

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROEROZYONLA İŞLEMEDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN
MALZEME GİDERİLMESİ ve YÜZEY KALİTESİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

ŞÜKRÜ KOCABAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İMAL USULLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ERHAN ALTAN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROEROZYONLA İŞLEMEDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN MALZEME
GİDERİLMESİ ve YÜZEY KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Şükrü KOCABAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 15.07.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

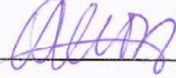
Prof. Dr. Erhan ALTAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

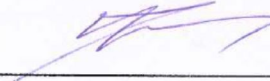
Yrd. Doç. Dr. Murat KIYAK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

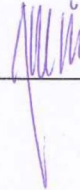
Prof. Dr. Erhan ALTAN
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Mehmet Emin YURCI
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi



Tez çalışması süresince bilgi birikimleri ve önerileriyle bana yol gösteren, tezimin hazırlanmasında emeği ve değerli katkılarından dolayı tez danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Erhan ALTAN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat KIYAK ile tezimin deneysel tasarım bölümlerindeki yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Mihriğül ALTAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin deneylerini gerçekleştirmem için bana tüm imkânı sağlayan Kale Kilit Fabrikası Ar-Ge müdürü Sayın Atilla Kocabaş'a ve Kale Kilit Fabrikası Kalıphane bölümünün tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca hiçbir fedakârlıktan kaçınmadan maddi ve manevi her türlü konuda bana desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürü borç bilirim.

Mayıs, 2013

Şükrü KOCABAŞ

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xviii
ÖZET.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ 1	
1.1 Literatür Özeti	3
1.1.1 Literatür Özetinde Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	51
1.1.1.1 Elektroerozyonla İşlemede İşlem Parametrelerinin Malzeme Giderilmesine Etkisi	51
1.1.1.2 Elektroerozyonla İşlemede İşlem Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisi	53
1.2 Tezin Amacı	54
1.3 Orijinal Katkı	54
BÖLÜM 2	
ELEKTROEROZYON İLE İŞLEME	55
2.1 Malzeme Kaldırma Mekanizması	58
2.2 Elektroerozyon İle İşleme Yöntemleri	61
2.3 Elektroerozyon ile İşlemenin Temel Prensibi.....	62
2.4 Elektroerozyon İle İşlemenin Temel Parametreleri.....	65
2.4.1 Elektriksel Parametreler.....	66
2.4.2 Vurum jeneratörü karakteristikleri.....	68
2.4.3 Dielektrik sıvı parametreleri.....	72
2.4.4 İşparçası malzemesinin fiziksel özellikleri	82
2.4.5 Elektrot malzemesinin fiziksel özellikleri	82
2.5 Elektroerozyon Yönteminde Boşalma Hataları.....	86

2.5.1 Açık Devre Sinyalleri Hatası	86
2.5.2 Kısa Devre Hatası	86
2.5.3 Ark Hatası	86
2.5.4 Kapalı Aralık Hatası	87
2.6 EEİ'de Performans Karakteristikleri	87
2.7 Elektrot Kenar Aşınması	92
BÖLÜM 3	
DENEYLER	95
3.1 İşparçası	95
3.2 Elektrot	97
3.3 Dielektrik Sıvı	98
3.4 Elektroerozyon Tezgahı	98
3.5 İşleme Parametreleri.....	99
3.6 Elektroerozyon İle İşlemede Performans Çıktılarının Tespit Edilmesi	100
3.6.1 İşparçası İşleme Hızının (İİH) Tespiti	100
3.6.2 Elektrot Aşınma Hızının (EAH) Tespiti	100
3.6.3 İşparçası ve Elektrotların Ortalama Yüzey Pürüzlülük (R_a) Değerlerinin Tespiti	101
3.6.4 Elektrotların Kenar Aşınması Değerinin Tespiti	102
3.7 Deneylelerin Uygulanışı.....	103
BÖLÜM 4	
BULGULAR	105
4.1 İşleme Parametrelerinin İşparçası İşleme Hızına (İİH) Etkisi.....	105
4.2 İşleme Parametrelerinin Elektrot Aşınma Hızına (EAH) Etkisi	115
4.3 İşleme Parametrelerinin Elektrot Kenar Aşınması Üzerine Etkisi	123
4.4 İşleme Parametrelerinin İşparçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	124
4.5 İşleme Parametrelerinin Elektrot Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	133
4.6 Enerji Yoğunluğu	142
4.6.1 Enerji Yoğunluğunun İşparçası İşleme Hızına Etkisi.....	147
4.6.2 Enerji Yoğunluğunun İşparçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	151
4.6.3 Enerji Yoğunluğunun Elektrot Kenar Aşınmasına Etkisi.....	156
4.7. Değişkenlerin Analizi (ANOVA)	159
4.7.1 İşparçası İşleme Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	160
4.7.2 Elektrot Aşınma Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	161
4.7.3 İşparçası Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	161
4.7.4 Elektrotların Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	162
4.7.5 Elektrotların Ortalama Kenar Aşınması için ANOVA Analizi Sonuçları.....	163
4.7.6 Enerji Yoğunluğu Değeri için ANOVA Analizi Sonuçları.....	163
4.8 Taguchi Yöntemi.....	164
4.9 Sinyal/Gürültü (db) Grafikleri.....	167
4.9.1 İşparçası İşleme Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db).....	167
4.9.2 Elektrot Aşınma Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db).....	168
4.9.3 İşparçası Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)	169
4.9.4 Elektrotların Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db).....	170

4.9.5 Elektrot Ortalama Kenar Aşınması İçin Sinyal/Gürültü Grafiği.....	171
BÖLÜM 5	
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	174
KAYNAKLAR.....	177
ÖZGEÇMİŞ.....	182

SİMGE LİSTESİ

A	Boşalım Akımı, Amper
A_{ön}	Elektrotların ön alın yüzey alanı, mm ²
B	Elektrot yan yüzeyinin koniklik açısı
°C	Santigrat
f_c	Vurum frekansı, vurum/s
f_v	Frekans, (Hz)
i	Ortalama çalışma akımı, Amper
i_d	Boşalım akımı, Amper
j	joule
k	Enerji yoğunluğu denklemindeki katsayı
K	Kelvin
m	metre
mm	milimetre
n	Puls (darbe) sayısı
P	Dielektrik sıvı basıncı, bar
P_d	Boşalım gücü, Watt
P_e	Dielektrik emme basıncı, bar
P_p	Dielektrik püskürtme basıncı, bar
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, µm
r	Yarıçap, mm
r_d	Elektrot dış kenar yarıçapı
r_i	Elektrot iç kenar yarıçapı
R_{max}	En yüksek tepe-çukur pürüzlülük yüksekliği
R_z	On-nokta yüksekliği
t_c	Vurum çevrim süresi, µs
t_d	Boşalım süresi, µs
t_i	Gecikme süresi, µs
t_p	Vurum bekleme süresi, µs
t_s	Vurum süresi, µs
V	Ortalama çalışma gerilimi, volt
V_d	Boşalım gerilimi, volt
V_o	Açık devre gerilimi, volt
W	Watt
W_s	Vurum enerjisi, joule
Φ	Elektrot ön yüzey eğim açısı

KISALTMA LİSTESİ

AFM	Atomic Force Microscopy
BA	Bağıl aşınma,%
BEAH	Bağıl elektrot aşınma hızı, %
BSD	Bilgisayar Sayısal Denetimi
CEDM	EDM with cryogenic cooling of the electrodes
CPC	Controlled Pulse Circuits
db	desibel
EAH	Elektrot aşınma hızı, gr/dk
EDM	Electro Discharge Machining
EEİ	Elektroerozyon ile İşleme
E.R_a	Elektrotların ortalama yüzey pürüzlülüğü,(μm)
EWR	Electrode Wear Rate
HB	Brinell Sertliği
HRC	Rocwell Sertliği – C Skala
HV	Vickers Sertliği
Hz	Hertz
İİH	İşparçası işleme hızı, gr/dk
İş.R_a	İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü,(μm)
LC	Sarım-Kapasitör
MRR	Material Removal Rate
(s/n)	(sinyal/gürültü)(db)
RC	Direnç-Kapasitör
RLC	Direnç-Sarım- Kapasitör
RLCD	Direnç-Sarım- Kapasitör-Diyot
UACEDM	EDM with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Boşalım tepe akımının işparçası işleme hızına etkisi	4
Şekil 1.2	Farklı vurum sürelerindeki boşalım tepe akımının işparçası işleme hızına etkisi	4
Şekil 1.3	Farklı boşalım akımlarında İİH'nın vurum süresiyle değişimi.....	5
Şekil 1.4	Vurum bekleme süresinin işparçası işleme hızına etkisi.....	5
Şekil 1.5	Boşalım tepe akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi	6
Şekil 1.6	Boşalım tepe akımı ve vurum süresinin işparçası pürüzlülüğüne etkisi	6
Şekil 1.7	Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	7
Şekil 1.8	Vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi	7
Şekil 1.9	Boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi.....	8
Şekil 1.10	Boşalım akımının elektrot aşınma oranına etkisi	8
Şekil 1.11	İİH ve EAH'nın vurum süresiyle birlikte değişimi.....	9
Şekil 1.12	Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	9
Şekil 1.13	Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	10
Şekil 1.14	Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi	10
Şekil 1.15	İşparçası işleme hızının vurum süresiyle birlikte değişimi.....	11
Şekil 1.16	Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi	12
Şekil 1.17	Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi	12
Şekil 1.18	Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	13
Şekil 1.19	Boşalım akımının İİH ve EAH'na etkisi	13
Şekil 1.20	İİH ve EAH'nın vurum süresiyle birlikte değişimi.....	14
Şekil 1.21	Farklı kullanma faktörlerindeki boşalım akımının İİH'na etkisi	14
Şekil 1.22	Farklı kullanma faktörlerindeki boşalım akımının EAH'na etkisi.....	15
Şekil 1.23	Farklı boşalım akımlarında, İİH'nın vurum süresiyle değişimi	15
Şekil 1.24	Farklı boşalım akımlarında, EAH'nın vurum süresiyle değişimi	16
Şekil 1.25	Boşalım akımının işparçası krater derinliği (yüzey pürüzlülüğüne) etkisi	16
Şekil 1.26	Vurum süresinin ve boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	17
Şekil 1.27	Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının İİH ve EAH'na etkisi.....	17
Şekil 1.28	Vurum süresi ve boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	18
Şekil 1.29	Boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi.....	18
Şekil 1.30	İşparçası işleme hızının vurum süresiyle değişimi.....	19
Şekil 1.31	Boşalım akımının işparçası ve elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	19

Şekil 1.32	Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	20
Şekil 1.33	Boşalım akımının işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızına etkisi.....	20
Şekil 1.34	İşparçası işleme hızının vurum süresiyle değişimi.....	21
Şekil 1.35	Elektrot aşınma hızının, vurum süresiyle değişimi.....	21
Şekil 1.36	Boşalım tepe akımının İİH ve BEAH'na etkisi	22
Şekil 1.37	İşparçası işleme ve bağıl elektrot aşınma hızının vurum süresiyle değişimi	22
Şekil 1.38	Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi	23
Şekil 1.39	Vurum süresi ve vurum bekleme sürelerinin, İİH'na etkisi	24
Şekil 1.40	Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	24
Şekil 1.41	Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	25
Şekil 1.42	Boşalım akımının işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızına etkisi.....	25
Şekil 1.43	Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının İİH ve EAH'na etkisi.....	26
Şekil 1.44	İşparçası işleme ve elektrot aşınma hızının vurum süresiyle değişimi.....	26
Şekil 1.45	Vurum bekleme süresinin işparçası işleme hızına etkisi	27
Şekil 1.46	Boşalım akımının işparçası işleme hızına ve elektrot aşınma hızına etkisi.....	27
Şekil 1.47	İşparçası işleme ve elektrot aşınma hızının vurum süresiyle değişimi.....	28
Şekil 1.48	Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	28
Şekil 1.49	Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	29
Şekil 1.50	Boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi.....	29
Şekil 1.51	Boşalım akımının elektrot aşınma hızına etkisi.....	30
Şekil 1.52	Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	30
Şekil 1.53	Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	31
Şekil 1.54	Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının İİH'na etkisi	31
Şekil 1.55	Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi	32
Şekil 1.56	Boşalım akımının İİH ve EAH'na etkisi	33
Şekil 1.57	Vurum süresinin İİH ve EAH'na etkisi	33
Şekil 1.58	Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	34
Şekil 1.59	Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	34
Şekil 1.60	Boşalım akımının elektrot kenar aşınması (iç – dış) değerine etkisi	35
Şekil 1.61	Vurum süresinin elektrot kenar aşınması (iç – dış) değerine etkisi	35
Şekil 1.62	Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının, İİH ve EAH'ına etkisi.....	36
Şekil 1.63	Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi	36
Şekil 1.64	Vurum süresinin işparçası işleme hızına ve elektrot aşınma hızına etkisi.....	37
Şekil 1.65	Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	37
Şekil 1.66	Vurum bekleme süresinin işparçası işleme hızına etkisi	38
Şekil 1.67	Vurum süresinin, İİH ve EAH'na etkisi	38
Şekil 1.68	Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	39
Şekil 1.69	Vurum süresinin ve boşalım akımının İİH'na etkisi	39
Şekil 1.70	Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	40
Şekil 1.71	Boşalım tepe akımının işparçası işleme hızına etkisi.....	40
Şekil 1.72	Vurum süresinin işparçası işleme hızına etkisi.....	41
Şekil 1.73	Vurum bekleme süresinin işparçası işleme hızına etkisi	41
Şekil 1.74	Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (vurum bekleme süresi 2 μ s).....	42
Şekil 1.75	Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (vurum bekleme süresi 3 μ s).....	42
Şekil 1.76	Boşalım akımı ve vurum süresinin elektrodun yüzey pürüzlülüğüne etkisi	

(vurum bekleme süresi 3 μ s).....	42
Şekil 1.77 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	43
Şekil 1.78 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (D2 çeliği için)	44
Şekil 1.79 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (H13 çeliği için)	44
Şekil 1.80 Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	45
Şekil 1.81 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	45
Şekil 1.82 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (bekleme süresi 12 μ s, aralık gerilimi 40 V)	46
Şekil 1.83 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (bekleme süresi 12 μ s, aralık gerilimi 60 V)	46
Şekil 1.84 Vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 7 A, aralık gerilimi 40 V)	47
Şekil 1.85 Vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 7 A, aralık gerilimi 60 V)	47
Şekil 1.86 Vurum süresi ve boşalım akımının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (sırasıyla boşalım akımı 7 ve 12 A olarak sabit alınmıştır)	48
Şekil 1.87 Vurum süresi ve boşalım akımının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (sırasıyla boşalım akımı 22 ve 50 A olarak sabit alınmıştır)	48
Şekil 1.88 Boşalım akımının, işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızına etkisi.....	49
Şekil 1.89 Vurum süresinin, işparçası işleme ve elektrot aşınma hızına etkisi.....	49
Şekil 1.90 Vurum süresinin elektrot kenar aşınması üzerine etkisi a) dış kenar aşınması b) iç kenar aşınması.....	50
Şekil 1.91 Boşalım akımının elektrot kenar aşınması üzerine etkisi a) dış kenar aşınması b) iç kenar aşınması.....	50
Şekil 2.1 EEİ'nin şematik görünüşü.....	55
Şekil 2.2 EDM tezgahının ana kısımları.....	58
Şekil 2.3 EEİ sırasında kıvılcım oluşumu ve işparçasından malzeme kaldırılması.....	59
Şekil 2.4 EEİ'de kıvılcım frekansının işparçası yüzeyine etkisi	60
Şekil 2.5 EEİ performansına parametrelerin etkileri	60
Şekil 2.6 EEİ ile delme ve oyma yöntemi	61
Şekil 2.7 EEİ ile kesme yöntemi.....	62
Şekil 2.8 EEİ ile taşlama yöntemi.....	62
Şekil 2.9 EEİ ile işlemenin fiziksel prensibi.....	63
Şekil 2.10 Elektrot ile işparçası arasındaki erozyon farklılığı	65
Şekil 2.11 Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri	66
Şekil 2.12 RC jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı	69
Şekil 2.13 RC jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi	69
Şekil 2.14 Döner vurum jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı.....	70
Şekil 2.15 Döner vurum jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi.....	70
Şekil 2.16 Isopulse jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı.....	71
Şekil 2.17 Isopulse jeneratörünün tipik akım zaman dalga grafiği	71
Şekil 2.18 Isopulse jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi.....	72
Şekil 2.19 Dielektrik sıvının elektrot içinden geçerek çalışma boşluğuna geçişi	76
Şekil 2.20 Dielektrik sıvının işparçası içinden geçerek çalışma boşluğuna geçişi	77

Şekil 2.21	Bazı belirli koşullarda normal akışlı sistemlerde eğimli yüzeylerin oluşumu.....	78
Şekil 2.22	Dielektrik sıvının vakum uygulanarak işparçası içinden emilmesi	78
Şekil 2.23	Dielektrik sıvının püskürtülerek çalışma boşluğuna gönderilmesi.....	79
Şekil 2.24	Çeşitli dielektrik sıvı uygulamalarının karşılaştırılması.....	80
Şekil 2.25	Yüzey pürüzlülüğünün üç boyutlu gösterilmesi.....	88
Şekil 2.26	Yüzey profilinin gösterilişi.....	89
Şekil 2.27	Pürüzlü düz yüzey (a), pürüzlü dalgalı yüzey (b).....	89
Şekil 2.28	Farklı akım şiddetlerinde yüzeyde meydana gelen pürüzlülük değişimi.....	90
Şekil 2.29	R_a yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi.....	91
Şekil 2.30	R_{max} yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi.....	91
Şekil 2.31	R_z yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi	92
Şekil 2.32	Geometrik aşınma bileşenleri	93
Şekil 2.33	Elektrot iç kenar ve dış kenar aşınması a) işleme öncesi b) işleme sonrası	94
Şekil 2.34	Elektrot ön yüzey aşınması a) işleme öncesi b) işleme sonrası	94
Şekil 3.1	Deneylerde kullanılan işparçaları ve elektrotlar	96
Şekil 3.2	Deneylerde kullanılan farklı çaplardaki elektrotlar	97
Şekil 3.3	Elektrotların teknik resmi	97
Şekil 3.4	Neu-ar marka CNC-P50 tipi elektroerozyon tezgahı	99
Şekil 3.5	Elektrot kütle kaybının hassas terazi ile ölçülmesi.....	101
Şekil 3.6	Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	102
Şekil 3.7	Yüzey pürüzlülüğünün ölçümü.....	102
Şekil 3.8	Profil Projeksiyon Cihazı.....	103
Şekil 4.1.1	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 10 μ s).....	106
Şekil 4.1.2	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 20 μ s).....	106
Şekil 4.1.3	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 45 μ s).....	106
Şekil 4.1.4	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 10 μ s).....	107
Şekil 4.1.5	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 20 μ s).....	107
Şekil 4.1.6	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 45 μ s).....	107
Şekil 4.1.7	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 10 μ s).....	108
Şekil 4.1.8	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 20 μ s).....	108
Şekil 4.1.9	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 45 μ s).....	108
Şekil 4.1.10	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 10 μ s).....	109
Şekil 4.1.11	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 20 μ s).....	109
Şekil 4.1.12	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 45 μ s).....	109
Şekil 4.1.13	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi	

	(20 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μ s)	110
Şekil 4.1.14	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μ s)	110
Şekil 4.1.15	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μ s).....	110
Şekil 4.1.16	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μ s)	111
Şekil 4.1.17	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μ s).....	111
Şekil 4.1.18	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μ s).....	111
Şekil 4.1.19	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μ s)	112
Şekil 4.1.20	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30)	112
Şekil 4.1.21	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300)	112
Şekil 4.1.22	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μ s)	113
Şekil 4.1.23	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μ s).....	113
Şekil 4.1.24	Boşalım akımı ve vurum süresinin İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektrotta ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μ s).....	113
Şekil 4.1.25	İşparçalarının deneylerden sonraki görünümü a) önden b) arkadan görünüm	114
Şekil 4.2.1	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 6 μ s, vurum süresi 10 μ s)	115
Şekil 4.2.2	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 6 μ s, vurum süresi 20 μ s)	115
Şekil 4.2.3	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 6 μ s, vurum süresi 45 μ s)	116
Şekil 4.2.4	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 30 μ s, vurum süresi 10 μ s)	116
Şekil 4.2.5	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 30 μ s, vurum süresi 20 μ s)	116
Şekil 4.2.6	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 30 μ s, vurum süresi 45 μ s)	117
Şekil 4.2.7	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 300 μ s, vurum süresi 10 μ s)	117
Şekil 4.2.8	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 300 μ s, vurum süresi 20 μ s)	117
Şekil 4.2.9	Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 300 μ s, vurum süresi 45 μ s)	118
Şekil 4.2.10	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (20 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 μ s).....	118
Şekil 4.2.11	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (20 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 μ s).....	118

Şekil 4.2.12	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (20 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 45 µs).....	119
Şekil 4.2.13	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (16 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 10 µs)	119
Şekil 4.2.14	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (16 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 20 µs)	119
Şekil 4.2.15	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (16 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 45 µs)	120
Şekil 4.2.16	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (12 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 10 µs)	120
Şekil 4.2.17	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (12 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 20 µs)	120
Şekil 4.2.18	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (12 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 45 µs)	121
Şekil 4.2.19	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (8 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 10 µs	121
Şekil 4.2.20	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (8 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 20 µs)	121
Şekil 4.2.21	Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin EAH'na etkisi (8 mm çaplı elektrot, vuruş süresi 45 µs)	122
Şekil 4.3.1	Boşalım akımının elektrot ortalama kenar yarıçapına etkisi (vuruş süresi 45 µs, vuruş bekleme süresi 6 µs).....	123
Şekil 4.3.2	Vuruş süresinin elektrot ortalama kenar yarıçapına etkisi (boşalım akımı 21 A, vuruş bekleme süresi 6 µs).....	124
Şekil 4.3.3	Vuruş bekleme süresinin elektrot ortalama kenar yarıçapına etkisi (boşalım akımı 15 A, vuruş süresi 45).....	124
Şekil 4.4.1	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 6 µs)	125
Şekil 4.4.2	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 30 µs).....	125
Şekil 4.4.3	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 300 µs).....	125
Şekil 4.4.4	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 6 µs)	126
Şekil 4.4.5	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 30 µs).....	126
Şekil 4.4.6	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 300 µs).....	126
Şekil 4.4.7	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 6 µs).....	127
Şekil 4.4.8	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 30 µs).....	127
Şekil 4.4.9	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 300 µs).....	127
Şekil 4.4.10	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş bekleme süresi 6 µs)	128
Şekil 4.4.11	Boşalım akımı ve vuruş süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi	

Şekil 4.5.11	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 μ s).....	137
Şekil 4.5.12	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 μ s).....	137
Şekil 4.5.13	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 9 A, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	138
Şekil 4.5.14	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 9 A, vurum bekleme süresi 30 μ s).....	138
Şekil 4.4.15	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 9 A, vurum bekleme süresi 300 μ s).....	138
Şekil 4.5.16	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 15 A, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	139
Şekil 4.5.17	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 15 A, vurum bekleme süresi 30 μ s).....	139
Şekil 4.5.18	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 15 A, vurum bekleme süresi 300 μ s).....	139
Şekil 4.5.19	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 21 A, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	140
Şekil 4.5.20	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 21 A, vurum bekleme süresi 30 μ s).....	140
Şekil 4.5.21	Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 21 A, vurum bekleme süresi 300 μ s).....	140
Şekil 4.6.1.1	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	147
Şekil 4.6.1.2	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 30 μ s).....	148
Şekil 4.6.1.3	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 300 μ s).....	148
Şekil 4.6.1.4	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	148
Şekil 4.6.1.5	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 30 μ s).....	149
Şekil 4.6.1.6	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 300 μ s).....	149
Şekil 4.6.1.7	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	149
Şekil 4.6.1.8	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 30 μ s).....	150
Şekil 4.6.1.9	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 300 μ s).....	150
Şekil 4.6.1.10	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	150
Şekil 4.6.1.11	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 30 μ s).....	151
Şekil 4.6.1.12	Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 300 μ s).....	151
Şekil 4.6.2.1	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi	

	(20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μ s).....	152
Şekil 4.6.2.2	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μ s).....	152
Şekil 4.6.2.3	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μ s).....	152
Şekil 4.6.2.4	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μ s).....	153
Şekil 4.6.2.5	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μ s).....	153
Şekil 4.6.2.6	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μ s).....	153
Şekil 4.6.2.7	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μ s).....	154
Şekil 4.6.2.8	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μ s).....	154
Şekil 4.6.2.9	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μ s).....	154
Şekil 4.6.2.10	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μ s).....	155
Şekil 4.6.2.11	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μ s).....	155
Şekil 4.6.2.12	Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μ s).....	155
Şekil 4.6.3.1	Enerji yoğunluğunun elektrot kenar yarıçapına etkisi (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	156
Şekil 4.6.3.2	Enerji yoğunluğunun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 15 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	157
Şekil 4.6.3.3	Enerji yoğunluğunun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 21 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	157
Şekil 4.6.3.4	Enerji yoğunluğunun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 21 A, vurum süresi 10 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	157
Şekil 4.6.3.5	Enerji yoğunluğunun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 21 A, vurum süresi 20 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s).....	158
Şekil 4.6.3.6	Enerji yoğunluğunun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 15 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 30 μ s).....	158
Şekil 4.6.3.7	Enerji yoğunluğunun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 15 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 300 μ s).....	158
Şekil 4.9.1	İşparçası işleme hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği	168
Şekil 4.9.2	Elektrot aşınma hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği	169
Şekil 4.9.3	İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği.....	170
Şekil 4.9.4	Elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğü hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği	171
Şekil 4.9.5	Elektrot ortalama kenar aşınması için sinyal/gürültü (db) grafiği	173

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 İşparçası malzemesinin kimyasal bileşimi.....	96
Çizelge 3.2 Elektrot malzemesinin bazı fiziksel özellikleri.....	97
Çizelge 3.3 Dielektrik sıvı özellikleri.....	98
Çizelge 3.4 Tezgaha ait teknik özellikler.....	98
Çizelge 3.5 Deneylerde kullanılan işleme parametreleri.....	100
Çizelge 3.6 Deney Tasarımı.....	104
Çizelge 4.1 İşparçası işleme Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	160
Çizelge 4.2 Elektrot Aşınma Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	161
Çizelge 4.3 İşparçası Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	161
Çizelge 4.4 Elektrotların Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	162
Çizelge 4.5 Elektrotların Ortalama Kenar Aşınması İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	163
Çizelge 4.6 Enerji Yoğunluğu Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	164
Çizelge 4.7 İşleme Performansının Çıktıları İçin Kullanılan Taguchi (L ₁₈) Ortogonal Dizisi.....	166
Çizelge 4.8 Kullanılan faktör (değişken) ve seviyeleri.....	167
Çizelge 4.9 Elektrot Ortalama Kenar Aşınması İçin Kullanılan Taguchi (L ₁₈) Ortogonal Dizisi.....	172

**ELEKTROEROZYONLA İŞLEMEDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN MALZEME GİDERİLMESİ
ve YÜZEY KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Şükrü KOCABAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erhan ALTAN

Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat KIYAK

Elektroerozyon ile işleme yöntemi; dielektrik sıvı içersine daldırılmış elektrot ve işparçası arasında bir dizi hızlı ve tekrarlanan elektriksel boşalımların etkisiyle işparçasından malzeme giderme esasına dayanan; kalıp imalat sektöründe, otomotiv, uçak ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılan geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Elektroerozyon ile işleme yönteminde işleme parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi için günümüze kadar birçok araştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada soğuk iş takım çeliğinden TS EN X155CrVMo12 (DIN 1.2379) işparçasının farklı çapa sahip % 99,99 saflıktaki elektrolitik bakır elektrotlar kullanılarak elektroerozyon yöntemiyle işlenmesinde, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresi, gibi en etken işlem parametrelerinin, işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), işparçası yüzey pürüzlülüğü ile elektrot yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması gibi işleme performansının çıktıklarına olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca elektroerozyon ile işlemede daha önceki çalışmalarda detaylı olarak değinilmemiş olan enerji yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Değişkenlerin Analizi (ANOVA) yönteminin uygulanmasıyla işleme performansının

çıktıları üzerine daha önemli etkisi olan işleme parametreleri belirlenmiştir. Taguchi deneysel tasarımı uygulanarak sonuçlar optimize edilmiş ve doğrulama testi yapılarak optimize edilen değerlerin doğruluğu değerlendirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, işparçası yüzey pürüzlülüğü, elektrot yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması boşalım akımının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Vurum süresinin artması ile birlikte işparçası işleme hızı, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Elektrot aşınma hızı, boşalım akımının 9 A ve 15 A olduğu deney şartlarında vurum süresinin artmasıyla azalırken, boşalım akımının 21 A ve vurum bekleme süresinin (30, 300 μ s) olduğu çalışmalarda, vurum süresinin artması elektrot aşınma miktarının artmasına neden olduğu görülmüştür. Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin az olduğu ve İİH, EAH ve elektrot kenar aşınması değerlerinin vurum bekleme süresi arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Vurum bekleme süresinin, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin az olduğu görülmüştür. Enerji yoğunluğundaki artışla birlikte işparçası işleme hızı, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektroerozyon ile işleme, malzeme giderme, enerji yoğunluğu, taguchi, ANOVA

**INVESTIGATION EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS ON MATERIAL REMOVAL AND
SURFACE QUALITY IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING**

Şükrü KOCABAŞ

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor : Prof. Erhan ALTAN

Co-Advisor : Asst. Prof. Murat KIYAK

Electric discharge machining (EDM) method is a nonconventional manufacturing method widely employed in mold manufacturing industry, automotive, aircraft and the aerospace industry base on the material removal through the effect of a series of rapid and repetitive electrical discharges between the electrode and the workpiece immersed into the dielectric fluid. Many researches have been conducted until present to determine the effects of processing parameters in the electro discharge machining method.

In this research, the effects of the most efficient process parameters such as discharge current, pulse on time and pulse off time on outcomes of processing performance such as material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR), surface roughness of workpiece, surface roughness of electrode and electrode edge wear have been examined through utilization of % 99,99 pure copper electrodes with different diameters in electrical discharge machining of materials from cold work tool steel TS EN X155CrVMo12 (DIN 1.2379) Moreover, the effect of energy density in electro-discharge machining that has not been addressed in detail in the previous researches has also been examined. Process parameters

which have more significant impact on the outcomes of processing performance have been determined through the Application of Analysis of Variance (ANOVA) method. The results have also been optimized by applying the Taguchi experimental design and the accuracy of the optimized values have been evaluated by the implementation of a verification test.

As a result of the experimental studies, material removal rate, electrode wear rate, workpiece surface roughness, electrode surface roughness and edge wear of the electrode have increased with increasing discharge current. Material removal rate, workpiece surface roughness and edge wear of the electrode values have increased with the increase of pulse on time.

Electrode wear rate has decreased with increasing pulse on time under test conditions where discharge current was 9 A and 15 A while under test conditions where discharge current was 21 A and pulse off time was (30, 300 μ s) in increased pulse on time was found to cause an increase in the amount of electrode wear. It was observed that pulse on time had less effect on the electrode surface roughness and MRR, EWR and electrode edge wear values decreased with increasing pulse off time. It was observed that pulse off time had less effect on workpiece surface roughness and electrode surface roughness. It was determined that material removal rate, workpiece surface roughness and electrode edge wear values increased with the increase in energy density.

Key words: Electric Discharge Machining, material removal, energy density, taguchi, ANOVA

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İmalat yöntemleri genelde Talaşlı ve Talaşsız imalat olmak üzere iki grupta toplanır. Ayrıca imalat yöntemleri Geleneksel İmalat Yöntemleri ve Geleneksel Olmayan İmalat Yöntemleri olarak da genellenebilir. Geleneksel yöntemlerde malzemedeki talaş kaldırma işlemi torna kalem, freze bıçağı, matkap ucu veya taşlama taşı gibi kesici takımlar kullanılarak yapılır. Mekanik kuvvet kullanılarak ve zorlama ile genellikle malzeme içinde kayma gerilmeleri yaratılarak malzeme üzerinden talaş kaldırılır. Geleneksel yöntemlerde kesici takım ile işparçası arasında talaş kaldırma işlemi sırasında sürekli olarak fiziksel temas ve göreceli bir hareket vardır. Talaş kaldırma işlemi özelliği olarak, geleneksel yöntemlerin işleme özellikleri ve sınırları, işparçasının mekanik özelliklerine bağlıdır. Özellikle akma gerilmesi yüksek olan malzemelerin, geleneksel yöntemlerle işlenmesinde önemli sorunlar olabilir. Bu sorunların giderilmesi için çok pahalı ve özel takımlar gerekebilir bazı durumlarda ise tamamen imkânsızdır. Geleneksel yöntemlerde takım ile işparçası arasındaki fiziksel temas ve kuvvet uygulama zorunluluğu nedeniyle takım boyutlarının çok küçük olması mümkün değildir. Bu nedenle küçük boyutlu işlerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor ya da bazı durumlarda imkânsız olabilmektedir. Geleneksel yöntemlerin çok uzun yıllardır kullanılmakta olduklarından, teknoloji birikiminin çok yüksek olması, geleneksel yöntemler için bir avantaj olarak sayılabilmektedir.

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri ise özellikle ikinci dünya savaşından sonra gelişme göstermiş ve çağdaş teknolojide yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemler geleneksel yöntemlerden farklı olarak fiziksel temas ve göreceli hareketin

olmadığı, mekanik kuvvet kullanmak yerine çeşitli enerji türlerinin yardımıyla malzeme işleyen, aşındıran veya şekillendiren yöntemlerdir [1].

Talaşlı imalat endüstrisinde kullanılan geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden birisi de elektriksel kıvılcımlarla aşındırma yöntemi olarak da bilinen elektroerozyon ile işleme (EEİ) yöntemidir. Bu yöntemde dielektrik sıvı içerisine daldırılmış elektrot ve işparçası arasında bir dizi hızlı ve tekrarlanan elektriksel boşalımların etkisiyle malzeme kaldırılması esasına dayanan yaygın olarak kullanılan geleneksel olmayan bir üretim yöntemidir [2-3].

İmalat endüstrisinde elektroerozyon ile işleme (EEİ) metotları içinde en yaygın olarak kullanılanları Dalma-EEİ ile Tel-EEİ yöntemleridir. Dalma – EEİ yönteminde, normal şartlarda elektrik iletmeyen sıvı (dielektrik sıvı) içine daldırılmış elektrik iletkenliğine sahip elektrot ile işparçası arasında oluşturulan kontrollü bir dizi elektriksel boşalımlar sayesinde işparçası yüzeyinden küçük bir bölgenin eritilmesi veya buharlaştırılması ve elektroerozyon sonucu oluşan işleme artıklarının işleme boşluğundan dielektrik sıvı yardımıyla uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır [4]. Tel-EEİ metodu ise, 0,05 ile 0,4 mm çaplı ve elektrik iletkenliğine sahip sürekli olarak belli bir hızda sürülen tel elektrot ile işparçası arasında oluşturulan elektriksel boşalımlar sayesinde işparçası kesitinden malzemenin sıvılaştırılması veya buharlaştırılması esasına dayanır. Tel-EEİ de dalma elektroerozyondaki gibi takım (elektrot) şeklinin işparçasına projeksiyonu söz konusu değildir. Dalma elektroerozyonunun işparçasındaki kör deliklerin açılmasında, tel elektroerozyonun ise işparçasının tüm kesitindeki profillerin kesilmesinde kullanıma uygunlukları elektroerozyonla işleme yönteminin iki farklı çeşidi arasındaki diğer önemli farktır [4-5].

Elektroerozyon ile işlemenin temelleri 1768 yılında İngiliz kimyacı J. Priestly tarafından kıvılcımın boşalımıyla metalin erozif olarak aşınmasını keşfetmesi ile ortaya çıkmıştır. Fakat uygulamanın pratik halde uygulanması için yüz yıldan fazla bir zamana ihtiyaç olmuştur. İlk EEİ uygulaması başlangıcı Mr. ve Mrs. Lazarenko tarafından II. Dünya Savaşı süreci içinde Moskava Teknik Enstitüsünde RC (relaxation circuit) devresini icat etmesiyle (1940) gerçekleştirilmiştir. Basit bir servo denetleyici kullanarak işparçası ve

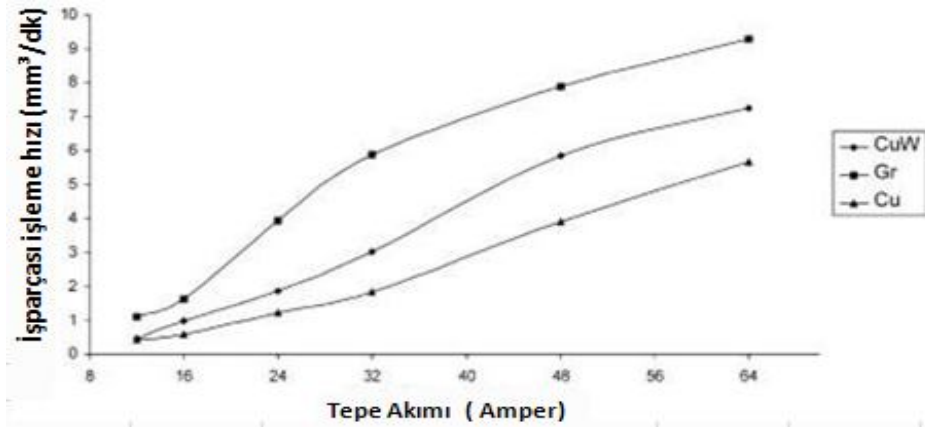
elektrot arasındaki boşluğu koruyarak, oluşan arkları azaltıp EDM yöntemini daha uygun bir hale getirmişlerdir [6,7,8].

Rus bilim adamları 1943 yılında elektriksel kıvılcımın aşındırıcı etkisini faydalı bir şekilde kullanmaya karar vererek yeni bir metal işleme metodu geliştirmişlerdir, Lazarenko devresi olarak bilinen kıvılcım jeneratör devresini kurarak elektriksel enerjinin verimli bir işleme yapabilmek için saklanıp korunabileceğini anlamışlardır ve bu şekilde ilk EEİ tezgâhını ortaya çıkarmışlardır. Bu jeneratör devresinin geliştirilmiş bir şekli bugün bile kullanılmakta olan birçok erozyon tezgâhında kullanılmaya devam etmektedir. 1960 yıllarının sonlarına doğru elektrik devrelerinin ve kontrol sistemlerin geliştirilmesi, EEİ'nin güvenilir ve hassas bir talaş işleme yöntemi olarak tanınmasını sağlamıştır. EEİ'de işparçası işleme hızının (İİH) artması, elektrot aşınma hızının (EAH) azalması, işparçasının yüzey kalitesinin artmasını özellikle 1980'li yıllarda Bilgisayarlı Sayısal Denetimli (BSD) bilgisayarların geliştirilmesi ile mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmeler EEİ tezgâhlarıyla daha hassas işlemlerin yapılabilmesini ve imalat sanayisindeki yerini almasını sağlamıştır [4-7].

1.1 Literatür Özeti

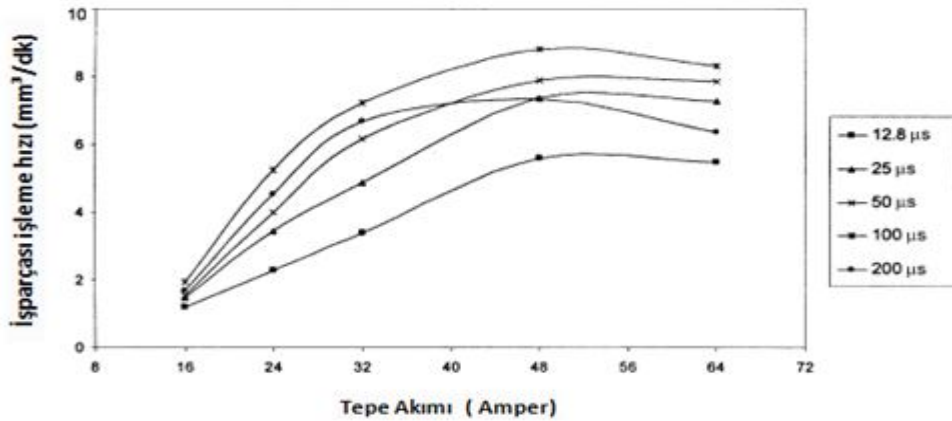
Literatür incelemesi yapılırken elektroerozyon ile işlemede (EEİ); işleme parametrelerinin malzeme giderilmesine ve yüzey kalitelerine etkileri göz önüne alınmıştır. Malzeme giderilmesine etkileri, malzeme kaldırma oranı (işparçası işleme hızı) ve elektrot aşınma hızı bakımında ele alınırken, yüzey kaliteleri olarak; işparçası ve elektrot ortalama yüzey pürüzlülük değerleri göz önüne alınmıştır. Elde edilen literatür incelemesi sonraki bölümlerde detaylı şekilde sunulmuştur.

Lee ve Li [9] tungsten karbürün işleme özelliklerine EDM işlem parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Bakır, bakır-tungsten (%25 Cu) ve grafit elektrotlar kullanılarak yapılan deneylerde akımın artışı ile İİH değerinin bütün elektrotların kullanımı sırasında arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 1.1). İşlem parametreleri olarak; gerilim 80 V, vurum süresi 25 μ s, vurum bekleme süresi 200 μ s, dielektrik basıncı 0.5 bar, negatif kutuplama yapılmış bakır, grafit, bakır tungsten olmak üzere üç farklı elektrot malzemesi ve işparçası olarak tungsten karbür kullanılmıştır.



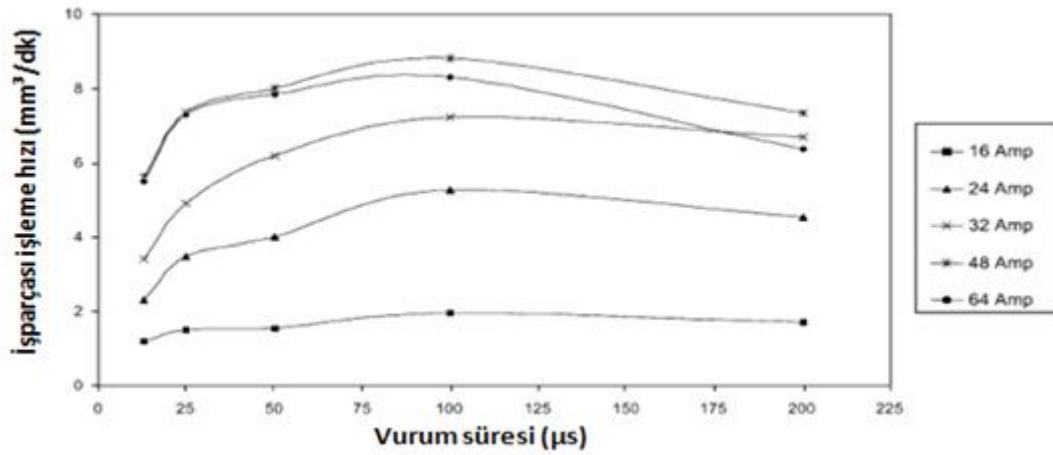
Şekil 1.1 Boşalım tepe akımının işparçası işleme hızına etkisi [9]

Yazarlar [9] bakır tungsten elektrotla farklı vurum sürelerinde yaptıkları deneylerde boşalım akımının artmasıyla ilk başlarda İİH'nın boşalım akımının artışıyla artarken, boşalım akımın daha da artması İİH'nın da düşüşe yol açtığı görülmüştür (Şekil 1.2). İşlem parametreleri olarak; vurum süresi (12.8, 25, 50, 100, 200 μ s), vurum bekleme süresi 100 μ s, boşluk gerilimi 120 V, dielektrik basıncı 0.5 bar, bakır tungsten elektrodun negatif kutuplama yapılmasıyla, tungsten karbür işparçası işlenmiştir.



Şekil 1.2 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi [9]

Araştırmacılar [9] bakır tungsten elektrotla farklı boşalım akımlarında yaptıkları deneylerde vurum süresinin artması ilk başlarda işparçası işleme hızının artmasına neden olurken vurum süresinin daha da artması işparçası işleme hızının azalmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.3). İşlem parametreleri olarak, boşalım akımı (16, 24, 32, 48, 64 A), vurum bekleme süresi 100 μ s, boşluk gerilimi 120 V, dielektrik basıncı 0.5 bar, bakır tungsten elektrodun negatif kutuplama yapılmasıyla, tungsten karbür işparçası işlenmiştir.



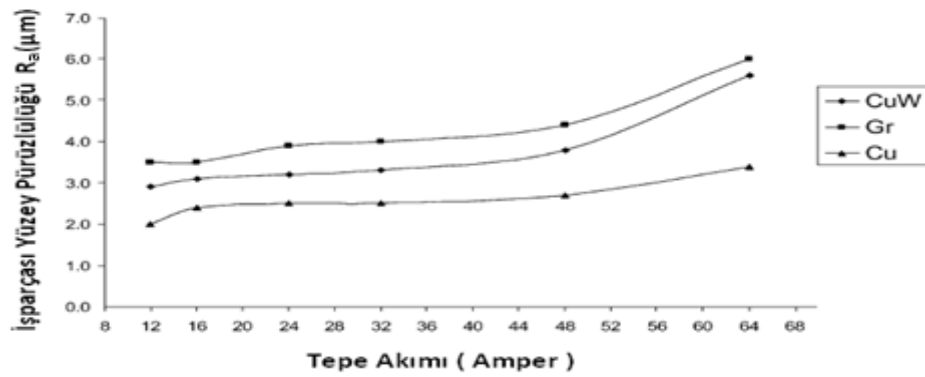
Şekil 1.3 Farklı boşalım akımlarında İİH'nın vurum süresiyle birlikte değışimi [9]

Lee ve Li [9] bakır tungsten elektrotla farklı boşalım akımların ile yaptıkları deneylerde vurum bekleme süresinin artmasıyla İİH'nın azaldığı görülmüştür (Şekil 1.4). Bakır tungsten elektrodun negatif kutuplama yapılarak tungsten karbür işparçası işlenmesi sırasında işlem parametreleri olarak; boşalım akımı 24 A, aralık gerilimi 120 V, vurum süresi 12.8 μ s, dielektik basıncı 0.5 bar alınmıştır.



