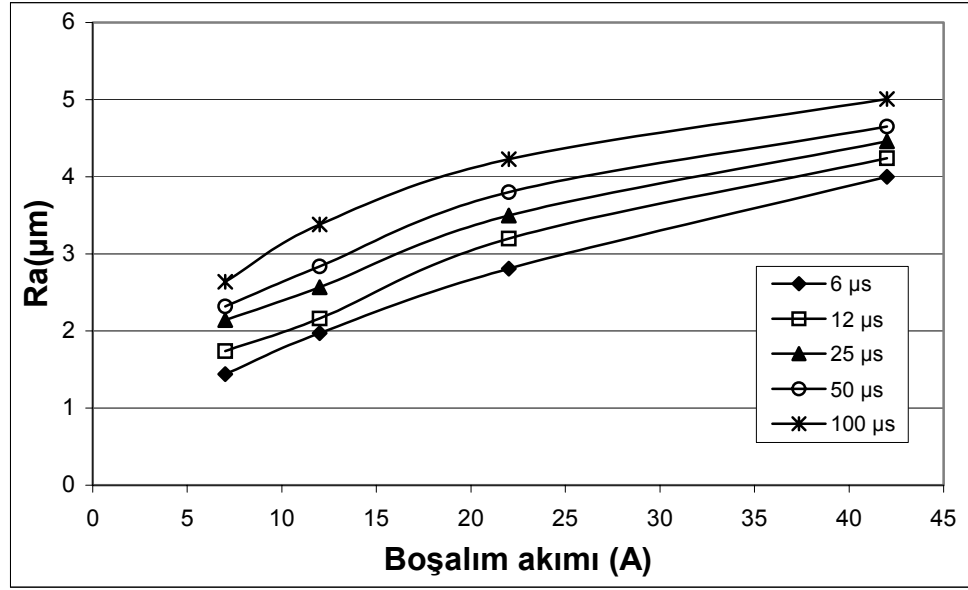
Şekil 27. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt



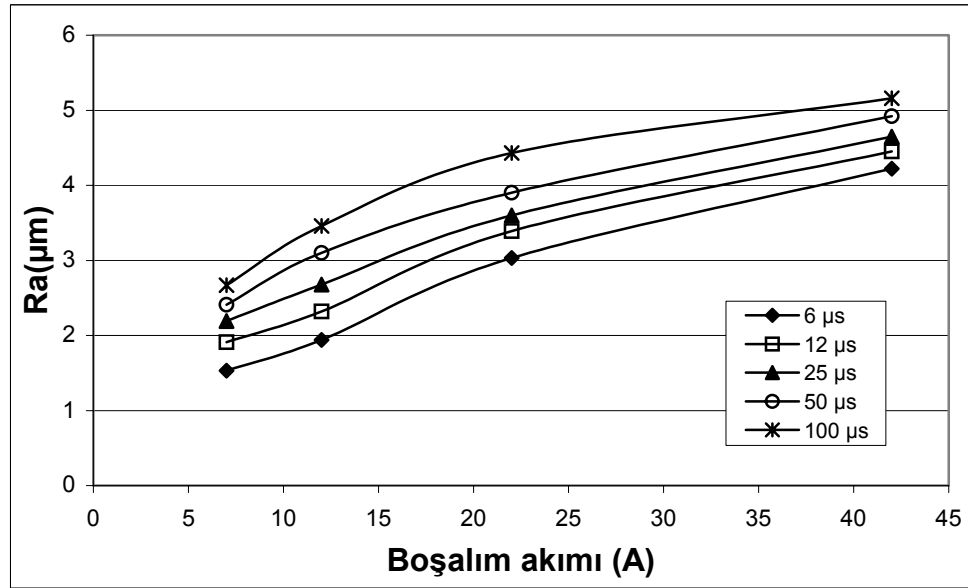
Şekil 28. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt



Şekil 29. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt

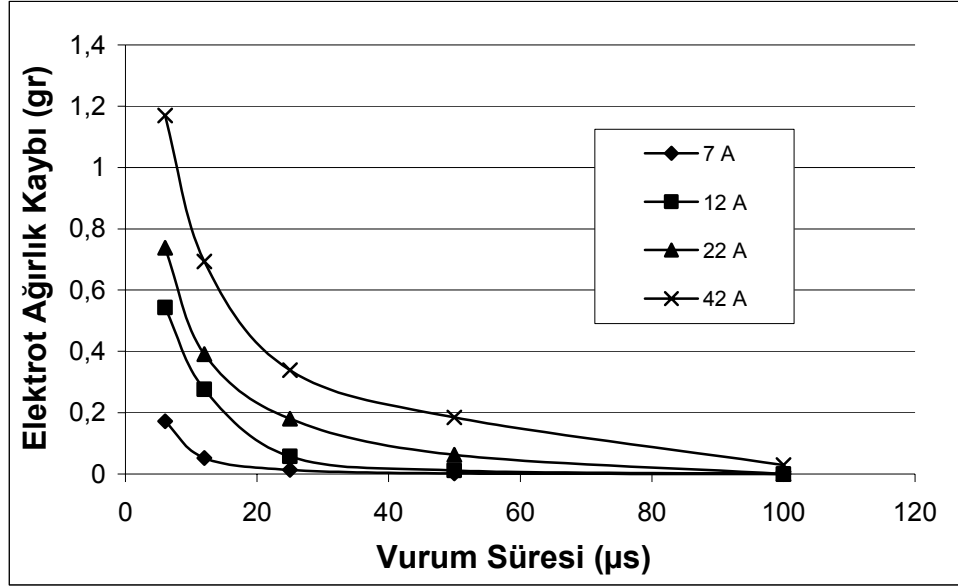


Şekil 30. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt

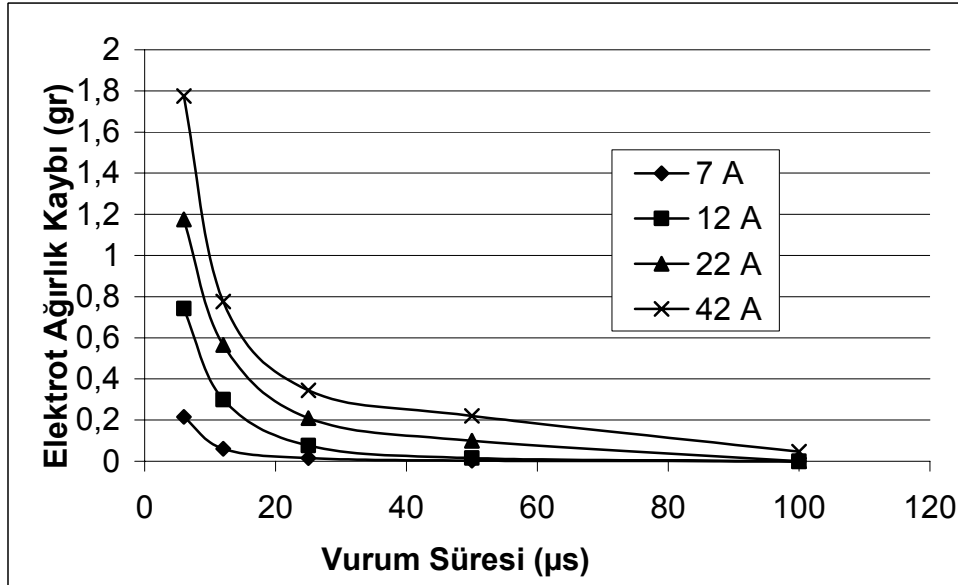


Şekil 31. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 100  $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt