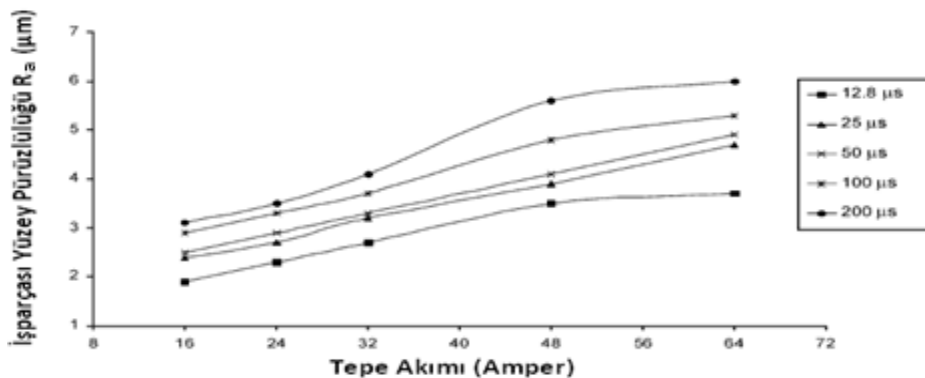
Şekil 1.4 Vurum bekleme süresinin işparçası işleme hızına etkisi [9]

Yazarlar [9] bakır, bakır-tungsten (%25 Cu) ve grafit elektrotlar kullanılarak yaptıkları deneylerde boşalım akımının artışı ile işparçası yüzey pürüzlülük değerinin bütün elektrotların kullanımı sırasında arttığını gözlenmiştir (Şekil 1.5). İşlem parametreleri olarak; boşalım gerilimi 80 V, vurum süresi 25 μ s, vurum bekleme süresi 200 μ s, dielektrik basıncı 0.5 bar, negatif kutuplama yapılarak bakır, grafit, bakır tungsten olmak üzere üç farklı elektrot malzemesi ve işparçası olarak da tungsten karbür kullanılmıştır.

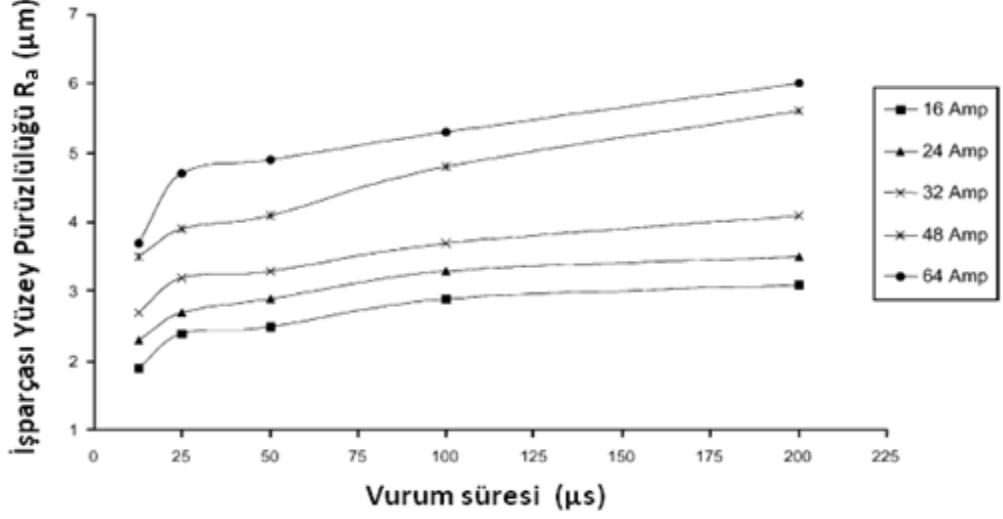


Şekil 1.5 Boşalım tepe akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [9]

Araştırmacılar [9] bakır tungsten elektrotla farklı vurum sürelerinde yaptıkları deneylerde boşalım akımının artmasıyla birlikte işparçası yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımıyla birlikte arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 1.6). Ayrıca bakır tungsten elektrotla farklı boşalım akımlarında yaptıkları deneylerde vurum süresinin artması işparçası yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.7). İşlem parametreleri olarak, boşalım akımı (16, 24, 32, 48, 64 A), vurum bekleme süresi 100 μ s, boşluk gerilimi 120 V, dielektrik basıncı 0.5 bar, bakır tungsten elektrodun negatif kutuplama yapılmasıyla, tungsten karbür işparçası işlenmiştir.

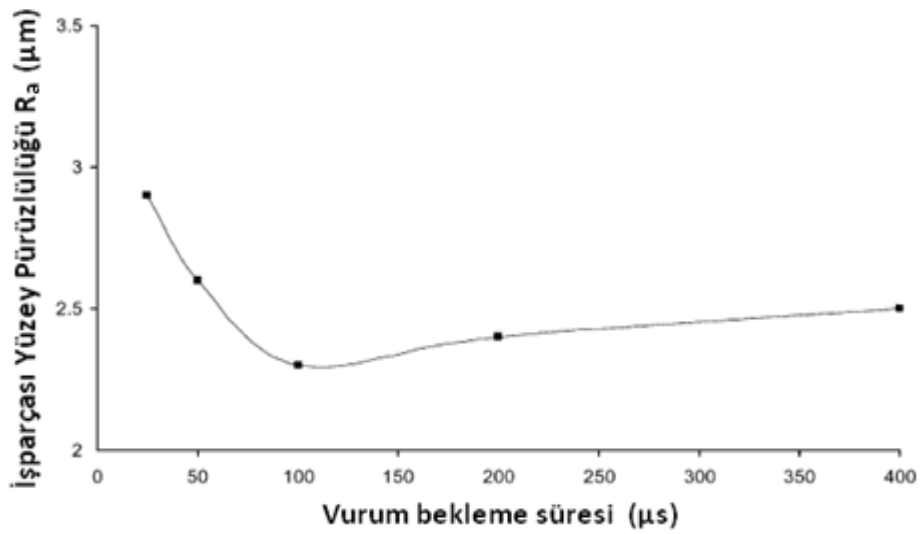


Şekil 1.6 Boşalım tepe akımı ve vurum süresinin işparçası pürüzlülüğüne etkisi [9]



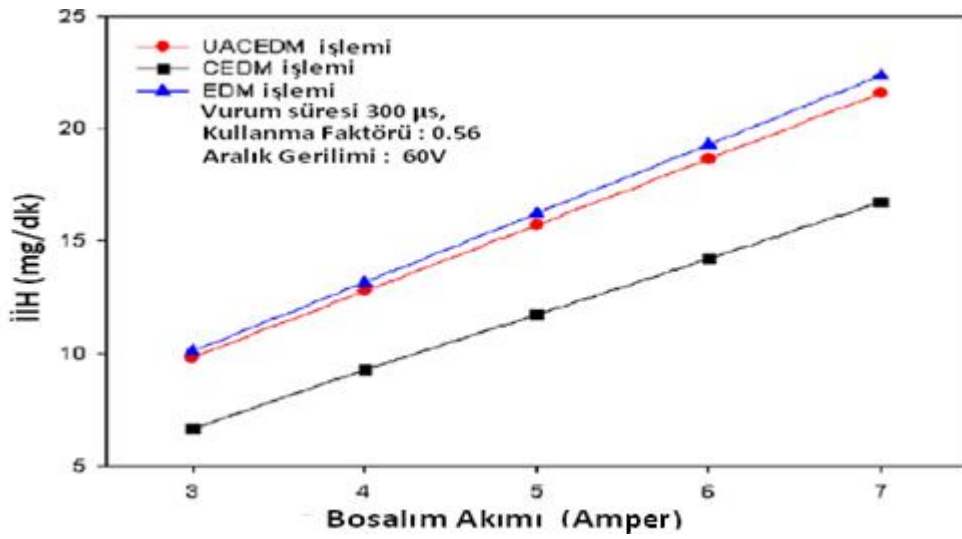
Şekil 1.7 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [9]

Lee ve Li [9] bakır tungsten elektrotla farklı boşalım akımlarında yaptıkları deneylerde vurum bekleme süresinin 100 µs'ye kadar artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğü değerinin vurum bekleme süresinin artmasıyla azaldığı, 100 µs'den sonra işparçası yüzey pürüzlülüğü değerinin vurum bekleme süresinin daha da artmasıyla artmaya başladığı görülmüştür (Şekil 1.8). Bakır tungsten elektrotun negatif kutuplama yapılarak tungsten karbür işparçasının işlenmesi sırasında İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı 24 A, aralık gerilimi 120 V, vurum süresi 12,8 µs, dielektrik basıncı 0.5 bar alınmıştır.

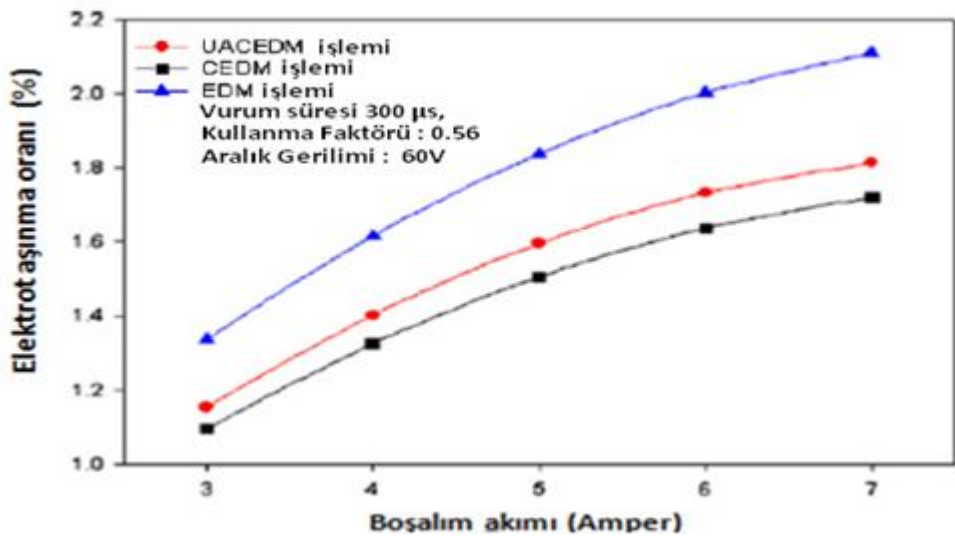


Şekil 1.8 Vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [9]

Srivastava ve Pandey [10] normal elektrot, kriyojenik olarak soğutmalı elektrot (CEDM) ve ultrasonik destekli kriyojenik olarak soğutmalı elektrotlar (UACEDM) kullanarak M2 sınıfı yüksek hız çeliğin işlenmesinde EDM işlem parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Dielektrik sıvı olarak kerosen kullanılmıştır ve her deney için 25 dk ayrılmıştır. Yapılan deneylerde boşalım akımının artışı ile işparçası işleme hızı (İİH) ve elektrot aşınma oranı ((elektrottaki aşınma miktarı/işparçası aşınma miktarı) x 100) değerlerinin bütün farklı elektrotların kullanımı sırasında arttığını gözlemlemiştir (Şekil 1.9 - Şekil 1.10).

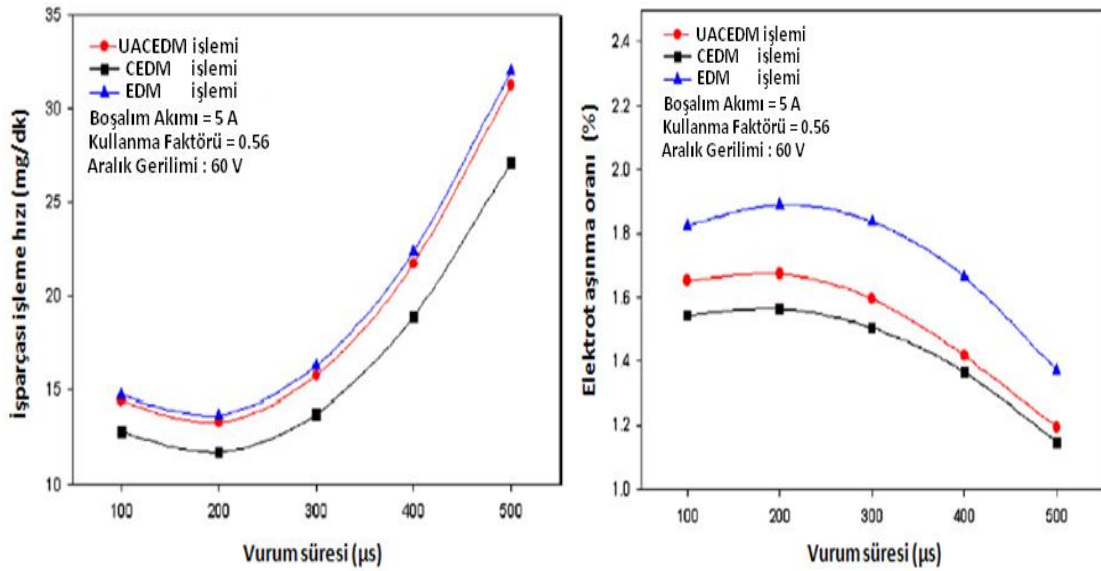


Şekil 1.9 Boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi [10]



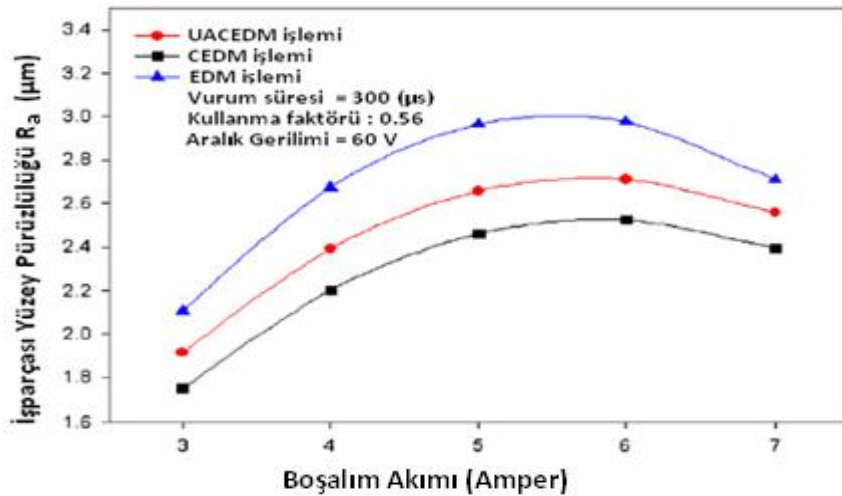
Şekil 1.10 Boşalım akımının elektrot aşınma oranına etkisi [10]

Araştırmacılar [10] yaptıkları deneylerde üç elektrot içinde ilk başlarda malzeme kaldırma hızı vurum süresi arttıkça azalmıştır ama vurum süresinin belli bir değerinden sonra malzeme kaldırma hızı vurum süresiyle beraber artmıştır. Vurum süresi arttıkça elektrot aşınma hızının önce vurum süresiyle birlikte arttığı, vurum süresinin daha da artmasıyla azaldığı gözlenmiştir (Şekil 1.11).



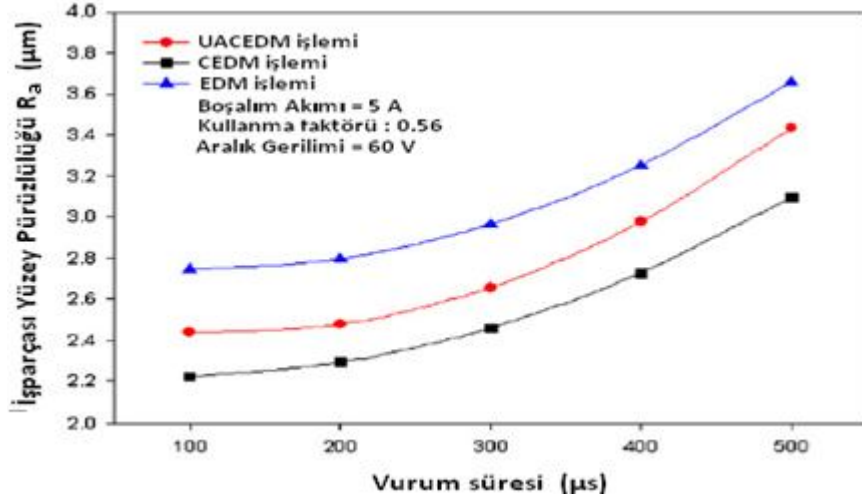
Şekil 1.11 İİH ve EAH'nın vurum süresiyle birlikte değişimi [10]

Yazarlar [10] yaptıkları deneylerde her üç elektrot malzemesi içinde işparçası yüzey pürüzlülüğünün ilk başlarda boşalım akımıyla birlikte arttığını, daha sonra boşalım akımının daha da artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlenmiştir (Şekil 1.12).



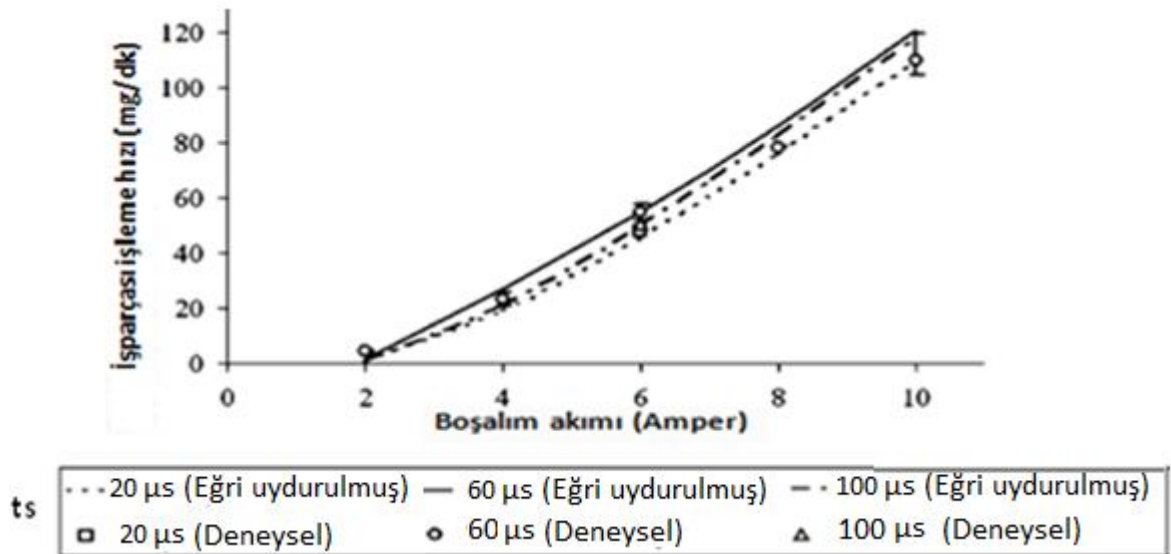
Şekil 1.12 Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [10]

Srivastava ve Pandey [10] yaptıkları deneylerde her üç elektrot malzemesi içinde işparçası yüzey pürüzlülüğünün, vurum süresinin artmasıyla arttığını gözlemlemiştir (Şekil 1.13).



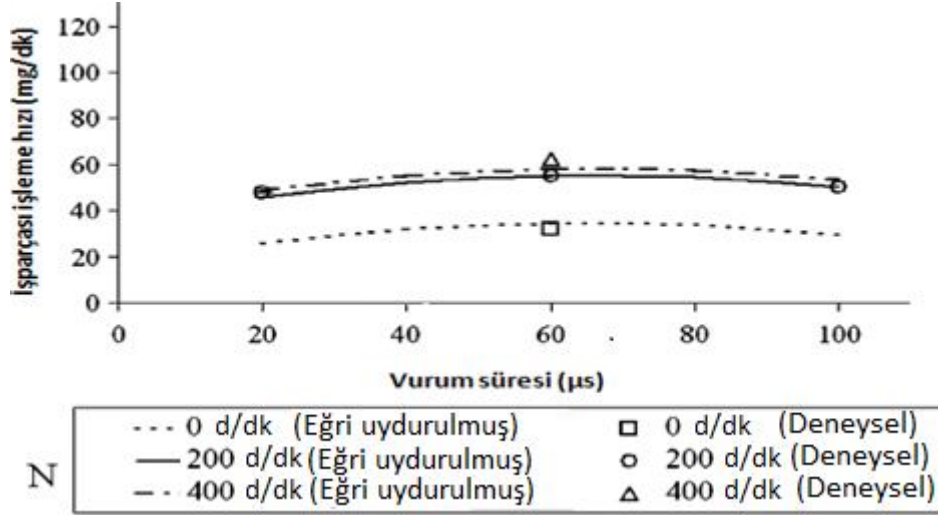
Şekil 1.13 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [10]

Kuppan vd. [11] nikel bazlı bir süper alaşım olan inconel 718 malzemesine, EDM yöntemiyle küçük derin delik delme işleminin yapılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı vurum sürelerinde boşalım akımının artmasıyla işparçası işleme hızının arttığını gözlemlemiştir (Şekil 1.14). Elektrot olarak elektrolitik bakır ve dielektrik olarak IPOL 450 kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (2, 4, 6, 8, 10 A), vurum süresi (20, 40, 60 µs), boşluk gerilimi 40 V alınmıştır.



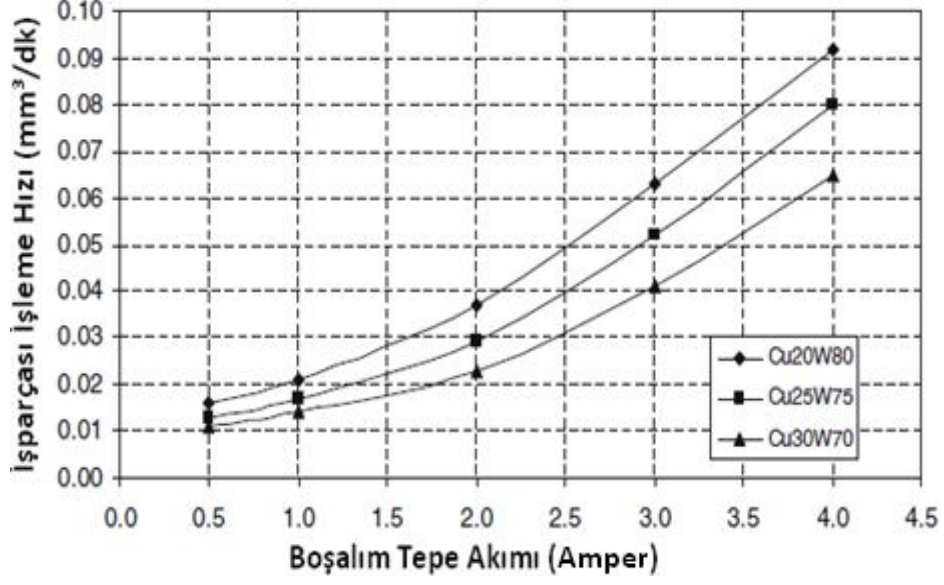
Şekil 1.14 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi [11]

Kuppan vd. [11] yaptıkları deneysel çalışmada vurum süresi arttıkça işparçası işleme hızı önce vurum süresiyle birlikte artış göstermişken, vurum süresinin daha da artmasıyla işparçası işleme hızının azalmaya başladığı görülmüştür (Şekil1.15).



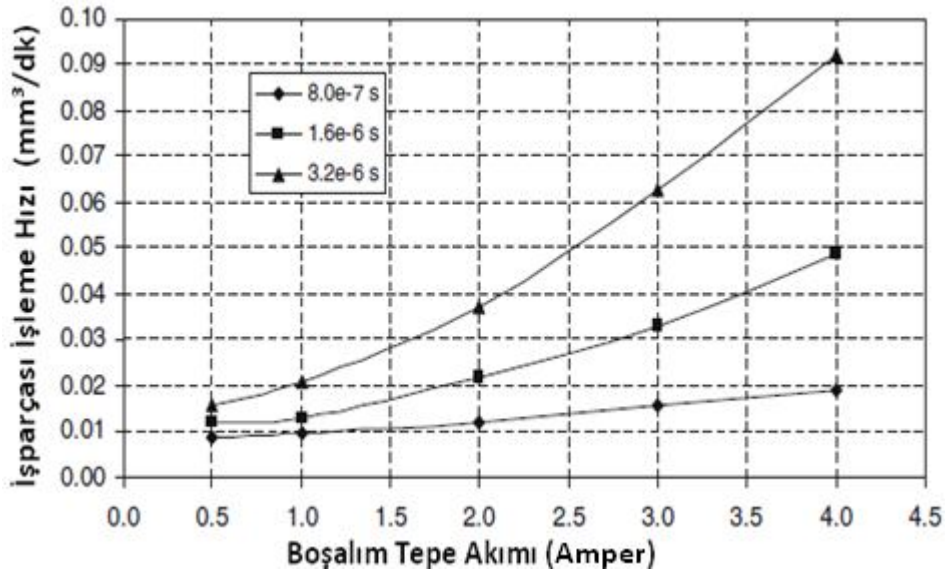
Şekil 1.15 İşparçası işleme hızının vurum süresiyle birlikte değişimi [11]

Jose [12], 53 HRC ye kadar sertleştirilmiş AISI H13 takım çeliği üzerine helisel dış boşluğunun bakır–tungsten alaşımı (Cu20W80, Cu25W75, Cu30W70) negatif kutuplanmış üç elektrot malzemesi kullanarak planetsel EDM yöntemiyle açılması üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Boşalım akımı arttıkça işparçası işleme hızının her üç elektrodun da kullanımı sırasında arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.16). İşlem parametreleri olarak; boşalım tepe akımı olarak (0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 A), boşalım gerilimi 30 V, vurum süresi 3.2 µs, vurum bekleme süresi 3.2 µs, dielektrik sıvı olarak Castrol SE180 dielektrik sıvı basıncı 0.4 bar olarak alınmıştır.



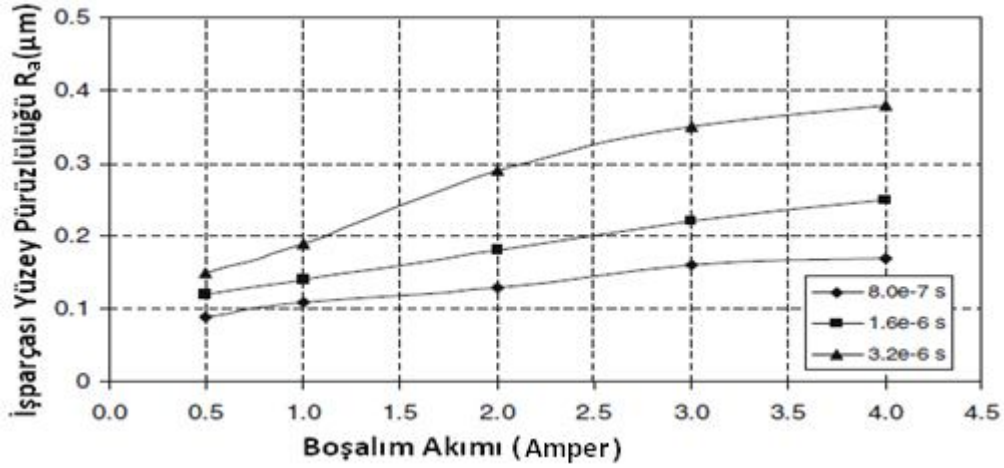
Şekil 1.16 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi [12]

Jose [12], (Cu20W80) alaşımı elektrot malzemesini kullanarak farklı vurum sürelerinde yaptığı deneysel çalışmada boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla İİH'nın arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.17). İşlem parametreleri olarak; boşalım tepe akımı (0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 A), boşalım gerilimi 30 V, kullanma faktörü ($t_s/(t_s+t_p)$) 50 %, vurum süresi (0.8, 1.6, 3.2 μ s) ve dielektrik sıvı basıncı 0.4 bar alınmıştır.



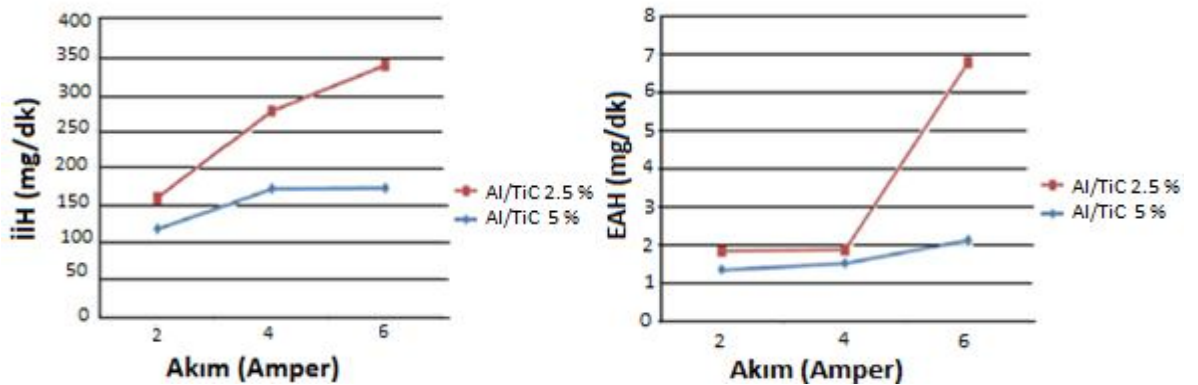
Şekil 1.17 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi [12]

Jose [12], (Cu₂₀W₈₀) alaşımı elektrot malzemesini kullanarak yaptığı deneysel çalışmalarda boşalım akımı ve vurum süresi arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin arttığını gözlemlemiştir (şekil 1.18). İşlem parametreleri olarak; boşalım tepe akımı (0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 A), vurum süresi (0.8, 1.6, 3.2 μ s), boşalım gerilimi 30 V, kullanma faktörü ($t_s/(t_s+t_p)$) 50 % ve dielektrik basıncı 0.4 bar alınmıştır.



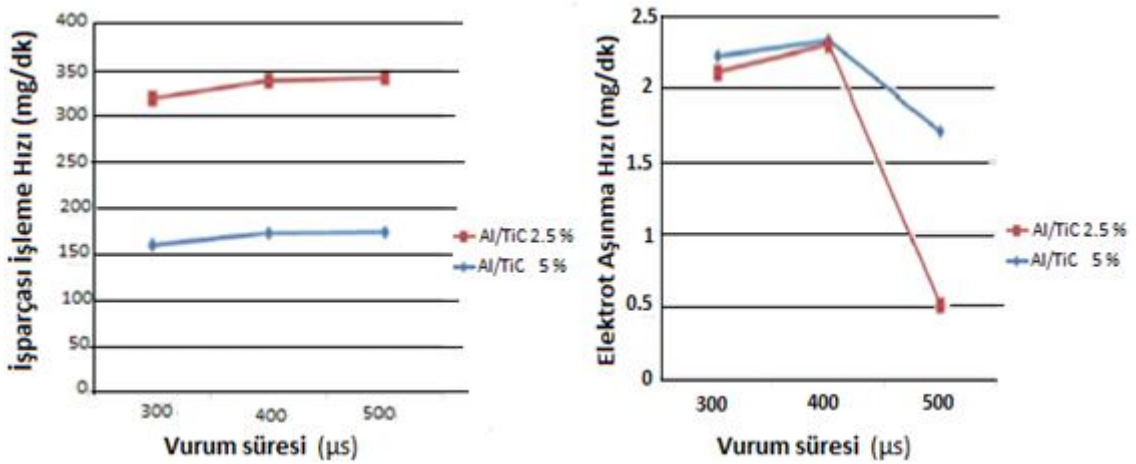
şekil 1.18 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [12]

Senthilkumar ve Omprakash [13] sinterlenmiş alümiyum metal matrisli kompozitinin (%5 ve 2.5 TiC ile güçlendirilmiş) işlenmesi sırasında EDM işlem parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Yapılan deneylerde boşalım akımının artmasıyla birlikte işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızının arttığını görülmüştür (şekil 1.19). İşlem parametreleri olarak; Boşalım akımı (2, 4, 6 A), vurum süresi (300, 400, 500 μ s), dielektrik sıvı basıncı (0.25, 0.5, 0.75 kgf/cm²), vurum bekleme zamanı 150 μ s, boşluk (aralık) gerilimi 45 V, elektrot malzemesi olarak elektrolitik bakır ve dielektrik olarak kerosen kullanılmıştır.



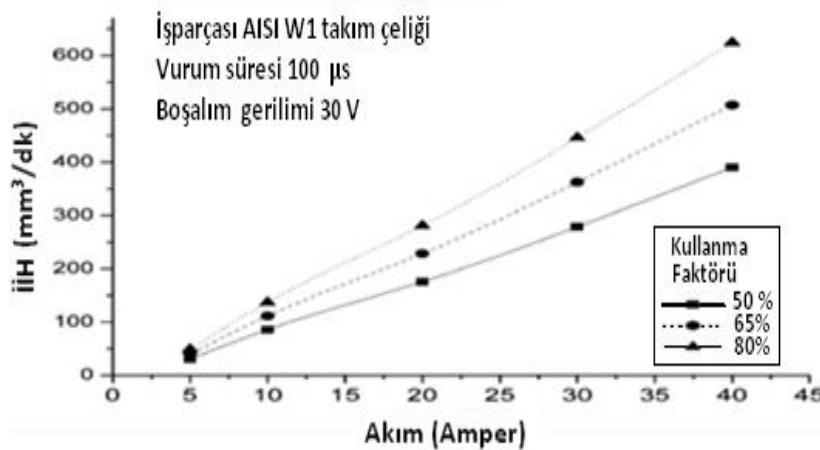
şekil 1.19 Boşalım akımının İİH ve EAH'na etkisi [13]

Araştırmacılar [13] yaptıkları deneysel çalışmalarda vurum süresi arttıkça ilk başlarda İİH ve EAH vurum süresiyle birlikte artış göstermiştir, vurum süresi optimum bir değere ulaştıktan sonra İİH üzerinde görülür bir iyileşme olmazken, EAH'ında kademeli bir azalma görülmüştür (Şekil 1.20). İşlem parametreleri olarak; Boşalım akımı (2, 4, 6 A), vurum süresi (300, 400, 500 μ s), dielektrik sıvı basıncı (0.25, 0.5, 0.75 kgf/cm²), vurum bekleme zamanı 150 μ s, boşluk gerilimi 45 V, elektrot malzemesi olarak elektrolitik bakır ve dielektrik olarak kerosen kullanılmıştır.

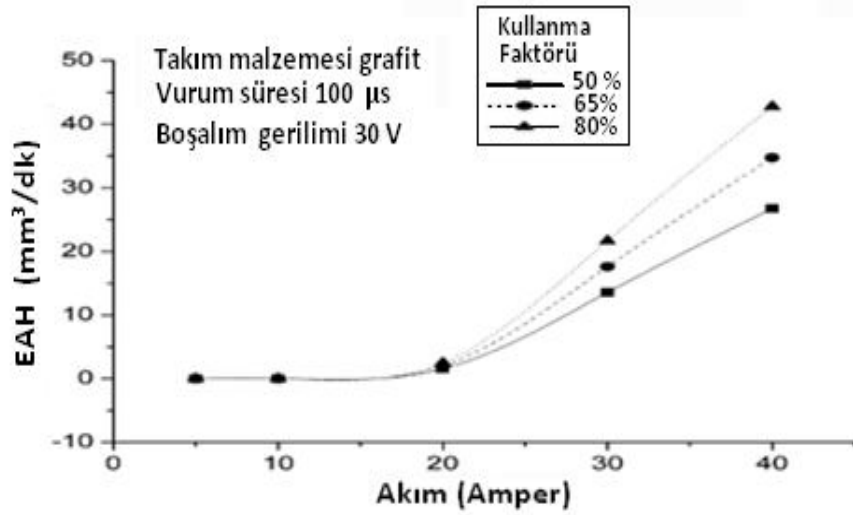


Şekil 1.20 İİH ve EAH'nın vurum süresiyle birlikte değişimi [13]

Joshi ve Pande [14] sonlu elemanlar modeli ve yapay sinir ağı kullanarak EDM işlemi için akıllı bir modelin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Model analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Yapılan deneylerde boşalım akımının artmasıyla birlikte işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızının arttığı görülmüştür (Şekil 1.21 - 1.22)

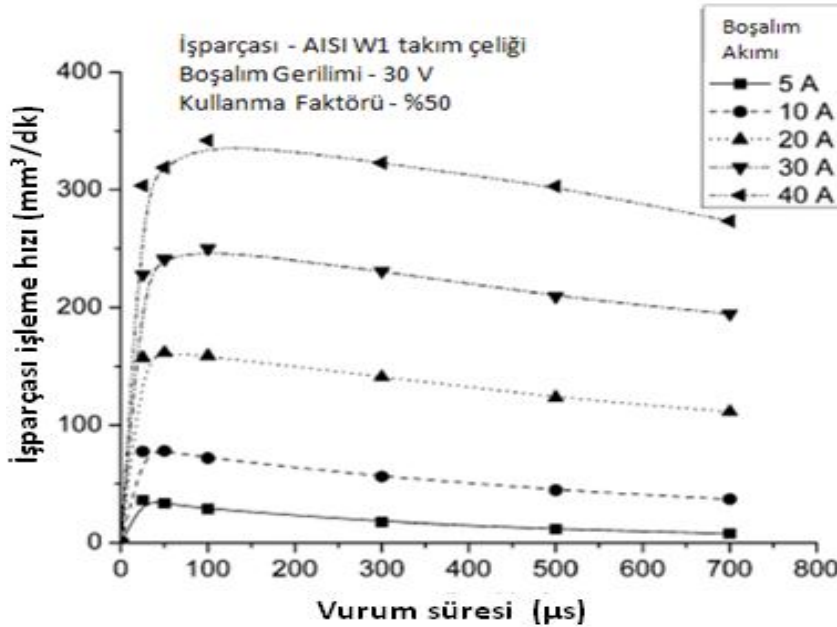


Şekil 1.21 Farklı kullanma faktörlerindeki boşalım akımının İİH'na etkisi [14]

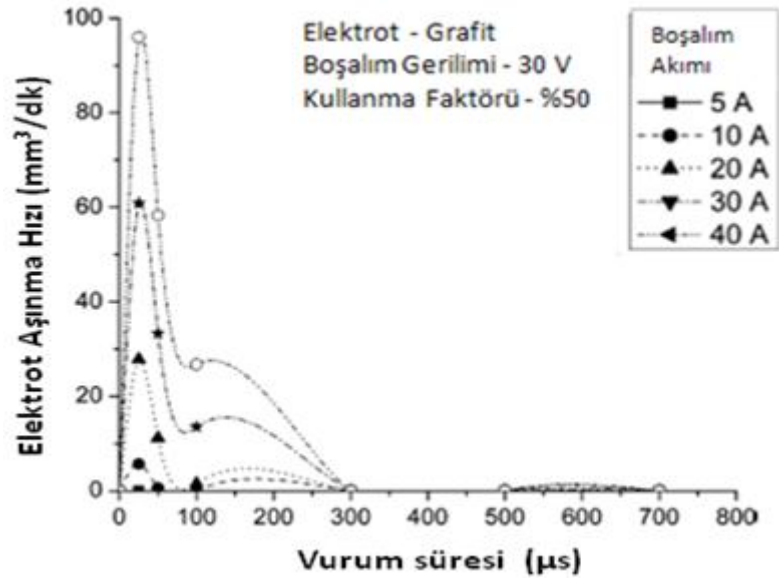


Şekil 1.22 Farklı kullanma faktörlerindeki boşalım akımının EAH'na etkisi [14]

Araştırmacılar [14] farklı boşalım akımlarında yaptıkları deneysel çalışmada, vurum süresi arttıkça ilk başlarda işparçası işleme ve elektrot aşınma hızı vurum süresiyle artarak maksimum değere ulaştıktan sonra vurum süresinin daha artmasıyla işparçası işleme ve elektrot aşınma hızının azalmaya başladığı görülmüştür. Boşalım akımının artması İİH ve EAH'nın artmasına neden olmuştur (Şekil 1.23 - 1.24).

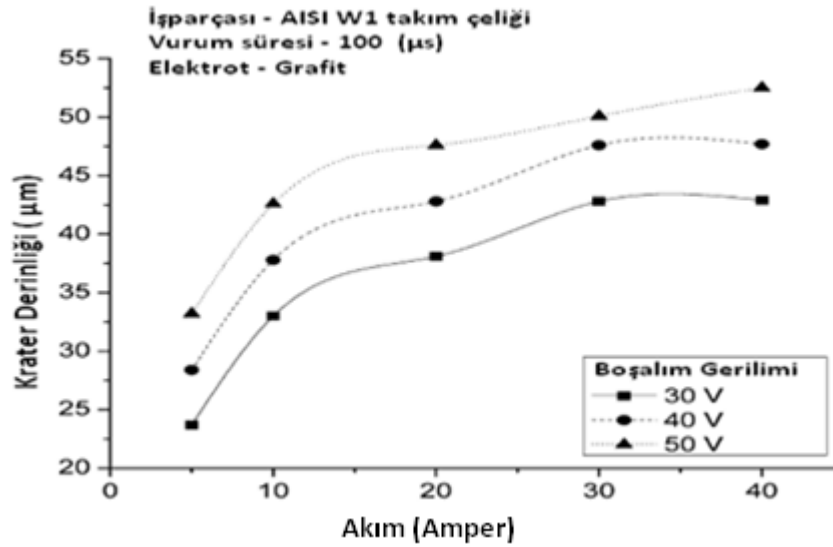


Şekil 1.23 Farklı boşalım akımlarında, İİH'nın vurum süresiyle değişimi [14]



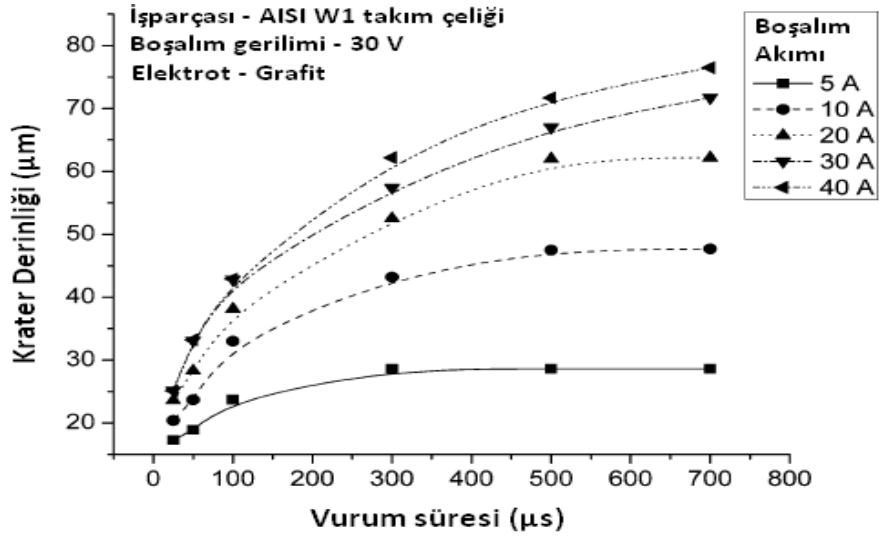
Şekil 1.24 Farklı boşalım akımlarında, EAH'nın vurum süresiyle değişimi [14]

Yazarlar [14] yaptıkları deneysel çalışmada, farklı boşalım gerilimlerinde yapılan deneysel çalışmada boşalım akımı ve boşalım gerilimin artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.25).



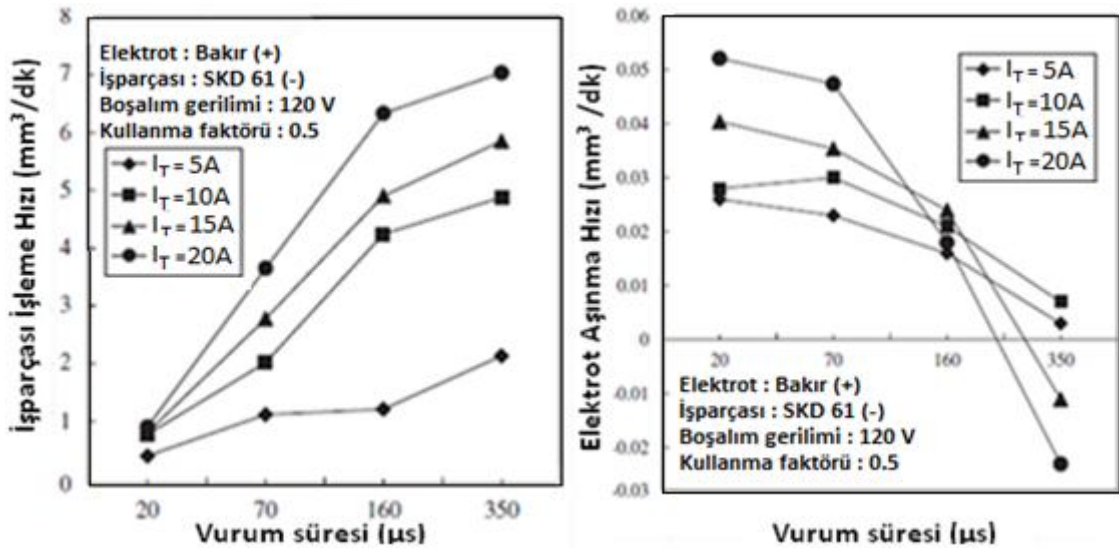
Şekil 1.25 Boşalım akımının işparçası krater derinliği (yüzey pürüzlülüğüne) etkisi [14]

Joshi ve Pande [14] farklı boşalım akımlarında yaptıkları deneysel çalışmada, vurum süresinin artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.26).



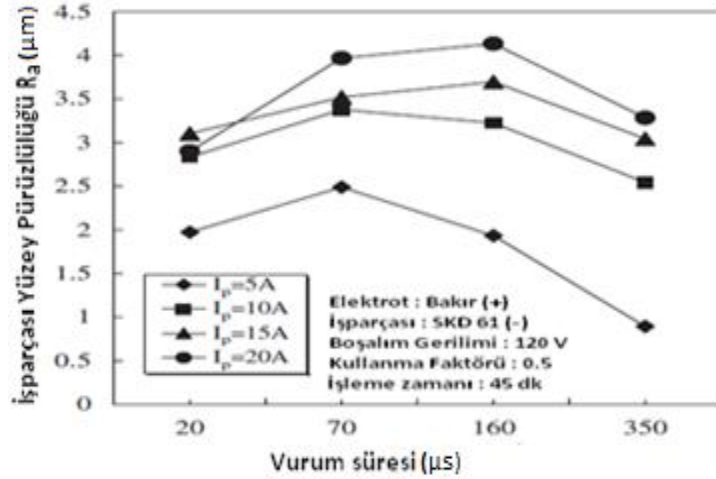
Şekil 1.26 Vurum süresi ve boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [14]

Lin ve Lie [15] manyetik kuvvet yardımıyla elektroerozyon sonucu oluşan metalsel parçacıklarının çalışma aralığından uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak için manyetik kuvveti geleneksel EDM makinasına ekleyerek manyetik destekli EDM gibi yeni bir işlem oluşturup işlem parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. İşparçası malzemesi SKD 61, elektrot malzemesi bakır ve dielektrik olarak kerosenin kullanılmasıyla yapılan deneysel çalışmada boşalım akımı arttıkça İİH ve EAH boşalım tepe akımıyla birlikte artış gösterirken, vurum süresinin artması İİH'nin artmasına neden olurken EAH'nın azalmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.27).



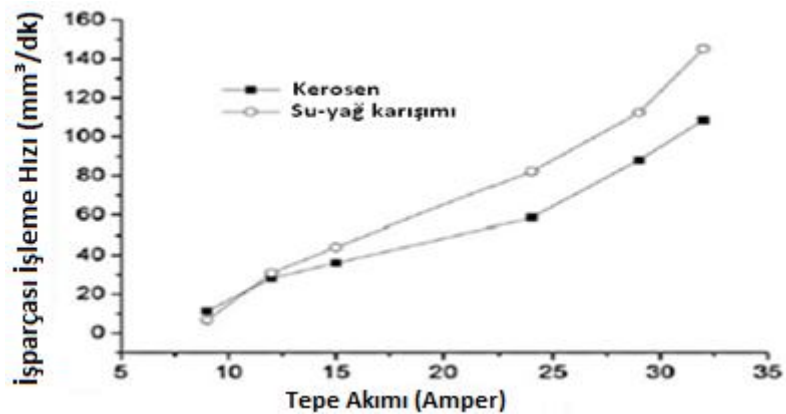
Şekil 1.27 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının İİH ve EAH'na etkisi [15]

Yazarlar [15] yaptıkları deneysel çalışmada, boşalım akımı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri boşalım akımıyla birlikte artış göstermiştir. Vurum süresinin artması ilk başlarda yüzey pürüzlülük değerinin artmasına neden olurken, vurum süresinin daha da artması işparçası yüzey pürüzlülük değerinin azalmasına neden olmuştur (Şekil 1.28).



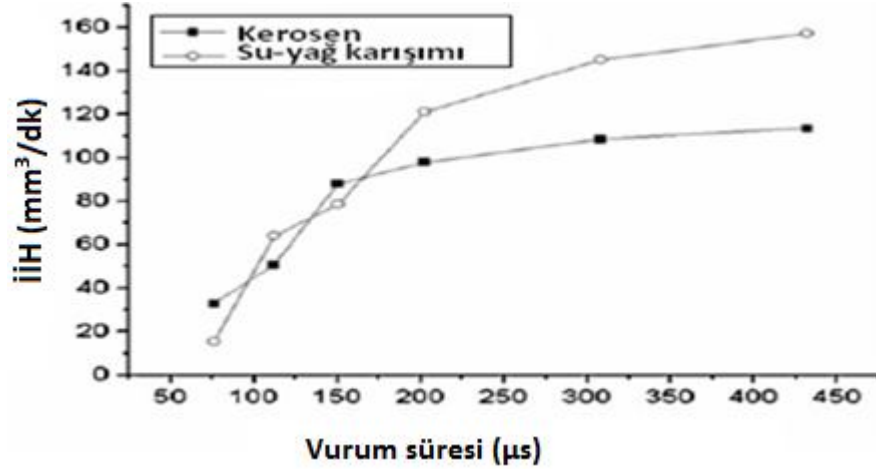
Şekil 1.28 Vurum süresi ve boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [15]

Zhang vd. [16] dalma elektroerozyon işlemi için yeni bir çeşit dielektrik olarak su- yağ karışımı (%66 makine yağı %34 deiyonize su) önermişlerdir. Bu yağ-su karışımının mekanik işleme özellikleri incelenmiştir ve kerosen ile karşılaştırılmıştır. Her iki dielektrik sıvı kullanımı sırasında da, boşalım akımının artmasıyla, işparçası işleme hızının arttığı görülmüştür (Şekil 1.29). İşlem parametreleri olarak; boşalım tepe akımı (9, 12, 15, 24, 29, 32 A), vurum süresi (76, 112, 150, 202, 308, 432 µs), vurum bekleme süresi 48 µs, işleme zamanı 5 dk, elektrot malzemesi olarak negatif kutuplanmış bakır elektrot, işparçası olarak yumuşak çelik ve dielektrik sıvı olarak kerosen ve su-yağ karışımı kullanılmıştır.



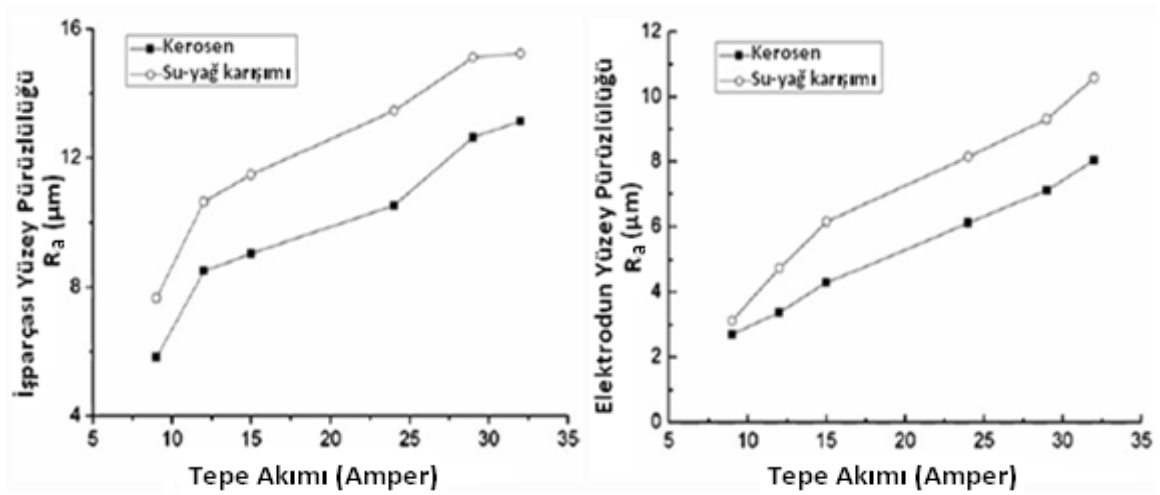
Şekil 1.29 Boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi [16]

Araştırmacılar [16] yaptıkları deneysel çalışmada her iki dielektrik sıvı kullanımını sırasında, vurum süresinin artması işparçası işleme hızının artmasına neden olduğu görölmüştür (şekil 1.30).



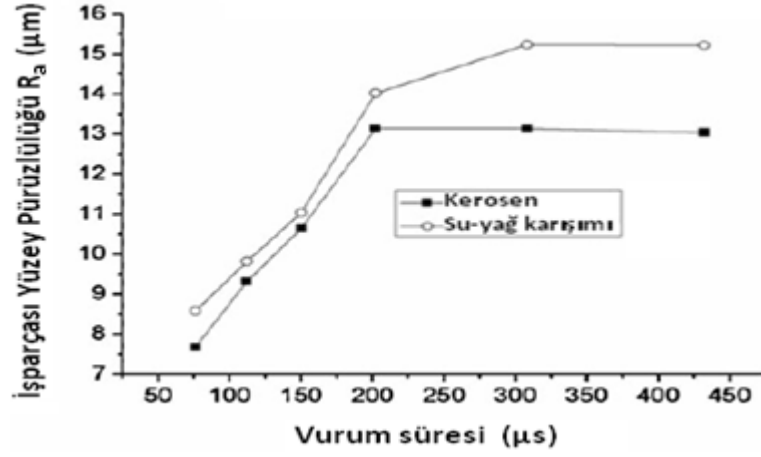
şekil 1.30 işparçası işleme hızının vurum süresiyle değişimi [16]

Yazarlar [16] yaptıkları deneysel çalışmada, boşalım akımının artmasıyla her iki dielektrik sıvı kullanımını sırasında işparçası ve elektrot yüzey pürüzlölüğünün arttığı görölmüştür (şekil 1.31).



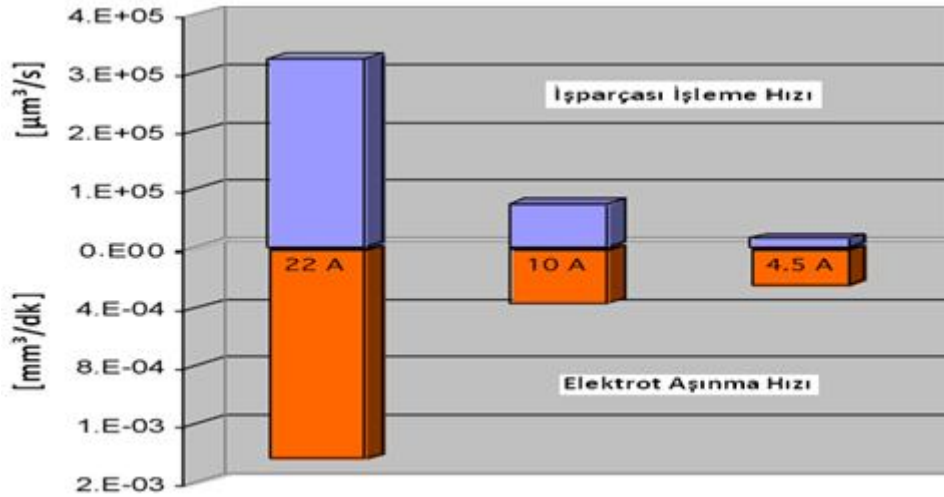
şekil 1.31 Boşalım akımının işparçası ve elektrot yüzey pürüzlölüğüne etkisi [16]

Yanzhen vd. [16] yaptıkları deneysel çalışmada, vurum süresinin artmasıyla her iki dielektrik sıvı kullanımını sırasında da ilk başlarda işparçası yüzey pürüzlölüğünün vurum süresiyle birlikte artarken, vurum süresinin daha fazla artması işparçası yüzey pürüzlölüğünün azalmasına yol açtığı görölmüştür (şekil 1.32).



Şekil 1.32 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [16]

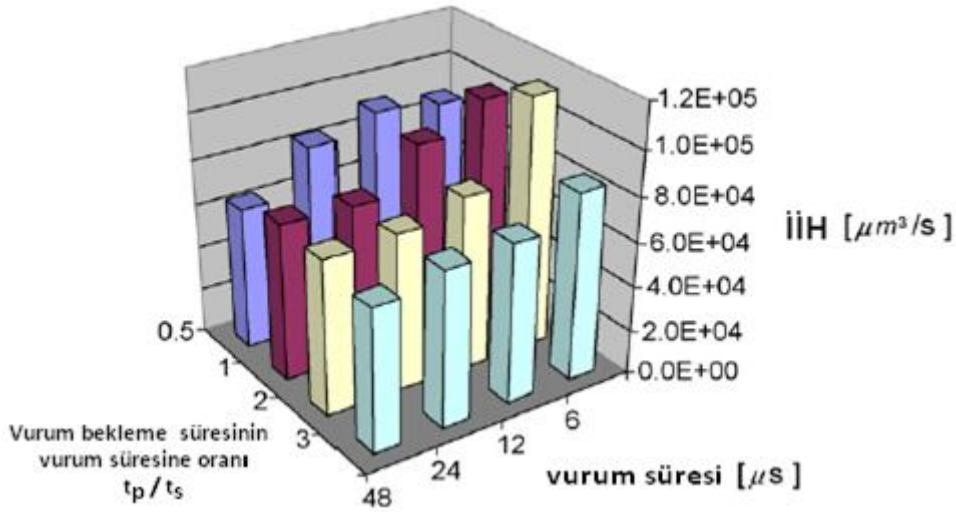
Rahman vd. [17] EDM darbe durumunun mikro EDM özellikleri üzerine etkileri incelemiştir. İşparçası olarak SUS 304 paslanmaz çelik, elektrot olarak tungsten, dielektrik sıvı olarak saf suyun kullanılmasıyla yapılan deneylerde boşalım akımının artmasıyla beraber işparçası işleme hızının ve elektrot aşınma hızının arttığı görülmüştür (Şekil 1.33). İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (4.5, 10, 11.03, 22.06, A), vurum süresi (6, 12, 24, 48 μs) ve gerilimi olarak (75, 150 V) alınmıştır.



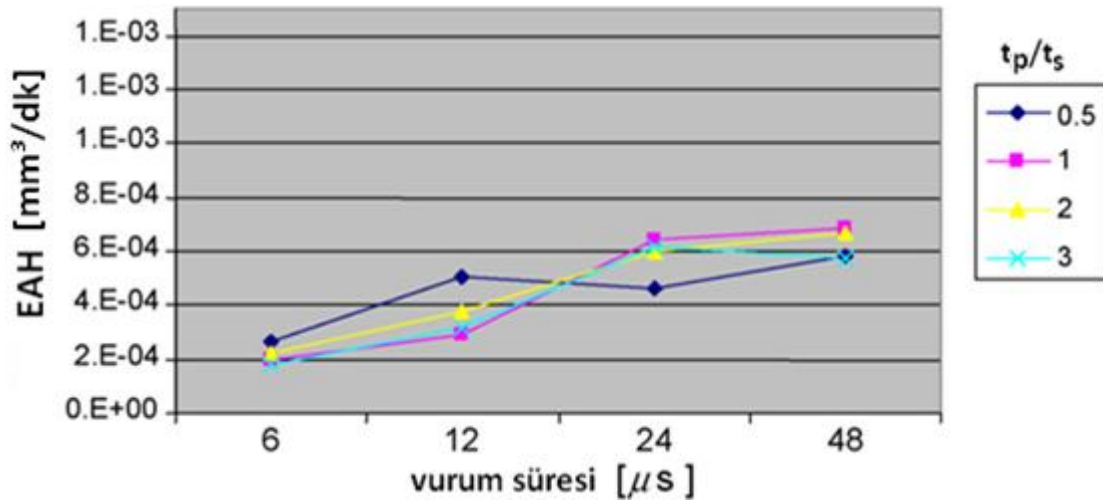
Şekil 1.33 Boşalım akımının işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızına etkisi [17]

Araştırmacılar [17] yaptıkları deneysel çalışmada, nispeten daha düşük vurum sürelerinde, daha yüksek malzeme kaldırma hızı ve daha düşük takım (elektrot) aşınma hızları olduğu görülmüştür (Şekil 1.34-1.35). İşlem parametreleri olarak boşalım akımı

10 A, vurum süresi (6, 12, 24, 48 μs) ve vurum bekleme süresinin (t_p), vurum süresine (t_s) oranı olarak (0.5, 1, 2, 3) seçilmiştir.



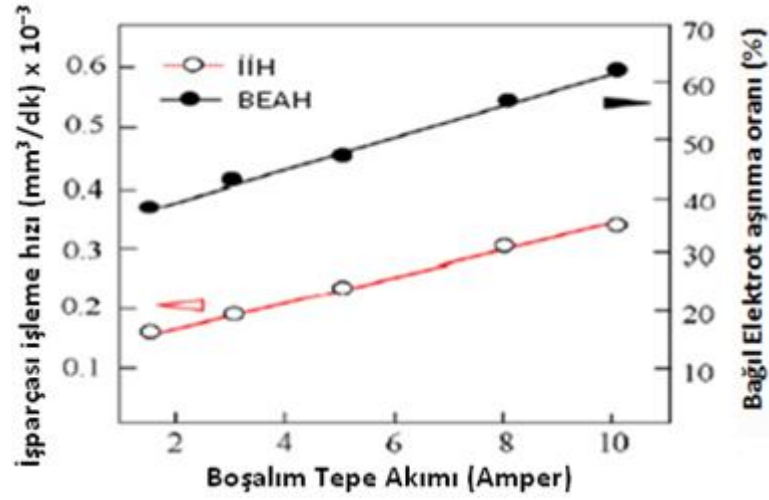
Şekil 1.34 İşparçası işleme hızının vurum süresiyle değişimi [17]



Şekil 1.35 Elektrot aşınma hızının, vurum süresiyle değişimi [17]

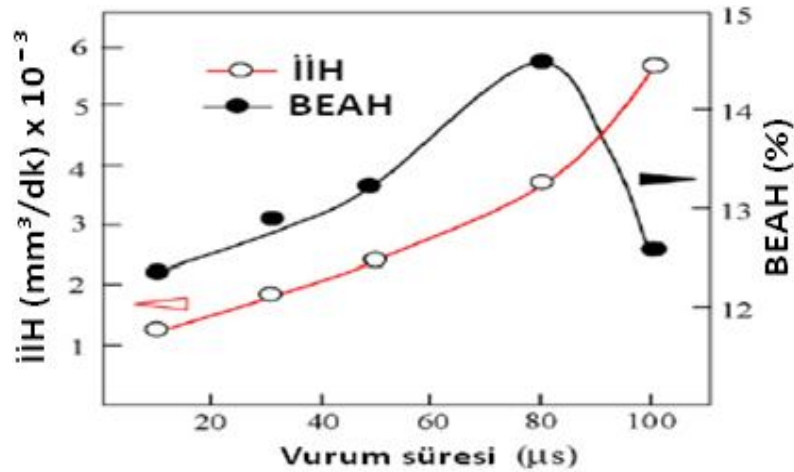
Chen vd. [18] yeni bir boru kesme mekanizmasını elektroerozyon ile işlemeyle, birleştirerek tasarlamışlardır. İşparçası olarak SUS 304 paslanmaz çelik malzemesi, elektrot olarak bakır ve dielektrik sıvı olarak kerosenin kullanılmasıyla yapılan deneylerde boşalım akımının artmasıyla, bağlı elektrot aşınma hızı (BEAH) (elektrottaki aşınma miktarı/işparçası aşınma miktarı) x 100) ve işparçası işleme hızının arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.36). Deney parametreleri olarak; boşalım tepe akımı (1, 3, 5,

8, 10 A), vurum süresi (10, 30, 50, 80, 100 μ s), işleme zamanı 20 dakika ve kutuplama olarak (+), (-) kutuplama yapılmıştır.



Şekil 1.36 Boşalım tepe akımının İİH ve BEAH'na etkisi [18]

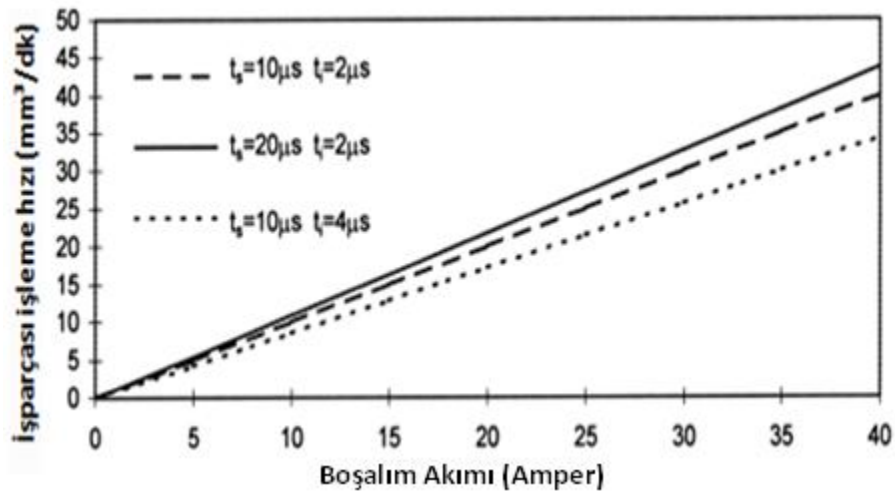
Araştırmacılar [18] yaptıkları deneysel çalışmada, işparçası işleme hızının vurum süresiyle beraber sürekli arttığı gözlenmiştir. Bağlı elektrot aşınma miktarı ilk başlarda vurum süresinin artmasıyla beraber artış göstermişken, vurum süresinin daha da artmasıyla azalmıştır (Şekil 1.37). İşlem parametreleri olarak; boşalım tepe akımı 5 A, vurum süresi olarak (20, 40, 60, 80, 100 μ s), elektrot malzemesi bakır, işparçası olarak SUS 304 paslanmaz çelik malzemesi ve dielektrik olarak kerosen kullanılmıştır.



Şekil 1.37 İşparçası işleme ve bağlı elektrot aşınma hızının vurum süresiyle değişimi [18]

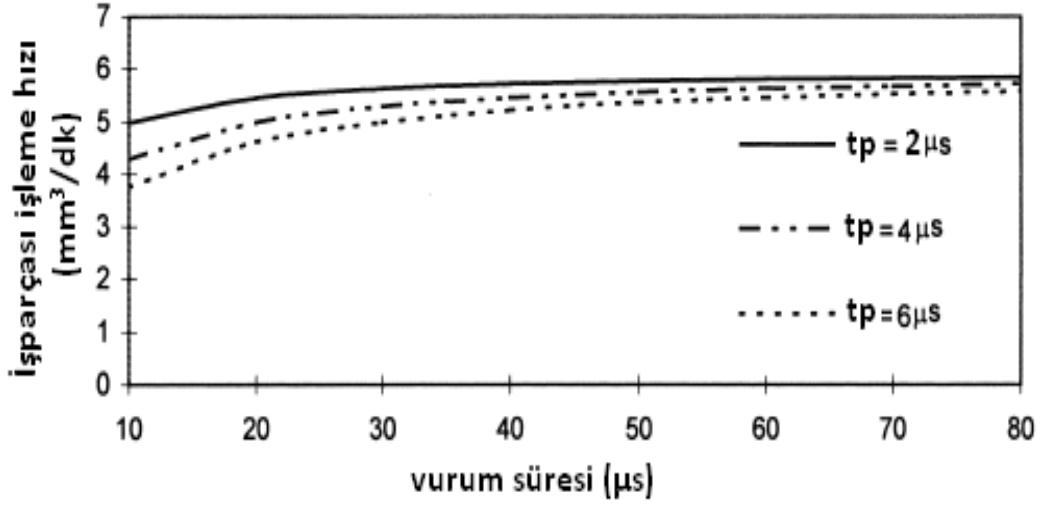
Chen ve Mahdivian [19] EDM ile işleme sırasında işparçası malzemesinin işleme hızını ve yüzey kalitesini tahmin etmek için teorik bir model geliştirmişlerdir. Deneysel

sonuçlarla teorik olarak yapılan tahminler karşılaştırıldığında uyduğu gözlenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda işparçası işleme hızının çeşitli vurum süresi ve vurum bekleme sürelerinde boşalım akımıyla beraber doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.38). İşparçası olarak yoğunluğu $7.8 \times \text{gr/cm}^3$, ergime noktası $1282 \text{ }^\circ\text{C}$ olan yumuşak çelik, elektrot olarak negatif kutuplama yapılmış bakır ve dielektrik olarak Castrol SE-185 kullanılmıştır. Deney parametreleri olarak; boşalım akımı (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 A), vurum süresi (10, 20 μs) ve vurum bekleme süresi (2, 4 μs) seçilmiştir.



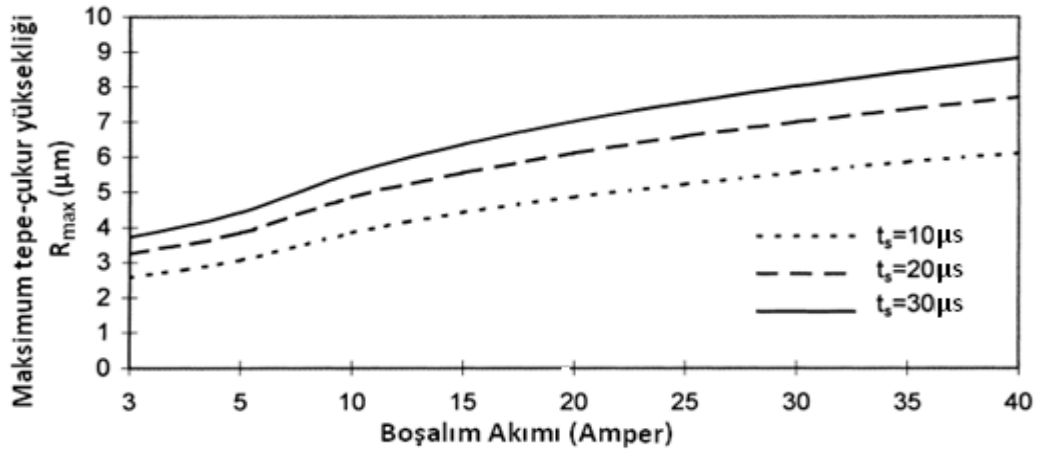
Şekil 1.38 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi [19]

Araştırmacılar [19] yaptıkları deneysel çalışmalarda, işparçası işleme hızının çeşitli vurum ve vurum bekleme sürelerinde, vurum süresinin artmasıyla arttığı gözlenmiştir. İşparçası işleme hızı, vurum süresinin artmasıyla ilk başlarda belirgin olarak artmıştır, vurum süresinin daha da fazla artmasıyla işparçası işleme hızında çok az bir artış gözlenmiştir. Vurum bekleme süresi arttıkça işparçası işleme hızının azaldığı görülmüştür (Şekil 1.39). İşparçası olarak, yoğunluğu $7.8 \times \text{gr/cm}^3$ olan ergime noktası $1282 \text{ }^\circ\text{C}$ olan yumuşak çelik, elektrot olarak negatif kutuplama yapılmış bakır ve dielektrik sıvı olarak Castrol SE-185 kullanılmıştır. Deney parametreleri olarak; vurum süresi (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 μs), vurum bekleme süresi (2, 4, 6, μs) alınmıştır.



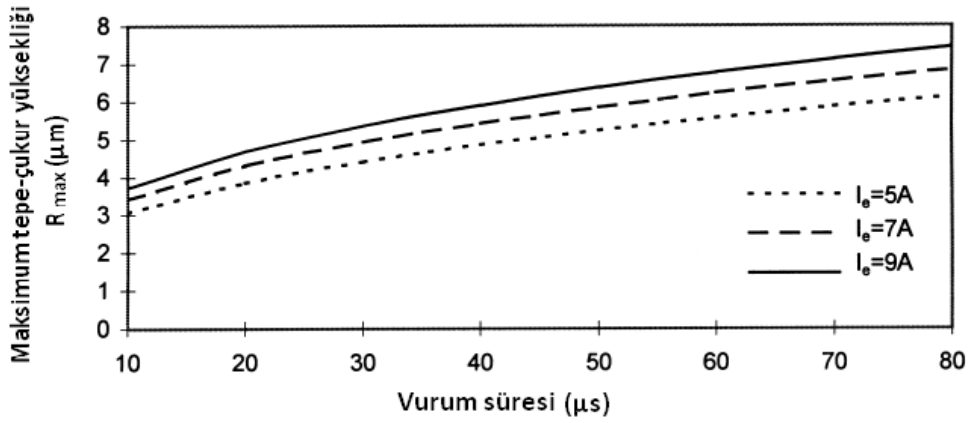
Şekil 1.39 Vurum süresi ve vurum bekleme süresinin, İİH'na etkisi [19]

Yazarlar [19] çeşitli boşalım akımları ve vurum sürelerinde yaptıkları deneysel çalışmalarda işparçası yüzey pürüzlülüğünün (R_{maks}) boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür (Şekil 1.40). Deney parametreleri olarak; vurum süresi (10, 20, 30 μ s), boşalım akımı (3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 A) alınmıştır.



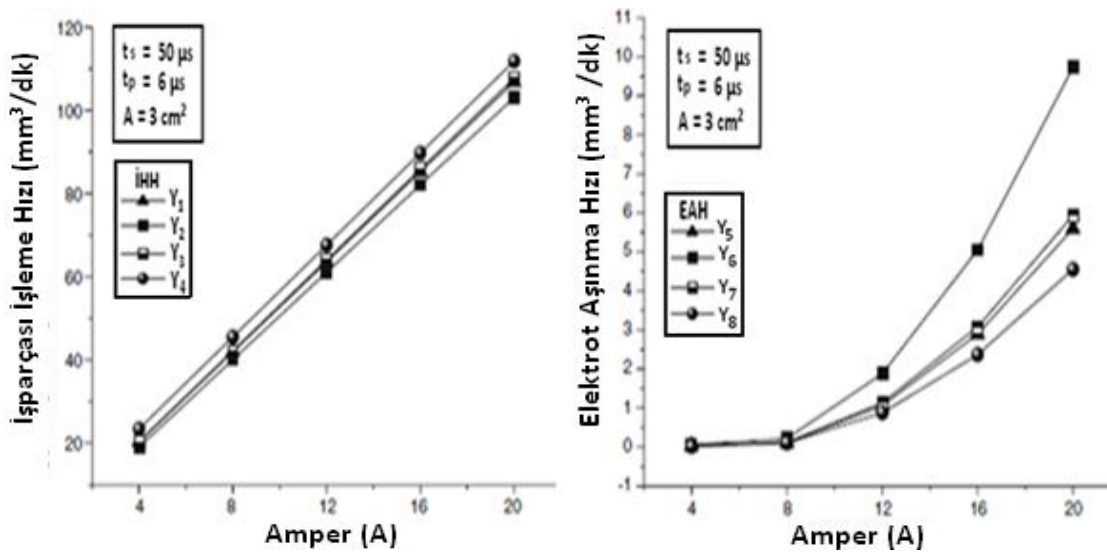
Şekil 1.40 Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [19]

Chen ve Mahdivian [19] çeşitli boşalım akımları ve vurum sürelerinde yaptıkları deneysel çalışmalarda işparçası yüzey pürüzlülüğünün (R_{maks}) vurum süresi ve boşalım akımının artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür (Şekil 1.41). Deney parametreleri olarak; vurum süresi (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 μ s), boşalım akımı (5, 7, 9 A) alınmıştır.



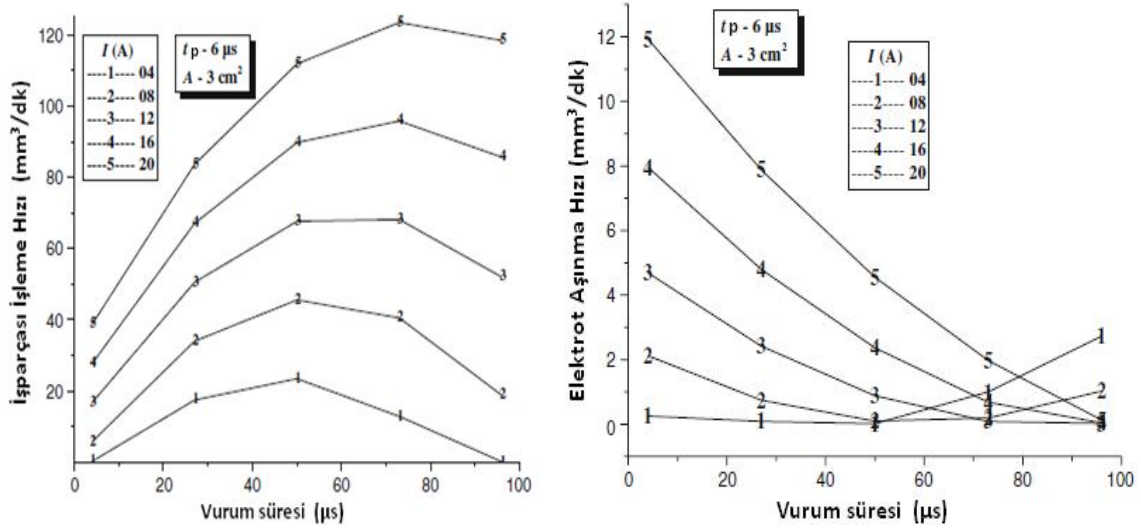
Şekil 1.41 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [19]

Sohani vd. [20] elektroerozyon ile işleme sırasında boyut faktörleri boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi ve takım alanı gibi işlem parametreleriyle alakalı olan farklı şekillere sahip elektrotların etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarda İİH'nın boşalım akımıyla beraber doğrusal bir şekilde arttığı, EAH'nın ise boşalım akımıyla beraber doğrusal olmayan bir şekilde arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.42). İşleme parametreleri olarak; işparçası malzemesi orta karbonlu çelik olan EN8, elektrot malzemesi olarak farklı şekil (üçgen, kare, dikdörtgen, daire) ve boyutlardaki elektrolitik bakır, dielektrik olarak kerosen, boşalım akımı 12 A, vurum süresi 50 μs, vurum bekleme süresi 6 μs ve elektrot (takım) alanı olarak da $A = 3 \text{ cm}^2$ alınmıştır. (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) ve (Y_5, Y_6, Y_7, Y_8) ifadeleri sırasıyla üçgen, kare, dikdörtgen ve daire şeklindeki elektrotları göstermektedir.



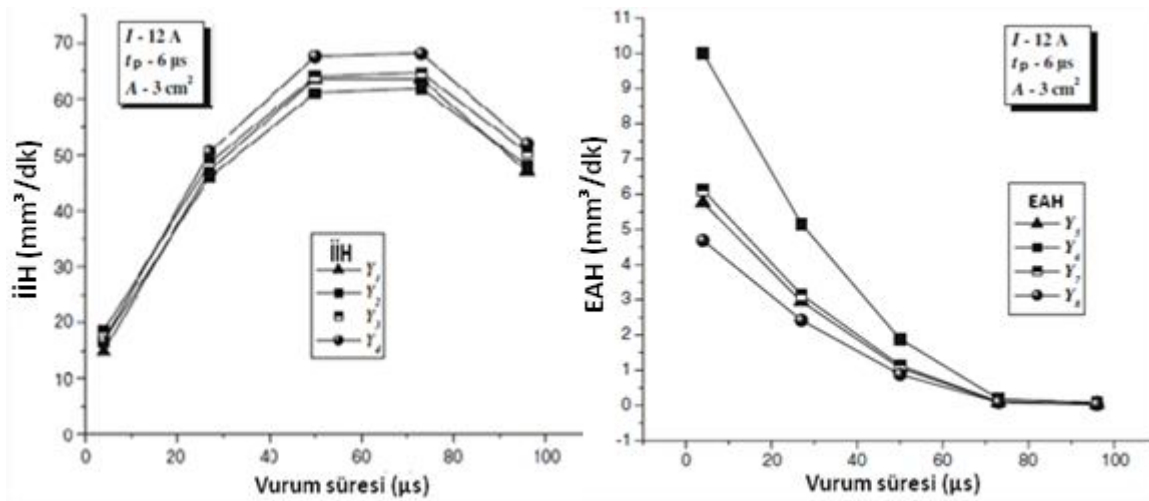
Şekil 1.42 Boşalım akımının işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızına etkisi [20]

Araştırmacılar [20] dairesel şekle sahip elektrotla farklı vurum süreleri ve akımlarında yaptıkları deneylerde, İİH ve EAH'nın tüm vurum sürelerinde boşalım akımının artmasıyla artış göstermiştir (Şekil 1.43). İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (4, 8, 12, 16, 20 A), vurum süresi (20, 40, 60, 80, 100 μ s), vurum bekleme süresi 6 μ s, ve elektrot alanı olarak $A = 3 \text{ cm}^2$ alınmıştır.



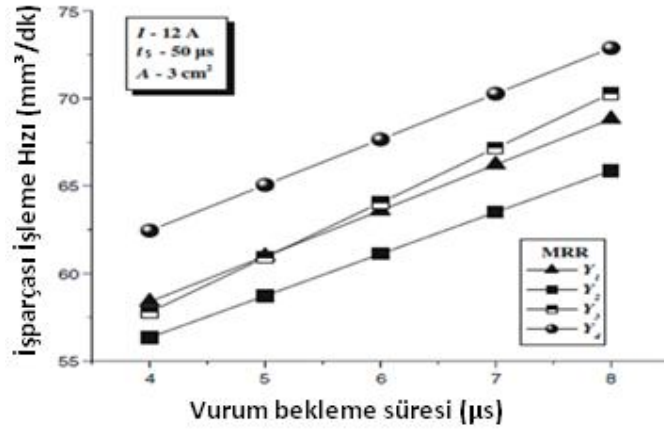
Şekil 1.43 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının İİH ve EAH'na etkisi [20]

Yazarlar [20] yaptıkları deneysel çalışmada, farklı akım değerlerindeki vurum süresinin artmasıyla işparçası işleme hızı önce vurum süresiyle birlikte artarken, vurum süresinin daha da artmasıyla işparçası işleme hızında düşüş görülmüştür, bunun yanında elektrot aşınma hızı vurum süresiyle ilk başlarda hızlı bir şekilde azalmıştır, sonra yavaşça azalmaya devam etmiştir ve uzun vurum sürelerinde sabit kalmıştır (Şekil 1.44).



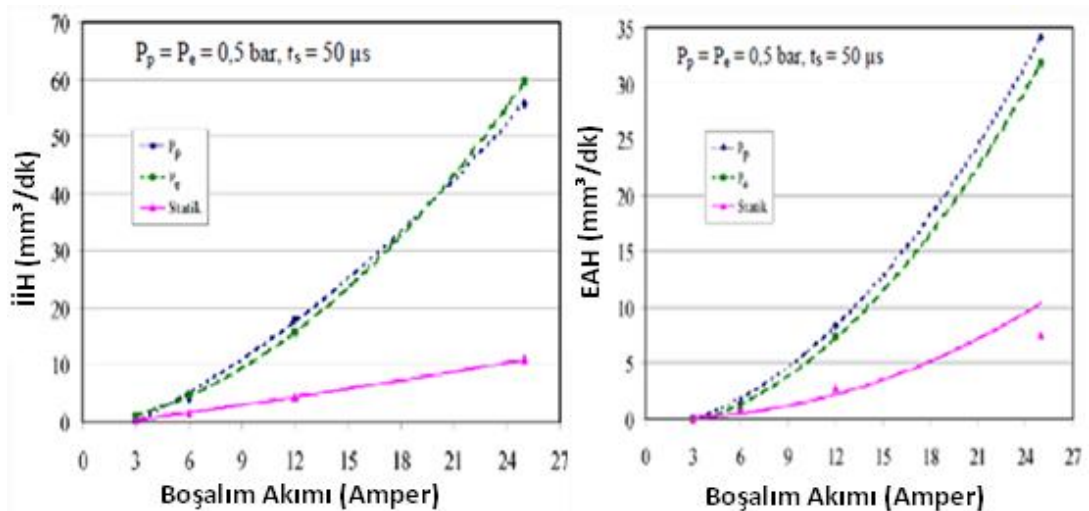
Şekil 1.44 İşparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızının vurum süresiyle değişimi [20]

Sohani vd. [20] yaptıkları deneysel çalışmada, vurum bekleme süresinin artmasıyla işparçası işleme hızının vurum bekleme süresiyle doğrusal olarak arttığı görülmüştür (Şekil 1.45). Boşalım akımı 12 A, vurum süresi 50 μ s ve elektrot alanı olarak $A = 3 \text{ cm}^2$ alınmıştır.



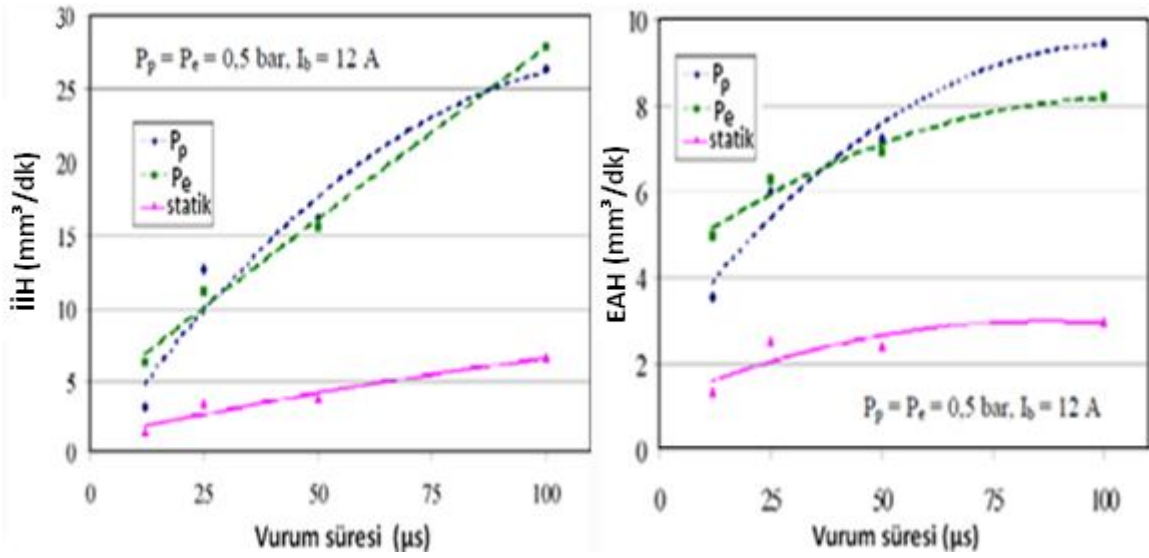
Şekil 1.45 Vurum bekleme süresinin işparçası işleme hızına etkisi [20]

Ergün ve Çoğun [21] elektroerozyon ile işlemede (EEİ) temel performans çıktılarının işleme parametreleriyle gösterdiği değişim deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımının artmasıyla İİH ve EAH'nın arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.46). İşparçası malzemesi olarak SAE 1040 çeliği ve elektrot olarak elektrolitik bakır ve dielektrik olarak gaz yağı kullanılmıştır. Deneyslerde dielektrik uygulama yöntemi olarak (püskürtme, statik ve emme) kullanılmıştır. Püskürtme ve emme basınçları $P_p = P_e = 0,5 \text{ bar}$ alınmış, boşalım akımı (3, 6, 12, 25 A), vurum süresi 50 μ s, vurum bekleme süresi, 50 μ s alınmıştır.



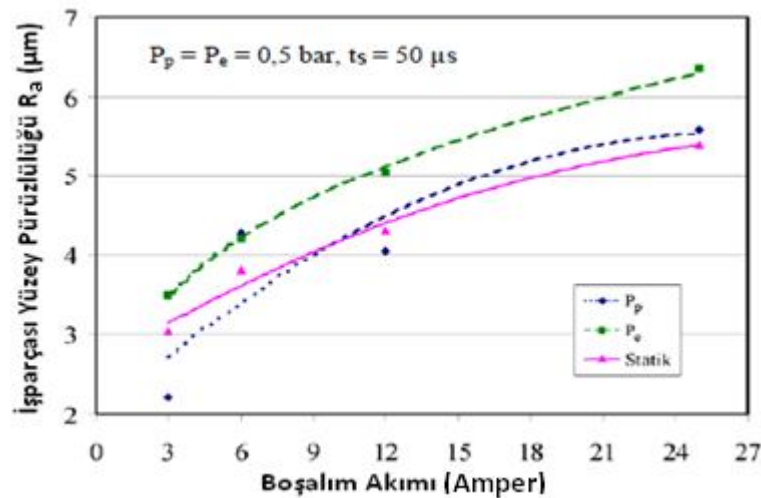
Şekil 1.46 Boşalım akımının işparçası işleme hızına ve elektrot aşınma hızına etkisi [21]

Ergün ve Çoğun [21] yaptıkları deneysel çalışmada vurum süresinin artmasıyla; işparçası işleme hızı değerinde artış görülmüştür, elektrot aşınma hızıda vurum süresiyle belirli bir seviyeye kadar artmıştır, 50 μ s'lik vurum süresinden sonra elektrot aşınma hızı değerindeki artış azalım eğilimi göstermiştir (Şekil 1.47). Boşalım akımı 12 A vurum süresi 25, 50, 75, 100 μ s, vurum bekleme süresi 50 μ s olarak alınmıştır.



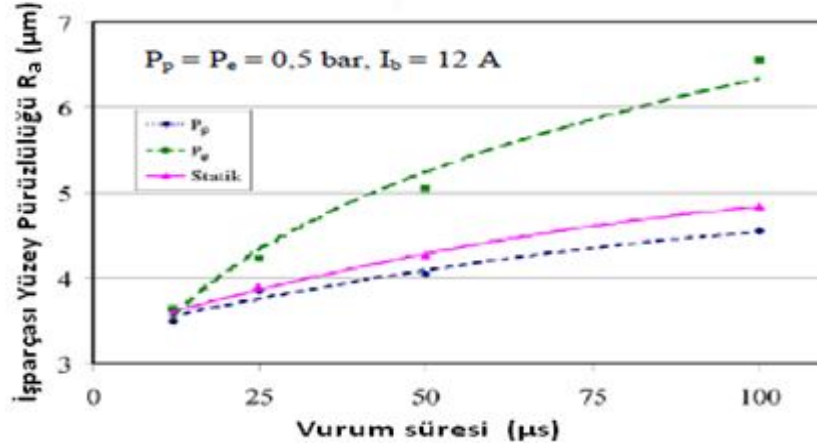
Şekil 1.47 İşparçası işleme ve elektrot aşınma hızının vurum süresiyle değişimi [21]

Araştırmacılar [21] yaptıkları deneysel çalışmada boşalım akımının artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.48). Püskürtme ve emme basınçları Pp = Pe = 0,5 bar alınmış, boşalım akımı (3, 6, 12, 25 A), vurum süresi 50 μ s ve vurum bekleme süresi 50 μ s alınmıştır.



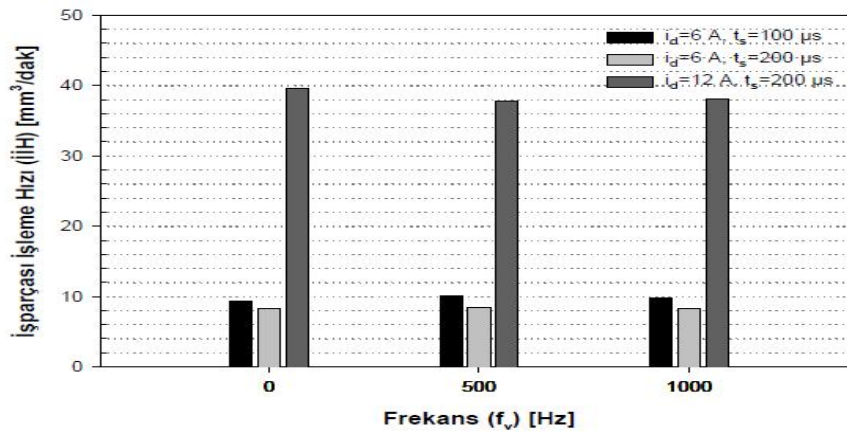
Şekil 1.48 Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [21]

Ergün ve Çoğun [21] yaptıkları deneysel çalışmada, vurum süresinin artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.49). Boşalım akımı 12 A, vurum süresi (12, 25, 50, 100 μ s) ve vurum bekleme süresi 50 μ s alınmıştır.

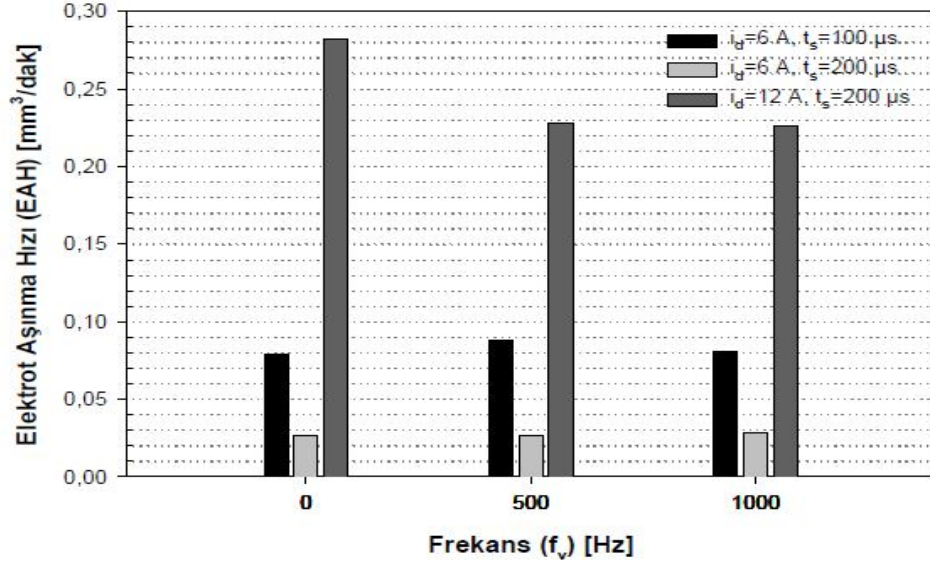


Şekil 1.49 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [21]

Özgedik ve Çoğun [22] elektroerozyon ile işlemede (EEİ), işleme koşullarında işleme haznesine uygulanan titreşimlerin performans çıktıları üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımının artışı titreşimli ve titreşimsiz bütün koşullarda İİH ve EAH'nın artmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.50). Vurum süresinin artışı bütün deney koşullarında İİH değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Vurum suresindeki artış ile EAH değerlerinde önemli azalmalar elde edilmiştir (Şekil 1.51). İşlem parametreleri olarak boşalım akımı (6, 12 A), vurum süresi (100, 200 μ s), vurum bekleme süresi 50 μ s, işleme zamanı 30 dk, dielektrik sıvı olarak gazyağı ve dielektrik sıvı pompa basıncı (P) 0.5 bar, işparçası olarak Ç 1040 ve elektrot olarak silindirik bakır kullanılmıştır.