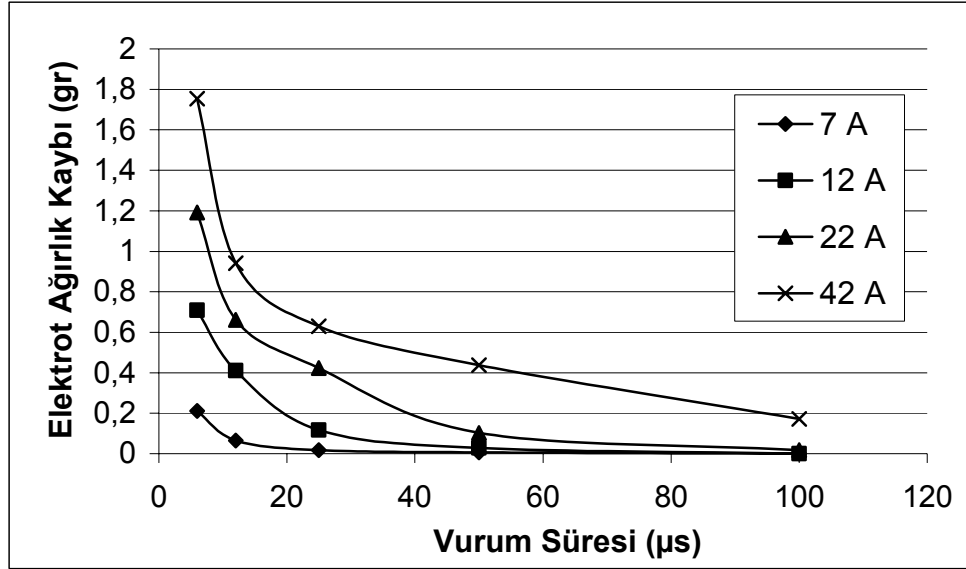




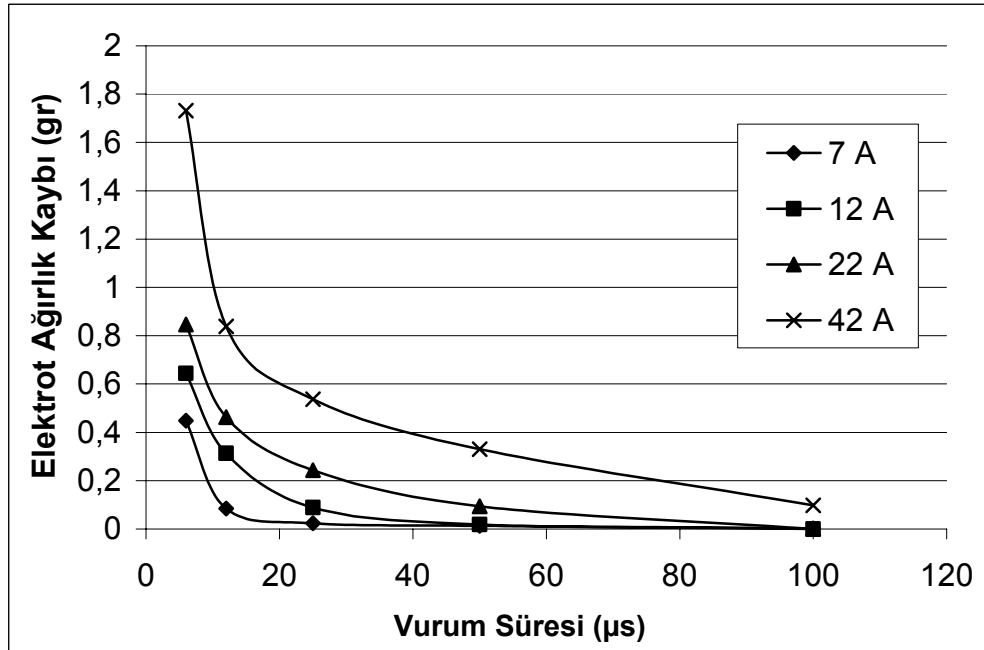
Şekil 32. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 12  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 80 Volt



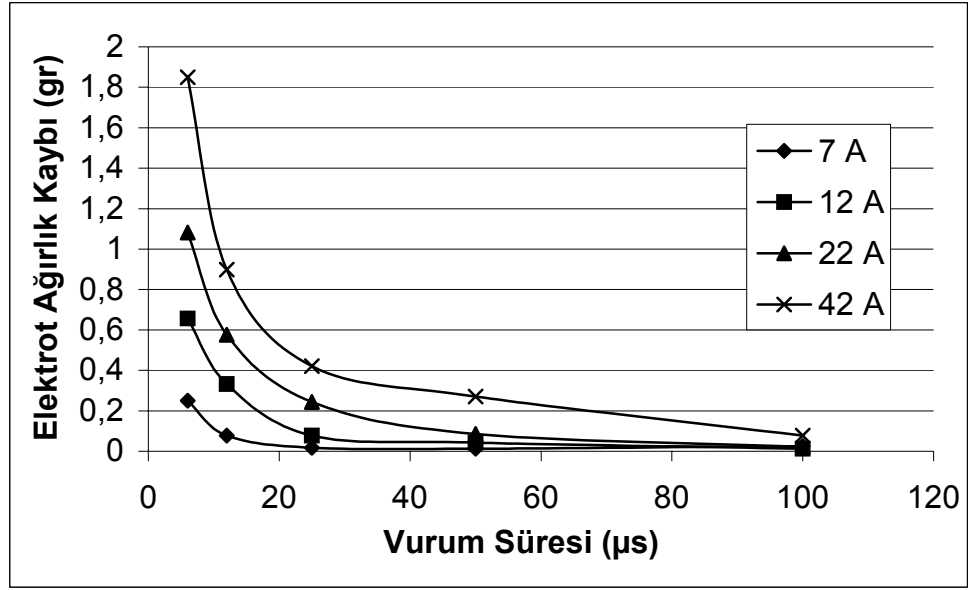
Şekil 33. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 12  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 100 Volt



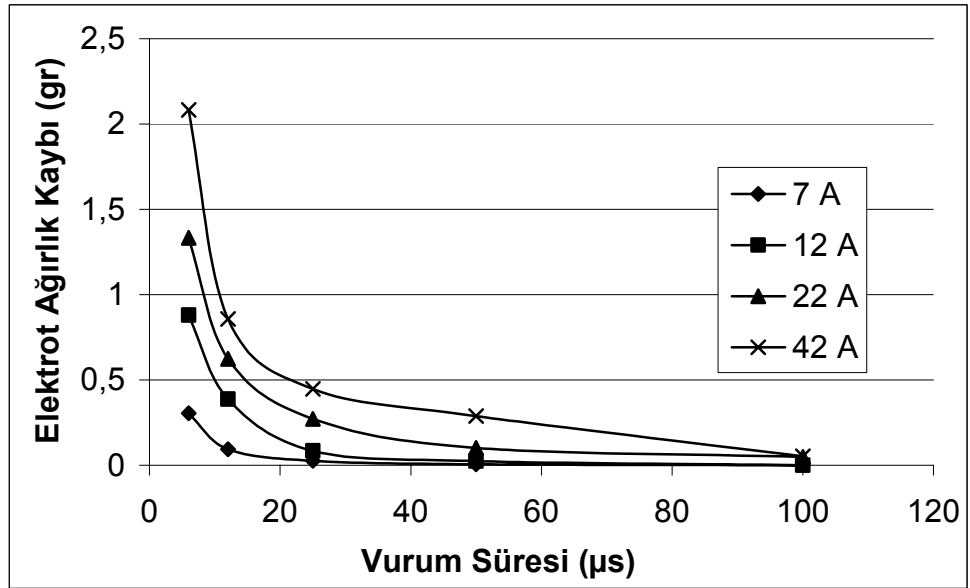
Şekil 34. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 µs, Aralık voltajı 40 Volt



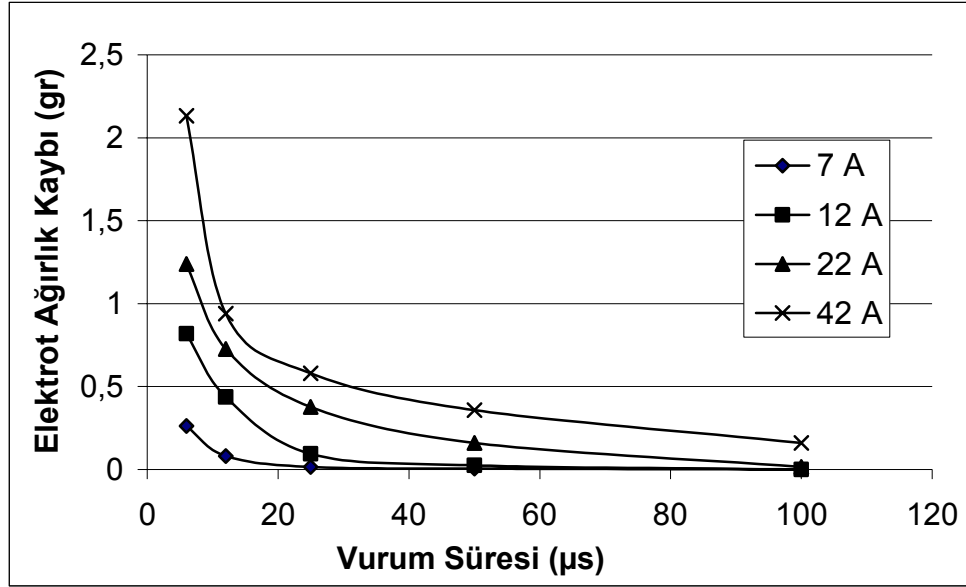
Şekil 35. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25 µs, Aralık voltajı 60 Volt



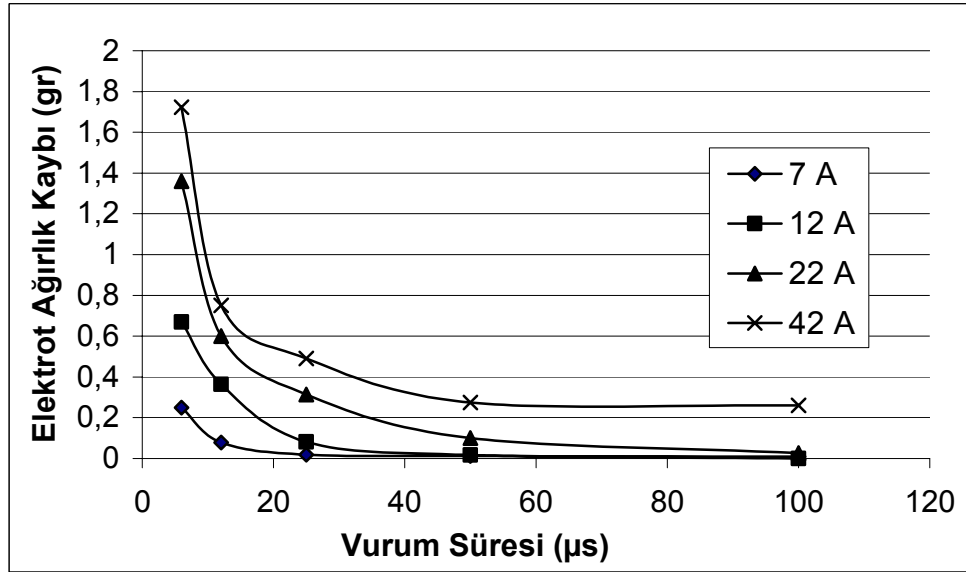
Şekil 36. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s, Aralık voltajı 80 Volt



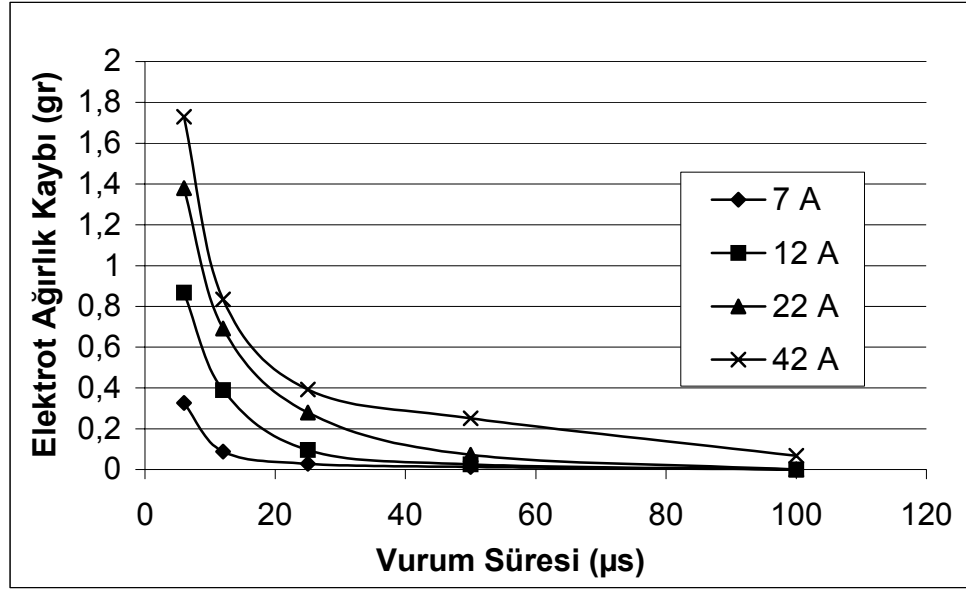
Şekil 37. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 25  $\mu$ s, Aralık voltajı 100 Volt