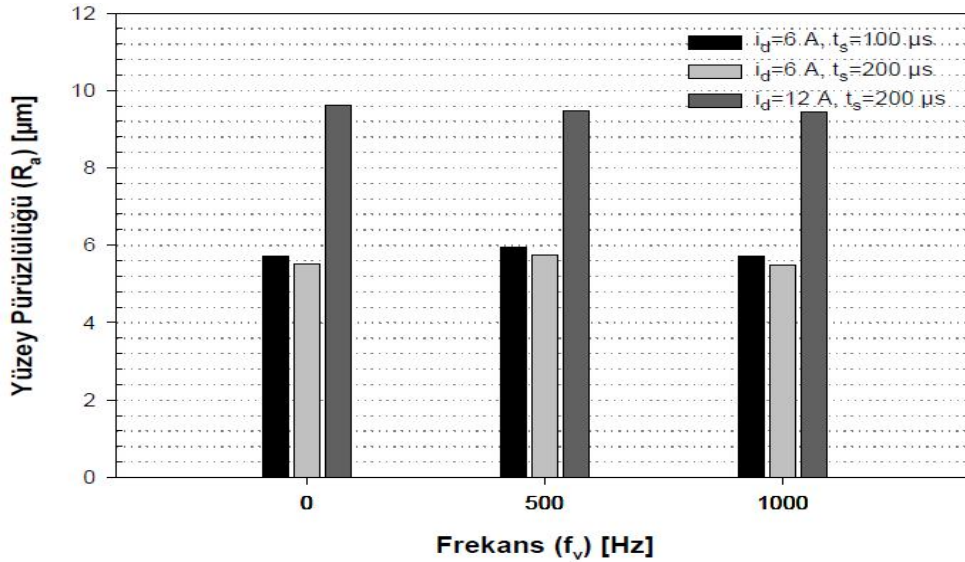


Şekil 1.50 Boşalım akımının işparçası işleme hızına etkisi [22]

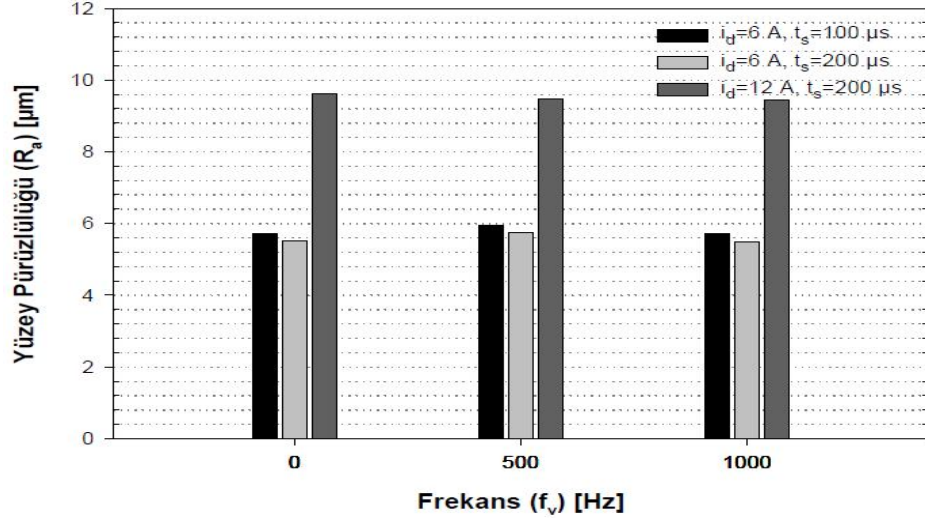


Şekil 1.51 Boşalım akımının elektrot aşınma hızına etkisi [22]

Araştırmacılar [22] yaptıkları deneysel çalışmada boşalım akımının artışı titreşimli ve titreşimsiz bütün koşullarda işparçası yüzey pürüzlüğünde artışa neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.52). Vurum süresinin artışı titreşimli ve titreşimsiz bütün koşullarda işparçası yüzey pürüzlüğünde azda olsa bir azalmaya yol açtığı görülmüştür (Şekil 1.53).

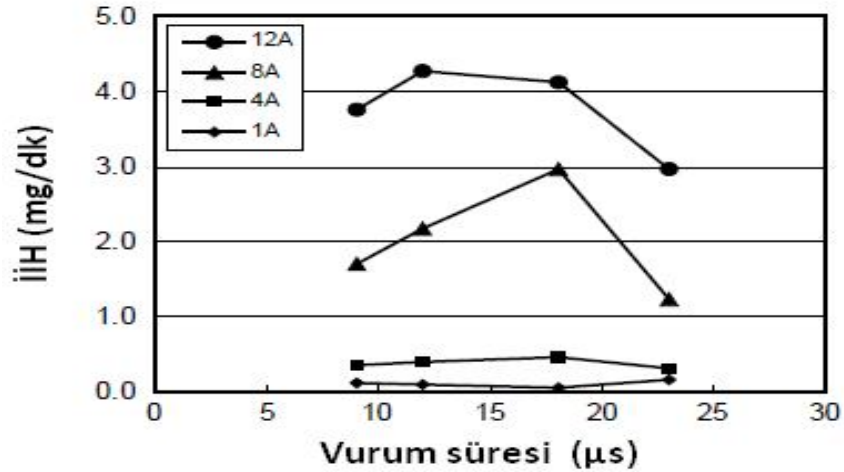


Şekil 1.52 Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [22]



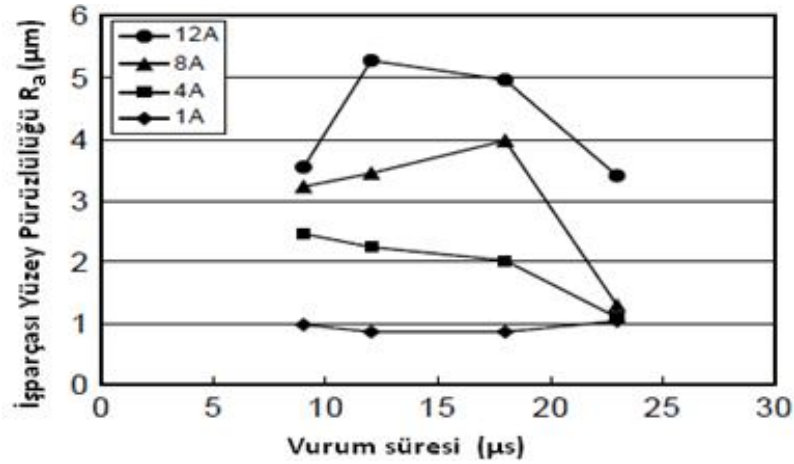
Şekil 1.53 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [22]

Lee vd. [23] bakır-tungsten elektrot ve işparçası olarak AISI 1045 karbon çeliği kullanarak küçük bir alanda EDM işlemi yapılırken EDM parametreleri ile malzeme kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkinin belirlenmesi için araştırma yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda işparçası işleme hızının boşalım akımıyla beraber arttığı gözlenmiştir. Boşalım akımının (4, 8, 12) amperlik değerleri için vurum süresi arttıkça İİH önce vurum süresiyle beraber artarken, vurum süresinin daha da artmasıyla İİH azalmıştır, boşalım akımının 1 amperlik değeri için ise tam tersi olmuştur (Şekil 1.54). İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (1, 4, 8, 12 A), vurum süresi (9, 12, 18, 23 µs), açık devre gerilimi 200 V, kullanma katsayısı ($t_s/(t_s+t_p)$) = 0.5, işparçası olarak AISI 1045 ve bakır malzemesi olarak da bakır-tungsten elektrot kullanılmıştır.



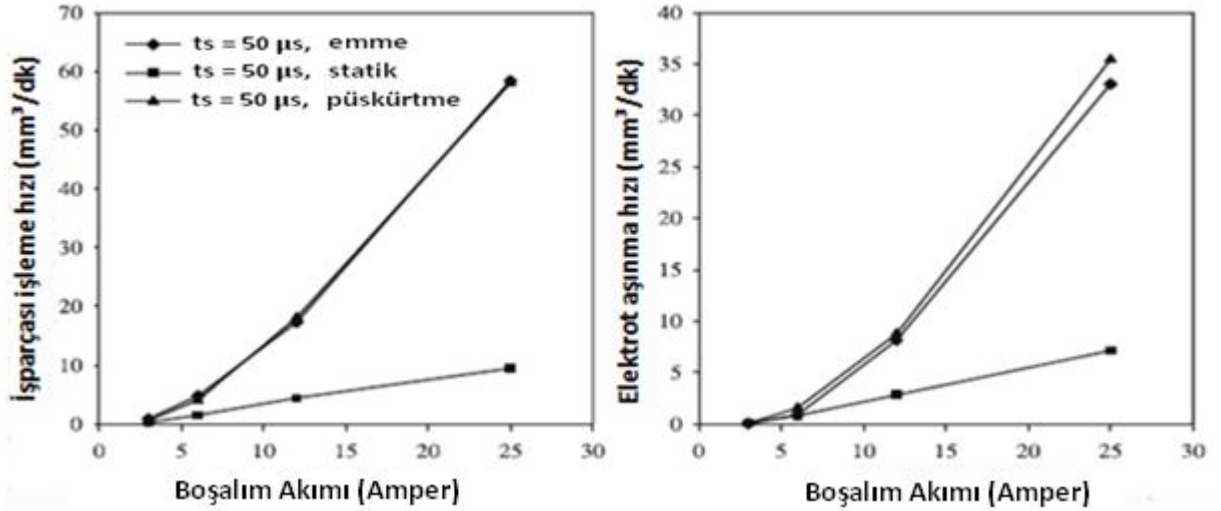
Şekil 1.54 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının İİH'na etkisi [23]

Araştırmacılar [23] deneysel çalışmada işparçası yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımının artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Vurum süresinin artması 1 ve 4 amperlik boşalım akımı değerleri için, yüzey pürüzlülük değerinin azalmasına yol açarken, 8 ve 12 amperlik boşalım akımı değerleri için vurum süresinin artması ilk başlarda işparçası yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olurken, vurum süresinin daha da artması işparçası yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.55). İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı olarak (1, 4, 8, 12 A), vurum süresi olarak (9, 12, 18, 23 μ s), açık devre gerilimi 200 V, kullanma katsayısı ($t_s/(t_s+t_p)$) = 0.5 olarak alınmıştır.



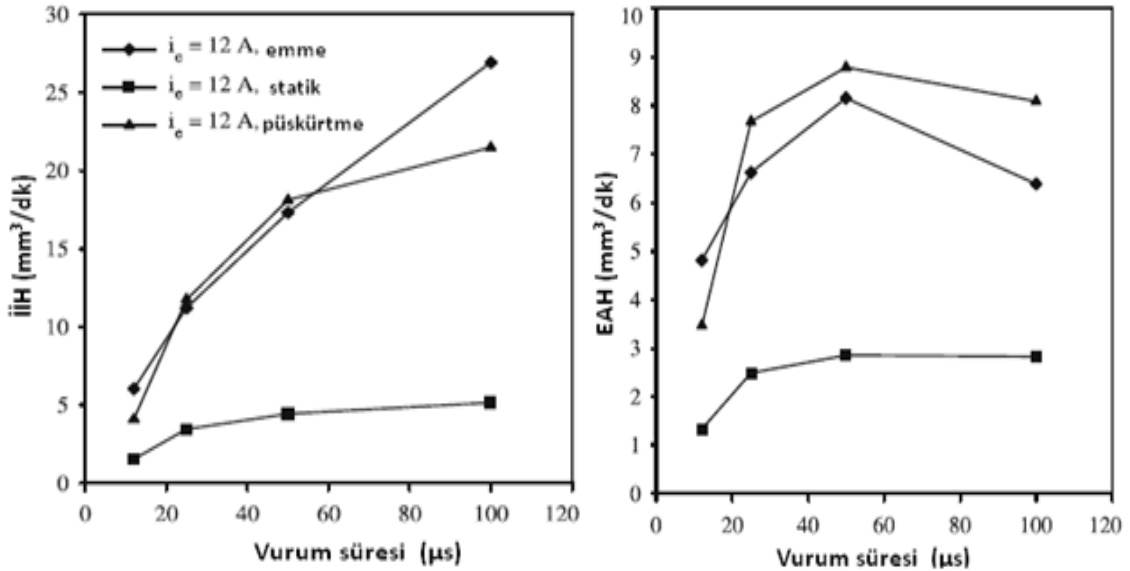
Şekil 1.55 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [23]

Özgedik ve Çoğun [24] elektroerozyon ile işlemede çeşitli işlem parametrelerinin kenar ve ön yüz takım (elektrot) aşınmasıyla birlikte işleme performansının çıktıklarına etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tüm dielektrik uygulama yöntemleri için boşalım akımının artmasıyla birlikte İİH ve EAH'nın boşalım akımıyla beraber arttığı görülmüştür (Şekil 1.56). İşparçası malzemesi olarak SAE 1040 çeliği, elektrot olarak bakır, dielektrik sıvı olarak kerosen kullanılmıştır. Deneylerde dielektrik uygulama yöntemi olarak (püskürtme, statik ve emme) kullanılmıştır. Püskürtme ve emme basınçları $P_p = P_e = 0,5$ bar, boşalım akımı (3, 6, 12, 25 A), vurum bekleme süresi 50 μ s, açık devre gerilimi 80 V alınmış ve elektrot pozitif kutuplama yapılarak kullanmıştır.



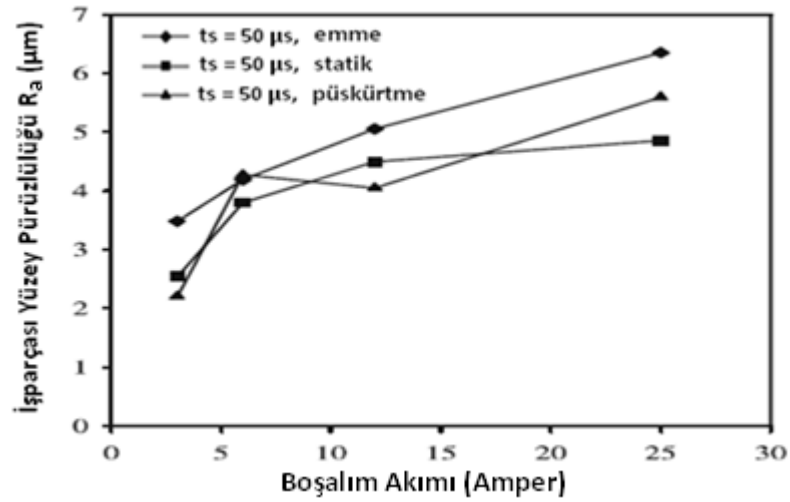
1.56 Boşalım akımının İİH ve EAH'na etkisi [24]

Araştırmacılar [24] yaptıkları deneysel çalışmada, farklı dielektrik uygulama yöntemleri için vurum süresi arttıkça İİH'nin arttığı görülmüştür. Vurum süresinin artmasıyla EAH'ı da vurum süresiyle belirli bir seviyeye kadar artmıştır, 50 μs 'lik vurum süresinden sonra EAH değerindeki artış azalım eğilimi göstermiştir (Şekil 1.57). Boşalım akımı 12 A, vurum bekleme süresi 50 μs , açık devre gerilimi 80 V alınmış ve elektrot pozitif kutuplama yapılarak kullanmıştır.



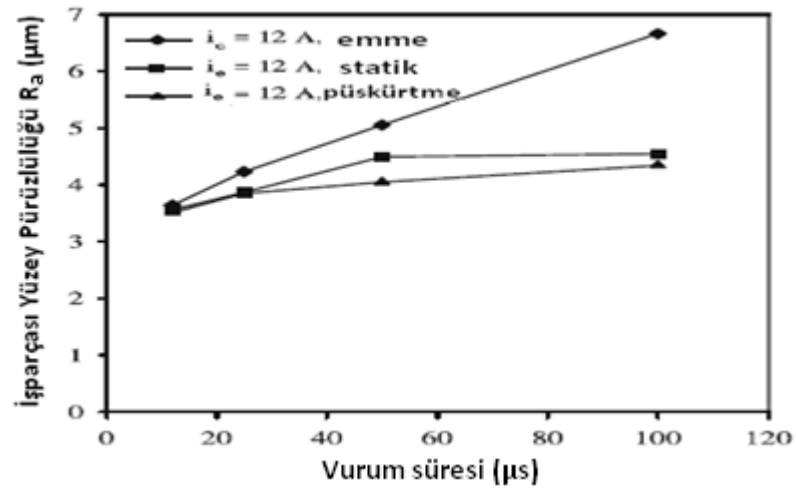
Şekil 1.57 Vurum süresinin İİH ve EAH'na etkisi [24]

Yazarlar [24] yaptıkları deneysel çalışmada, farklı dielektrik uygulama yöntemleri için boşalım akımı arttıkça işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür (Şekil 1.58).



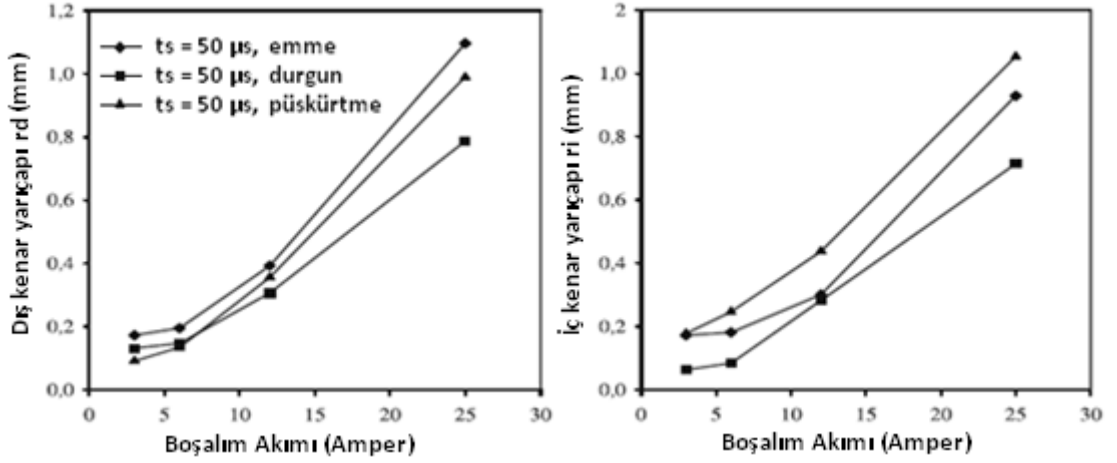
Şekil 1.58 Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [24]

Araştırmacılar [24] yaptıkları deneysel çalışmada, farklı dielektrik uygulama yöntemleri için vurum süresi arttıkça işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür (Şekil 1.59). Boşalım akımı (12 A), vurum bekleme süresi 50 µs, açık devre gerilimi 80 V alınmış ve elektrot pozitif kutuplama yapılarak kullanmıştır.

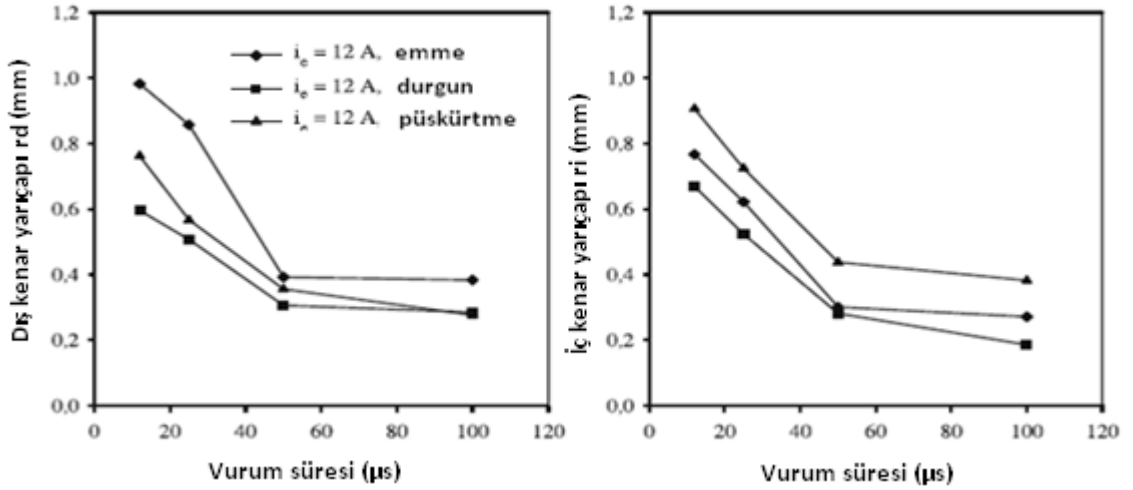


Şekil 1.59 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [24]

Özgedik ve Coğun [24] yaptıkları deneysel çalışmada, boşalım akımının artmasıyla elektrot kenar aşınma değerlerinin (iç –dış), boşalım akımının artmasıyla birlikte arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.60). Vurum süresinin artması ise elektrot kenar aşınma değerlerinin değerlerinin (iç –dış), azalmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.61).



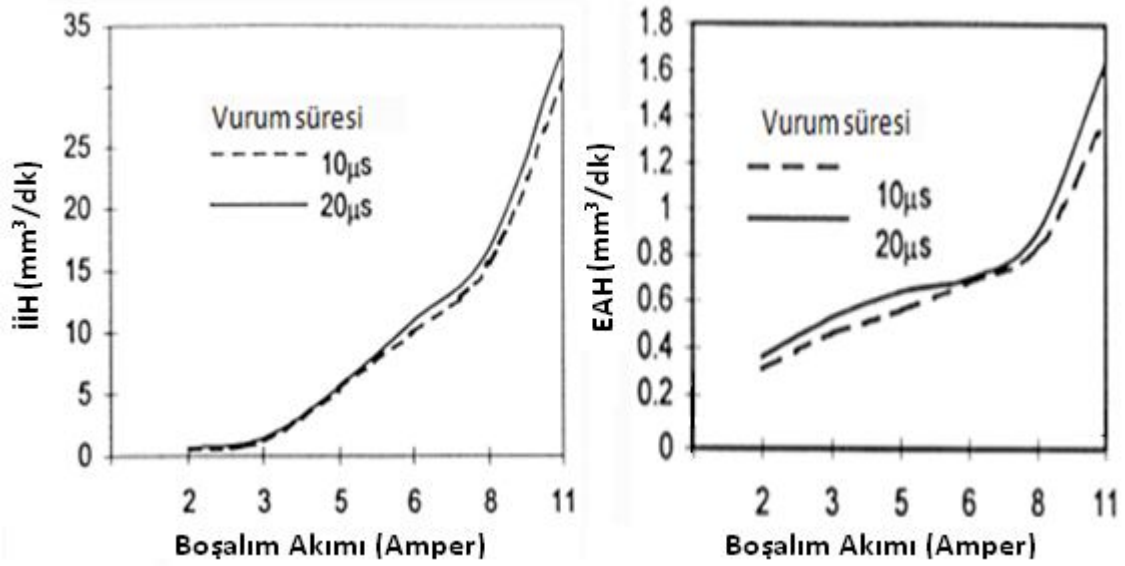
Şekil 1.60 Boşalım akımının elektrot kenar aşınması (iç – dış) değerine etkisi [24]



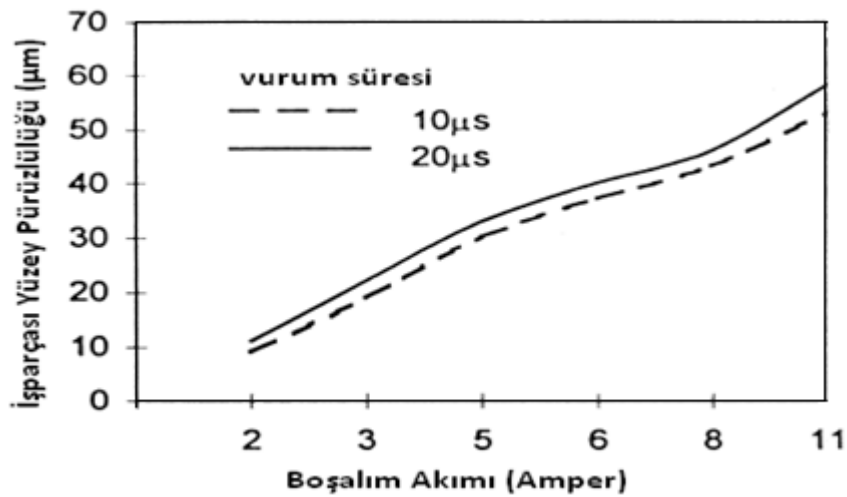
Şekil 1.61 Vurum süresinin elektrot kenar aşınması (iç – dış) değerine etkisi [24]

Chen ve Mahdivian [25] elektroerozyon ile işleme sırasında işlem parametrelerinin işparçası işleme hızı, yüzey kalitesi ve elektrotun ve ürünün boyutsal hassasiyetine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada boşalım akımının artmasıyla beraber İİH ve EAH'nın arttığı görülmüştür (Şekil 1.62). Boşalım Akımının artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür (Şekil 1.63). İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (2, 3, 5, 6, 8, 11 A), vurum süresi olarak (10, 20 µs), dielektrik olarak Castrol SE-185 hidrokarbon esaslı yağ, elektrot malzemesi olarak 0.8 bakır, 0.1 alüminyum, 0.05 demir, 0.05 nikel içeren kimyasal bileşimli ve HV 115 sertlikteki malzeme kullanılmıştır. İşparçası olarak 0.08 – 0.13 karbon, 0.4 – 0.8

mangan, 0.05 fosfor ve 0.05 kükürt bileşimine sahip ve HB 235 sertliğine sahip işparçası malzemesi kullanılmıştır.

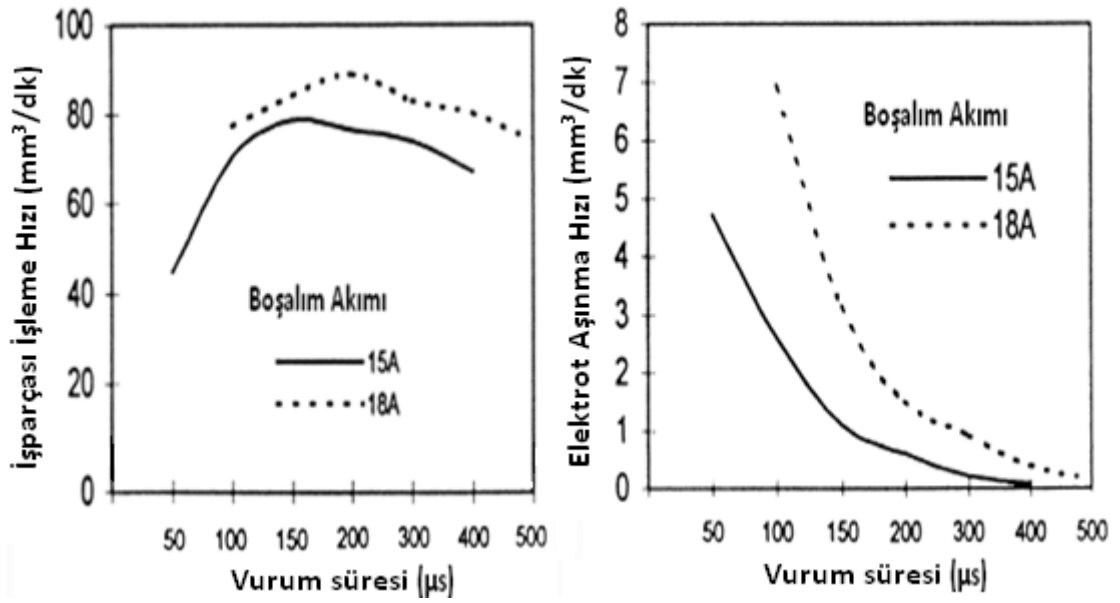


Şekil 1.62 Farklı vurum sürelerindeki boşalım akımının, İİH ve EAH'ına etkisi [25]

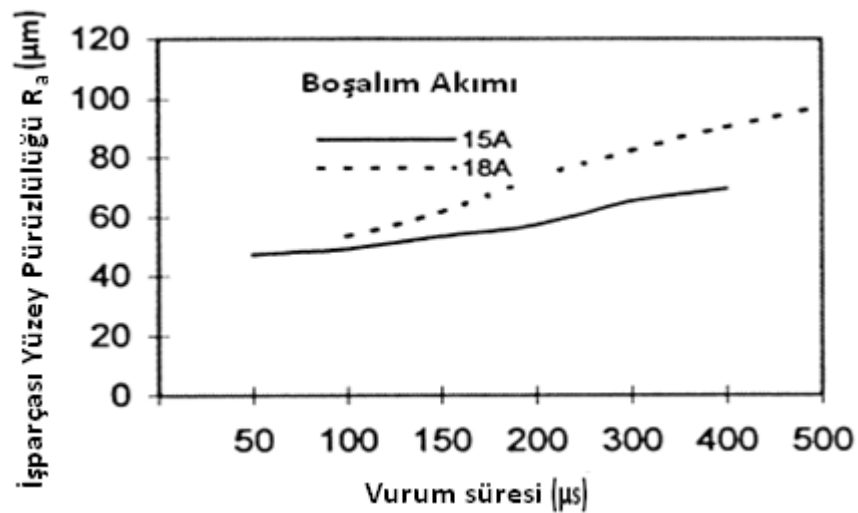


Şekil 1.63 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [25]

Araştırmacılar [25] yaptıkları deneysel çalışmada vurum süresinin artmasıyla ilk başlarda İİH vurum süresiyle artış gösterirken, vurum süresinin daha da artması İİH'nın azalmasına neden olmuştur ayrıca EAH vurum süresinin artmasıyla azalmıştır (Şekil 1.64). Vurum süresinin artmasıyla beraber işparçası yüzey pürüzlülüğünde arttığı görülmüştür (Şekil 1.65). İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (15, 18 A), vurum süresi (50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 µs) alınmıştır.

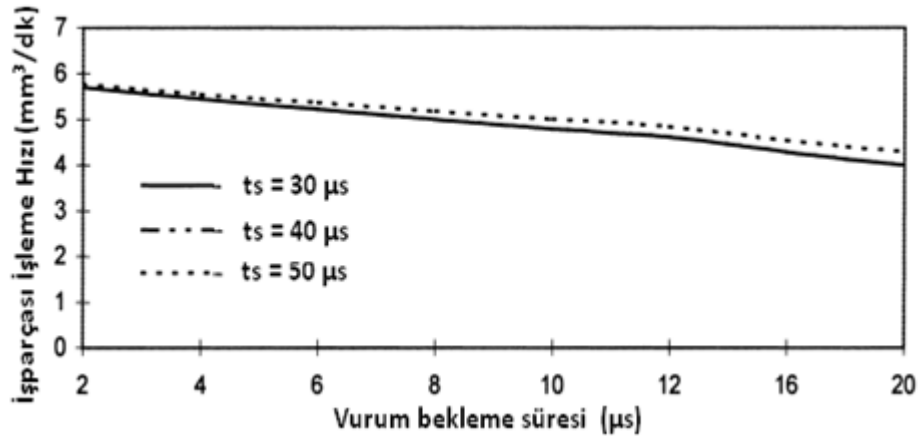


Şekil 1.64 Vurum süresinin işparçası işleme hızına ve elektrot aşınma hızına etkisi [25]



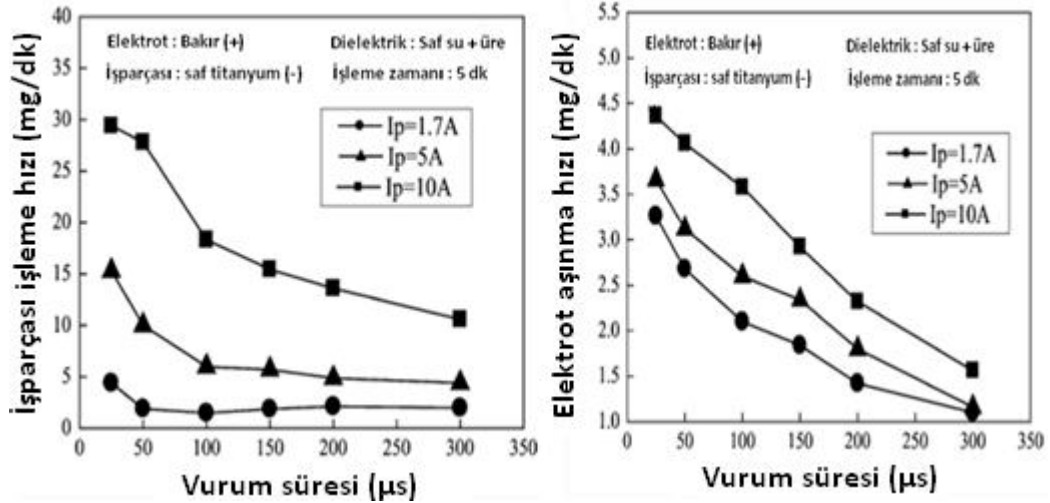
Şekil 1.65 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [25]

Chen ve Mahdavian [25] yaptıkları deneysel çalışmada, işparçası işleme hızının vurum bekleme süresinin artmasıyla kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir (Şekil 1.66). Vurum süresi (30, 40, 50 µs), vurum bekleme süresi (2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 µs) alınmıştır.



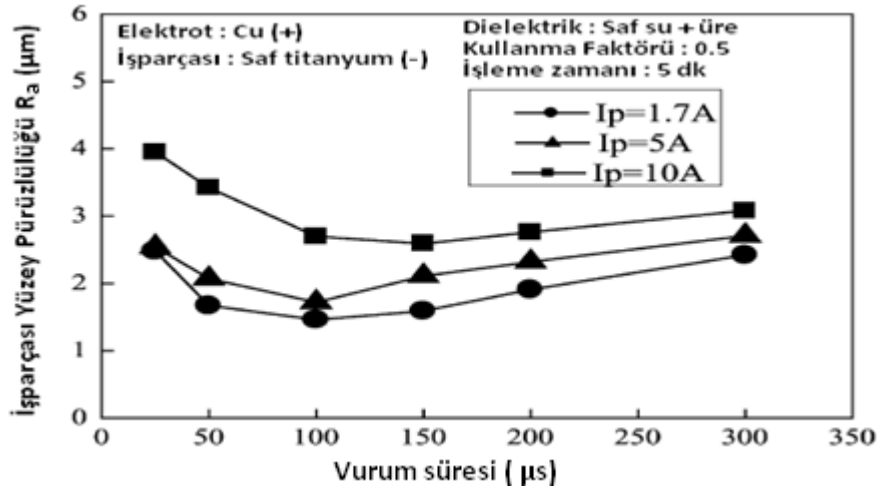
Şekil 1.66 Vurum bekleme süresinin işparçası işleme hızına etkisi [25]

Yan vd. [26] saf suyun içine üre katılmasıyla elde edilen dielektrik sıvıya sahip EDM işlemiyle saf titanyum metalinin çeşitli işleme parametrelerinde işlenmesi sırasında bu dielektrik sıvının, işleme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada boşalım akımı arttıkça işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızının boşalım akımıyla birlikte artarken, vurum süresinin artması İİH ve EAH'nın azalmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.67).



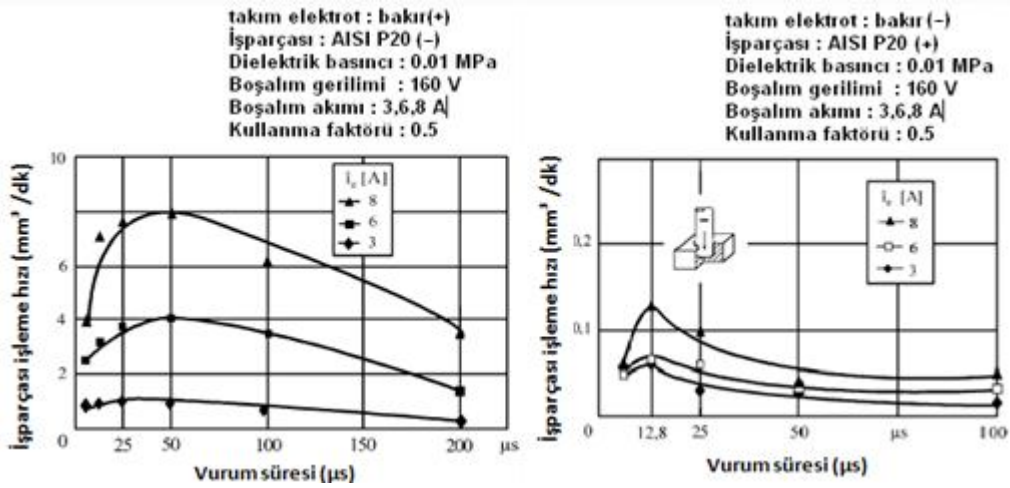
Şekil 1.67 Vurum süresinin, İİH ve EAH'na etkisi [26]

Araştırmacılar [26] yaptıkları deneysel çalışmada boşalım akımı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Vurum süresinin artması ilk başlarda işparçası yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olurken, vurum süresinin daha da artması işparçası yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur (Şekil 1.68).



Şekil 1.68 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [26]

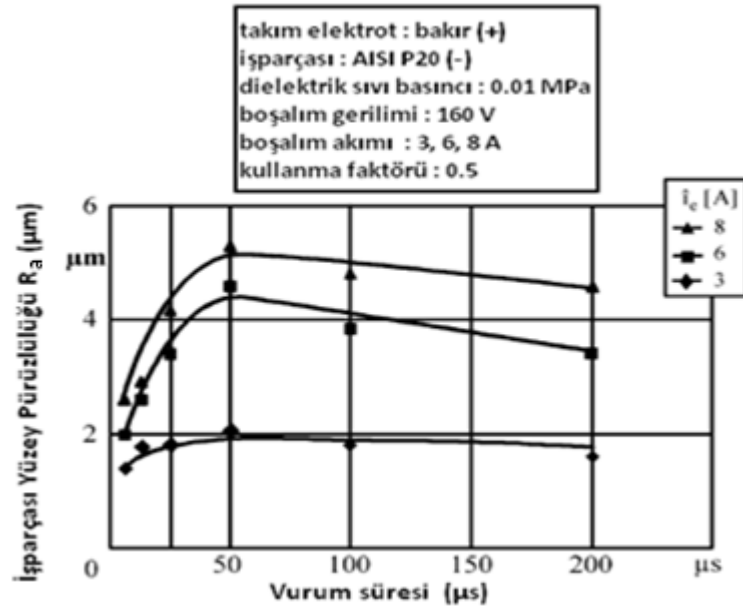
Amorim ve Weingaertner [27] elektroerozyon ile işlemede bitirme işlemi yapılması sırasında jeneratörün çalıştırma modu ile bazı önemli EDM elektriksel parametrelerinin performans çıktıları üzerine etkilerini incelemiştir. İzo enerjik modlu jeneratör kullanımı sırasında yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı arttıkça İİH'nın boşalım akımıyla beraber arttığı gözlenmiştir. Vurum süresinin artması ilk başlarda İİH'nın artmasına neden olurken, vurum süresinin daha da artması İİH'nın azalmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.69).



Şekil 1.69 Vurum süresinin ve boşalım akımının İİH'na etkisi [27]

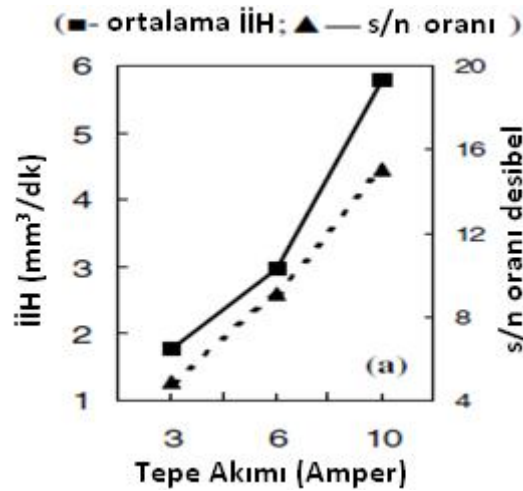
Araştırmacılar [27] yaptıkları deneysel çalışmada, boşalım akımının artması işparçası yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğu görülmüştür. Vurum süresinin artması ilk başlarda işparçası yüzey pürüzlülük değerinin artmasına neden olurken, vurum

süresinin daha da artması işparçası yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.70).



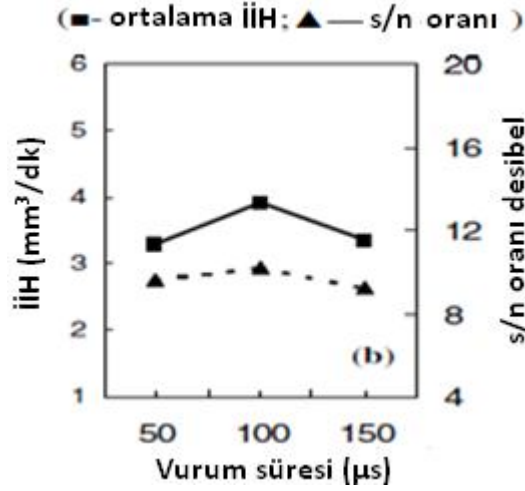
Şekil 1.70 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [27]

Kansal vd. [28] bakır elektrot kullanarak AISI D2 kalıp çeliğinin EDM ile işlenmesi sırasında kerosen olan dielektrik sıvısının içine silikon tozunun eklenmesinin işleme özelliklerine etkisini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım tepe akımının artmasıyla işparçası işleme hızında artış gözlenmiştir (Şekil 1.71). İşleme parametreleri olarak, vurum bekleme süresi (15, 20, 25 µs), boşalım akımı (3, 6, 10 A), işleme zamanı olarak 30 dk, dielektrik basıncı 0.5 kg/cm² değerleri kullanılmıştır.



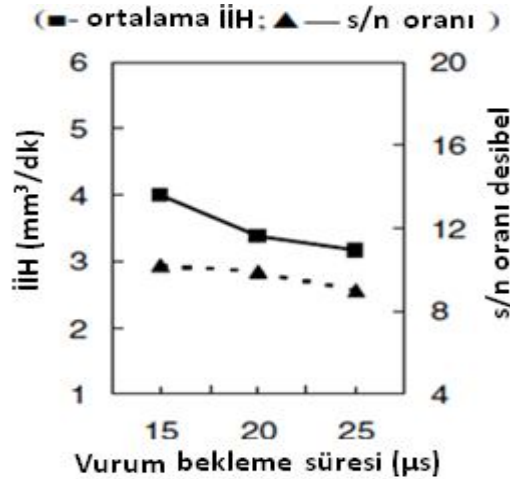
Şekil 1.71 Boşalım tepe akımının işparçası işleme hızına etkisi [28]

Araştırmacılar [28] yaptıkları deneysel çalışmada, vurum suresinin artmasıyla ilk başlarda İİH arttığı, vurum suresinin daha da artmasıyla İİH'nin azalmaya başladığı grlmştr (şekil 1.72).



şekil 1.72 Vurum suresinin işparçası işleme hızına etkisi [28]

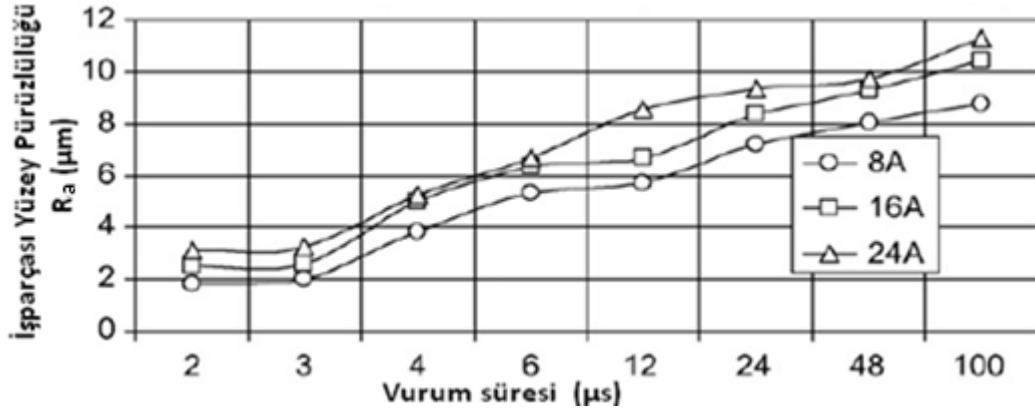
Kansal vd. [28] yaptıkları deneysel çalışmada, vurum bekleme suresinin artmasıyla işleme zamanının azalması nedeniyle, işparçası işleme hızının azaldığı gözlenmiştir (şekil 1.73).