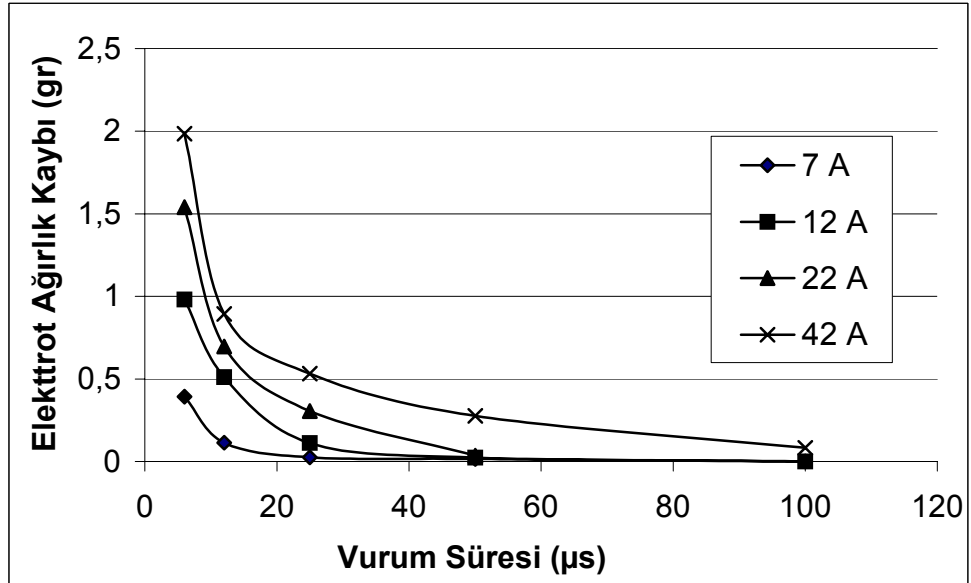
Şekil 38. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s, Aralık voltajı 40 Volt



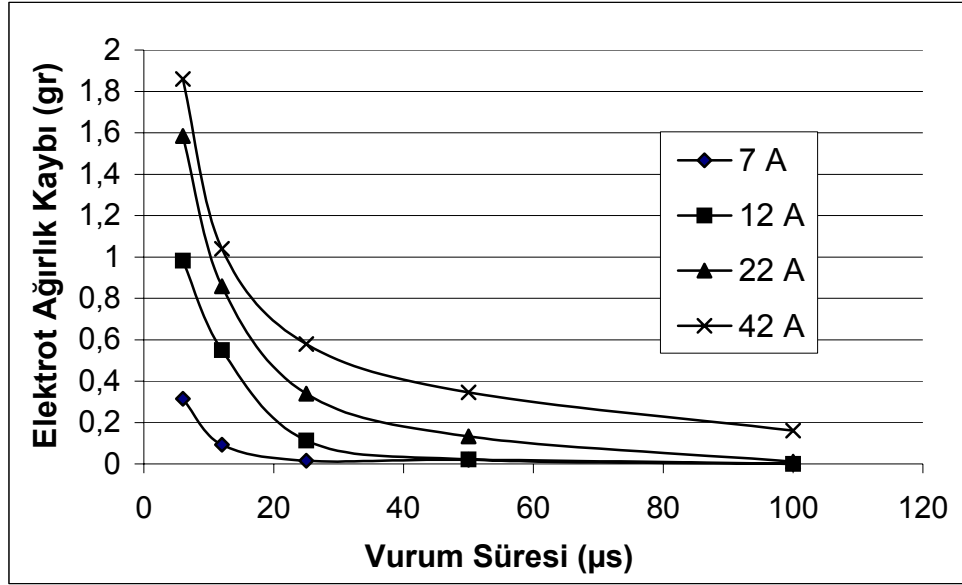
Şekil 39. Bekleme süresi ( $t_{off}$ ) 50  $\mu$ s, Aralık voltajı 60 Volt



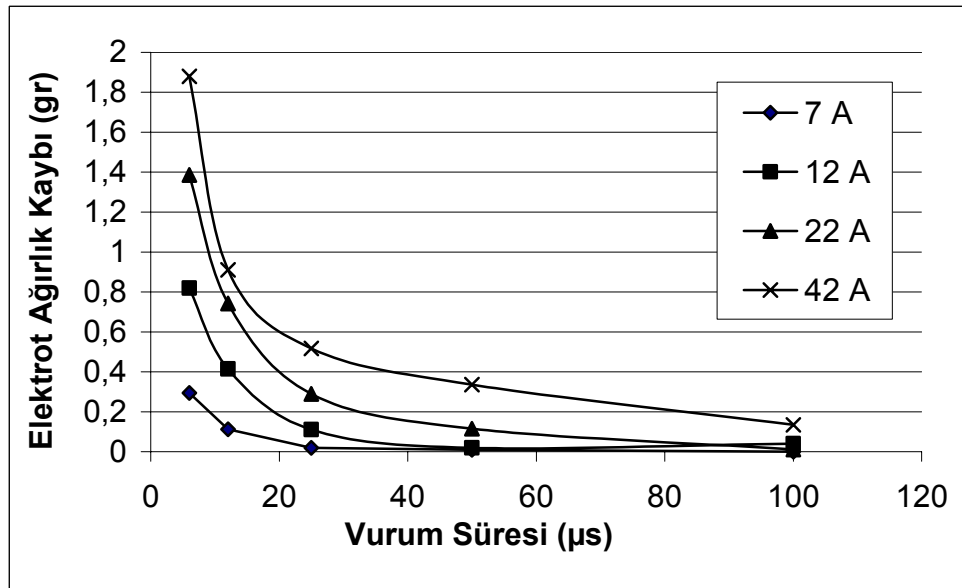
Şekil 40. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 50  $\mu\text{s}$  Aralık voltajı 80 Volt



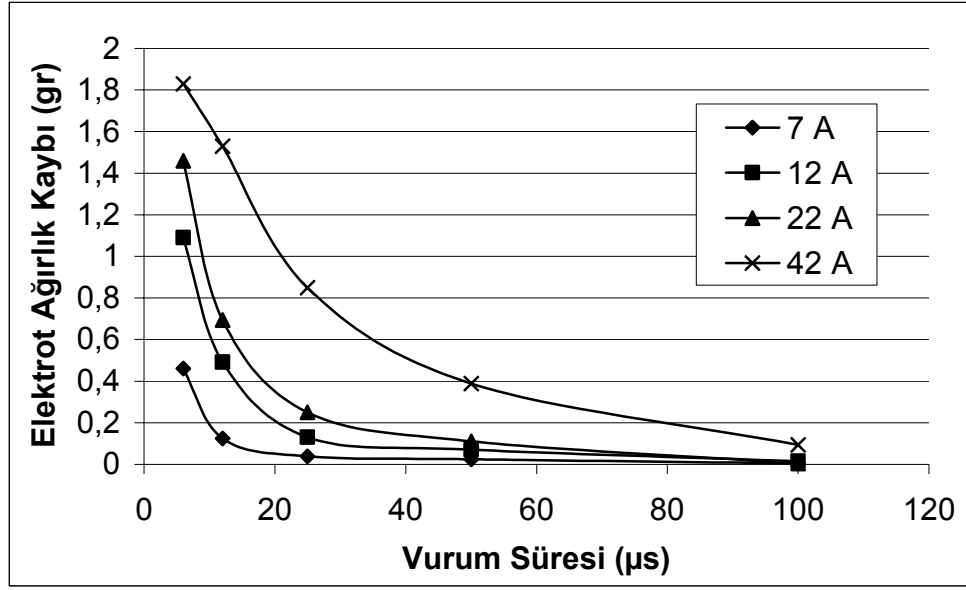
Şekil 41. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 50  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 100 Volt