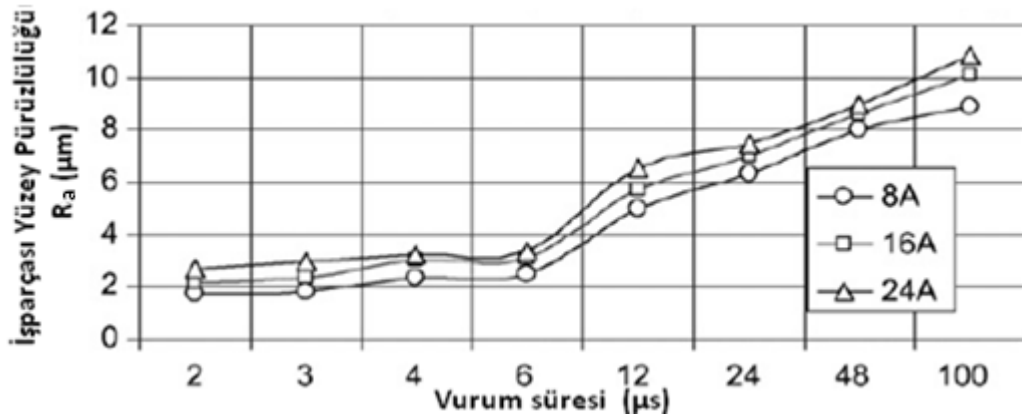
şekil 1.73 Vurum bekleme suresinin işparçası işleme hızına etkisi [28]

M. Kıyak ve O. akır [29] AISI P20 takım çeliğinin elektroerozyonla işlenmesi sırasında işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne üzerine etkileri incelenmiştir. Farklı vurum sureslerinde yapılan deneysel çalışmalarda işparçası ve elektrotun yüzey pürüzlüğünün

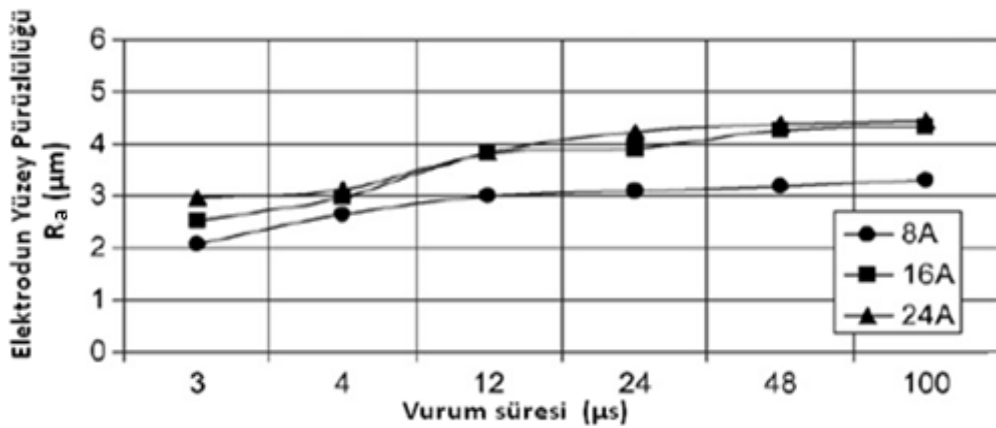
boşalım akımının ve vurum süresinin artmasıyla birlikte arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.74 - 1.75 - 1.76). İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (8, 16 ve 24 A), vurum süresi (2, 3, 4, 6, 12, 24, 48 ve 100 μ s) ve vurum bekleme süresi olarak (2, 3 μ s) seçilmiştir



Şekil 1.74 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (vurum bekleme süresi 2 μ s) [29]

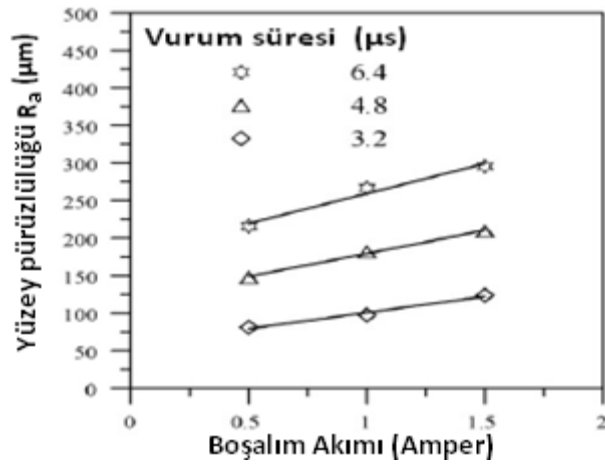


Şekil 1.75 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (vurum bekleme süresi 3 μ s) [29]



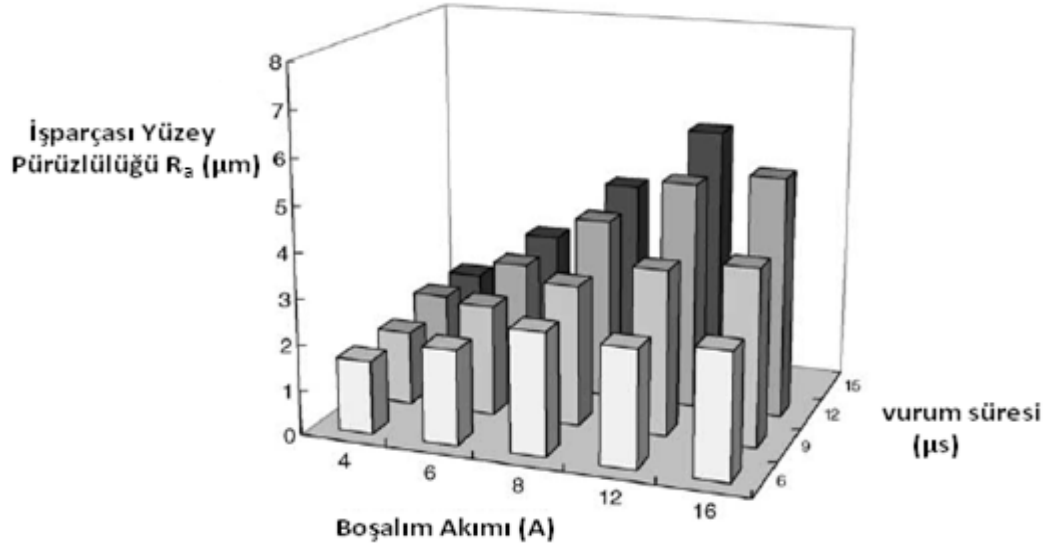
Şekil 1.76 Boşalım akımı ve vurum süresinin elektrodun yüzey pürüzlülüğüne etkisi (vurum bekleme süresi 3 μ s) [29]

Guu ve Hou [30] çeşitli işlem parametrelerinin elektroerozyon ile işleme sonucu oluşan yüzey özelliklerine etkisini atom kuvvet mikroskopu (AFM) özelliği ile analiz etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada boşalım akımı ve vurum süresi arttığı zamanda yüzey pürüzlülük değerinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 1.77). İşparçası olarak Fe-Mn-Al alaşımı, elektrot olarak bakır ve dielektrik sıvı olarak kerosen kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (0.5, 1, 1.5, 2), vurum süresi olarak (3.2, 4.8, 6.4 μ s) ve vurum bekleme süresi olarak da 10 μ s alınmıştır.

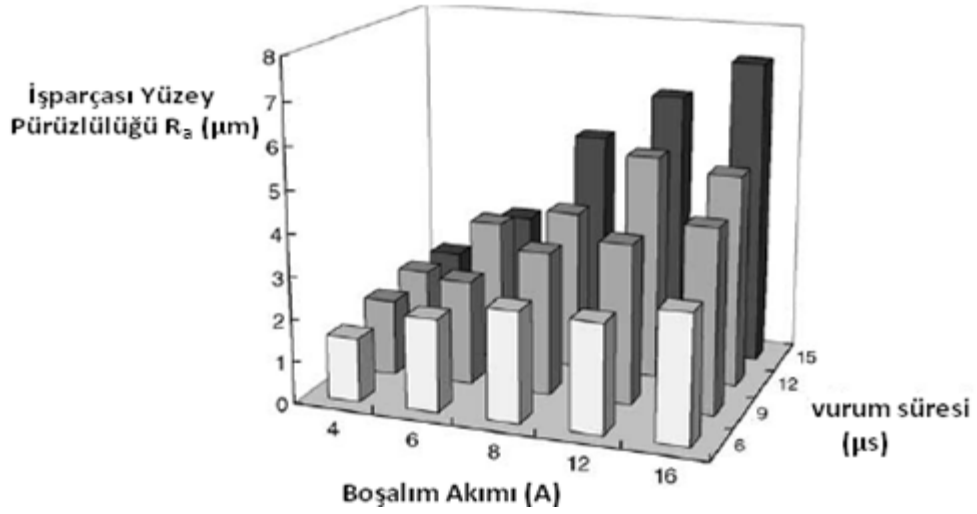


Şekil 1.77 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [30]

Lee ve Tai [31] EDM parametreleri ile yüzey çatlak oluşumu arasındaki ilişkiyi boşalım akımı ve vurum süresini temel alarak tam faktöriyel tasarım kullanılarak sunmuşlardır. D2 ve H13 takım çelikleri işparçası olarak kullanılmıştır. Elektrot malzemesi olarak bakır dielektrik sıvı olarak kerosen kullanılmıştır. Boşalım akımları olarak (4, 6, 8, 12, 16 A), vurum süresi ve vurum bekleme süresi olarak (6, 9, 12, 15 μ s), boşalım gerilimi 120 V seçilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla her iki durumda da, yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığı görülmüştür (Şekil 1.78 – 1.79) .



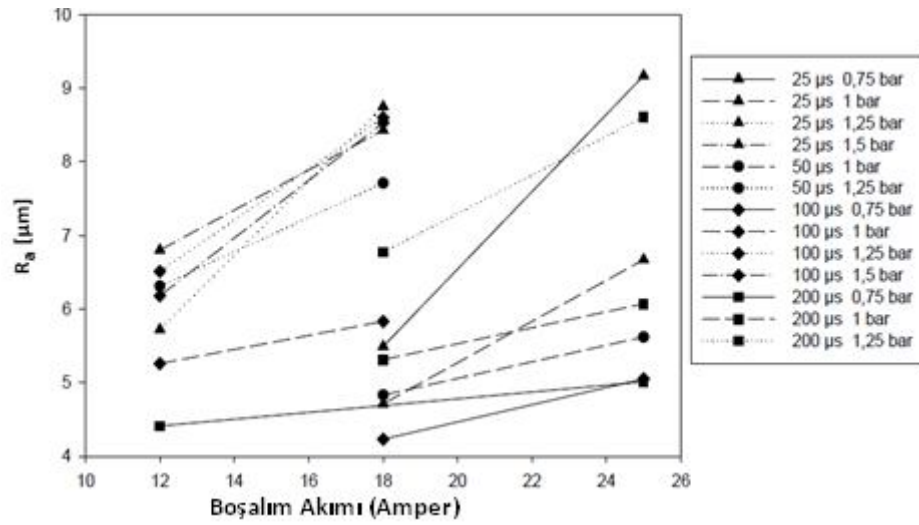
Şekil 1.78 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (D2 çeliği için) [31]



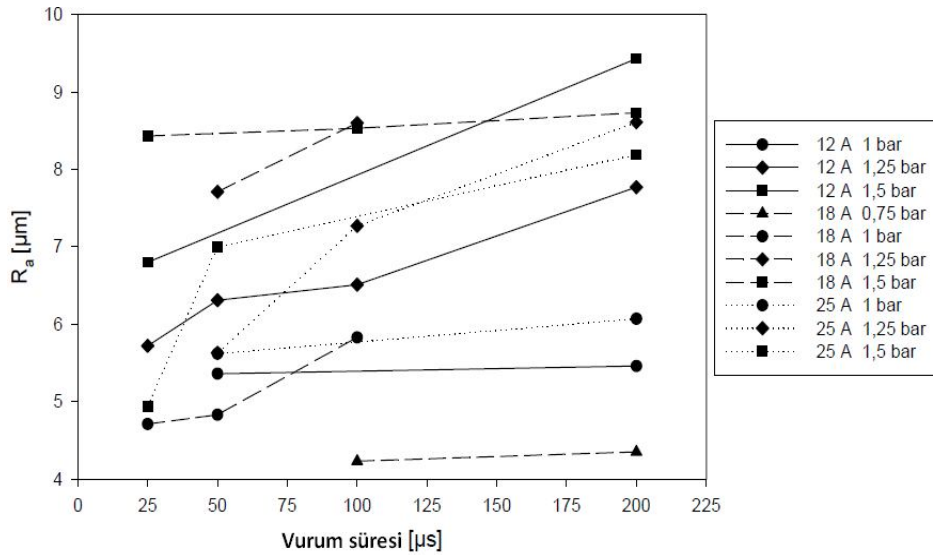
Şekil 1.79 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (H13 çeliği için) [31]

Çoğun vd. [32] elektroerozyon ile işlemede (EEİ) değişik parametrelerde işlenmiş işparçalarının yüzey profilleri deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada, boşalım akımı, vurum süresi ve dielektrik sıvı basıncı gibi işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Deneylerde boşalım akımının artırılmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü artan dielektrik sıvı basıncıyla artmıştır. Bu artış özellikle 1.25 ve 1.5 bar basınçlarda oldukça belirgin

olmuştur (Şekil 1.80). Yapılan deneylerde yüksek dielektrik sıvı basınçlarında yüzey pürüzlülüğü vurum süresiyle belirgin şekilde artmıştır. Düşük dielektrik sıvı basınçlarında yüzey pürüzlülüğünün vurum süresinden daha az etkilendiği tespit edilmiştir (Şekil 1.81). İşparçası malzemesi olarak Ç2080 takım çeliği, elektrot olarak elektrolitik bakır ve dielektrik olarak Tellus kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (12, 18, 25 A), vurum süresi (25, 50, 100, 200 μ s), dielektrik sıvı püskürtme basıncı (P_p) olarak (0.75, 1, 1.25, 1.5 bar), vurum bekleme süresi 25 μ s, açık devre gerilimi 80 V ve (+) kutuplama tüm deneylerde sabit tutulmuştur.

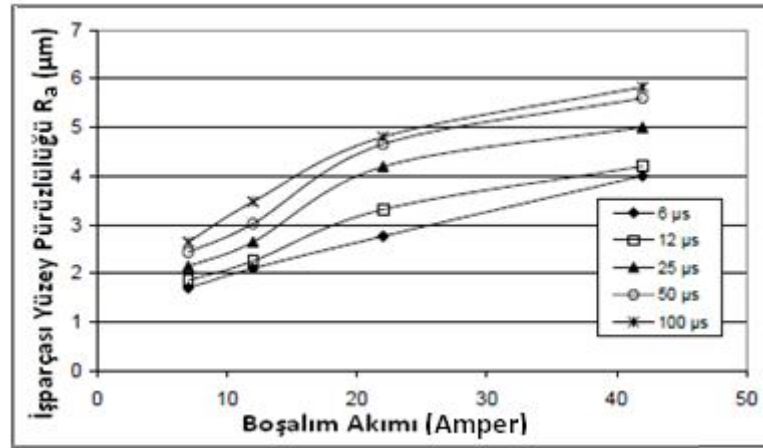


Şekil 1.80 Boşalım akımının işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [32]

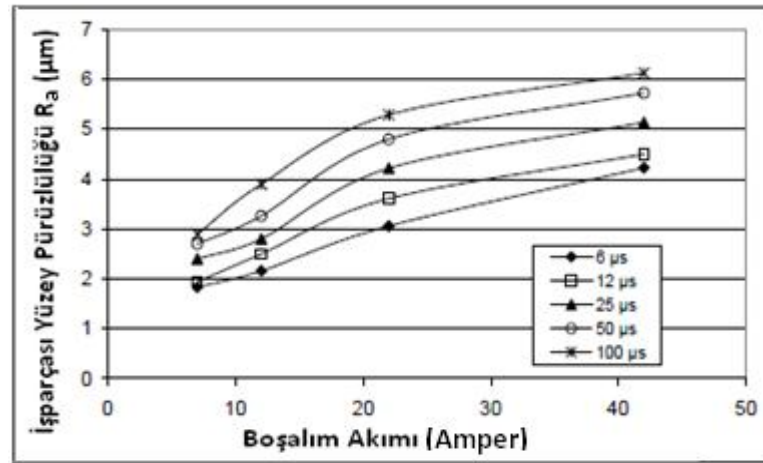


Şekil 1.81 Vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi [32]

Salman Ö, [33] bakır elektrot ile farklı EDM parametreleri kullanılarak (akım şiddeti, vurum süresi, vurum bekleme süresi, aralık gerilimi) AISI D2 soğuk iş takım çeliği ile aynı fiziksel ve kimyasal özelliğe sahip sertleştirilmiş toz metal (soğuk iş takım çeliği) işparçasına uygulanması sonucu oluşan R_a (μm) pürüzlülük değerleri incelemiştir. Farklı EDM parametreleri uygulanan, kaba ve hassas işlemler sonucu toz metal işparçası yüzeyinde meydana gelen R_a yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek kendi içinde ve literatür çalışmalarıyla kıyaslanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla, yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmüştür (Şekil 1.82 - 1.83). İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (7, 12, 22, 42 A), vurum süresi (6, 12, 25, 50, 100 μs), vurum bekleme süresi 12 μs ve aralık gerilimi (40, 60 V) alınmıştır.

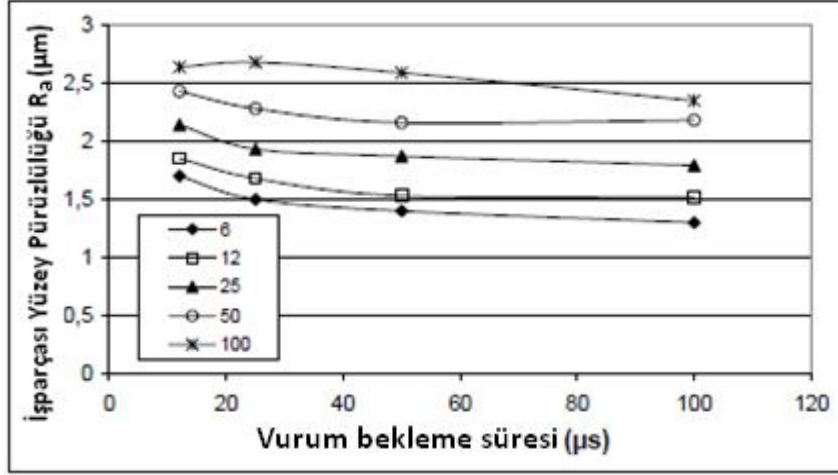


Şekil 1.82 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (bekleme süresi 12 μs , aralık gerilimi 40 V) [33]

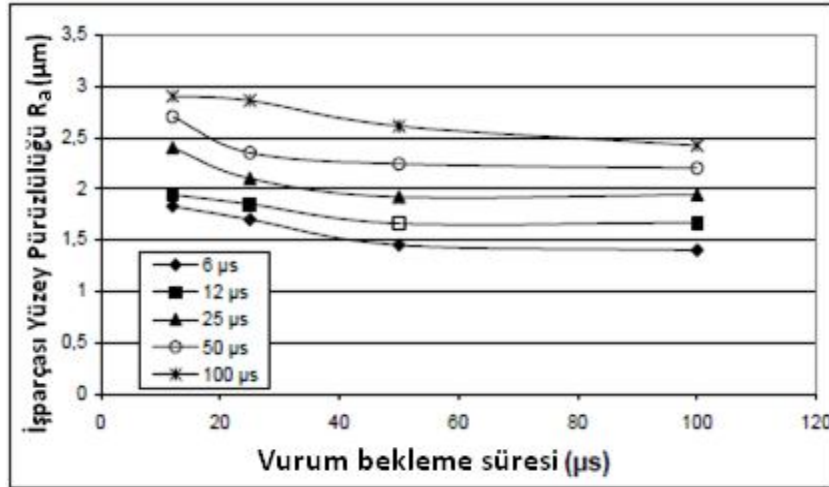


Şekil 1.83 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (bekleme süresi 12 μs , aralık gerilimi 60 V) [33]

Salman Ö, [33] yaptığı deneysel çalışmada, vurum bekleme süresi arttıkça, yüzey pürüzlülük değerinin de azaldığı görülmüştür (Şekil 1.84 - 1.85). İşlem parametreleri olarak: boşalım akımı (7 A), vurum süresi (6, 12, 25, 50, 100 μ s), ve aralık gerilimi (40, 60 V) alınmıştır.



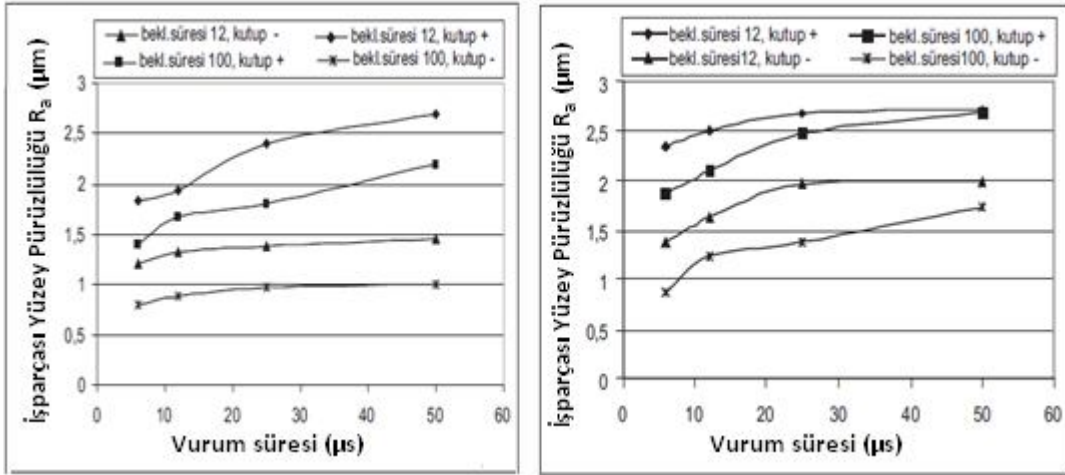
Şekil 1.84 Vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 7 A, aralık gerilimi 40 V) [33]



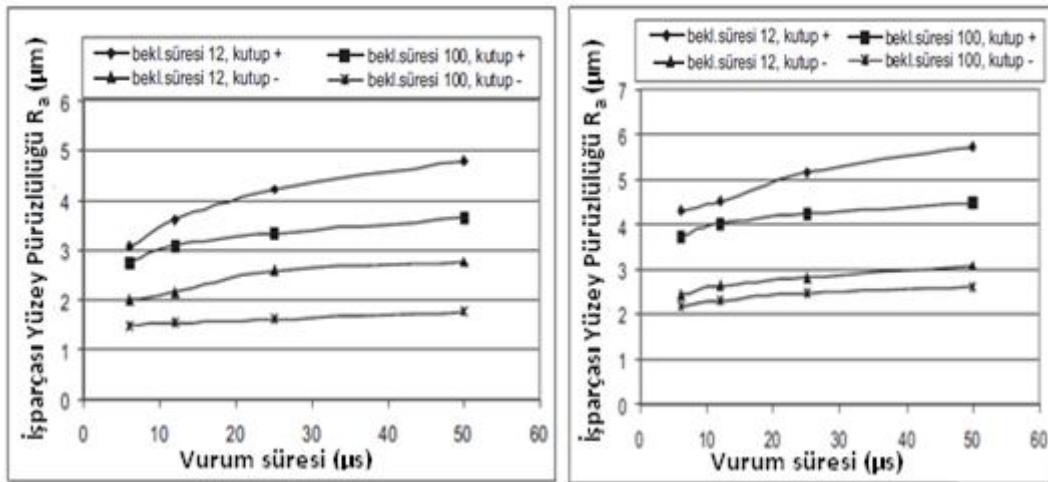
Şekil 1.85 Vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 7 A, aralık gerilimi 60 V) [33]

Salman ve Kayacan [34], bakır elektrot ile farklı EDM parametreleri kullanılarak (akım şiddeti, vurum süresi, vurum bekleme süresi, aralık gerilimi ve farklı elektrot kutupları) sertleştirilmiş toz metal (soğuk iş takım çeliği) işparçasına uygulanması sonucu oluşan R_a (μ m) pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı

ve vurum süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmüştür (Şekil 1.86 - 1.87). Negatif kutuplanmış elektrot ile yapılan işlemin pozitif kutuplamaya göre daha iyi sonuç verdiği de ölçülmüştür. Vurum bekleme süresi arttıkça yüzey pürüzlülük değeri azalmıştır. İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı (7, 12, 22, 50 A), vurum süresi (6, 12, 25, 50 μ s), vurum bekleme süresi (12, 100 μ s), boşalım gerilimi 60 V ve elektrotun (+,-) kutuplama yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir.



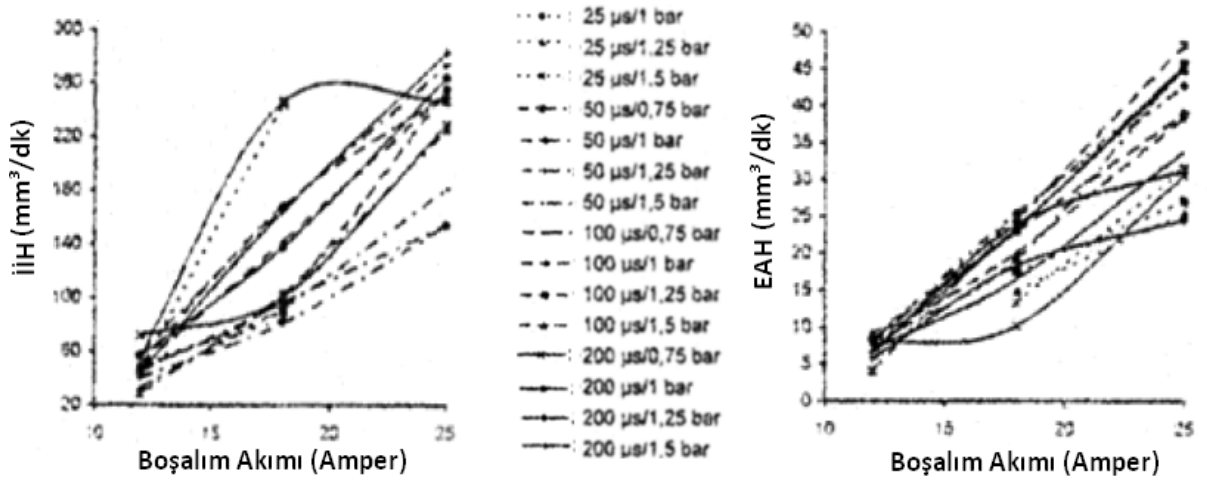
Şekil 1.86 Vurum süresi ve boşalım akımının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (sırasıyla boşalım akımı 7 ve 12 A olarak sabit alınmıştır)[34]



Şekil 1.87 Vurum süresi ve boşalım akımının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (sırasıyla boşalım akımı 22 ve 50 A olarak sabit alınmıştır)[34]

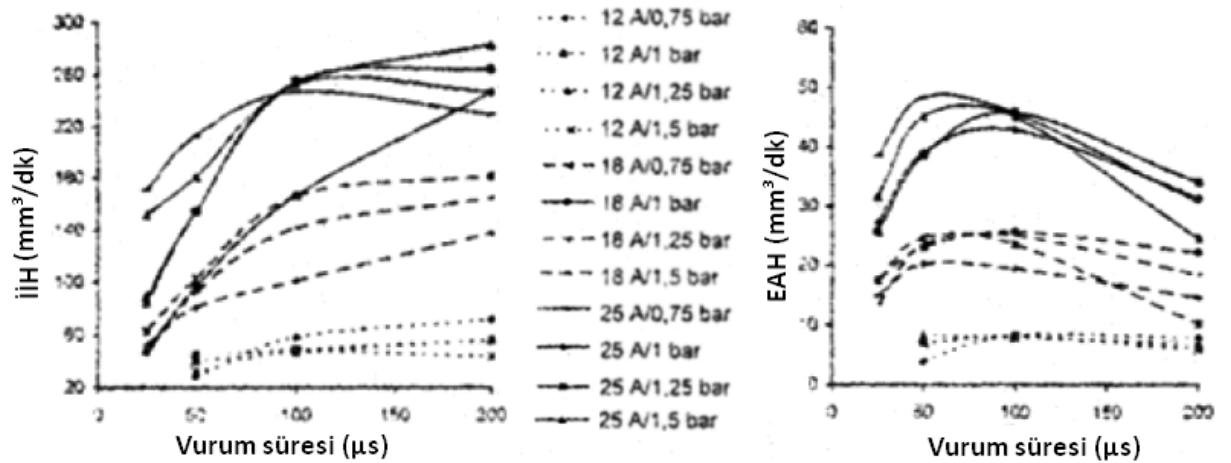
Çoğun ve Akaslan [35] çeşitli işleme parametreleri (vurum süresi, boşalım akımı ve dielektrik sıvı basıncı) ile elektrot kenar aşınması ve işleme performansı çıktılarının (işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve bağıl aşınma) değişimi incelenmiştir.

İşparçası malzemesi olarak 2080 kalıp çeliği, elektrot olarak elektrolitik bakır ve dielektrik sıvı olarak Tellus kullanılmıştır. Dielektrik sıvı elektrotların merkezinden açılan 5 mm'lik yıkama deliği ile işleme bölgesine gönderilmiştir. İşlem parametreleri olarak; boşalım akımı 12, 18, 25 A, vurum süresi 25, 50, 100, 200 μ s, dielektrik sıvı basıncı (P) 0 (statik), 0.3, 0.75, 1, 1.25, 1.5 bar, vurum bekleme süresi 25 μ s, açık devre gerilimi 80 V ve pozitif (+) kutuplama yapılmıştır. Boşalım akımı arttıkça İİH ve EAH'nın boşalım akımıyla birlikte arttığı görülmüştür (Şekil 1.88)



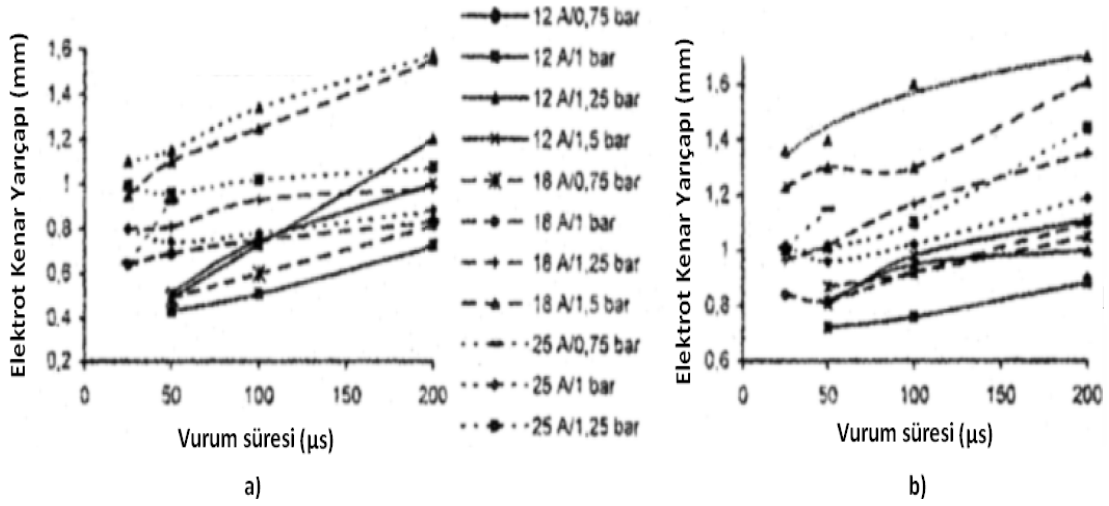
Şekil 1.88 Boşalım akımının, işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızına etkisi [35]

Araştırmacılar [35] yaptıkları deneysel çalışmada, vurum süresi arttıkça işparçası işleme hızının vurum süresiyle birlikte artış göstermiştir, elektrot aşınma hızının ise vurum süresinin artmasıyla ilk başlarda artış göstermişken, vurum süresinin daha da artması elektrot aşınma hızının düşmesine neden olduğu görülmüştür (Şekil 1.89).

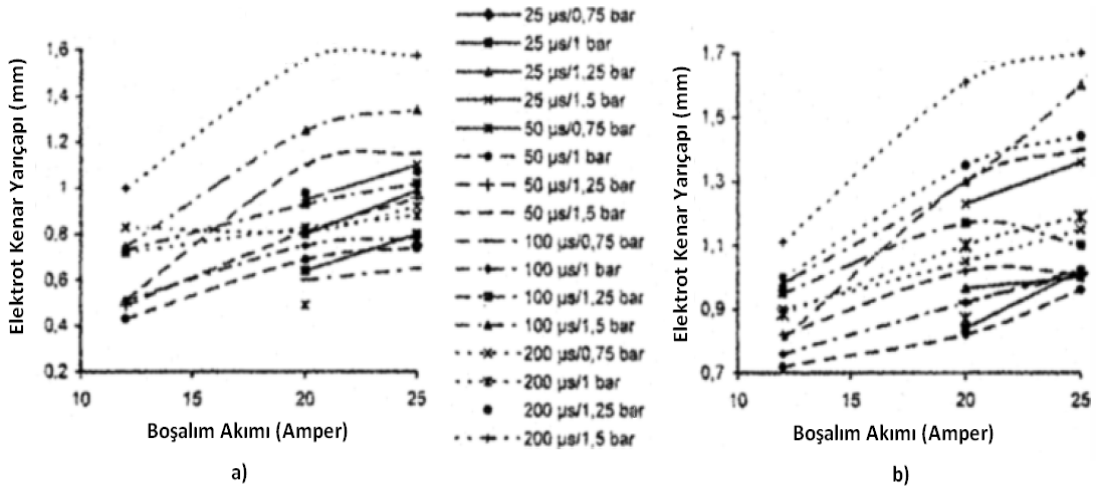


Şekil 1.89 Vurum süresinin, işparçası işleme ve elektrot aşınma hızına etkisi [35]

Çoğun ve Akaslan [35] yaptıkları deneysel çalışmada vurum süresi arttıkça elektrot iç ve dış kenar aşınma değerlerinin de vurum süresiyle birlikte arttığı görülmüştür (Şekil 1.90). Ayrıca boşalım akımı arttıkça elektrot iç ve dış kenar aşınma değerlerinin de boşalım akımıyla birlikte arttığı görülmüştür (Şekil 1.91).



Şekil 1.90 Vurum süresinin elektrot kenar aşınması üzerine etkisi a) dış kenar aşınması b) iç kenar aşınması [35]



Şekil 1.91 Boşalım akımının elektrot kenar aşınması üzerine etkisi a) dış kenar aşınması b) iç kenar aşınması [35]

1.1.1 Literatür Özetiinde Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Literatür taramasıyla elde edilen sonuçlar değerlendirilirken, işleme parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin) malzeme giderilmesi ve yüzey kalitelere etkileri ayrı ayrı ele alınmıştır.

1.1.1.1 Elektroerozyonla İşlemede İşlem Parametrelerin Malzeme Giderilmesine Etkisi

Malzeme giderilmesi olarak işparçası malzemesinden, malzeme kaldırma oranı (işparçası işleme hızı) ve takım (elektrot) aşınma hızı göz önüne alınmıştır.

Boşalım akımının etkisi: Yapılan literatür incelemesi sonucunda, boşalım akımının artması işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve elektrot kenar aşınması değerlerinin artmasına neden olduğu görölmüştür. Bunun nedeninin ise boşalım akımının artmasıyla birlikte boşalım enerjisinin yükselmesi ve yüksek boşalım enerjisinin daha fazla malzemenin ergime ve buharlaşmasına neden olması olarak bildirilmiştir. Bunun yanında yapılan bir çalışmada [9] boşalım akımının aşırı artışı, işparçası işleme hızının düşmesine yol açtığı görölmüştür bunun muhtemel nedeninin işparçasının yetersiz soğumasından dolayı oluşan kötü boşalımlardan olabileceği belirtilmiştir.

Vurum süresinin etkisi: Yapılan literatür incelemesi sonucunda vurum süresi arttıkça genellikle işparçası işleme hızı vurum süresiyle birlikte artış gözlenmiştir. Bunun yanında vurum süresinin aşırı artışı işparçası işleme hızının ya çok az değişmesine ya da azalmasına yol açtığı görölmüştür. Bunun nedeni olarak vurum süresinin artmasıyla boşalım enerjisinin artmış olmasıdır ama aşırı vurum sürelerinde plazma çapının genişlemesi sonucunda enerji yoğunluğunun azalması nedeniyle vurum süresinin aşırı artışı işparçası işleme hızının azalmasına yol açmıştır.

Ayrıca yapılan bir çalışmada [10] vurum süresi arttıkça işparçası işleme hızının vurum süresiyle önce azalıp sonra tekrar arttığı görölmüştür bunun muhtemel nedeninin de ilk başlarda düşük vurum süresinden dolayı oluşan düşük boşalım enerjisi nedeniyle ergimiş malzemenin bir kısmının işparçası üzerinde tekrar katılaşması bunun da işparçası işleme hızının azalmasına neden olması ve daha sonra vurum süresinin daha

da artması işlem bölgesine gönderilen enerjinin artmasına neden olarak işparçası malzemesi üzerinden daha fazla malzemenin kaldırılmasının sağlanması olduğu belirtilmiştir. Yine yapılan bir başka çalışmada [26] ise vurum süresinin artmasıyla birlikte işparçası işleme hızının azaldığı görülmüştür.

Vurum süresinin artmasıyla elektrot aşınma miktarının işlem şartlarına göre değişiklik gösterdiği gözlenmiştir. Bazı çalışmalarda [13,14,24] vurum süresinin artmasıyla elektrot aşınma hızı vurum süresiyle birlikte artış göstermişken, vurum süresinin daha da artması elektrot aşınma hızının azalmasına yol açmıştır. Bazı çalışmalarda [20, 26] vurum süresinin artması elektrot aşınma hızının azalmasına yol açtığı görülmüştür. Yapılan bir başka çalışmada [15] ise vurum süresinin artmasıyla elektrot aşınma hızı giderek azalmış ve yüksek vurum sürelerinde elektrot aşınma miktarı negatif çıkmıştır. Bunun muhtemel nedeninin vurum süresinin artmasıyla plazma çapının genişlemesinden dolayı enerji yoğunluğunun azalması ve dielektrik sıvı olarak kerosenin kullanılmasından dolayı işlem sırasında kerosenden karbon atomlarının ayrılarak elektrot yüzeyine yapışması ve elektrot yüzeyinde aşınmaya dirençli bir tabaka oluşturması olabileceği belirtilmiştir.

Vurum süresinin artması elektrot kenar aşınması değerinin bir çalışmada [35] artmasına neden olduğu görülürken başka bir çalışmada [24] ise vurum süresinin artması elektrot kenar aşınması değerinin azalmasına neden olduğu görülmüştür.

Vurum bekleme süresinin etkisi: Yapılan literatür incelemesi sonucunda vurum bekleme süresi arttıkça işparçası işleme hızının düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni ise vurum bekleme süresinin artması ile etkin işleme zamanının azalmış olmasıdır. Bu yüzden işleme zamanı vurum bekleme süresinin artmasıyla önemli bir şekilde yükselir. Yapılan bir başka çalışmada [20] ise vurum bekleme süresinin artması işparçası işleme hızının artmasına neden olduğu görülmüştür. Bunun muhtemel nedeninin ise, işleme aralığındaki işlem artıklarının temizlenebilmesi ve dielektrik sıvının tekrar de-iyonize olabilmesi için yeterli bekleme süresinin olmasından kaynaklandığı bildirilmiştir.

1.1.1.2 Elektroerozyonla İşlemede İşlem Parametrelerin Yüzey Kalitesine Etkisi

Elektroerozyon işlemi sonucunda oluşan işparçası ve elektrot yüzey pürüzlülüğü değerlerine işleme parametrelerin etkileri ayrı ayrı ele alınmıştır.

Boşalım akımının etkisi: Yapılan literatür incelemesi sonucunda boşalım akımı arttıkça işparçası ve elektrot yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Bunun muhtemel nedeninin artan boşalım akımıyla birlikte boşalım enerjisinin artması nedeniyle işparçası ve elektrot yüzeyinden daha derin ve geniş malzemenin kaldırılması olduğu bildirilmiştir. Ayrıca yapılan bir başka çalışmada [10] ise boşalım akımının artmasıyla birlikte işparçası yüzey pürüzlülüğü artış göstermişken, boşalım akımının daha da artması işparçası yüzey pürüzlülüğünün azalmasına yol açtığı görülmüştür. Bunun nedeninin ise dielektrik sıvı içerisindeki elektroerozyon sonucu oluşan yeterli miktardaki metalsel enkazın plazma kanalının modifiye olmasına, (genişleyip, büyümesine) yol açmış olabileceği belirtilmiştir.

Vurum süresinin etkisi: Yapılan literatür incelemesi sonucunda vurum süresi arttıkça işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür ama vurum süresinin aşırı artması yüzey pürüzlülük değerinin düşmesine neden olduğu görülmüştür. Bunun muhtemel nedeninin artan vurum süresiyle birlikte vurum enerjisinin artmasından dolayı işparçası ve elektrot yüzeyinden daha geniş ve derin malzemenin kaldırılması sonucunda yüzey pürüzlülüğünün artması bunun yanında uzun vurum sürelerinde plazma kanalının genişlemesinden dolayı enerji yoğunluğunun azalması nedeniyle işparçası ve elektrot yüzeyinden kaldırılan malzemenin azalması olduğu bildirilmiştir. Ayrıca yapılan bir başka çalışmada [26] ise vurum süresinin artmasıyla ilk başlarda işparçası yüzey pürüzlülüğü vurum süresiyle birlikte azalmışken, vurum süresinin daha da artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür.

Vurum bekleme süresinin etkisi: Yapılan literatür incelemesi sonucunda işlem şartlarına da bağlı olmak üzere, işparçası yüzey pürüzlülüğü genel olarak vurum bekleme süresiyle birlikte azalmıştır. Ayrıca yapılan bir başka çalışmada [9] ise işparçası yüzey pürüzlülüğü ilk başlarda vurum bekleme süresinin artmasıyla beraber azalırken, vurum bekleme süresinin daha da artmasıyla işparçası yüzey pürüzlülüğünde artış görülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, farklı çaplara sahip (8, 12, 16 ve 20 mm) % 99,99 saflıktaki elektrolitik bakır çubukların elektrot olarak kullanılmasıyla, 57-59 HRC sertliğinde, soğuk iş takım çeliğinin TS EN X155CrVMo12 (DIN 1.2379) elektroerozyon ile işlenmesi sırasında, işlem parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi), işleme performansı çıktıları (İİH, EAH, elektrot kenar aşınması, işparçası ve elektrot yüzey pürüzlülükler) üzerine etkileri ve elektroerozyonla işleme yönteminde yeni bir ek parametre olarak enerji yoğunluğunun etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elektroerozyonla işleme yönteminde enerji yoğunluğundaki değişimin, İİH, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması üzerine etkisi belirlenmiştir. Değişkenlerin analizi (ANOVA) yöntemi uygulanarak hangi işleme parametrelerinin, işleme performansı çıktılarına hangi önem sırasıyla etki ettiği bulunmuştur. Daha sonra elde edilen deneysel verilerle Taguchi Deneysel tasarımı uygulanarak sonuçlar optimize edilmiş ve son olarak doğrulama testi yapılarak optimize edilen değerlerin doğruluğu teyit edilmeye çalışılmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

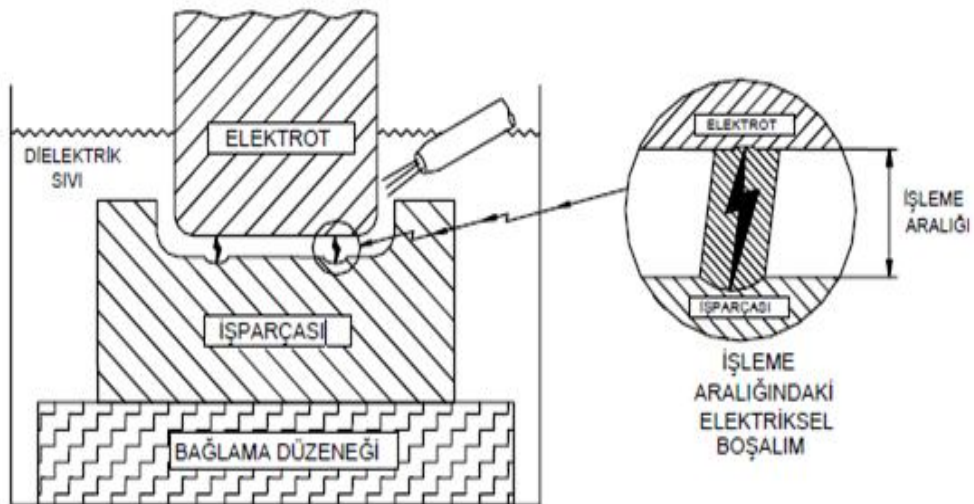
Elektroerozyon ile işlemeyle ilgili olarak yapılan çalışmalarda çoğunlukla elektroerozyon işleminin en etken parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi), işleme performansının çıktıları üzerine (İİH, EAH, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot yüzey pürüzlülüğü) üzerine etkilerinin araştırıldığı görülmüştür.

Bu çalışmada elektroerozyon ile işlemede kullanılan en etken parametrelerin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi) işleme performansının çıktılarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir bununla birlikte Taguchi deneysel tasarımı ve değişkenlerin analizi (ANOVA) yöntemleri kullanılarak, sonuçlar optimize edilmiş ve hangi işleme parametrelerinin işleme performansının çıktılarına daha önemli etki ettiği bulunmuştur. Ayrıca elektroerozyonla işlemede yeni bir ek parametre olarak enerji yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Enerji yoğunluğundaki değişimle birlikte işparçası işleme hızı, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınmasının değişimleri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

ELEKTROEROZYON İLE İŞLEME

Elektriksel kıvılcımla aşındırma yöntemi olarak da adlandırılan elektroerozyon ile işleme (EDM; Electrical Discharge Machining) elektriksel olarak iletken bir işparçasına yüksek frekanslı elektrik boşalmalarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece işparçası yüzeyinden küçük parçacıkların ergitilerek veya buharlaştırılarak kaldırılması prensibine dayanan bir modern üretim yöntemidir. Gerilim vurumlarının uygulanması sonucu takım elektrodu ile işparçası elektrodu arasında birbirine en yakın noktalar arasında elektrik boşalmaları oluşur. Şekil 2.1’de ana hatları ile görülen EEİ’de elektrik iletkenliğine sahip işparçası ve elektrot arası dielektrik sıvıyla doldurulur ve takım elektrodu işlem sırasında işparçasına temas etmeyecek şekilde çok yaklaştırılır genellikle işleme aralığı olarak bilinen 0,01-0,5 mm’lik bir aralık bırakılır.



Şekil 2.1 EEİ'nin şematik görünüşü [4]

Boşalım gerilimi işleme aralığının büyüklüğüne ve dielektrik sıvının yalıtkanlık direncine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir daha büyük işleme aralığı için daha büyük boşalım gerilimi gerekir. Gerilim vurumunun uygulanmasını takiben elektrot ve işparçası arasındaki en yakın iki nokta arasında oluşan yoğun elektrik alandan dolayı bir kanal iyonlaşır ve normal şartlarda yalıtkan olan dielektrik sıvı iletken hale geçerek elektriğin iletilmesini sağlar. Oluşan elektrik boşalımları temas ettiği elektrot ve işparçası yüzeylerinin ergimesine ve buharlaşmasına neden olur. Sonuçta, işparçasında küçük kraterler oluşacak şekilde malzemeler yüzeyden kaldırılır ve dielektrik sıvı dolaşımı tarafından işlem bölgesinden uzaklaştırılır. Mikrosaniye gibi çok kısa sürelerde gerçekleşen bu işlemler devam ederek işparçası elektrotu üzerinde takım elektrodu şeklinin negatifi oluşur [36].

Elektriksel boşalımların enerjisi nedeniyle ısınan elektrot ile işparçası yüzeylerinin soğutulması ve elektroerozyon sonucu oluşan işleme atıklarının işleme aralığından uzaklaştırılması dielektrik sıvı tarafından gerçekleştirilir. Ayrıca dielektrik sıvı arkın oluşmasını ve dar alanda yoğunlaşmasını sağlar. EEİ'nin devam edebilmesi için işleme aralığı sabit bir değerde tutulmalıdır, işleme aralığının sabit bir değerde tutulması ise servo kontrollü besleme mekanizmasının işparçasına doğru hareket ettirilmesiyle gerçekleştirilir [37].