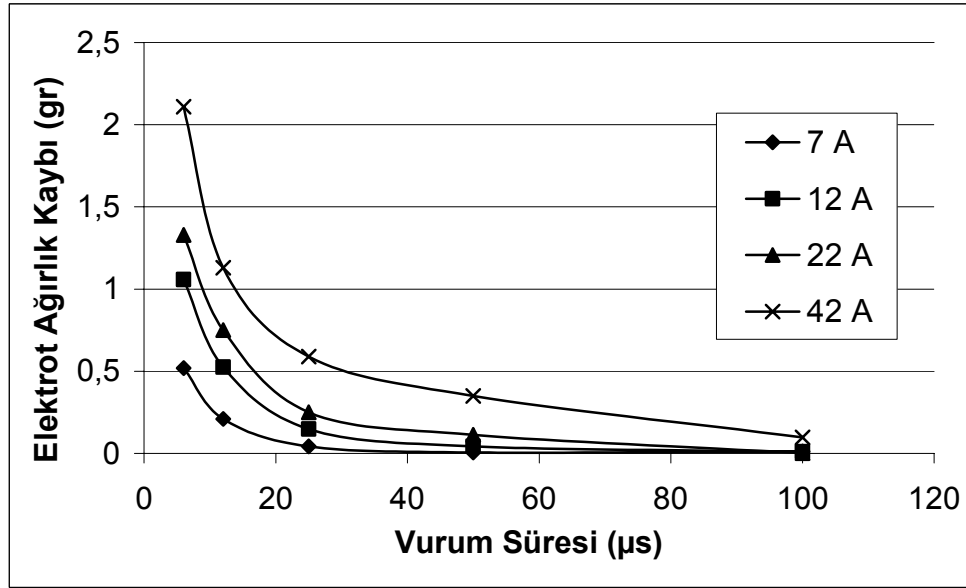
Şekil 42. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 100  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 40 Volt



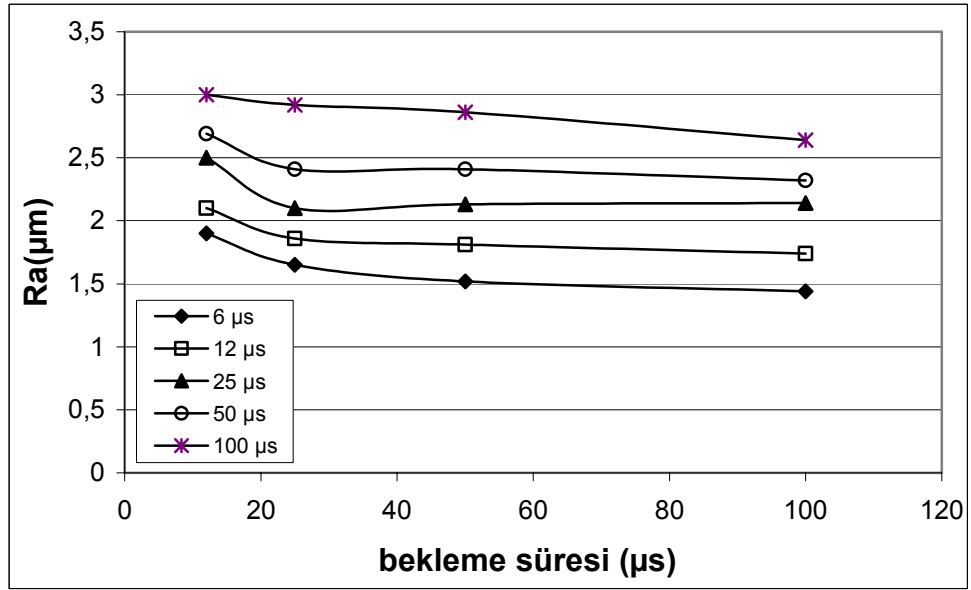
Şekil 43. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 100  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 60 Volt



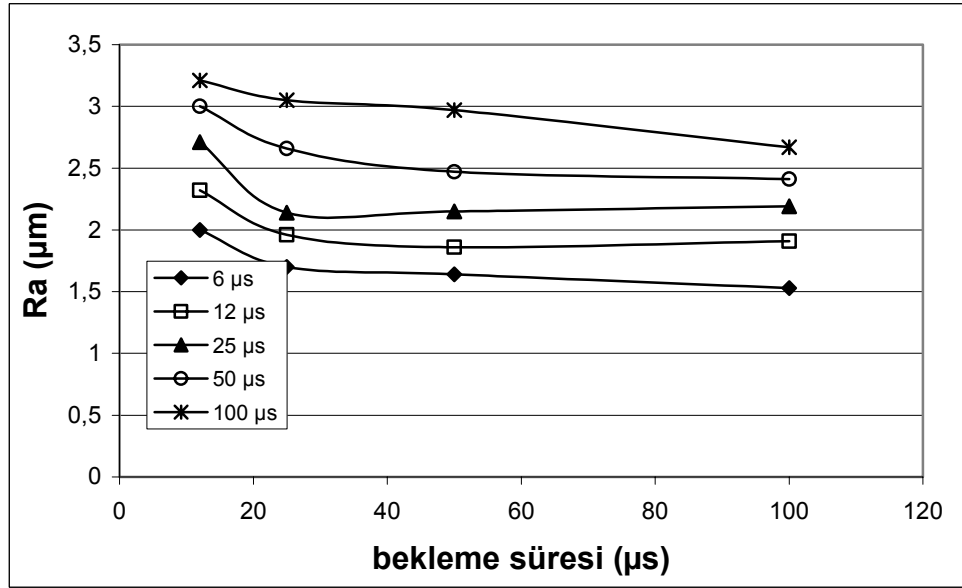
Şekil 44. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 100  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 80 Volt



Şekil 45. Bekleme süresi ( $t_{\text{off}}$ ) 100  $\mu\text{s}$ , Aralık voltajı 100 Volt

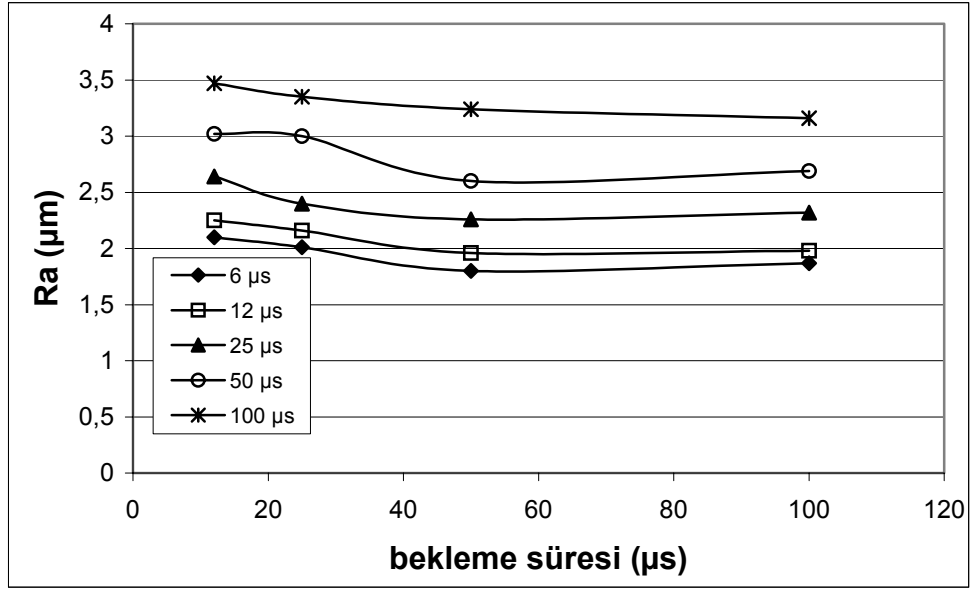


Şekil 46. Boşalım akımı 7 Amper, Aralık voltajı 80 Volt

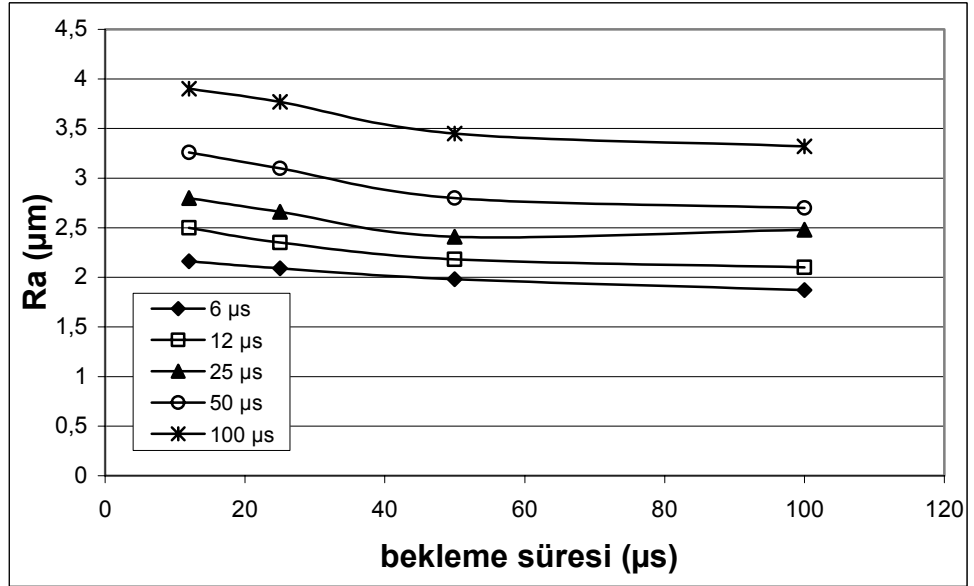


Şekil 47. Boşalım akımı 7 Amper, Aralık voltajı 100 Volt

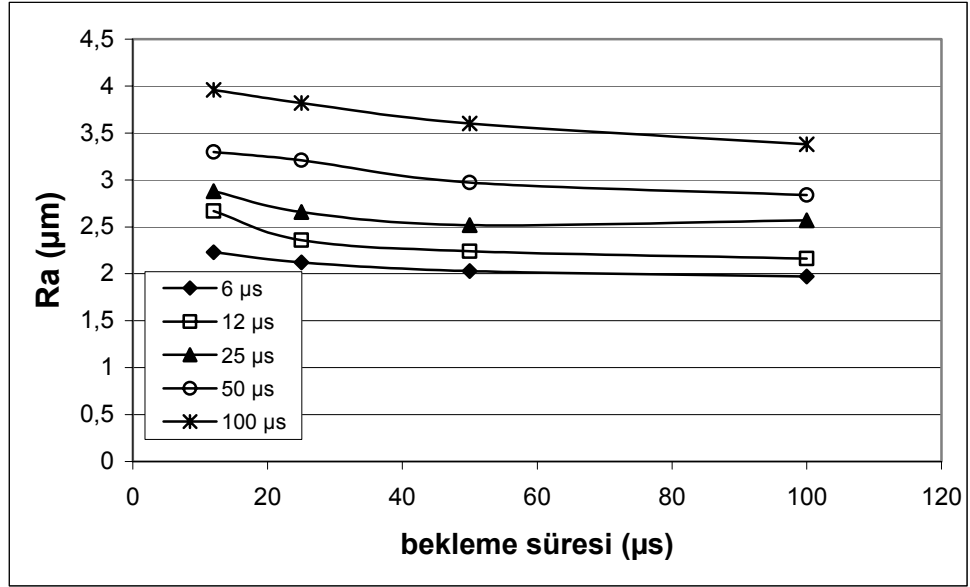




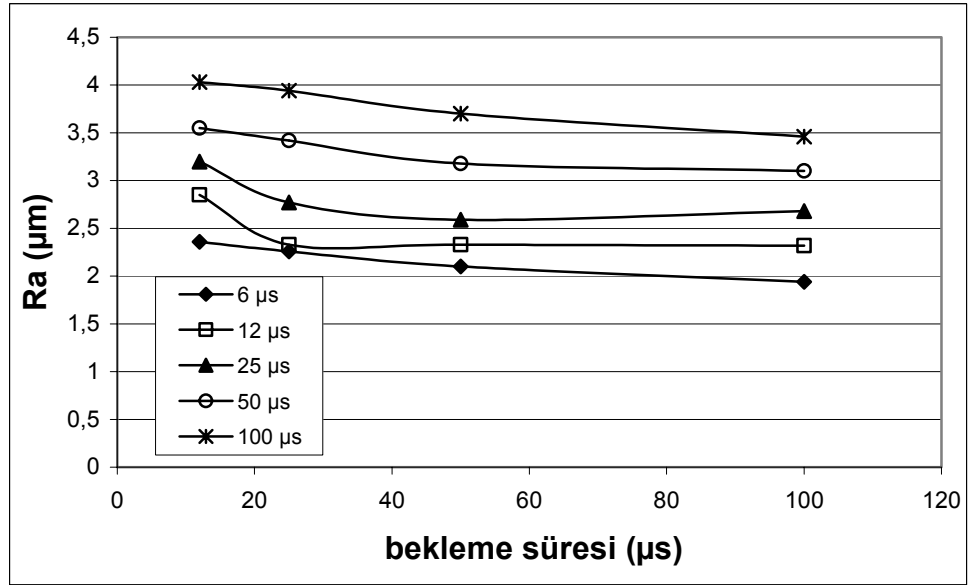
Şekil 48. Boşalım akımı 12 Amper, Aralık voltajı 40 Volt



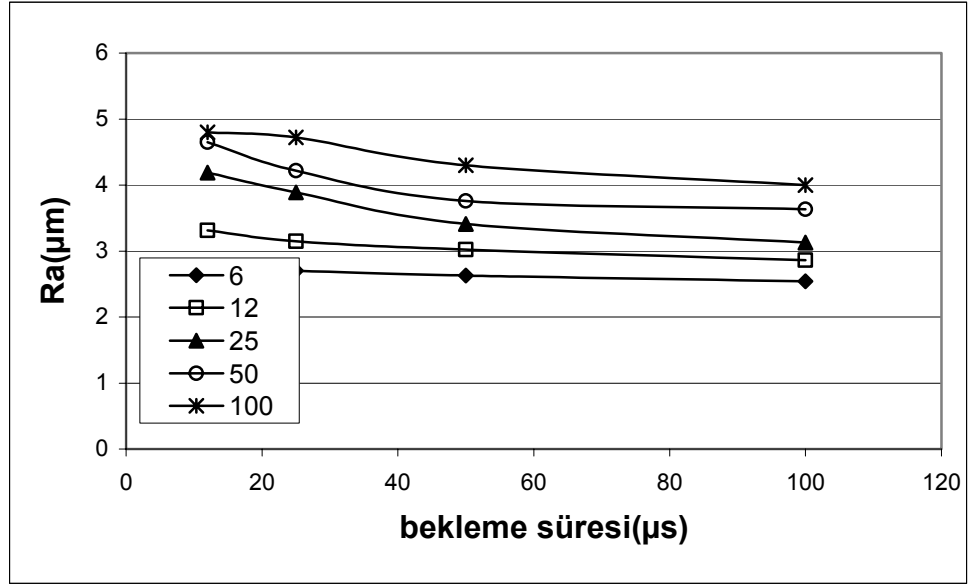
Şekil 49. Boşalım akımı 12 Amper, Aralık voltajı 60 Volt