EEİ yönteminde öncelikle elektrik enerjisinden yararlanılır iletken olmayan sıvı içerisine daldırılmış olan işparçası ve elektrot arasında gerçekleşen bir dizi farklı elektriksel boşalımlar sonucu ısı enerjisi oluşur. Bu ısı enerjisi işparçasını aşındırmak için yüksek sıcaklıktaki plazmanın üretilmesinde kullanılmaktadır ısı enerjisi tarafından oluşturulan plazma kanalının anot ile katot uçlarında 8 000 °C ile 12 000 °C arasında sıcaklıklar oluşur. Her bir elektriksel boşalımda ise işlem şartlarına bağlı olarak 10^{-6} ile 10^{-4} mm³ arasındaki malzeme hacmi işparçası yüzeyinden kaldırılır. Malzeme işleme hızı ise işleme şartlarına bağlı olarak 2 ile 400 mm³/dk arasında değişkenlik gösterir [2].

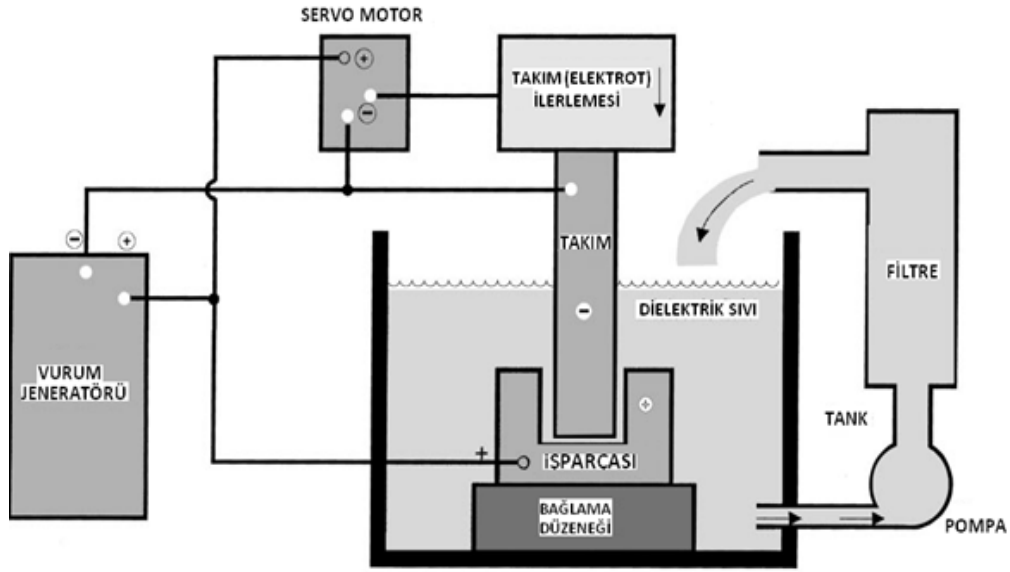
Elektroerozyon yöntemiyle her sertlikteki malzeme elektrik iletmek şartıyla mekanik özelliklerinden bağımsız olarak işlenebildiğinden dolayı, geometrik olarak karışık, yüksek sertlikteki, gevrek ve yüksek dayanımlı malzemeler gibi kesimi geleneksel

yöntemlere göre zor olan malzemeler bu yöntemle kesme kuvveti gerektirmeden rahatlıkla kesilir. EEİ yönteminde işparçası ve elektrot arasında fiziksel bir temas olmamasından dolayı işparçasında mekanik stres ve titreşim oluşmaz bu da bu yöntemin hassas kalıp üretiminde başlıca yöntem haline getirmiştir. Ayrıca havacılık, otomotiv, uzay sanayi, uçak sanayinde ve cerrahi parçaların bitirme işlemlerinde son şeklinin verilmesinde de kullanılır [38].

EDM işleminin tüm bu avantajlarına rağmen bazı önemli eksiklikleri de vardır. EDM işleminin en büyük eksikliği olarak; düşük hacimsel malzeme kaldırma oranı (işparçası işleme hızı) ve bu yöntemle işlenen parçaların kötü yüzey kalitesine sahip oluşu olarak gösterilebilir. Diğer eksiklikleri olarak da, yüksek oranda elektrot aşınması, yüzey ve yüzeyaltı hasarları ve ince ve kırılğan ısıdan etkilenmiş bölgenin (beyaz tabaka) oluşmasıdır [10,28]. Ayrıca işleme sırasında oluşan sıcaklıktan dolayı elektrodun ısıl genişmesi ve kaba işleme ile bitirme işlemleri arasında elektrot değişimi esnasındaki aksel sapmaların olabilmesi, böylelikle istenen işleme ölçülerinin dışında sonuçların elde edilmesi, neden olarak gösterilebilir [39].

1943 yılında Rus araştırmacıların kıvılcım erozyonu ile metallerin birbirlerini aşındırabileceğini keşfetmelerine rağmen, ancak 1960'lı yıllarda matematiksel modelleme ile ilgili yapılan kapsamlı çalışmalarla EDM yönteminde ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle elektronik kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ile bu işlem güvenilir ve hassas bir talaş kaldırma metodu olarak kabul edilmiştir [8].

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



Şekil 2.2 EDM tezgahının ana kısımları [40]

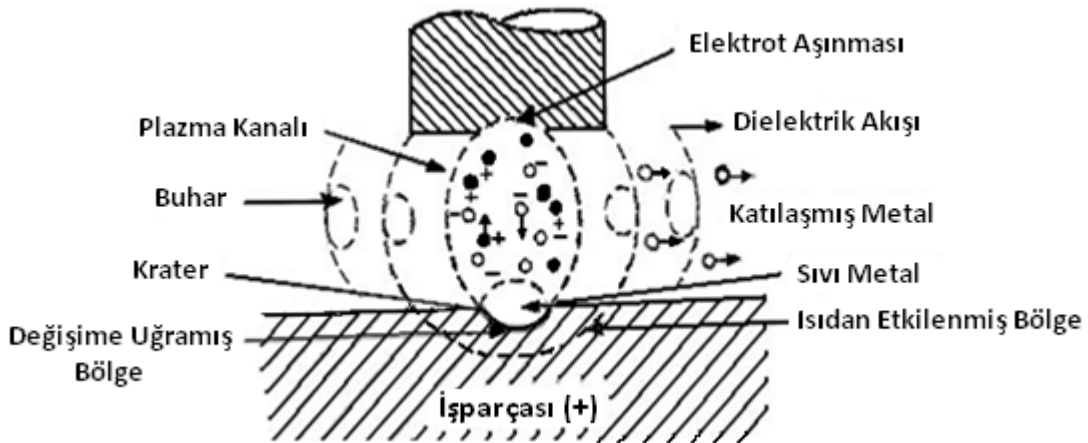
2.1 Malzeme Kaldırma Mekanizması [8]

EDM yönteminde malzeme kaldırma işleminin temeli dielektrik sıvı tarafından ayrılmış olan elektrik iletkenliğine sahip işparçası ve elektrot arasında meydana gelen elektriksel kıvılcımların etkisiyle oluşan elektroerozyon işlemine dayanmaktadır. Frekansı 5 kHz seviyesinde ve büyüklükleri 20 – 120 V arasında olan bir dizi gerilim vurumları küçük bir işlem aralığıyla genellikle 0.01 ile 0.5 mm mertebesinde ayrılmış olan işparçası ve elektrot arasına uygulanır. Böyle küçük bir boşluk arasına bu gerilim değerlerinin uygulanması dielektrik sıvının elektriksel olarak bozunumuna yol açar. Elektriksel bozunum çok küçük bir alanda etkili olur yaklaşık olarak 10 µm yarıçaplı bir kanalda gerçekleşir.

İşlem bölgesindeki başıboş elektronlar ve uygulanan gerilim alanı nedeniyle, katot tarafından yayılan elektronların anoda doğru ivmelenmesiyle elektriksel bozunum ortaya çıkar. Bu elektronlar dielektriğin nötr atomlarıyla çarpışır böylece pozitif iyonlar ile daha fazla elektron oluşur, bu iyonlar ve elektronlarda sırasıyla katot ve anoda doğru hızlanarak ilerler. Elektronlar ve pozitif iyonlar sırasıyla anot ve katot yüzeye ulaştıklarında da çarpma etkisiyle sahip oldukları kinetik enerji ısı enerjisine dönüşür bu arada sıcaklıklar 8000 ile 12.000°C'ye ve ısı akısı da 10^{17} W/m² kadar ulaşır. Genellikle 0.1 ile 200 µs arasında değişen çok kısa kıvılcımlanma (vurum) süresinde elektrotların

yerel olarak sıcaklıkları kaynama noktalarının üstüne çıkabilir. Dielektrik sıvının buharlaşması nedeniyle plazma kanalı üzerindeki basınç 200 bar'a kadar çıkabilir bu yüksek basınç da aşırı şekilde ısınmış metalin buharlaşmasını önler. Vurum işlemi sona erince basınç hızla azalır ve aşırı ısınmış metal patlayarak buharlaşır böylece malzeme elektrot yüzeylerinden kaldırılmış olur daha sonra taze dielektrik sıvı işlem bölgesine gönderilerek, işlem artıklarını işleme aralığından uzaklaştırır ve işparçası yüzeyini soğutur bu sırada işparçası yüzeyinden çıkarılamayan metal yüzey de tekrar katılır. İşparçası yüzeyinden kaldırılan malzeme küçük küreler şeklinde katılır geriye kalan buhar ise yüzeye doğru yükselir (Şekil 2.3).

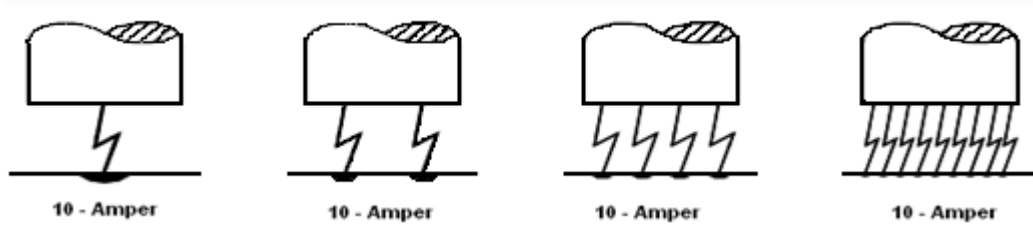
Anot ve katot yüzeylerinden malzeme kaldırma miktarı toplam akım içindeki elektron ve pozitif iyonlarının yüzdeleriyle bağlıdır. Boşalmanın başlangıcında elektron akımı daha baskındır ve pozitif iyonlar elektronlardan kabaca 10^4 kat büyük kütleye sahip olduklarından dolayı elektronlar kadar hızlı hareket edemezler bunun sonucunda anot olan işparçasından malzeme kaldırılması katot olan elektrotta göre fazla gerçekleşir. EDM işleminin sonuna doğru, plazma kanalının genişliği artar ve elektrotlar arasında ki akım yoğunluğu azalır. Akımın azalan elektronlar nedeniyle azalması pozitif iyonların oransal olarak katkısının artmasını sağlar ve böylece daha fazla malzeme katot yüzeyinden kaldırılmış olur.



Şekil 2.3 EEİ sırasında kıvılcım oluşumu ve işparçasından malzeme kaldırılması [8]

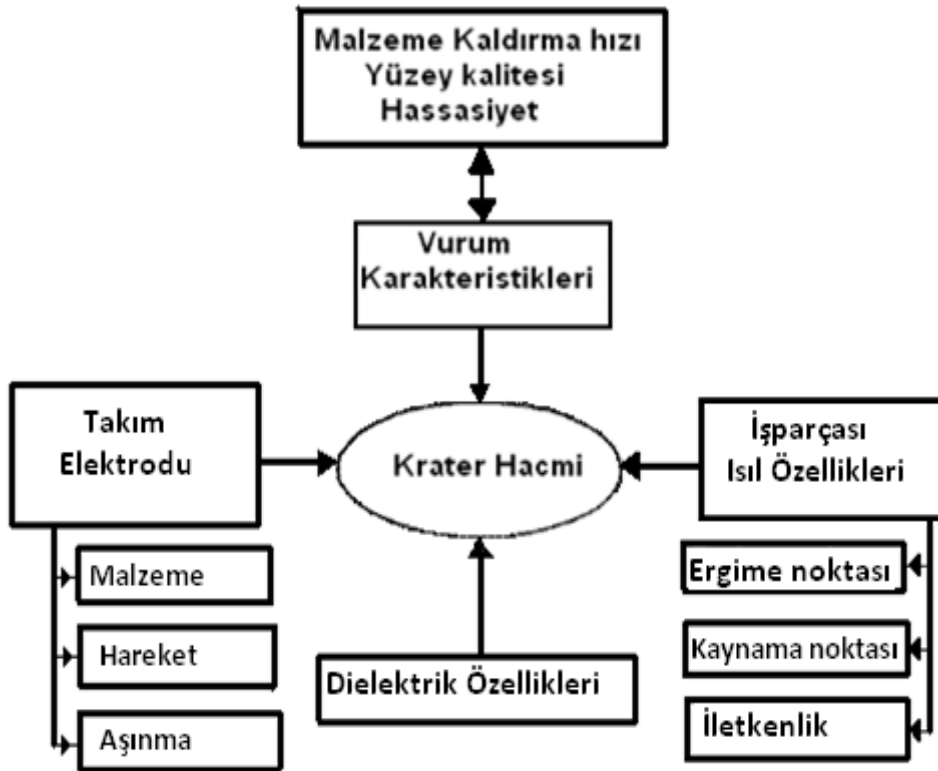
Boşalım frekansı ya da kıvılcım frekansı genellikle saniye de 500 ile 500.000 kıvılcım arasındadır. Yüksek kıvılcım frekansı, kıvılcımların kombine etkisiyle daha fazla

malzeme işparçası yüzeyinden kaldırılmış olur. Eğer akım sabit kalıp, frekans yükseltirse her kıvılcımla daha az malzeme kaldırıldığı için yüzey kaliteside daha iyi olur [8].



Şekil 2.4 EEİ'de kıvılcım frekansının işparçası yüzeyine etkisi [41]

Elektroerozyon işleminde hem işparçası hem de elektrottan malzeme kaldırma hızı sadece işparçası malzemesine bağlı değildir bunun yanında elektrot malzemesine, işleme parametrelerine (boşalım akımı, boşalım süresi, kutuplama vb), işparçasının ve takım elektrodunun şekil ve ölçüsü gibi geometrik özelliklerine ve işleme ortamına bağlı olarak değişir. Elektroerozyonla işlemede malzeme kaldırma hızını tamamen tahmin edebilecek her hangi bir kullanılabilir bağıntı mevcut değildir [7,8].



Şekil 2.5 EEİ performansına parametrelerin etkileri [8]

2.2 Elektroerozyon İle İşleme Yöntemleri [42]

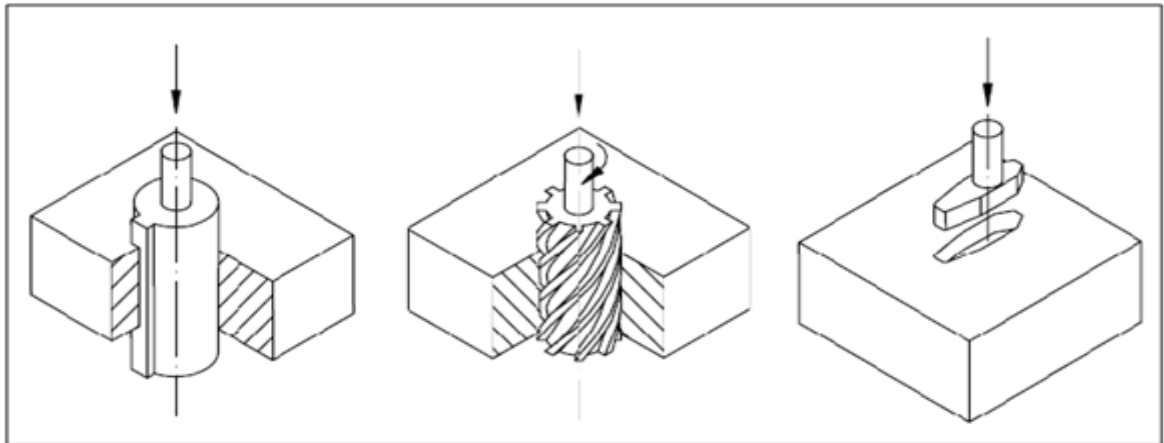
EEİ ile işleme yöntemleri işleme prensiplerini göz önünde bulundurularak aşağıdaki gibi üç ana grup altında ele alınabilir.

- (i) EEİ ile delme ve oyma
- (ii) EEİ ile kesme
- (iii) EEİ ile taşlama;

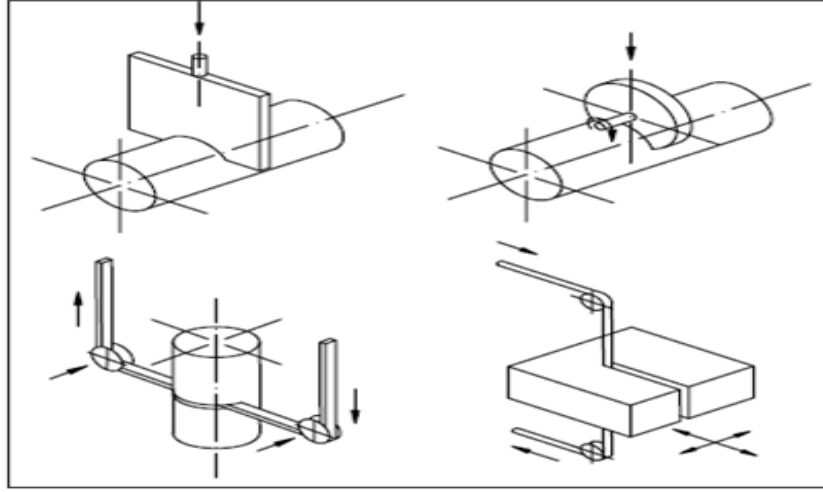
(i) EEİ ile delme ve oyma yöntemi, işparçasının sabit profilli bir elektrot ile boydan boya delinmesi veya elektrodun işparçasına belirli bir işleme derinliğinde daldırılması ile yapılan işlemdir (Şekil 2.6).

(ii) EEİ ile kesme yöntemi, işparçasının levha, disk, tel veya şerit şeklindeki elektrotlar ile çeşitli profillerde kesilerek koparıldığı veya belirli bir işleme derinliğinde elektrodun işparçası üzerinde kör delik oluşturduğu bütün operasyonları kapsayan yöntemdir (Şekil 2.7).

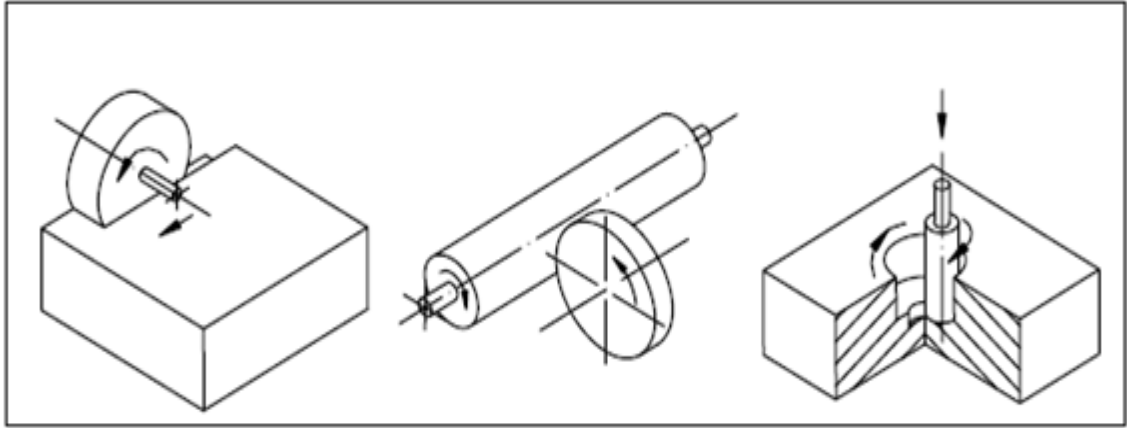
(iii) EEİ ile taşlama yöntemi, kendi eksenini etrafında dönebilen elektrotlar ile işparçalarının dış yüzeylerinin veya iç deliklerinin taşlandığı işleme yöntemidir (Şekil 2.8).



Şekil 2.6 EEİ ile delme ve oyma yöntemi [42]



Şekil 2.7 EEİ ile kesme yöntemi [42]



Şekil 2.8 EEİ ile taşlama yöntemi [42]

2.3 Elektroerozyon İle İşlemenin Temel Prensipleri

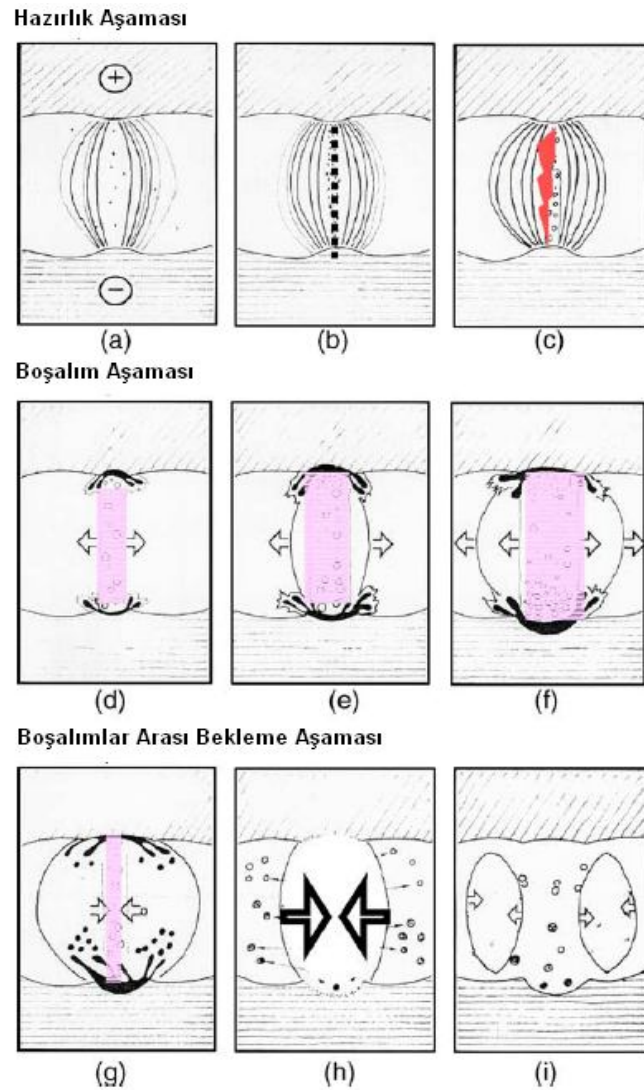
EEİ fiziksel prensibi olarak, bir elektriksel boşalım sırasında, EEİ'nin üç temel elemanı olan elektrot, işparçası ve dielektrik sıvı arasındaki ardışık fiziksel olaylar oluşmaktadır. Bu olaylar üç farklı bölüme ayrılarak açıklanabilir. Bunlar;

- i) Hazırlık aşaması
- ii) Boşalım aşaması
- iii) Boşalımlar arası bekleme aşaması

EEİ' nin üç temel elemanı olan elektrot, işparçası ve dielektrik sıvı arasında gerçekleşen fiziksel olaylar sırasıyla ayrıntılı olarak Şekil 2.9' da gösterilmiştir.

İlk aşama hazırlık aşaması olarak bilinir ve çok kısa sürer. Bu safhada güçlü elektrik alan dielektrik ortamı iyonize eder bu yüzden yüksek iletkenlikli bir kanal oluşur. İkinci aşama elektroerozyonun gerçekleştiği safhadır. Üçüncü aşama ise elektroerozyonun son bulduğu, boşalıklar arası beklemenin olduğu bekleme safhasıdır [3].

EEİ ile işlemede kullanılan ve elektrot ve işparçası arasını dolduran dielektrik sıvı çok küçük partiküller içermektedir. Elektrot yüzeylerinin birbirine en yakın uçları arasındaki elektrik alan yoğunlaşması, dielektrik ortamın molekül ve iyonlarının kutuplaşmasına aynı zamanda da yönlendirilmesine neden olur (Şekil 2.9. a).



Şekil 2.9 Elektroerozyon ile işleminin fiziksel prensibi [43]

Operasyon sırasında çok küçük işleme aralığı boyunca uygulanan yaklaşık 80-200 V'luk doğru akım gerilimi işparçası ve elektrot arasında manyetik alan oluşturur. Dielektrik sıvının işparçası ve elektrodu yalıtmış olmasından dolayı işlemin başlangıcında hiçbir elektrik akım akışı olmaz. Güçlü elektriksel alan dielektrik sıvı içerisindeki küçük partiküllerin elektriksel alan içinde bir hat üzerinde asılı kalmasına ve işleme aralığı boyunca bir köprü oluşturmaya neden olur (Şekil 2.9.b).

Köprü boyunca dielektrik sıvı kırılarak iyonlaşır ve iletken hale geçer. Bu nedenle işleme aralığındaki voltaj değeri yaklaşık 25 volta kadar düşerken akım değeri operatör tarafından önceden ayarlanmış olan sabit değere kadar yükselir (Şekil 2.9.c)

Akımın artmasıyla bu bölgede ısı artmaya başlar, elektrot ile işparçasının bir kısmı buharlaşır ve plazma kanalı oluşmaya başlar. Plazma kanalını oluşturan bileşenler; pozitif iyonlar, serbest elektronlar, her iki elektrotun metal buharı, elektriksel kıvılcıkların etkisiyle dielektrik sıvının ayrışması sonucu açığa çıkan gazlardır (Şekil 2.9.d).

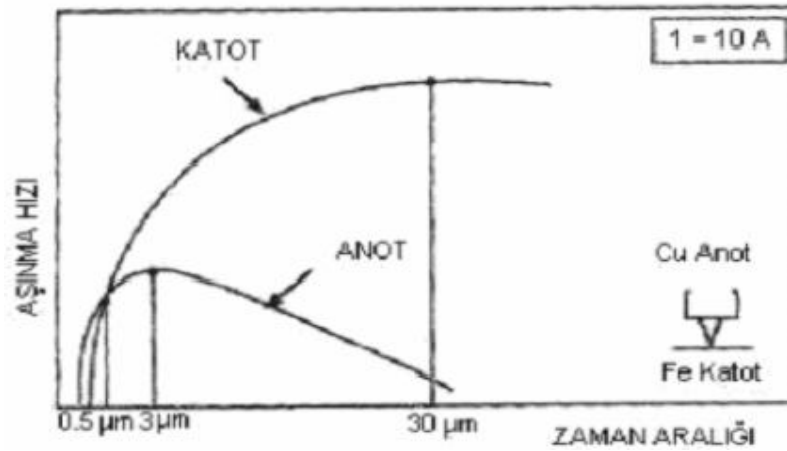
Şekil 2.9.d'deki plazma kanalı vurum süresi boyunca genişler (Şekil 2.9.e) Plazma kanalının etrafı buhar kabarcıklarıyla çevrilir ve buhar kabarcıkları gittikçe büyür ama yoğun dielektrik sıvı, plazmanın büyümesini kısıtlayarak enerjinin çok küçük bir hacimde verilerek enerji yoğunluğunun artmasını sağlar (Şekil 2.9.f).

3 j/mm^3 'e kadar olan enerji yoğunlukları, yerel plazma sıcaklığının $40\,000^\circ \text{C}$ 'ye kadar çıkmasına neden olur. Yoğunluk etkileri sebebiyle dinamik plazma basıncı 3000 bar'a çıkar. Viskozite etkisinin plazma şeklinden sorumlu olduğu düşünülmektedir. Vurum süresi boyunca yüksek plazma enerjisi işparçası ve elektrot çiftini ısı iletimle ısıtır. Fakat yüksek plazma basıncı nedeniyle sınırlı elektrot malzemesi buharlaşması olur. Akım durduğunda basınç azalır, plazma kanalı yok olur ve buhar kabarcıkları söner. Bu da elektrot ve işparçası yüzeylerindeki aşırı ısınmış sıvı partiküllerin dielektrik sıvı içinde patlamasına sebep olur (Şekil 2.9. g).

Bekleme süresi esnasında boşalım kanalı kaybolur ve dielektrik sıvı ergimiş malzemeyi soğutup katılaştırarak ortamdan uzaklaştırır. Böylece işlem bölgesinde, işlem

kalıntılarının fazla birikmesinden dolayı oluşan arkların oluşması engellenir. Ayrıca dielektrik sıvı elektrot yüzeylerini soğutur ama sıvı malzemenin bir kısmı yüzeyde tekrar katılaşabilir. Böylece elektrot ve işparçası arasındaki en yakın iki nokta aşınmış olur (Şekil 2.9.h). Bu döngü işlemin sonuna kadar her elektriksel boşalım için tekrar eder (Şekil 2.9.i).

Vurum süresinin başlangıcında hızlı hareket eden elektronların bombardımanı sebebiyle elektrot ilk başta işparçasına göre daha hızlı erir. Fakat plazma yarıçapının artması ile anot yüzeyinde bölgesel ısı transferinde oluşan azalma hızla erimiş elektrot malzemesinin birkaç mikrosaniye içerisinde tekrar katılaşmasına neden olur. Elektronlarda kabaca 10^4 kat büyük kütleyle sahip pozitif iyonların daha düşük hareket kabiliyetleri sebebi ile işparçasının erimesi daha geç olur. İşparçasında (katot) oluşan plazma yarıçapı elektroda göre daha küçüktür ancak derinliği büyüktür. Plazma kanalının bu nedenle işparçasının iç kısımlarına doğru noktasal bir ısı kaynağı oluşturduğu kabul edilir [3,44].



Şekil 2.10 Elektrot ile işparçası arasındaki erozyon farklılığı [44]

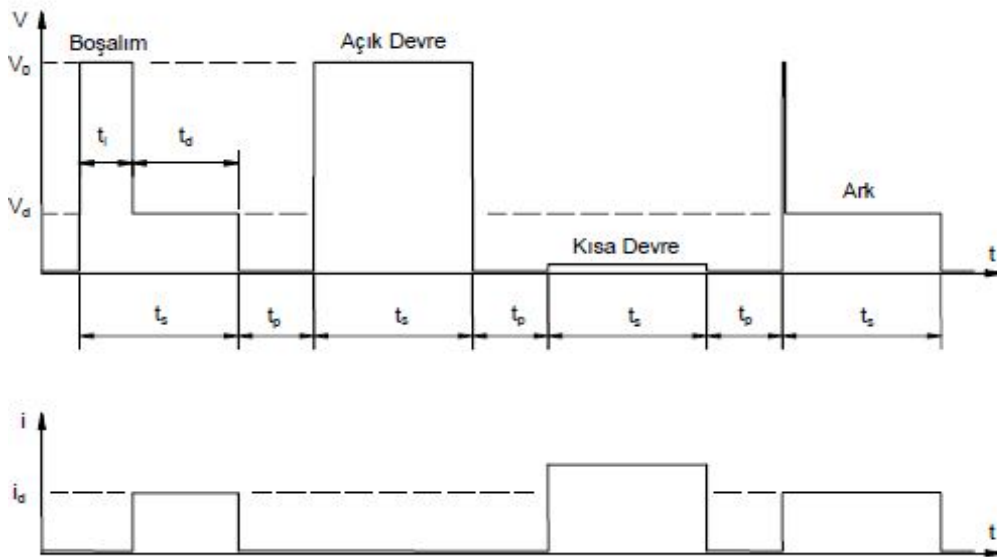
2.4 Elektroerozyon ile İşlemin Temel Parametreleri

EEİ ile işlemin çok parametreliliği olduğu düşünüldüğünde, işlem parametreleri ile işleme performansı arasındaki ilişkinin çok iyi bilinmesi gerekir. EEİ ile işlemede temel parametreler aşağıda verilmiştir;

1. Elektriksel parametreler,
2. Vurum jeneratörü karakteristikleri,
3. Dielektrik sıvı parametreleri,
4. İşparçası malzemesi fiziksel özellikleri,
5. Elektrot malzemesi fiziksel özellikleri,

2.4.1 Elektriksel Parametreler [19,45,46]

Çalışma aralığındaki boşalım işleminin tipik gerilimi ve akım değişimleri $V(t)$ ve $i(t)$ tarafından karakterize edilirler. Bu değişimler Şekil 2.11'de gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri

EEİ ile işlemin elektriksel parametreleri ile ilgili eşitlikler ve tanımlar aşağıdaki verilmiştir.

- a) Boşalım süresi (t_d): Ateşleme sonrası işleme aralığı boyunca oluşan boşalım süresidir.
- b) Gecikme süresi (t_i): Dielektrik sıvının iyonlaşma (elektrik iletkenleşme) süresidir.

c) Vurum süresi (t_s): İşleme aralığına gerilimin ilk uygulanma anı ile boşalmanın bitiş anı arasındaki toplam süredir.

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

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

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

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

f) Vurum frekansı (f_c): Jeneratör tarafından işparçası ve elektrot arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısıdır.

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

h) Boşalım akımı (i_d): Boşalım süresince işleme aralığından geçen akımdır.

i) Boşalım gerilimi (v_d): Boşalmanın devam ettiği sürece ölçülen gerilimdir.

j) Boşalım gücü (P_d): Bir boşalım süresince uygulanan güçtür.

$$P_d = V_d(t) \cdot i_d(t) \quad (2.3)$$

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

$$W_s = \int_{t_d} V_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt \approx V_d \cdot i_d \cdot t_d \quad (2.4)$$

l) Ortalama çalışma akımı (i): İşleme süresi boyunca işleme aralığından geçen akım değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

m) Ortalama çalışma gerilimi (V): İşleme süresi boyunca işleme aralığında ölçülen gerilim değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

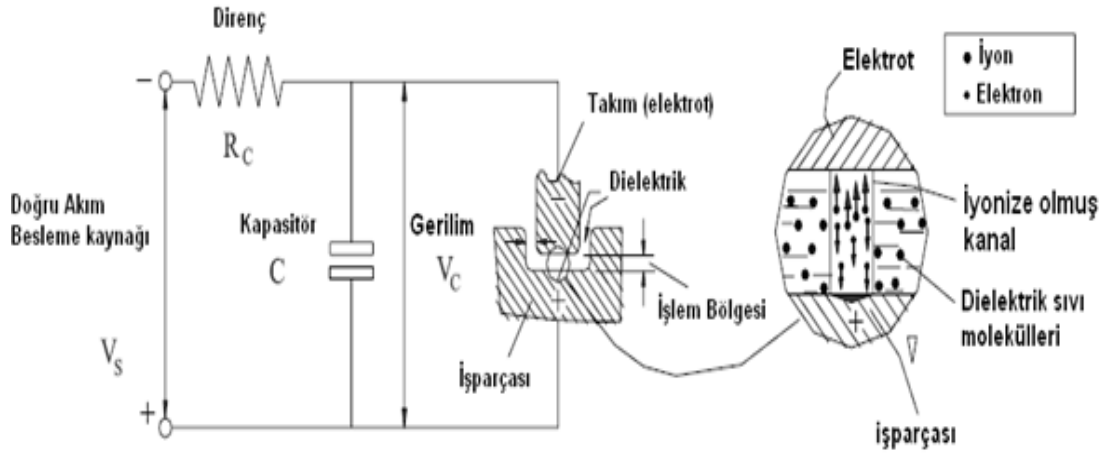
2.4.2 Vurum jeneratörü karakteristikleri:

Elektroerozyon ile işlemede çeşitli tiplerde elektrik güç kaynakları kullanılmaktadır. Aralarında birçok farklılık olsa da, her çeşitteki güç kaynakları aynı amaç için kullanılırlar bunlar; hassasiyet ve ekonomik bir şekilde elektriksel kıvılcım ile malzemelerin kaldırılmasının sağlanabilmesidir [47]. Çeşitli tipteki güç kaynakları aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

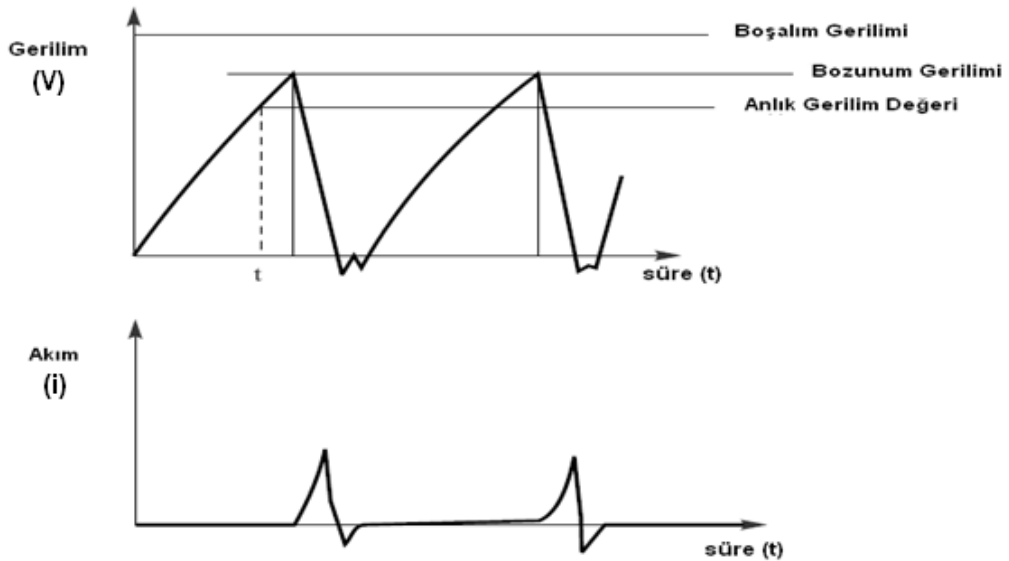
i) RC tipi jeneratörler: Bu jeneratör üzerindeki kondansatörde gerilim yeterli seviyeye geldiğinde kondansatör aniden takım-işparçası aralığına boşalır ve sonra yeniden doldurularak çevrim devam ettirilir. Ana elektrot malzemesi olarak bakırın kullanıldığı bu devreye "RC" ya da yöntemin geliştirilmesinde büyük katkıları olan rus bilim adamı Lazarenko tarafından ilk kez kullanıldığı için "Rus Devresi" de denilmektedir. Doğal ateşlemenin ve çoğunlukla salınımlı boşalımların oluştuğu, boşalım sonunun enerji depolanması tarafından etkilendiği, boşalım süresi ve sıklığının esasen devre elemanlarına bağlı olduğu kadar işleme aralığındaki şartlara da bağlı olduğu jeneratörlerdir. Bu türdeki jeneratörlerde kullanılan elemanlar kapasitanslar, indüktanslar veya her ikisinin beraber kullanıldığı RC, RLC, RLCD, LC tipindeki elemanlardır [5,45].

"RC" devresi basit, ucuz ve dayanıklı olması sebebiyle sık tercih edilse de malzeme kaldırma kabiliyeti sınırlıdır. Düşük akımlarda iyi çalışır, özellikle çapı 0.12 mm'nin altındaki delikler için miliamper gerekli olmaktadır. Boşalma akımının 4-5 A'den büyük olduğu değerlerde devre kararsız ve düzensiz bir hal alır. Bu tip devre kullanımında işleme hızı da düşüktür. Bunun sebebi kondansatörün dolması için gerekli zamanın

yüksek frekanslarla çalışmasına engel olmasıdır. Ekonomikliği ve basitliği sebebiyle ilk kullanımından itibaren fazla geliştirilmeyen bu tip devrelerin halen kullanıldığı basit tezgahlar bulunmaktadır [5,47].



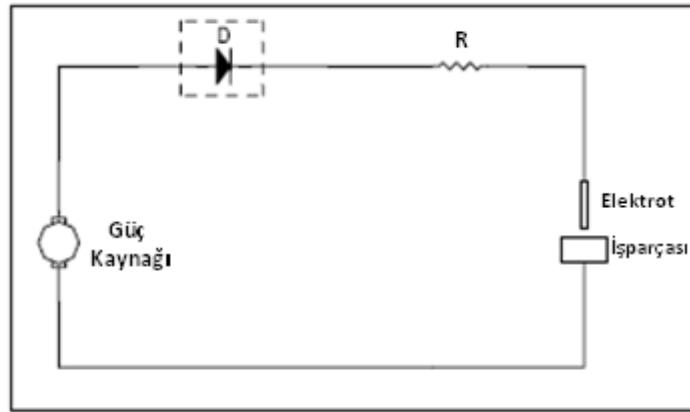
Şekil 2.12 RC jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı [41]



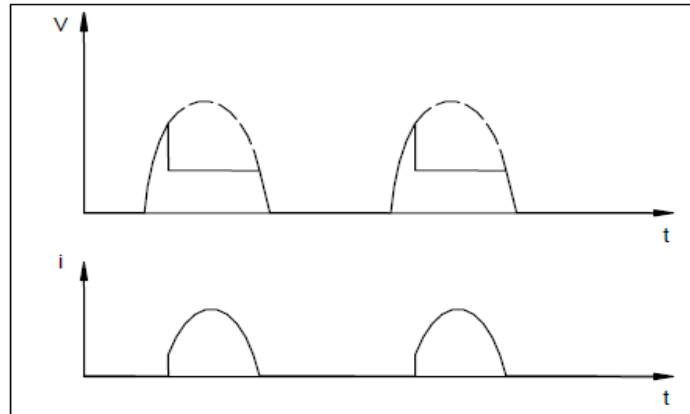
Şekil 2.13 RC jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi [41]

ii) Döner vurum jeneratörleri: Elektroerozyonla işlemede malzeme kaldırma hızlarının artırılmasıyla ilgili yapılan çalışmalar sonucunda devrelerdeki gerekli gücü karşılayabilmek için motor-jeneratör kombinasyonun kullanılmaya başlanmıştır. Bunun sonucunda da asimetrik çıkış dalgalar elde edilerek doğru akım güç kaynaklarına eşdeğer hatta daha üstün bir sonuç elde edilmiştir. Genellikle dönel impuls jeneratörleri

(RIG: Rotary Impuls Generators) olarak da bilinen bu cihazlarla yapılan devrelemede, kondansatörler yarım devrede bir diyot üzerinden şarj edilir. Daha sonra jeneratörün toplam gerilimiyle beraber kondansatörde şarj edilen gerilim işleme boşluğuna birlikte boşaltılır, boşalım süresi ve sıklığı öncelikle döner jeneratörler tarafından belirlenir. Bu jeneratörler bir kollektör ve bir doğrultucu ile teçhiz edilebilirler. Dönel impuls jeneratörleriyle çok yüksek hızlarda işparçasından malzeme kaldırılır, ancak işlem sırasında kötü yüzey yapısı elde edilir. İşleme frekansında ayarlama yapılamadığından dolayı işlenen yüzey kalitesi iyileştirilememektedir [5,45].



Şekil 2.14 Döner vurum jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı [45]

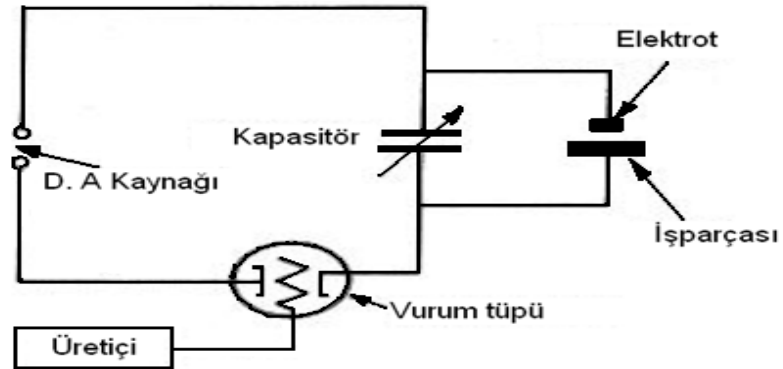


Şekil 2.15 Döner vurum jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi [45]

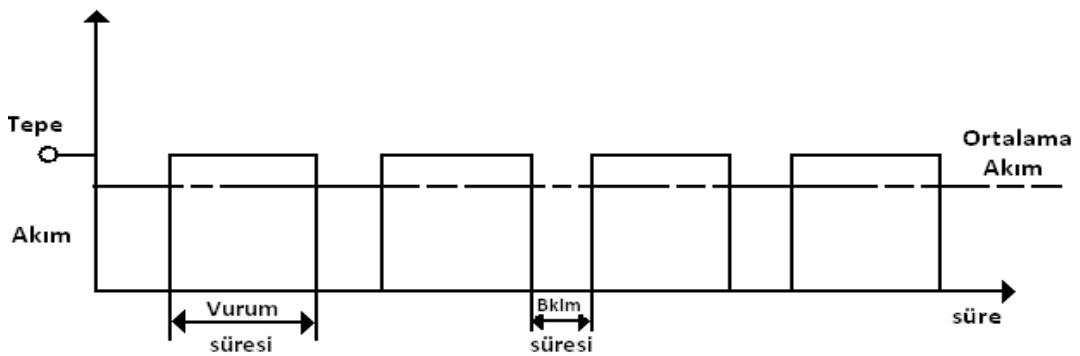
iii) Isopulse jeneratörler: Gerilimin anahtarlama elemanları kullanımıyla işleme aralığına bağlı olduğu, boşalım sürelerinin ve sıklıklarının özellikle kontrollü anahtarlama proseslerine bağlı olduğu jeneratörlerdir [45]. Elektroerozyon ile işleme sırasında oluşabilecek kısa devrelerden dolayı işparçası ve elektrodun zarar görmemesi

içim akım hızlı bir şekilde kesilmelidir. Akımın gerektiğinde hızla ve elektronik olarak kesilmesi ihtiyacı sonucunda devrelerde kullanılan anahtar ünitesi yerine vakum tüpleri ve transistörler içeren devreler geliştirilmiştir. Yeni geliştirilen bu devre tipine kontrollü darbe devreleri (CPC: Controlled Pulse Circuits) denmektedir. Bu devreler genel olarak RC devrelerine benzemektedir, fakat vakum tüpü ve katı hal aygıtları eklenerek hızlı anahtarlama etkinliğine ulaşmak amaçlamışlardır. Anahtarlama son derece hızlıdır, düşük frekanslardaki saniyedeki boşalım sayısı RC devrelerinden 10 kat veya daha fazladır böylelikle birim zaman içinde daha çok boşalım gerçekleştirilebilir.