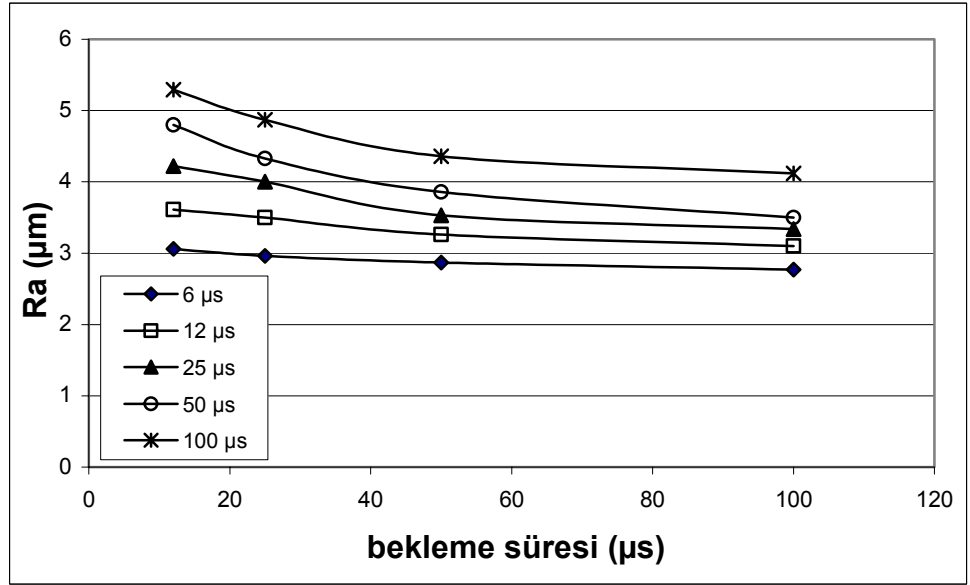
Şekil 50. Boşalım akımı 12 Amper, Aralık voltajı aj 80 Volt



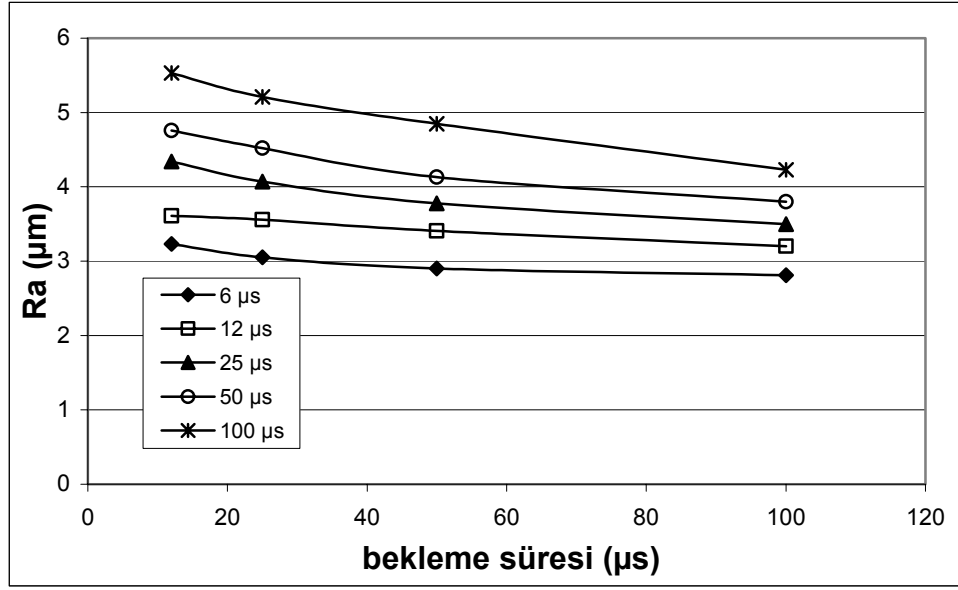
Şekil 51. Boşalım akımı 12 Amper, Aralık voltajı 100 Volt



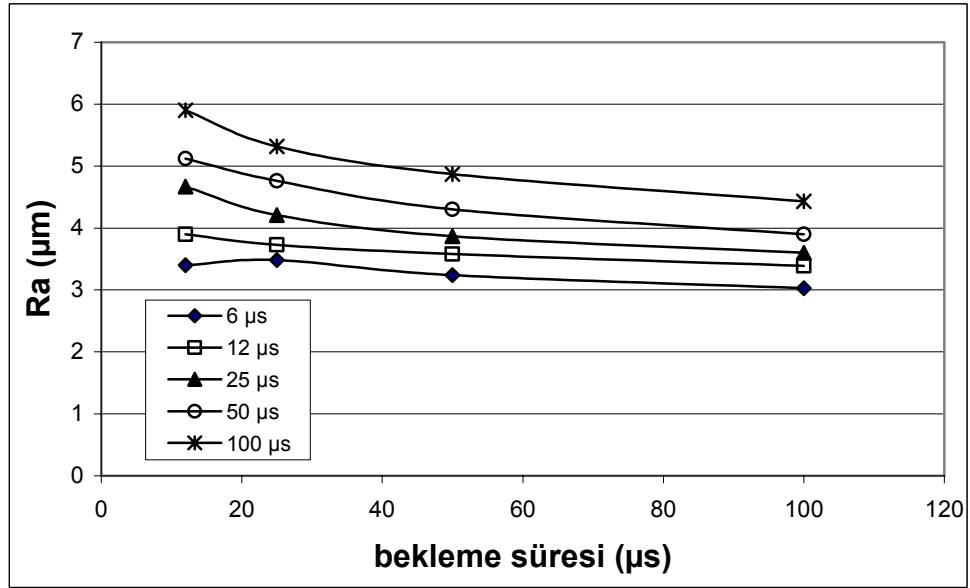
Şekil 52. Boşalım akımı 22 Amper, Aralık voltajı 40 Volt



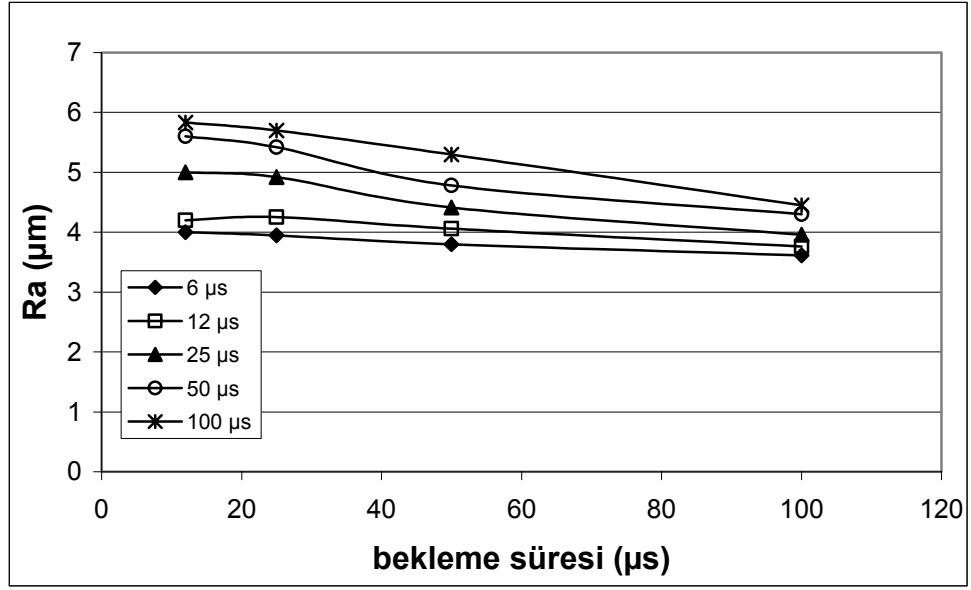
Şekil 53. Boşalım akımı 22 Amper, Aralık voltajı 60 Volt



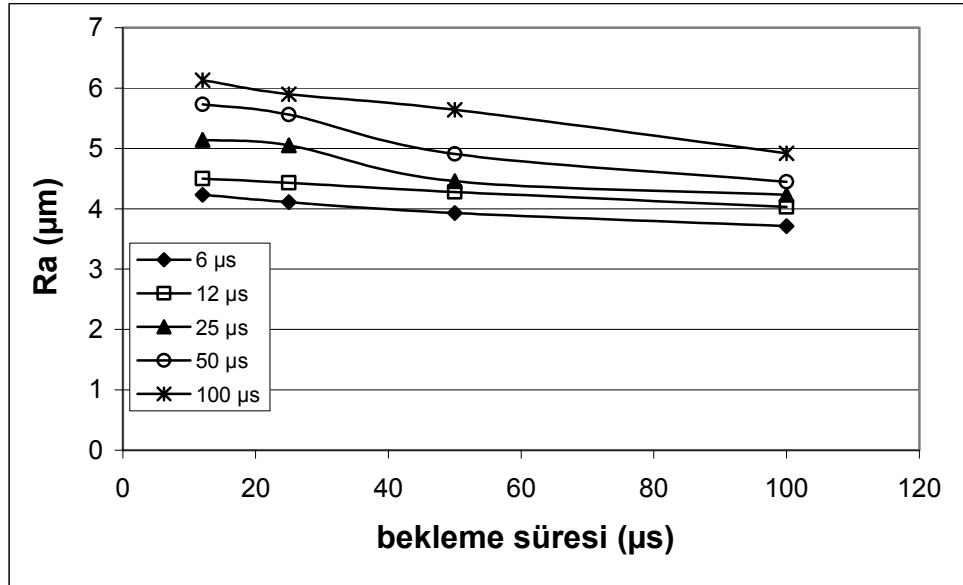
Şekil 54. Boşalım akımı 22 Amper, Aralık voltajı 80 Volt



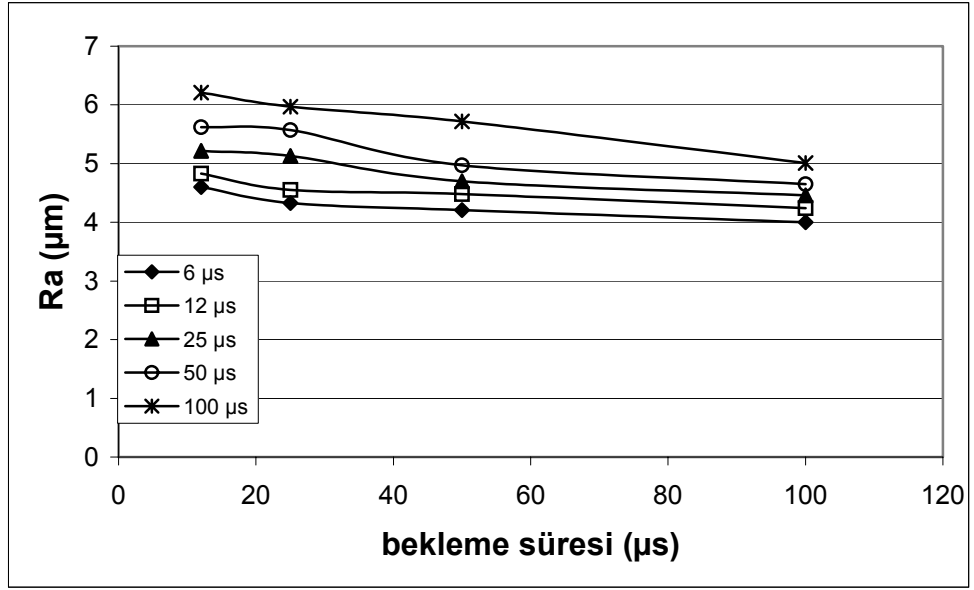
Şekil 55. Boşalım akımı 22 Amper, Aralık voltajı 100 Volt



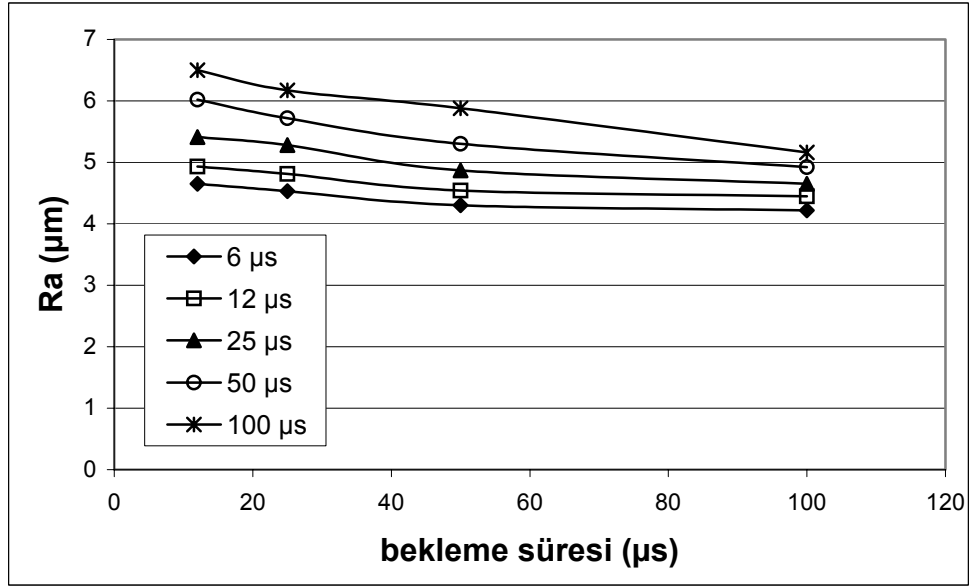
Şekil 56. Boşalım akımı 42 Amper, Aralık voltajı 40 Volt



Şekil 57. Boşalım akımı 42 Amper, Aralık voltajı 60 Volt



Şekil 58. Boşalım akımı 42 Amper, Aralık voltajı 80 Volt



Şekil 59. Boşalım akımı 42 Amper, Aralık voltajı 100 Volt