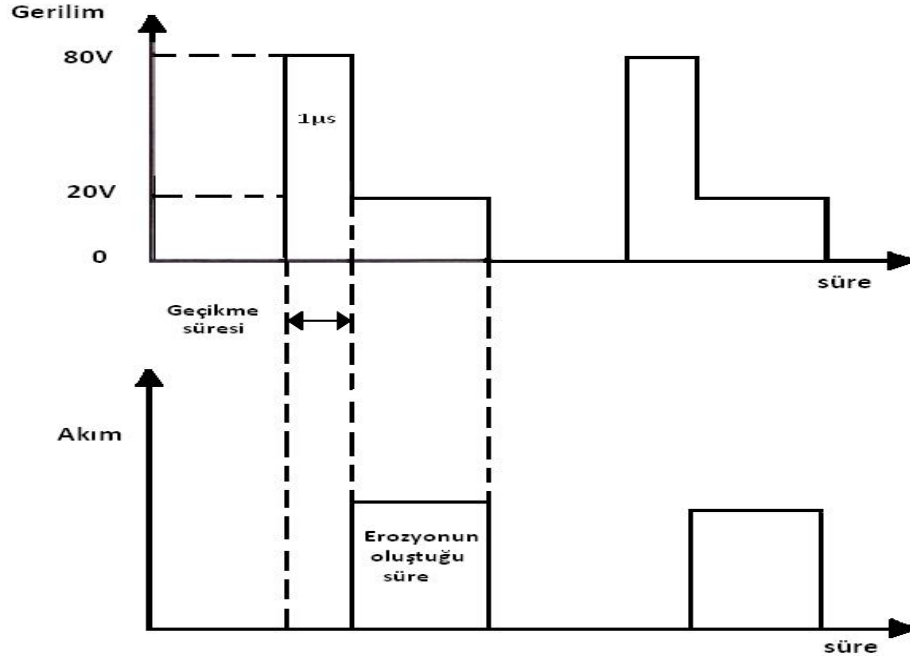
Bu yeni devrelerde akımın devreye alınmasında ve kesilmesinde elektronik anahtarların kullanılması elektrot aşınmasının azaltılmasıyla beraber yüksek malzeme kaldırma hızının elde edilmesini sağlamıştır. Oldukça çok yönlüdür, kaba ve bitirme işlemleri için hassas bir şekilde kontrol yapılabilir. Birim zamanda daha fazla kıvılcım oluşturabildiğinden dolayı, her kıvılcımla daha az malzeme kaldırılmasını sağlayarak daha iyi bir yüzey kalitesinin elde edilmesine yardımcı olur [5, 47].



Şekil 2.16 Isopulse jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı [47]



Şekil 2.17 Isopulse jeneratörünün tipik akım zaman dalga grafiği [7]



Şekil 2.18 Isopulse jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi [7]

2.4.3 Dielektrik sıvı parametreleri

Elektroerozyon ile işlemede dielektrik sıvı seçimi ve dağıtımı malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınması, yüzey kalitesi ve çevresel etkilerden dolayı önemlidir. Bu yüzden endüstride sürekli olarak yeni ve daha iyi bir dielektrik sıvı bulunması için araştırmalar yapılmaktadır [47,48]. Elektroerozyon ile işleme yöntemi verimlilik ve kaliteyi etkileyen dielektrik sıvının önemimin anlaşılmasından sonra ticari önem kazanmıştır. EEİ işlemlerinin farklı çeşitleri vardır bunlar kullanılan dielektrik sıvıların çeşitlerine göre sınıflandırılmıştır. Kalıp dalma elektroerozyon işlemlerinde genellikle hidrokarbon yağ kullanılmaktadır, tel erozyon, mikro elektroerozyon işlemlerinde ve hızlı delik delme işlemlerinde genellikle deiyonize (saf) su kullanılır. Saf su demir işparçalarının işlenmesi sırasında korozyon oluşturma konusundan dolayı sıkıntılıdır. Korozyondan korunmak için de saf suyun içine katılan pas önleyiciler de elektriksel iletkenliği kabul edilemez bir seviyeye çıkartırlar. Dielektrik sıvı makine parçalarının verimlilik, fiyat ve kalitesi açısından oldukça önemli bir işlevi yerine getirir [7,49]. EDM işleminde kullanılacak dielektrik sıvıda bozunum gerilimine ulaşıncaya kadar dielektrik sıvının yalıtkan kalması için yüksek dielektrik dayanıma sahip olmalıdır, bozunum sonrası hızlı bir şekilde de-

iyonize olmalıdır, etkili soğutma yapabilmesi için ısı kapasitesi yüksek olmalıdır ve püskürtme yeteneğine sahip olması gerekir [50].

EEİ ile işlemede dielektrik sıvının görevleri aşağıda belirtilmiştir.

i) Fiziksel olarak dielektrik sıvı elektrotlar üzerinde toplanan yükü bozunum gerilimine ulaşıncaya kadar belirli bir süre tutar.

ii) Dielektrik sıvı, boşalımı dar bir kanalda tutar. Böylece işparçası yüzeyi üzerindeki gücün yoğunlaşmasını sağlayarak işleme hızının artmasını sağlar.

iii) Boşalım esnasında açığa çıkan ısı erozyona katkıda bulunmadığı için hemen atılmalıdır. Bu ısı aksine elektrot ve işparçası yüzeyleri üzerinde zarara sebep olur. Dielektrik sıvı ısıyı yüzeylerden boşalım biter bitmez uzaklaştırır.

iv) Boşalım sonrası işleme aralığında oluşan işleme artıkları dielektrik sıvı ile işleme aralığından uzaklaştırılır. Dielektrik sıvının düşük viskoziteye sahip olması onun akıcılığını arttığı için işleme atıklarının uzaklaştırılması kolaylaşır. Bu işlem kısa devreleri oluşumunu engelleme ve elektrot aşınmasını azaltma açısından çok önemlidir [51].

Dielektrik sıvıdan beklenen genel özellikler şu şekilde sıralanabilir [52];

i) Dielektrik sıvı kıvılcım boşalımından sonra hızlı bir şekilde de-iyonize olmalıdır.

ii) Düşük viskoziteli olmalıdır, etkili bir soğutma yapabilmesi ve talaş parçacıklarının çalışma bölgesi boşluğundan çıkarabilmesi için iyi bir ıslatma kapasitesine sahip olmalıdır.

iii) Boşalım sırasında oluşan parçacıkları çalışma boşluğundan dışarı atmalıdır. Bu dielektrik sıvının en önemli özelliğidir. Yetersiz yıkama ark oluşmasına (kıvılcımlanmaya) neden olabilir, bu da elektrodun ömrünü azaltır ve işleme zamanını arttırır.

iv) Kimyasal olarak nötr olmalıdır, elektroda, işparçasına, tabla ve dielektrik sıvı tankına zarar vermemelidir.

v) Yangın tehlikesi olmaması için alevlenme noktası yüksek olmalıdır.

vi) Zehirli duman ve istenmeyen kokular yaymamalıdır.

vii) Çalışma artıkları ve ayrışma ürünleri nedeniyle oluşan kirlenmelerde ve sıcaklık değişimlerinde bu özelliklerini korumalıdır.

viii) Ekonomik olmalı ve kolayca bulunmalıdır

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

1) Dielektrik sıvının cinsi: Çeşitli tipteki elektroerozyon işlemleri kullanılan dielektrik sıvının cinsine göre sınıflandırılır. En çok kullanılan dielektrik sıvılar hidrokarbon bileşenleri, silikon bazlı yağlar ve saf sudur. Bunların yanı sıra organik bileşikler olan glikol ve etilenin farklı hacimsel oranlardaki sulu çözeltileri de kullanılmaktadır. Akışkan özellikleri temel olsada doğru sıvı dolaşım metodolojisinde önemlidir [53,54]. Hidrokarbon bileşikleri ham petrolün rafine edilmiş formu olup, bunların arasında en iyibilinen kerosendir. Fakat kerosen uzun süreli işlem sırasında özelliklerini yitirebilir. Kerosenin diğer dezavantajları da hava kirliliği ve yüksek boşalım sıcaklığıdır. Bu da kerosenin ayrışmasına ve karbon elementlerinin elektrodun yüzeyine yapışmasına neden olur. Elektrot yüzeyine yapışan karbon elementleri özellikle mikro EDM işleminde normal boşalımı etkiler. Karbon parçacıklarının elektrot ve işparçası yüzeyine yapışmasıyla işleme aralığındaki kalıntıların çıkarılması zorlaşır bu durum ise EDM işlemi sırasında malzeme kaldırma hızını azaltır. Ayrıca kerosenin dielektrik sıvı olarak kullanımında uygun olmayan işleme şartlarında işlem yapılırken kerosenin düşük tutuşma sıcaklığından dolayı tutuşma gerçekleşebilir.

Saf su ise, tel erozyon tezgâhlarında, düşük viskozitenin avantajlı olduğu ve işleme sırasında dielektrik sıvının bozunumu ile karbon oluşumunun istenmediği dalma tipi erozyon tezgâhlarında kullanılır. Hidrokarbon dielektrik sıvı ile işlenmiş çelik parçaların karbon içeriğinde bir artış görülür bunun aksine bu parçaların saf su ile işlenmesinde karbon konsantrasyonunda azalma görülmektedir [49,52,55].

Ayrıca deneysel amaçlı gaz jeti uygulamaları da mevcuttur. Gaz bazlı dielektrik kullanılması sağlık, güvenlik ve çevre açısından önemlidir. Dielektrik olarak gaz kullanılarak yapılan elektroerozyon işlemlerinde daha küçük hacimde malzeme yüzeyden kaldırılır. Oksijen gibi gazların dielektrik olarak kullanılmasıyla bazı çok özel

işleme koşullarında, hidrokarbon yağ kullanımdan daha yüksek metal kaldırma oranları elde edilir. Ama bu uygulamanın ticari olması için daha çok araştırmaya gerek vardır. [49].

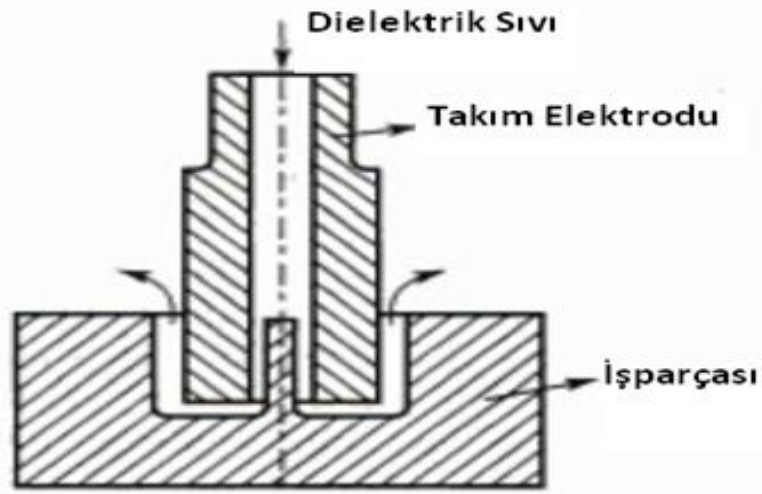
Kısmen kuru elektroerozyon yönteminde sıvı- gaz karışımı kullanılır. Deiyonize su ve hava kısmen kuru elektroerozyon yöntemi için deneysel çalışmalarda karıştırılmıştır, su – hava karışımının özelliğinin hava ve deiyonize su arasında olması beklenmiştir. Kısmen kuru EEİ yönteminde deiyonize su – hava karışımının uygulamasıyla yanma gazları büyük ölçüde azaltmıştır ve yüzden metal parçacıkları etkili bir şekilde işlem bölgesinden temizlenmiştir. Ayrıca sıvı – gaz karışımının dielektrik sıvı olarak kullanılmasıyla yapılan deneysel çalışmada delik delme işlemlerinden daha iyi bir tutarlılık görülmüştür sıvı – gaz karışımının kullanılmasıyla neredeyse hiç koniklik oluşmamıştır [48].

2) Dielektrik sıvı uygulama yöntemi: Yıkama elektrot ve işparçası arasındaki çalışma boşluğuna sıvı akış yöntemini ifade etmek için kullanılır. İşlem verimliliği büyük ölçüde dielektrik sıvı seçimi ve yıkama verimliliğine bağlıdır. Çalışma boşluğu içindeki aşınma parçacıkları mümkün olduğunca hızlı bir şekilde çıkarılmalıdır. Yetersiz yıkama nedeniyle çalışma bölgesinde işlenmiş parçacıkların birikme olasılığı artar bunun sonucunda ise bu parçacıkların elektriği ileten yollar gibi davranması nedeniyle kısa devreler oluşabilir bu nedenle düşük işparçası işleme hızı ve elektrot aşınması gerçekleşir. Uygun olmayan yıkama nedeniyle düzensiz ve önemli takım aşınmaları oluşur bu da hassasiyeti ve yüzey kalitesini etkiler, kararsız işlem koşulları ve enkaz yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde arkın oluşması nedeniyle malzeme kaldırma oranı azalır. Bu arklar hem işparçasına hem de elektroda zarar verir [52].

EEİ ile işlemede yıkama işlemi işparçasının geometrisine bağlıdır ve aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

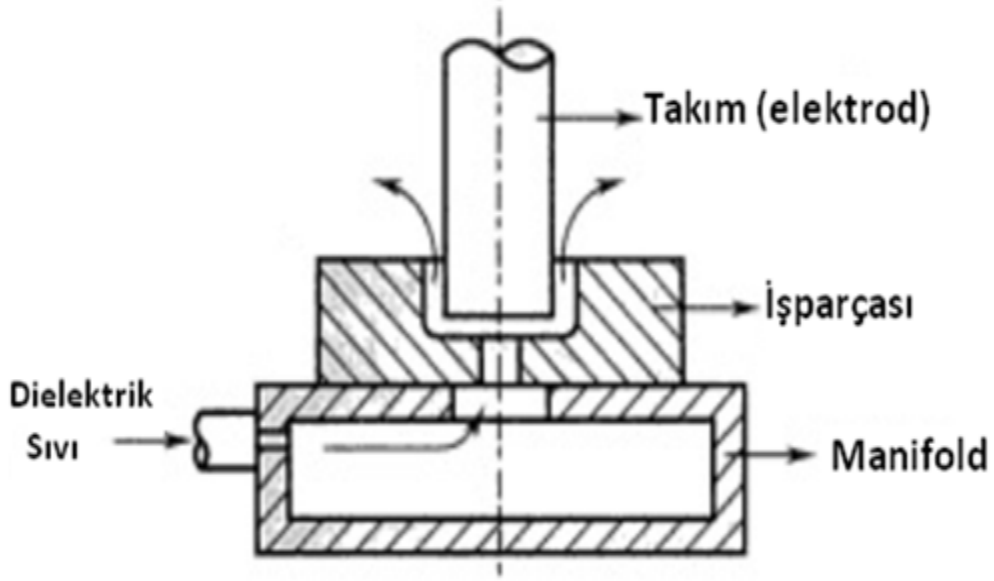
- i) Normal Akış
- ii) Ters Akış
- iii) Püskürtme Akış
- iv) Daldırma yöntemi

Normal akış: Bu yöntemde, basınç altındaki sıvı elektrot içindeki bir veya daha fazla kanaldan geçerek işparçası ve elektrot arasındaki boşluğa akması sağlanır (Şekil 2.19). Boşaltma deliğinin yeri genel olarak en derin malzeme kaldırılacak olan bölgede olmalıdır. Tek bir delik dielektrik sıvı akışının iyileştirilmesine yardımcı olacağından genelde çok delik kullanmadan daha iyidir. Bununla birlikte tercih ayrıca parça geometrisine bağlı olacaktır ve bazen çoklu delik kullanmak işparçasının farklı bölgelerinin kesimi sırasında gönderilecek olan dielektrik sıvının akışını kolaylaştırmak için gereklidir olabilmektedir [52].



Şekil 2.19 Dielektrik sıvının elektrot içinden geçerek çalışma boşluğuna geçişi [52]

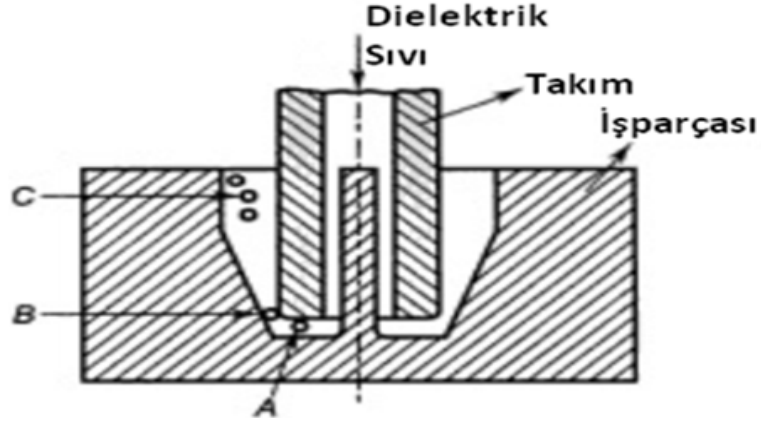
Eğer işparçası malzemesi üzerinde delik bulunuyorsa veya işparçası malzemesinin geometrisine zarar vermeden delik açılabilirse bu yıkama işlemini kolaylaştırır. Bu durumda elektrot malzemesi içine delik açılmasına gerek yoktur (Şekil 2.20). Bu yöntemde dielektrik sıvı manifold içine basınçla gönderilir ve daha sonra işparçası üzerindeki delikten işparçası ve elektrot arasındaki çalışma boşluğuna gönderilir. Bu düzenleme normal olarak, takım uzunluğundan dolayı delik açmanın zor olduğu ve takımın kesit alanının çok küçük olduğu durumlarda kullanılır [52].



Şekil 2.20 Dielektrik sıvının işparçası içinden geçerek çalışma boşluğuna geçişi [52]

Sadece tek yönden uygulanan dielektrik sıvı püskürtme yönteminde, akış yönünde kalıntı parçacıkların yoğunluğunda artış meydana gelir. Bu da boşluk genişliğinin eşit olmayan bir şekilde dağılmasına ve işleme hassasiyetinin bozulmasına neden olur. İşparçası veya elektroda zarar vermeyecek şekilde işparçası veya elektrot üzerine açılan deliklerden basınç veya vakum yoluyla uygulanan yıkama yöntemi en verimli yöntemlerdendir. Hem basınçlı hem de vakumlu yıkama yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla, daha düşük elektrot aşınması ve daha büyük çalışma boşluğu genişliği gözlemlenir [56].

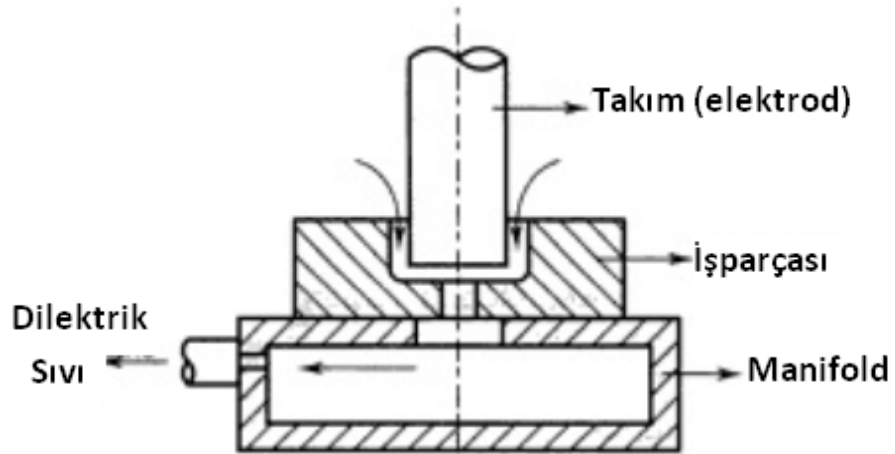
Bazı belirli koşullarda normal akışlı sistemlerde eğimli yüzeylerin oluşma olasılığı vardır (Şekil 2.21). Takımın uç yüzeyinde üretilen talaşlar şekilde gösterilen A ve B bölgelerinde, işleme aralığından geçmeleri gerekir. Talaşlar hareket edince iletken olduklarından dolayı takım ile işparçası arasındaki çalışma boşluğu mesafesini azaltırlar, böylece istenmeyen kenar arkları oluşur bu da işparçası malzemesi üzerinden malzeme kaldırılmasına neden olur. Bu da dikey duvarların şekilde gösterildiği gibi konik olmasına neden olacaktır. C bölgesinde gösterildiği gibi ağız genişliği arttıkça, kenar arkının oluşması için daha fazla talaşın olması gerekir, bu yüzden bu kısım daha az problemlidir. Sonuç olarak bu kısmın duvarı hiçbir koniklik oluşturmadan dikey olarak kalmaktadır.



Şekil 2.21 Bazı belirli koşullarda normal akışlı sistemlerde eğimli yüzeylerin oluşumu[52]

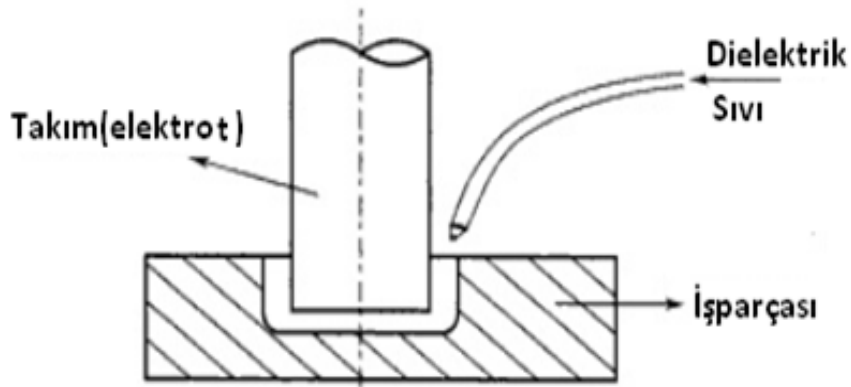
Ters akışlı sistem: Üretilen konikliği azaltmak için ters akışlı sistem kullanılabilir. Bu durumda, takım ve işparçası arasındaki çalışma boşluğu tamamen dielektrik sıvı altında kalmaktadır ve daha sonra manifold ile vakum uygulanmaktadır (Şekil 2.22). Çalışma boşluğunda negatif basınç oluşturulur bu da dielektrik sıvının elektrot ve işparçası arasındaki 0.02 mm'lik bir aralıktan akmasını sağlar. Akış elektrot içindeki bir delikten yukarıya veya işparçası üzerindeki bir delikten aşağıya doğru yapılabilir.

Bu yöntemin diğer yöntemler üzerinde bazı avantajlara sahiptir. Bunlar; işleme verimliliğini artırır, kokuyu ve dumanı azaltır ayrıca talaşlar işparçası malzemesi arasından akarken, kenar arkının oluşmasının imkânı olmadığından dolayı işparçalarındaki eğrilikler oluşmaz. Ancak elde edilebilir akış hızı uygulanan vakuma bağlı olarak sınırlıdır. Bu yöntem özellikle derin boşluklu kalıpların üretiminde kullanılması için uygundur [47,52].



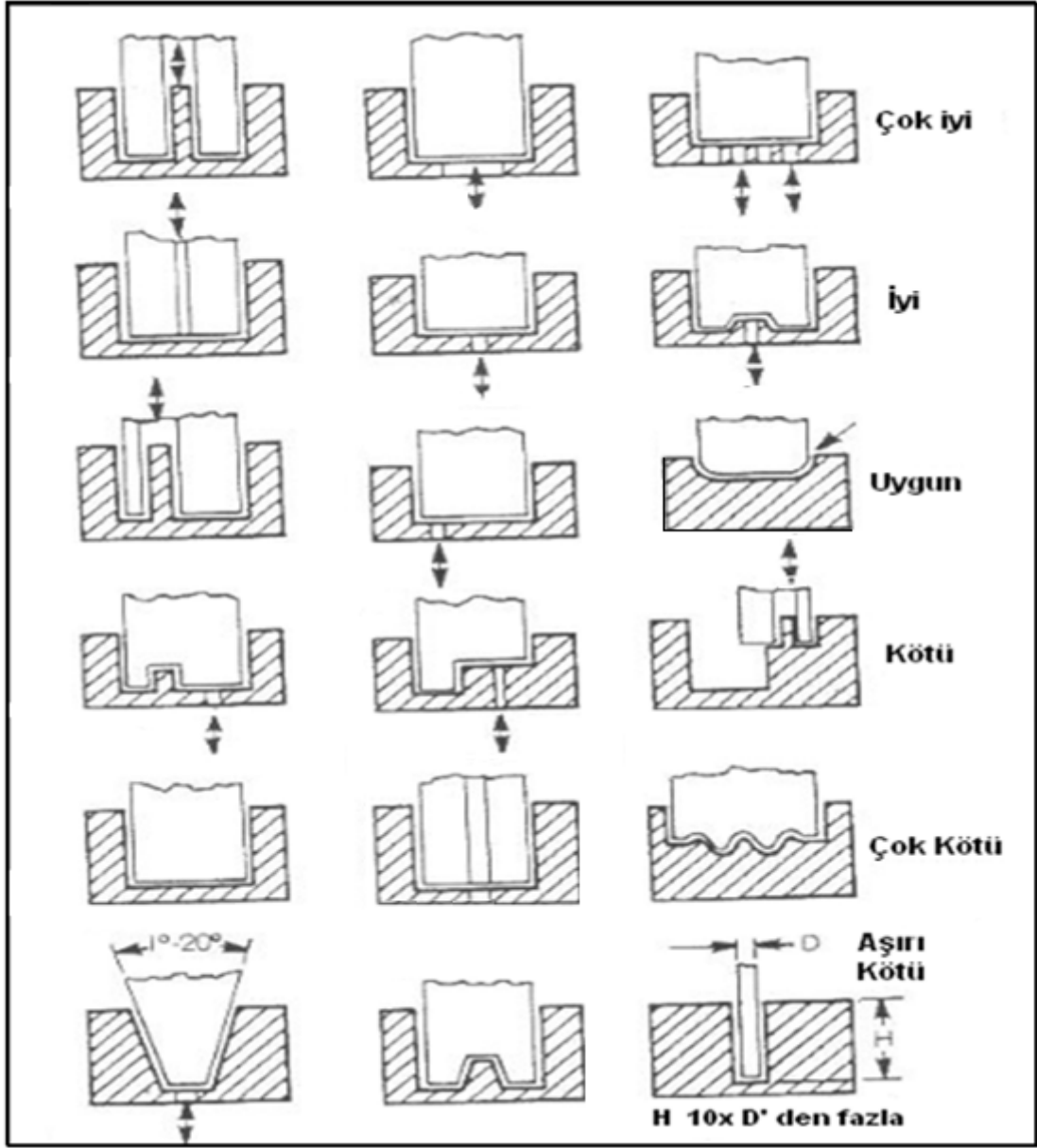
Şekil 2.22 Dielektrik sıvının vakum uygulanarak işparçası içinden emilmesi [52]

Püskürtme akış: Birçok durumda istenilen işleme amacına işlem bölgesine dielektrik sıvının direk olarak püskürtülerek gönderilmesiyle ulaşılır bu yöntem işleme bölgesine sıvı gönderilmesinin daha basit yöntemidir (Şekil 2.23) ve işparçası üzerindeki uzun dar delikler veya oyukların işlenmesi için kullanılır. Ancak bu teknikle işleme zamanı diğer yöntemlere göre daha uzundur. Bir dizi sığ oyukları sıvı püskürtme yöntemiyle yıkamak için, nozulların dağılımı, sıvı akış hızı, açısı ve boşlukların bulunduğu yerler önemli etmenlerdir [52].



Şekil 2.23 Dielektrik sıvının püskürtülerek çalışma boşluğuna gönderilmesi [52]

Daldırma sistemi: Bu yöntem daha çok, çok küçük delikler, derin delikler ve kör delikler gibi diğer dielektrik sıvı uygulama yöntemlerinin pratik olmadığı yerlerde kullanılır [48]. İnce işparçalarındaki yüzeysel kesme ve delme şeklindeki elektroerozyon uygulamaları için dielektrik sıvı akışının sağlanması gerekli olmayabilir. Bu yöntemle herhangi bir sıvı pompası olmadan da kesme işlemi yapmak mümkündür. Takımın göreceli hareketi ve titreşimi küçük bir çalkalanma sağlayabilir bu da kesme işlemi sırasında soğutma yapmak ve talaş kaldırılmasını sağlamak için takımla iş parçası arasına gönderilecek dielektrik sıvının, sıvı pompası kullanılmadan gönderilmesi sağlar [5,52]. Daldırma yöntemi kullanımı sırasında düşük elektrot aşınması gerçekleşir ama buna rağmen bazı kullanılmama sebepleri vardır. Bunlar genel olarak iş parçası işleme hızının çok düşük olması, oluşan ark ve kısa devre vurumlarından dolayı işlemin sıkça kesilmesi sonucu oluşan zaman kaybı nedeniyle verimliliğin azalması ve işlem sırasında iş parçası ve elektrot yüzeylerinde oluşan yanma izleridir [57].



Şekil 2.24 Çeşitli dielektrik sıvı uygulamalarının karşılaştırılması [3]

3) *Dielektrik sıvı basıncı*: Dielektrik sıvının işlem boşluğuna akışının nedeni, EDM işlemi sırasında oluşan gazları ve katı enkaz parçacıklarını işlem bölgesinden olabildiğince hızlı bir şekilde uzaklaştırmak ve dielektrik sıvının sıcaklığını onun parlama noktasının altında tutmaktır. Eğer dielektrik sıvı basıncı çok az olursa, her boşalım sonrasında oluşan gaz ve katı parçacıklar işlem bölgesinden etkin bir şekilde temizlenemez. Bununla birlikte dielektrik basıncı çok yüksek olursa, iyonize kanalının yüksek dielektrik sıvı basıncıyla beraber sürekli sürüklenmesinden dolayı uygun bir işleme elde edilemez ve bağlı aşınma oranı yükselir. Aşırı dielektrik basıncı aynı zamanda elektrot aşınma miktarını hızlandırabilir ve işleme boşluğunda türbülans meydana getirir [9]. Dielektrik

sıvı akışının farklı yöntemleri vardır bu yöntemlerden dielektrik sıvının hiçbir basınç uygulamadan sadece yanal akış yöntemiyle uygulanması durumunda işleme atıkları işleme aralığının iç kenarlarında toplanarak boşalımın kararsız olmasına neden olarak boşalım kapasitesini azaltır.

Basıncın uygulanmadığı durumlarda yüzeylerden kaldırılan talaş miktarı birikerek kirlilik oluşturur. Basıncın uygulanması bilhassa derin ve dar işleme koşullarında daha önemlidir. Çünkü yanal akış yönteminde derin işleme şartlarında işleme aralığında, boşalımın oluşturduğu basınçtan dolayı yeterli dielektrik sıvı nüfuziyeti gerçekleşemez ve elektroerozyon sonucu oluşan işleme atıkları birikerek boşalım veriminin düşmesine neden olur. Ayrıca basıncın uygulanmaması halinde işleme derinliğinde belirgin oranda azalmalar gözlenir.

Dielektrik sıvı basıncındaki artış işlem bölgesindeki kalıntı parçacıkların daha etkin bir şekilde kaldırılmasını sağlayıp işleme bölgesinin koşullarını iyileştirdiği için işparçası işleme hızını artırır. Dielektrik sıvı basıncındaki artış yüzey pürüzlülüğünün önce artmasına daha sonra yüksek basınç değerlerinde fazla değişmemesine neden olur [35,59]. Bunların yanı sıra dielektrik sıvının basınçlı bir şekilde uygulandığı yöntemlerde elektrodun keskin köşe ve kenarlarındaki yuvarlanma eğilimi (elektrot kenar aşınması) metalin yüzeyde tekrar katılaşmadan basınç yoluyla ortamdan uzaklaştırılmasından dolayı basınç uygulanmadığı durumlara göre daha yüksektir [35].

4) Dielektrik sıvı akış hızı: Dielektrik sıvının akış hızı uygulama merkezinden uzaklaştıkça azalır. Yüksek hızlardaki dielektrik sıvının işlem bölgesine gönderilmesi akışın türbülanslı olmasına yol açan kabarcıklar oluşturur. Yüksek akış hızı ve türbülansa sahip dielektrik sıvı yapısı, bir sonraki boşalımın aynı noktalarda oluşma yoğunluklarının daha yüksek olma olasılığını artırır [4,35]. Ayrıca dielektrik sıvı akış hızı işparçası yüzeyindeki tekrar katılaşmış tabaka kalınlığını ve bu tabakadaki mikro çatlakların yoğunluğunu da etkiler. Akış hızının yüksek olması, ergimiş işparçası malzemesinin yüzeyden daha çabuk uzaklaştırılmasını sağlayacağı için tekrar katılaşan tabaka kalınlığı hızın artışıyla azalır [53]. Yapılan deneysel bir çalışmada, dielektrik akış debisindeki artışın EAH'nı arttırdığı belirtilmiştir [57].

5) *Dielektrik sıvı viskozitesi*: Elektroerozyon işleminde dielektrik sıvı viskozitesi, dielektrik sıvının işlem atıklarını uzaklaştırabilme ve ısıyı dağıtabilme yeteneğini etkiler. Nispeten daha düşük viskoziteli dielektrik sıvı kullanılmasıyla daha iyi bir püskürtme işlemi ve daha etkin bir ısı dağılımı elde edilir [16]. Ayrıca viskozite etkisinin plazma şeklinden sorumlu olduğu düşünülmektedir. Yüksek dielektrik sıvı viskozitesi plazma kanallarının genişlemesini kısıtlar boşalımın daha küçük bir bölgeye odaklanmasını sağlar ve malzemeyi kaldırmak için daha büyük patlama gücü yaratır ve boşluk mesafesini artırır [44,48]. Yüksek viskozite değerine sahip dielektrik sıvılarla yapılan derin işleme koşullarında elektroerozyon sonucu oluşan işleme atıklarının çalışma aralığından uzaklaştırılması zordur. Bunun sebebi ise yüksek viskoziteye sahip olması nedeniyle akıcılığı kötü olan dielektrik sıvının işleme aralığı ve kesme genişliği aralıklarında etkin bir sirkülasyon sağlayamamasıdır. Düşük viskoziteli sıvılar daha ince ve hassas yüzeyler üretmek için daha iyidir. Düşük viskoziteli sıvı takım (elektrot) ve işparçası arasındaki çalışma boşluğunu temizlemede daha etkilidir bunun sonucunda daha iyi bir işleme elde edilir. Bununla birlikte yüksek malzeme kaldırma hızları ve yüksek akım değerlerinde ağır yağlar (yüksek viskoziteli) kullanılabilir [4,52].

6) *Dielektrik sıvı sıcaklığı*: İşlem sırasında dielektrik sıvının yetersiz soğutulması dielektrik sıvının ısınmasına neden olur. Dielektrik sıvının ısınmasıyla beraber viskozitesi düşer, düşük viskoziteli dielektrik sıvıların elektriksel bozunmaya karşı dirençleri düşük olduğundan düzensiz boşalımın gerçekleşir.

2.4.4 İşparçası malzemesinin fiziksel özellikleri

Elektroerozyonla işlemede elektriksel iletkenliğe sahip bütün malzemeler işparçası olarak kullanılabilir. İşparçası malzemesinin işlenebilirlik derecesi işparçası malzemesinin bazı ısı-fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerden en etkili olanları yoğunluk, ısı kapasitesi ve ergime sıcaklığıdır. Bu değerler ile işleme hızı ters orantılıdır [45].

2.4.5 Elektrot malzemesinin fiziksel özellikleri

EDM yönteminde kullanılan takım elektrodunun görevi elektrik akımının işparçasına aktarılmasını sağlamaktır. Elektrot şekli işparçasına aktarılmak istenen şeklin negatiftir

[3]. Elektroerozyon ile işleme sırasında, elektrot malzemesi seçilirken; işparçası işleme hızı, istenen yüzey kalitesi, elektrot malzemesinin üretim maliyeti ve işlenecek malzemenin özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır [54]. Elektroerozyon ile işlemede bütün elektrik iletkenliğine sahip malzemeler elektrot yapımında kullanılabilir. Bununla birlikte elektrot malzemelerinden beklenen ısı - fiziksel özellik olarak, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek ısı iletim katsayısı ve yüksek elektrik iletim katsayısına sahip olması istenir. Bunun nedeni ise elektrot aşınmasının bu belirtilen değerler ile ters orantılı olmasıdır. Yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek ısı kapasiteye sahip elektrot malzemelerinin aşınma direnci daha yüksek olmaktadır [59].

Elektrot malzemesinden beklenen özellikler genel olarak aşağıdaki gibidir [52];

- i) Elektriği ve ısıyı iyi iletmeli
- ii) Makul bir maliyetle herhangi bir şekil için kolayca işlenmelidir
- iii) İşparçası malzemesi üzerinden verimli bir malzeme kaldırma hızı sağlamalıdır.
- iv) Elektroerozyon işlemi sırasında deformasyona karşı dirençli olmalıdır.
- v) Düşük elektrot (takım) aşınması oranı göstermelidir.
- vi) Çeşitli şekillerde mevcut olmalıdır (kare, dikdörtgen, silindir vb).

Çeşitli elektrot malzemeleri kullanılmaktadır bunlar; grafit, bakır, pirinç, çinko alaşımları, çelik, bakır tungsten, gümüş tungsten, tungsten vb .

Bakır: Saf bakır ve elektrolitik sınıfı bakır elektrot malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle işparçası malzemesinin yüzeyinin kaliteli olması istenilen durumlarda sık olarak bakır kullanılır ve $0.25 \mu\text{m}$ R_a 'ya kadar yüzey pürüzlülüğü elde edilebilir. Çok düşük dielektrik basınçların da oldukça az aşınma oranı gösterir. Bakırın kötü işlenebilirliği nedeniyle, işlenmesi büyük bir problemdir. Ayrıca yüksek üretim uygulamaları için sıklaştırılmış bakır elektrotlar kullanılmaktadır. Böylece oldukça karmaşık şekiller bu yöntemle düşük bir maliyetle üretilebilmektedir [3,52]. Bakır, elektroerozyonla işleme sırasında (kıvılcımlanma koşulları altında) kararlılık gösteren bir malzemedir [7].

Grafit: İyi işlenebilirliği ve aşınma özelliklerinden dolayı belki de en yaygın olarak kullanılan EDM elektrotudur. Grafite hızlı bir malzeme kaldırma hızı sağlaması yanısıra erime noktasının 3000°C'den fazla olması nedeniyle iyi bir aşınma direnci gösterir. Grafite çok iyi bir kararlılık göstermektedir. Kaba taneli grafitler ince işçilik gerektirmeyen büyük hacimli elektroerozyon işlemlerinde, ince taneli yüksek yoğunluklu grafitler ise yüksek sertlik ve dayanımları nedeniyle ince işçilik ve hassasiyet gerektiren işlemlerde kullanılır. Genelde çelik malzemelerin işlenmesinde kullanılan elektrotlar, metal elektrotlarla karşılaştırıldıklarında birim akımla daha yüksek bir talaş kaldırma hızına sahiptirler [5,52]. Grafite elektrot kullanımının bazı avantajları aşağıda sunulmuştur.

- i) Termal şoklara karşı dirençlidirler ve mekanik özelliklerini korurlar.
- ii) Geleneksel yöntemlerle işlenmesi kolaydır.
- iii) Düşük yoğunluk (1,6-1,85 g/cm³) sebebiyle elektrotlar hafif olur.
- iv) Ekonomiklik ve yüksek erime sıcaklığı (3600 °C) önemli avantajlardır [5].

Bakır-grafite: Bakır grafit elektrotlar, bakırın içerisine grafitin karıştırılmasıyla oluşmuştur. Grafitten 1.5 -2 kez daha pahalıdır. Grafitten daha iletken ama kenar aşınması saf grafit kadar iyi değildir. Yetersiz yıkama koşulları altında iyi çalışır. Bakır alaşımları içindeki ince taneli grafit, tungsten karbür malzemesinin kaba ve son (bitirme) işleme işlemlerinde çok iyi sonuçlar verir. Bakır grafitler pahalı bir elektrot malzemesi olup, küçük boyutlarda imal edilirler [5,52]. İnce taneli bakır grafit elektrotlar genellikle tungsten karbürün kaba işleme ve bitirme işlemleri için kullanışlı bir elektrot malzemesidir [3].

Tungsten: Tungsten yüksek rijitlik yanısıra iyi bir aşınma oranına sahiptir. Tungsten elektrotlar 0.2 mm'den küçük deliklerin oluşturulması için uygundur, bu elektrotlarda küçük yıkama deliği mevcut değildir. Fiyatının yüksek olması dezavantajdır [52].

Bakır tungsten: Bakır tungsten yüksek yoğunluğuyla beraber yüksek mukavemetli bir elektrot malzemesidir. Bakır tungsten elektrotlar, iyi bir sertlik ve dayanıma sahip olduğundan ince detayların ve ince kesitlerin işlenmesinde grafit ve diğer elektrotlara

oranla takım yüzeyinde daha az çatlama ve kırılma tehlikesi bulunur. İnce detaylı ve yüksek hassasiyetin istendiği elektroerozyon işlemlerinde tercih edilir. Yüksek maliyetli olan bakır tungsten elektrotların işlenmesinde karbür takımların kullanımı uygundur. Yüksek miktarda (%70 kadar) tungsten içeren bakır tungsten elektrotların yoğunluğu ve sertliği yüksektir. İyi ısı ve elektrik iletkenliği özelliklerine sahiptir. Yüksek yoğunluklu bir elektrot malzemesi olması bu elektrotların iyi bir yüzey kalitesinin elde edilmesinin gerekli olduğu uygulamalar için onu kullanışlı bir elektrot malzemesi yapar. Ayrıca bu elektrotlar minimum aşınma ile ince detay ve iyi bir yüzey kalitesi elde edebilme yeteneklerinden dolayı tungsten karbür uygulamaları için kullanılır. Bu elektrotlar oldukça küçük boyutlarda üretilebilirler [3,5].

Pirinç: Pirinç kullanılmasının başlıca avantajı kolay ulaşılabilir ve işlenebilir olmasıdır. Genellikle silindirik şeklinde elektrotlarla, yüksek aşınma hızının kabul edilebilir olduğu özelleşmiş EDM makinalarında küçük delik delme işlemlerinde kullanılır. Düşük talaş kaldırma hızlarında bazı titanyum alaşımları için pirinç kendisini iyi bir elektrot malzemesi olarak göstermiştir. Yüksek aşınma oranı nedeniyle tungsten karbürün işlenmesi için pirinç kullanılmaz [52].

Gümüş-tungsten: Yüksek tungsten oranına sahip, pahalı ve işlemesi zor olan bu tip elektrot malzemelerin işlenmesinde karbür takımlar kullanılır. EDM uygulamalarında kenar aşınması bu tip elektrotlarda bakır tungsten elektrotlara göre daha iyidir. Minimum elektrot aşınmasıyla beraber ince detayların pürüzsüz yüzey bitirmeyle işlenmesi istenen elektroerozyon uygulamalarında kullanılır. İyi seviyede elektriksel iletkenliğe, yüksek yoğunluğa ve 94 HB'lik sertliğe sahip olan gümüş tungsten malzeme çok küçük hacimlerde imal edilir [3].

Tungsten Karbür: Bu elektrot malzemesi çelikler ve tungsten karbürün işlenmesi için uygundur. İyi bir kenar aşınmasına sahiptir ve çeşitli şekillerde mevcuttur [3].

Çelik: Tatmin edici bir elektrot malzemesi değildir. Malzeme kaldırma hızı oldukça yavaştır ve aşınma hızı sadece bazı çelik kombinasyonları için uygundur [52].

2.5 Elektroerozyon Yönteminde Boşalma Hataları

Bu bölümde elektroerozyon yönteminde malzeme kaldırılması sırasında oluşabilecek hatalar, bunların sebepleri ve etkileri incelenecektir.

2.5.1 Açık Devre Sinyalleri Hatası

Bu hataların olası sebepleri elektrotla işparçası arasında servo kontrol mekanizması tarafından sabit tutulması gereken aralığın nominal değerinden fazla olması veya kullanılan dielektrik sıvının çok temiz olmasıdır. Temiz dielektrik sıvının yalıtma direnci, işlem parçacıkları ve iyonlar içeren dielektrik sıvılara göre daha yüksektir. Bu nedenle temiz dielektrik sıvı kullanımı sırasında ilk birkaç kıvılcım oluşumunda gecikme süresi olağandan fazla gerçekleşebilmektedir. Açık devre sinyalleri ateşlemeye ya da elektriksel boşalmaya izin vermezler. Bu hataların işparçasına, elektroda ya da sisteme herhangi bir zararı yoktur ancak malzeme kaldırma hızının normalden düşük olmasına neden olurlar [5].

2.5.2 Kısa Devre Hatası

Malzeme kaldırılması sırasında istenmeyen bir diğer durum da kısa devre oluşmasıdır. İşparçası ve takım (elektrot) birbirine temas ettiğinde kısa devre meydana gelir. İşparçası malzemesinden kaldırılan metalsel parçacıkların işleme boşluğunda yetersiz bir şekilde temizlenmesi sonucunda, bu metalsel kalıntılar işleme boşluğunda birikir. Daha sonra bu parçacıklar işparçası ve elektrot arasında elektriği ileten bir yol olarak görev yaparak elektroda ve işparçasına önemli zarar veren istenmeyen boşalmalara neden olurlar bundan dolayı malzeme kaldırma hızı düşmektedir [9].

2.5.3 Ark Hatası

Ark hatası boşalma sonrasında kaldırılan malzemelerin yetersiz dielektrik sıvı sirkülasyonu sebebiyle işleme bölgesinde kalmaları sonucu meydana gelen bir hatadır. Yetersiz yıkama nedeniyle çalışma bölgesinde işlenmiş parçacıkların birikme olasılığı artar bunun sonucunda kısa devre ve düşük malzeme kaldırma hızı gerçekleşir. İşleme

bölgesinde kalan parçacıklar sebebiyle bu bölgede elektriksel alan yoğunluğunda bir artış olur ve boşalım kanalı dielektrik sıvıyla kaplanıp deiyonize olması gerekirken aniden bir ark meydana gelir. Bu ark oluşumu takıma (elektroda) ve işparçasına büyük zarar verir. Kararsız işlem koşulları ve metalsel talaş yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde arkin oluşması nedeniyle malzeme kaldırma hızı azalır [5,52].

2.5.4 Kapalı Aralık Hatası

Kapalı ark hatasında işleme aralığındaki kirlilik çok fazladır hatta öyle ki bu kirlilik boşalma sırasında malzemenin buharlaştırılmasını engellemektedir. Ayrıca boşalım sırasında oluşan iletken köprü işparçasına hasar verir [5].

2.6 EEİ'de Performans Karakteristikleri

EEİ operasyonlarında işleme performansı genel olarak işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), bağlı aşınma (BA) ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilir [21,62].

$$\text{İİH [mm}^3/\text{dak]} = \frac{\text{İşparçasından kaldırılan hacim [mm}^3\text{]}}{\text{Toplam işleme süresi [dk]}} \quad (2.7)$$

$$\text{EAH [mm}^3/\text{dak]} = \frac{\text{Elektrottaki aşınan hacim [mm}^3\text{]}}{\text{Toplam işleme süresi [dk]}} \quad (2.8)$$

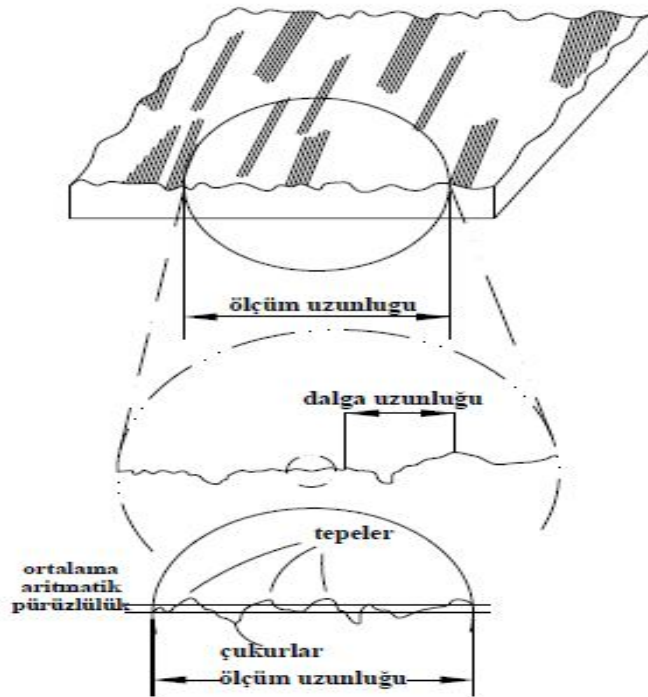
$$\text{BA [\%]} = \frac{\text{EAH}}{\text{İİH}} \times 100 \quad (2.9)$$

Yüzey pürüzlülüğü; genel olarak çeşitli talaşlı üretim yöntemleri ile imal edilen işparçasının, işlenen yüzeylerinde meydana gelen geometrik düzensizlikleri tanımlamak için kullanılır. Talaş kaldırma yöntemlerinde ki amaç, parça yapım resimde belirtilen tolerans derecelerine uygun bir şekilde parçaların istenilen geometrik ölçü ve yüzey kalitesinde imal edilmesidir. Ancak imal edilen parçaların yüzeyleri belli bir büyütme ile incelenirse, mikro-geometrik formlarının ideal formlardan her zaman farklı olduğu görülür. Bunun nedeni ise çeşitli talaşlı üretim yöntemleri ile üretilen işparçalarının,

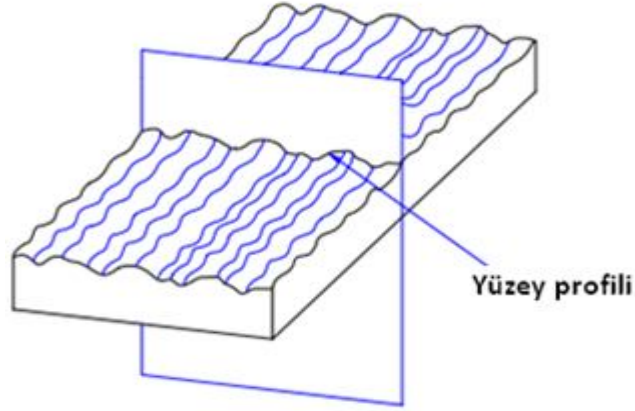
işlenen yüzeylerinde, kesme parametreleri, takım tezgahı rijitliği, kesici takım geometrisi ve kesme ısı gibi faktörler nedeniyle geometrik bir takım düzensizlik meydana gelmesidir. Talaşlı işleme sonrası, üç boyutlu bir yüzey şekli ve profili Şekil 2.25’de gösterilmiştir [33,60].

Şekil 2.26 gerçek yüzey ile belirlenen düzlemin kesişmesi sonucu oluşan bir profili göstermektedir. Yüzey profilleri, takım geometrisine, soğutma sıvısı kullanılmasına, talaş derinliğine, kesme ve ilerleme miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [61].

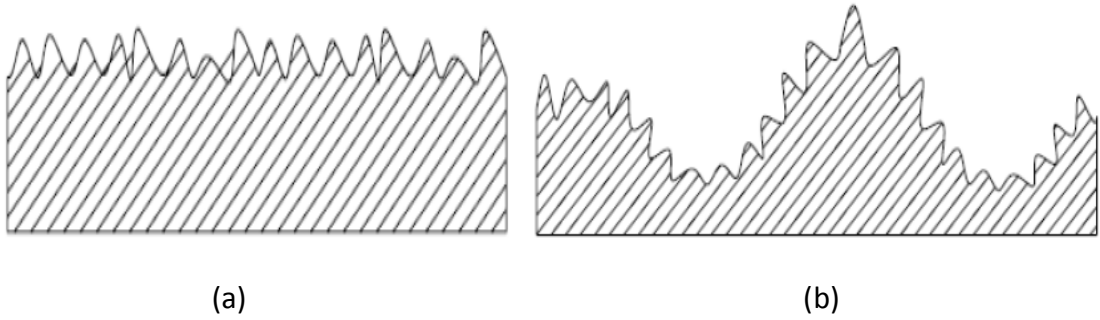
Gerek ANSI gerekse ISO standartlarına göre yüzey kalitesini, kabalık, dalgalılık, izler ve hatalar oluşturmaktadır. Pürüzlülük veya kabalık; imalat işlemlerinden kaynaklanan genellikle daha ince düzensizliklerden oluşur (örneğin torna işlemleri sonrasında oluşan ilerleme izleri). Dalgalılık; tezgâh, işparçası defleksiyonu, titreşim, ısıl davranış veya kesici takım aşınmasından dolayı ortaya çıkan pürüzlülük, örnekleme uzunluğundan daha büyük olan geniş aralıklı düzensizlikleri kapsamaktadır. Pürüzlülük ve dalgalılık aynı anda görülebilir örneğin pürüzlülük dalgalı bir yüzey üzerinde konumlanmış olabilmektedir (Şekil 2.27) [60].



Şekil 2.25 Yüzey pürüzlülüğünün üç boyutlu gösterilmesi [33]



Şekil 2.26 Yüzey profilinin gösterilişi [61]

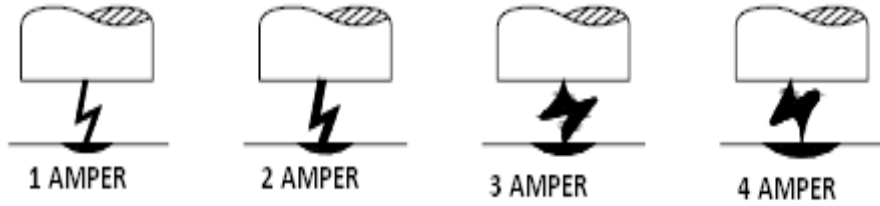


Şekil 2.27 Pürüzlü düz yüzey (a), pürüzlü dalgalı yüzey (b) [60]

Yüzeyde oluşan izler kullanılan üretim metodu ile ilgili olarak meydana gelmektedir. Hatalar, yüzey üzerinde bulunan bu kusurları, çatlaklar, delikler, artıklar oluşturmaktadır. Hatalar işlenmiş yüzey üzerinde belli bir yerde toplanmış veya yüzey üzerinde geniş aralıklı olarak oluşabilir ve aksi belirtilmedikçe kusurlarının etkisi ortalama pürüzlülük değerine dâhil edilmezler. Yüzey hassasiyeti özetle yüzey bitimi ve çatlaklardan arınma, kimyasal değişim, yanma, dönüşme ve aşırı temperleme şeklinde ısı hasar ve kalıcı çekme gerilmesi gibi birçok önemli parametreyi kapsamaktadır. Bunlardan, bir yüzeyin genel kalitesini göstermek için kullanılan bitirme yüzeyi ifadesi talaş kaldırma işlemleri için en önemli olanıdır [60].

Geleneksel imalat yöntemlerinden pürüzlülük, kesici takım izlerinden, titreşimlerden kaynaklanabilir. Elektroerozyon işlemi sonucunda meydana gelen yüzey pürüzlülüğü ise elektriksel boşalım enerjisiyle ilgilidir. Boşalım akımı arttıkça boşalım enerjisi de

artar bu da işparçası malzemesi yüzeyinden daha derin ve geniş kraterlerin oluşacak şekilde malzeme kaldırılmasını sağlar bunun sonucunda işlenen yüzey daha pürüzlü olur ve yüzey kalitesi düşer. Herhangi bir elektroerozyon işlemi sırasında işleme parametrelerindeki bir değişiklik üretilen parçanın bitirme yüzeyi üzerine oldukça farklı etkiye sahip olabilmektedir [11,33].

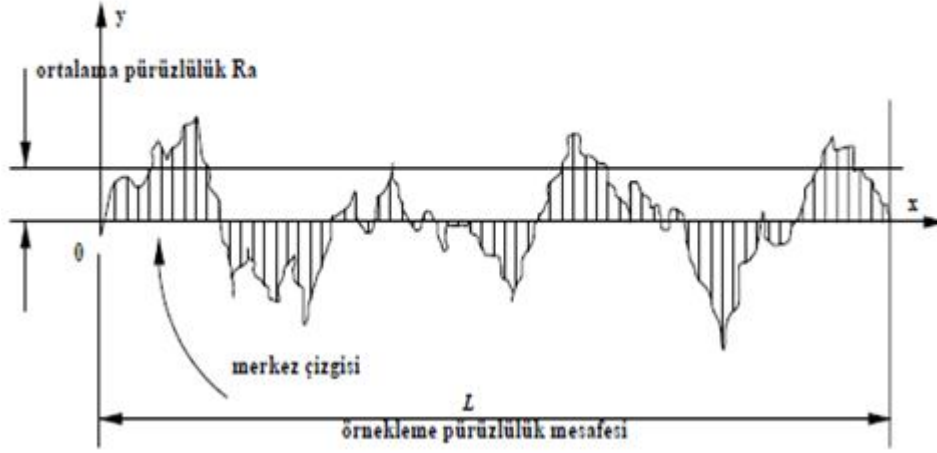


Şekil 2.28 Farklı akım şiddetlerinde yüzeyde meydana gelen pürüzlülük değişimi [41]

Farklı EEİ parametreleriyle yapılan deneyler sonucu farklı yüzey pürüzlülük değerleri meydana gelmektedir. EEİ metalürjik bir işlem başlattığı için yüzey pürüzlülüğü işparçası malzemesine de oldukça bağlıdır. Elektroerozyon ile yüzey bitirmesi yapılmış işparçası malzemesinin yüzey pürüzlülük değeri işlem şartlarına bağlı olarak 0.2 ile 12.5 µm arasında değişmektedir. EEİ sonucunda mikro çatlaklar ve diğer kusurlar ısıdan etkilenmiş katmanda (beyaz tabaka) oluşmaktadır [33].

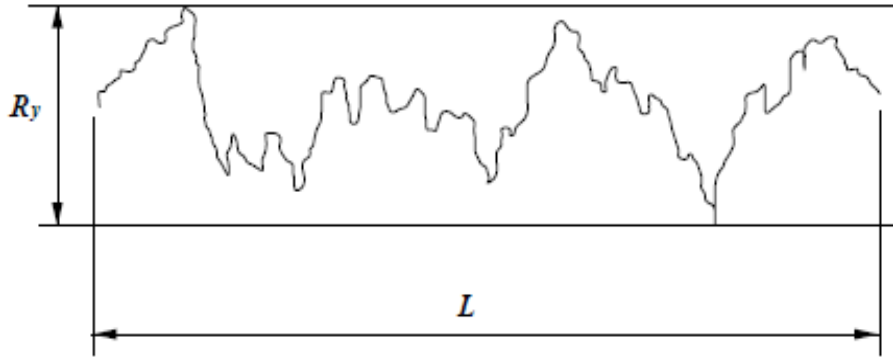
Ortalama pürüzlülük (R_a): İmalat işlemleri tamamlandıktan sonra istenilen ölçü doğruluğuna ve yüzey pürüzlülüğüne ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Ortalama pürüzlülük, yüzeyin genel kalitesini göstermek için kullanılan oldukça geniş bir terimdir. "İyi bitirme yüzeyi" imal edilen parçanın düşük pürüzlülük değerine sahip olduğunu gösterir ve bunun tersi de her zaman "yüksek pürüzlülük" değerini gösterir. R_a , uluslararası benimsenmiş bir sembol olup aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değerini ifade etmek için kullanılır. R_a , değeri işparçası yüzeyinde belirli bir uzunluktaki doğrultu üzerinden ölçülen yüzeye dik eksendeki değerlerin µm cinsinden aritmetik ortalamasıdır [4,33].

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (2.10)$$



Şekil 2.29 R_a yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi [33]

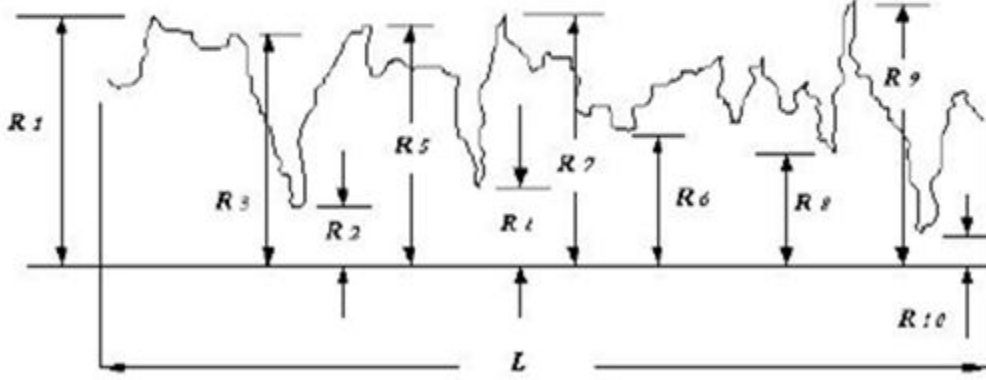
En Yüksek Tepe-Çukur Pürüzlülük Yüksekliği R_{max} , R_y : Örnekleme boyu içinde en büyük profil tepe nokta yüksekliği ve profilin en çukur nokta derinliği değerlerinin toplamıdır (Şekil 2.30).



Şekil 2.30 R_{max} yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi [33]

On nokta yüksekliği R_z ; 10 nokta yüksekliği olup örnekleme uzunluğu içinde beş en yüksek tepe ve beşen derin çukurun arasındaki ortalama mesafedir (Şekil 2.31) [33].

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5} \quad (2.11)$$



Şekil 2.31 R_z yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi [33]

İşparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğü gibi performans çıktıları temel olarak işleme parametreleriyle ilişkilidir.

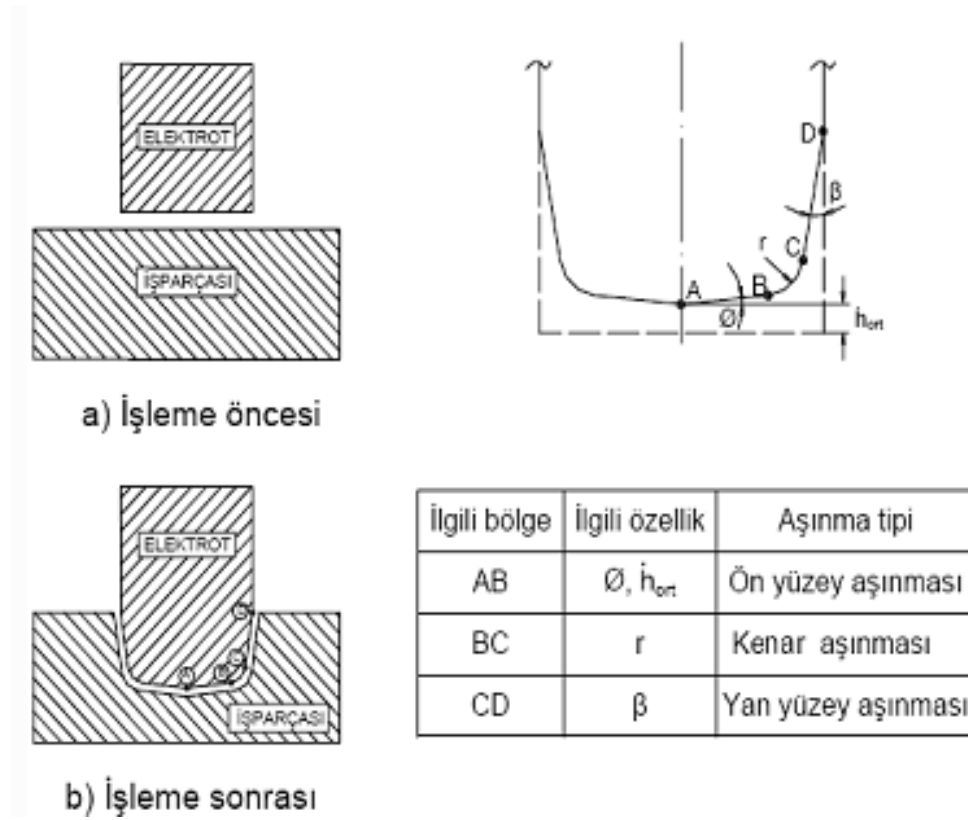
2.7 Elektrot Kenar Aşınması

Elektroerozyonla işlemede, işparçasından malzeme giderilmesi esnasında, elektrotta da aşınmalar oluşmaktadır. Bu aşınmalar elektrodun alın yüzeyinde, işleme derinliği arttıkça yanal yüzeylerde ve alın yüzeyi ile yan yüzeyler arasındaki kenarlar boyunca oluşmaktadır. İşlem başlangıcında elektrot kenar yarıçapı sıfır kabul edilse de, işlem parametrelerine bağlı olarak kenarlardaki aşınmalar sonucu yarıçap değeri artmaktadır. Elektrot formunun değişmesi işlenen parçanın formunu da etkilemekte, dolayısıyla elektrot kenar aşınmasının işlem parametreleriyle nasıl değiştiğinin bilinmesi önem kazanmaktadır.

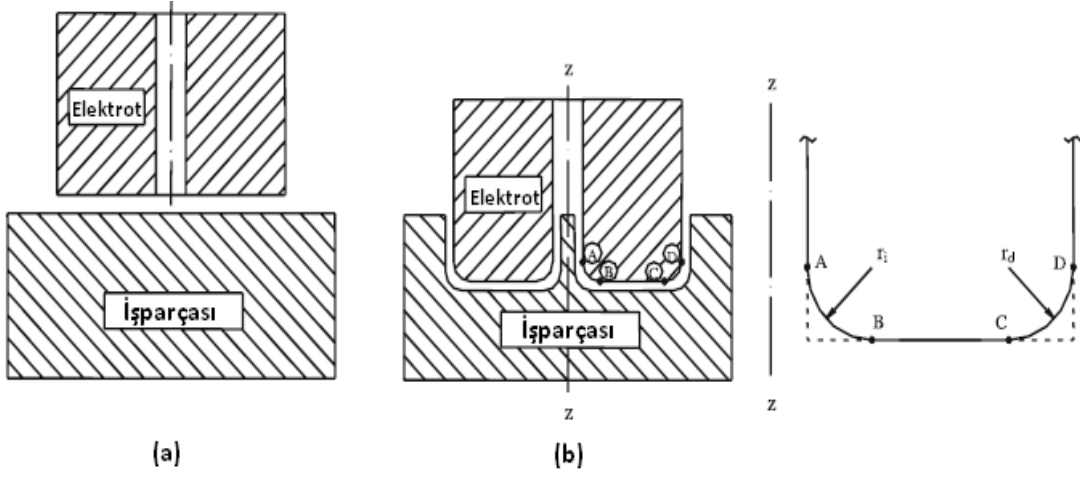
Elektroerozyonla işleme sırasında elektrotlarda gerçekleşen geometrik aşınmalar elektrotların farklı bölgelerinde farklı geometrik bozulmalar (değişimler) olarak ortaya çıkmaktadır ve bu aşınmaların karakterleride birbirinden farklı olmaktadır [57]. Geometrik aşınma bileşenleri sırasıyla; yan yüzey aşınması, kenar aşınması ve ön yüzey aşınması şeklindedir (Şekil 2.32).

Yan yüzey aşınması; Elektrot yan yüzeyinin konik açısı şeklinde ifade edilir (β) birçok araştırmada (deneysel çalışmada) bu açı çok küçük olduğu için ihmal edilir [24].

Kenar Aşınması; Bu aşınma elektrot köşelerinin yuvarlanması şeklinde meydana gelmektedir ve köşelerdeki bu yuvarlanma genellikle geometrik olarak bir dairenin yayı şeklinde ifade edilir (Şekil 2.33). İşleme başlangıcında elektrot kenarlarında görülen aşınma, elektrot ön yüz aşınmasına göre çok daha hızlı gerçekleşmektedir [24]

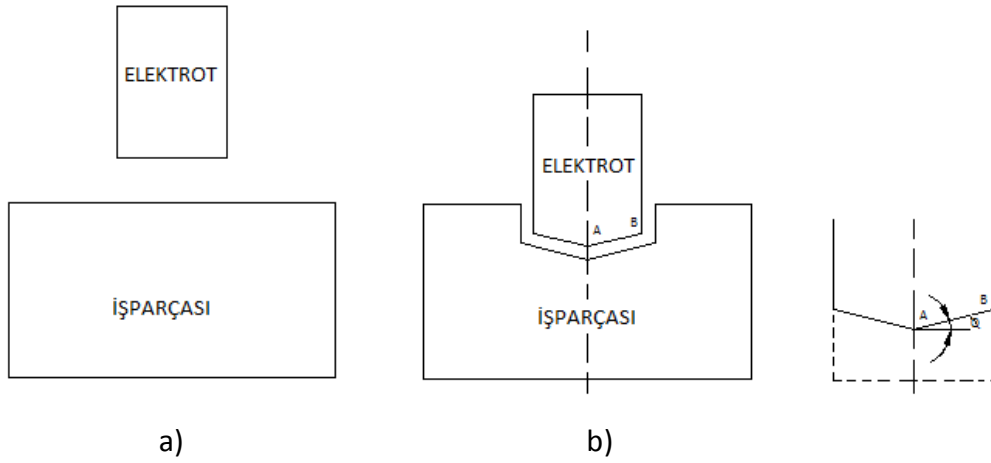


Şekil 2.32 Geometrik aşınma bileşenleri [57]



Şekil 2.33 Elektrot iç kenar ve dış kenar aşınması a) işleme öncesi b) işleme sonrası [24]

Ön yüzey aşınması: Ön yüzey eğim açısı (Φ) ile ifade edilir (Şekil 2.34) bu açı büyük ölçüde işleme boşluğuna gönderilen dielektrik sıvının giriş yönüne bağlıdır [24].



Şekil 2.34 Elektrot ön yüzey aşınması a) işleme öncesi b) işleme sonrası

DENEYLER

Bu çalışmada, çeşitli elektroerozyon işlem parametrelerin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi), soğuk iş takım çeliğinin TS EN X155CrVMo12 (DIN 1.2379) işleme özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), işparçası yüzey pürüzlülüğü ile elektrot yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması değerlerinin işlem parametreleriyle değişimi incelenmiştir. Ayrıca elektroerozyon ile işlemede yeni bir ek parametre olarak da enerji yoğunluğunun etkisi de incelenmiştir. Enerji yoğunluğunun değişimiyle işparçası işleme hızı, işparçası yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve elektrot kenar aşınması değişimi belirlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler yardımıyla Taguchi deneysel tasarımı (L_{18}) ortogonal dizileri kullanılarak uygulanmış ve işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu bulunmuştur. Optimize edilen sonuçların doğruluğunu tespit etmek için doğrulama testi yapılmış ve sonucun doğruluğu teyit edilmiştir. ANOVA analizi uygulanarak işleme parametrelerin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi ve elektrot çapı) işleme performansının çıktıları (İİH, EAH, elektrot kenar aşınması ve işparçası yüzey pürüzlülüğü ile elektrot yüzey pürüzlülüğü) üzerine hangi önem sırasıyla etki yaptığı belirlenmiştir.

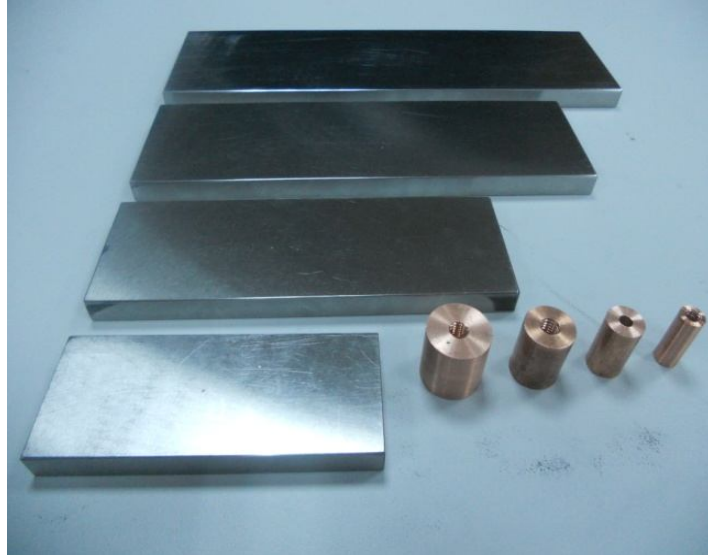
3.1 İşparçası

Deneysel işparçası olarak Çizelge 3,1'de kimyasal bileşimi verilmiş olan TS EN X155CrVMo12 (DIN 1.2379) soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 İşparçası malzemesinin kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W
%	1.55	0.30	0.30	11.75	0.75	-	1.00	-

Deneylerde kullanılan farklı çaptaki elektrotlar için ayrı birer işparçası olmak üzere toplam dört adet farklı ölçüde işparçası kullanılmıştır (Şekil 3.1). İşparçaları ticari olarak sektörden temin edilerek ısıtma işlemi sertlikleri 58–59 HRC ye kadar çıkartılmıştır. Daha sonra işparçalarının, deneylerin yapılacağı karşılıklı iki geniş yüzeyi paralel olarak taşlanmıştır.



Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan işparçaları ve elektrotlar

3.2 Elektrot

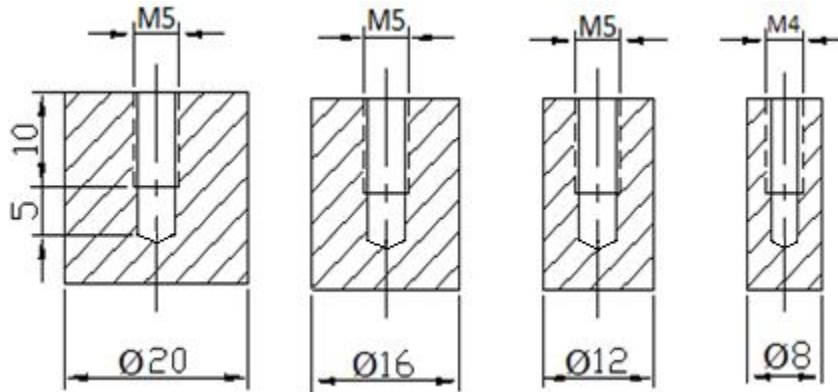
Deneylerde boyları 20 mm olmak üzere 4 farklı çapta (8, 12, 16 ve 20 mm) ve % 99,99 saflıktaki elektrolitik bakırlar elektrot malzemesi olarak kullanılmıştır (Şekil 3.2). Silindirik çubuklar tornalama ile deney için öngörülen çap değerlerine getirilmiştir. 20, 16 ve 12 mm çaplı elektrotların 10 mm'lik kısımlarına elektrotları EDM tezgahına bağlayabilmek için M5, 8 mm çaplı elektrotlar için de M4 diş açılmıştır (Şekil 3.3). Deneylerde kullanılan elektrotların bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3,2'te verilmiştir.

Çizelge 3.2 Elektrot malzemesinin bazı fiziksel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk	Erime Nok.	Kaynama Nok.	Elektriksel Direnç
Elektrolitik Bakır (Cu)	8,904 gr/cm ³	1083 (C°)	2580 (C°)	9 (μΩcm)



Şekil 3.2 Deneylerde kullanılan farklı çaplardaki elektrotlar



Şekil 3.3 Elektrotların teknik resmi

3.3 Dielektrik Sıvı

Deneylerde dielektrik sıvı olarak, özel hidrokarbon bileşiklerinden oluşan kokusuz, su berraklığında, uzun bir çalışma ömrüne sahip olan ve fizyolojik olarak tamamen zararsız olan Petrofer Dielektrikum 358 kullanılmış olup genel özellikleri Çizelge 3,3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Dielektrik sıvı özellikleri

Parametre	Renk	Yoğunluk 20° C'da	Viskozite 40 ° C'da	Alev alma noktası	Akma noktası	Kaynama başlangıcı
Değer	-	0,809	2,3	> 130 ° C	-23 ° C	240 ° C
Birim	-	g/cm ³	cSt	C °	° C	° C

3.4 Elektroerozyon Tezgâhı

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar Kale Kilit fabrikası kalıphane bölümünde bulunan Neu-ar marka CNC-P50 tipi elektroerozyon tezgahında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 3,4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Tezgaha ait teknik özellikleri

Elektronik Güç Devresi	
Güç (220/380/440V)	5.5 KVA
Boşalım Akım Kademeleri	0.5- 1 - 1,5 - 2 - 3 - 4.5 - 6 - 9 - 12 - 15 - 21 - 30 - 45 - 60 A
Vurum Süresi Kademeleri	0.5 - 1 - 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 - 90 - 120 - 150 - 200 - 300 - 400 - 500 - 600 - 700 - 900 - 1200 - 1500 - 1800 µs
Vurum Bekleme Süresi Kademeleri	2 - 4 - 6 - 10 - 20 - 30 - 60 - 90 - 150 - 300 - 500 - 900 µs
Malzeme Üzerinde Kalma Süresi	0,5 - 1 - 1,5 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 sn
İş parçası Üzerinden Yükselme	0,3 - 0,6 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3 - 3,5 - 4 (mm)
En İyi Yüzey Kalitesi	0.15 Ra µm
Tezgah Gövde Boyutları	
İş Tablası Ölçüleri (X - Y)	630x360 mm
İşleme Haznesi Ölçüleri	350x250x200mm
Maksimum Elektrot Ağırlığı	50 kg
Maksimum İş parçası Ağırlığı	500kg
Dielektrik Sıvı Sistemi	
Depo Ölçüleri (X-Y-Z)	940x530x350 mm
Kapasite	300 litre



Şekil 3.4 Neu-ar marka CNC-P50 tipi elektroerozyon tezgahı

3.5 İşleme Parametreleri

Deneylerde kullanılan işleme parametreleri liste halinde Çizelge 3.5'te verilmiştir. Elektroerozyonla işlemede deney parametreleri için boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresi değişken parametre olarak alınmıştır. Aralık gerilimi, elektrot kutbu, işleme zamanı, elektrodun malzeme üzerinde kalma süresi ve elektrodun malzeme üzerinden maksimum kalkma miktarı tüm deneyler boyunca sabit olarak alınmıştır.

Çizelge 3.5 Deneyleerde kullanılan işleme parametreleri

Deney Parametresi	Değer
Boşalım Tepe Akımı (Amper) (A)	9, 15, 21
Vurum süresi (t_s) (μs)	10, 20, 45
Vurum bekleme süresi (t_p) (μs)	6, 30, 300
Aralık gerilimi (Volt) (V)	55
Malzeme üzerinde kalma (sn)	1.5
Malzeme üzerinden kalkma (mm)	1.5
İşleme zamanı (dk)	20
Elektrot Kutbu	Negatif (-)

3.6 Elektroerozyon ile İşlemede Performans Çıktılarının Tespit Edilmesi

3.6.1 İşparçası İşleme Hızının (İİH) Tespiti

Her deney öncesi işparçaları kuru bir bezle iyice temizlenip, sonrasında basınçlı hava ile kurutulduktan sonra Densi marka JW UFO model hassas terazi ile üçer kez tartılmıştır. Bu üç ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanmış ve işparçalarının deney öncesi ağırlığı olarak kaydedilmiştir. Her deney tamamlandıktan sonra işparçaları aynı temizleme ve kurutma işlemine tutularak üçer kez tartılmış ve bu üç ölçümün ortalaması işparçalarının deney sonrası ağırlığı olarak kaydedilmiştir.

3.6.2 Elektrot Aşınma Hızının (EAH) Tespiti

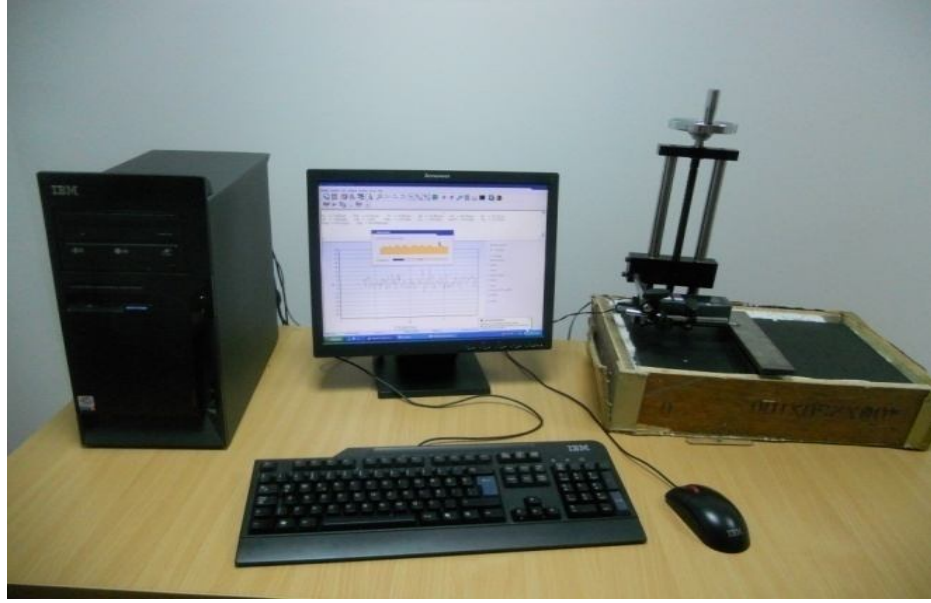
Elektrotlar her deney öncesi ve sonrasında kuru bir bezle iyice temizlenip sonrasında basınçlı hava ile kurutulduktan sonra KERN marka EW model hassas terazi ile üçer kez tartılmıştır. Bu üç ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanmış ve elektrotların deney öncesi ağırlığı olarak kaydedilmiştir. Her deney tamamlandıktan sonra elektrotlar aynı temizleme ve kurutma işlemine tutularak üçer kez tartılmış ve bu üç ölçümün ortalaması elektrotların deney sonrası ağırlığı olarak kaydedilmiştir.



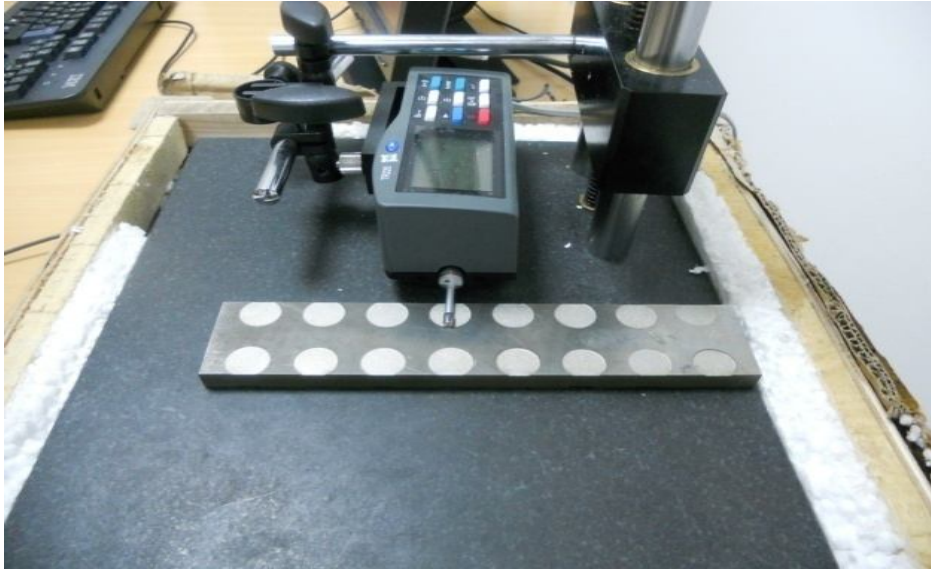
Şekil 3.5 Elektrot kütle kaybının hassas terazi ile ölçülmesi

3.6.3 İşparçası ve Elektrotların Ortalama Yüzey Pürüzlülük (R_a) Değerlerinin Tespiti

İşparçası ve elektrotların işlenmiş yüzeylerine ait ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerlerini ölçmek için 0,001 μm hassasiyette ölçüm yapan, elmas uçlu Time marka TR-200 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.6-Şekil 3.7). Her ölçüm için en az 5 farklı noktadan ölçüm alınmıştır ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır. 20, 16 ve 12 mm'lik elektrotlar ve bu elektrotlara ait işparçalarının yüzey pürüzlülük değerinin ölçümü yapılırken ayarlanan değerler; cut off : 0.8, değerlendirme uzunluğu = 5L, Range : 40 μm ve metrik sistem şeklindedir. 8 mm'lik elektrotları ve bu elektrotlara ait işparçalarının ölçümü yapılırken değerlendirme uzunluğu olarak 2L alınmıştır. İşparçaların yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapılabilmesi için işparçaları kenarlarından ölçümün yapılmasına olanak sağlayacak şekilde tel elektroerozyon yöntemiyle kesilmiştir.



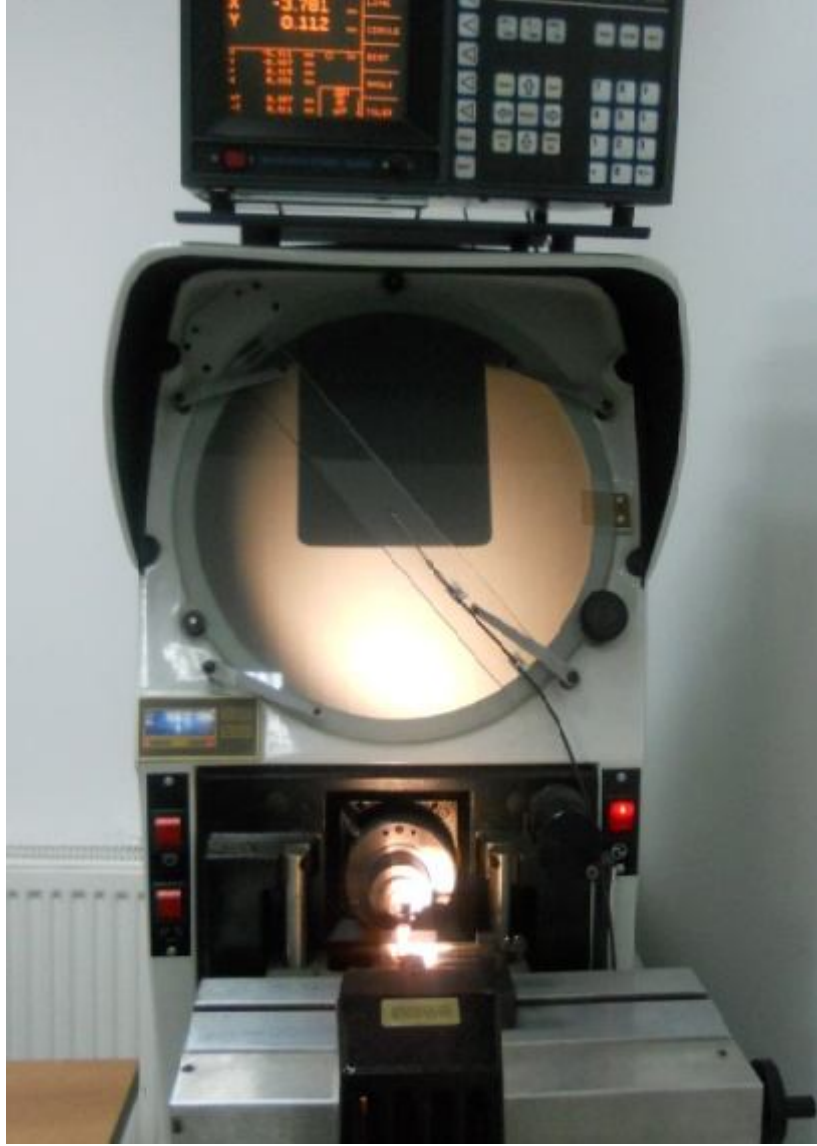
Şekil 3.6 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı



Şekil 3.7 Yüzey pürüzlülüğünün ölçümü

3.6.4 Elektrotların Kenar Aşınması Değerinin Tespiti

Elektrotlarda oluşan kenar aşınma yarıçap değerlerini belirleyebilmek için, 1 μm boyutsal ölçüm hassasiyetine sahip olan BETY R14 model profil projeksiyon cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.8). Elektrot kenarlarından 4 farklı noktadan (90'ar derece arayla) 50'şer ölçüm alınmış daha sonra bu 4 ölçümün aritmetik ortalaması alınarak her elektrot için kenar aşınma sonucu oluşan ortalama kenar yarıçap değerleri bulunmuştur.



Şekil 3.8 Profil Projeksiyon Cihazı

3.7 Deneilerin Uygulanışı

Bu çalışmada, yapılan tüm deneylerde 58-59 HRC'ye kadar sertleştirilmiş TS EN X155CrVMo12 (DIN 1.2379) soğuk iş takım çeliği ve elektrot olarak farklı çaplardaki (8, 12, 16 ve 20 mm) % 99,99 saflıktaki elektrolitik bakır çubuklar kullanılmıştır. Çizelge 3.6'da verilen deney tasarımı tüm farklı çaptaki elektrotlar için ayrı ayrı uygulanarak toplamda her bir farklı elektrot çapı için 27 farklı deney yapılmıştır. Her deney 20 dakika süresince gerçekleştirilmiştir. Her deney öncesi ve sonrası hem işparçaları hem de elektrotlar hassas terazide tartılarak kütle kayıpları hesaplanmıştır. Deneyler tamamlandıktan sonra işparçası ve elektrotların ortalama

yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) ile elektrotlarda elektroerozyon sonucu oluşan kenar aşınması (kenar yarıçap değişimi) değerleri ölçülmüştür.

Taguchi deneysel tasarım yöntemi (L_{18}) ortogonal dizisi kullanılarak uygulanmıştır. Sinyal/gürültü (s/n) oranları hesaplanarak sinyal/gürültü grafikleri çizilmiş ve işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu elde edilmiştir. Optimize edilen sonuçların doğruluğunu teyit etmek için doğrulama testi yapılmıştır. Değişkenlerin Analizi (ANOVA) yöntemi uygulanarak, işleme parametrelerinin işleme performansı çıktıları üzerin (İİH, EAH, işparçası yüzey pürüzlülüğü ile elektrot yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınmasını) hangi önem sırasıyla etki ettiği bulunmuştur.

Çizelge 3.6 Deneysel Tasarımı

Deneysel numarası	Boşalım Tepe Akımı (Amper)	Vurum süresi (μ s)	Vurum bekleme süresi (μ s)
1	9	10	6
2	9	10	30
3	9	10	300
4	9	20	6
5	9	20	30
6	9	20	300
7	9	45	6
8	9	45	30
9	9	45	300
10	15	10	6
11	15	10	30
12	15	10	300
13	15	20	6
14	15	20	30
15	15	20	300
16	15	45	6
17	15	45	30
18	15	45	300
19	21	10	6
20	21	10	30
21	21	10	300
22	21	20	6
23	21	20	30
24	21	20	300
25	21	45	6
26	21	45	30
27	21	45	300

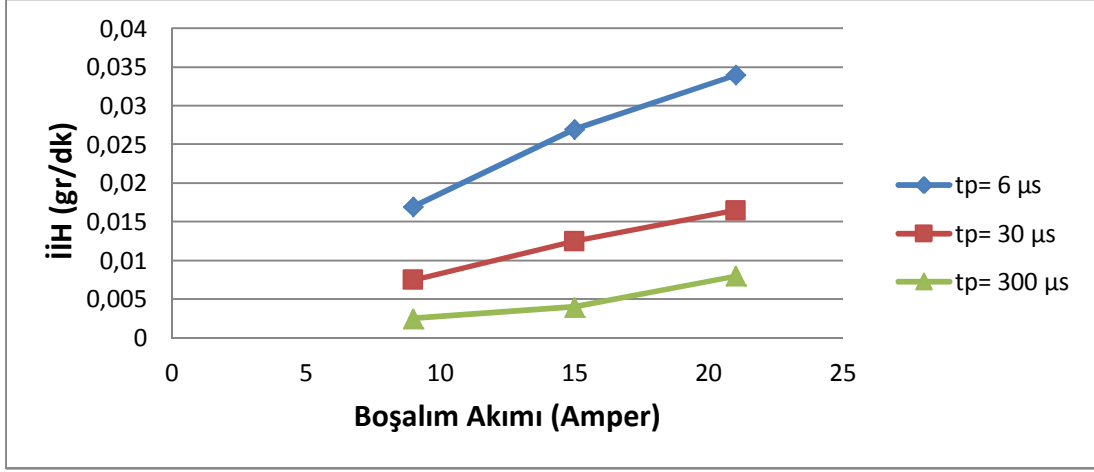
BÖLÜM 4

BULGULAR

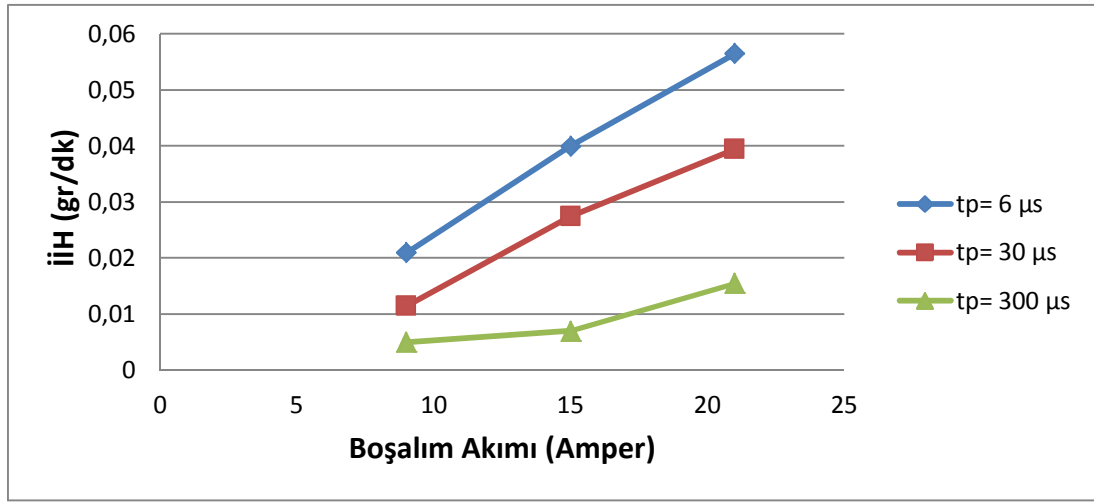
Elektroerozyon ile işleme (EEİ) yönteminde kullanılan çeşitli işlem parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi), işleme performansı çıktıları (işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, işparçası yüzey pürüzlülüğü ile elektrot yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması) üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elektroerozyonla işlemede yeni bir ek parametre olarak da enerji yoğunluğunun etkisi incelenmiştir ve enerji yoğunluğundaki değişimin işparçası işleme hızı, işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve elektrot kenar aşınmasına etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Farklı çaplara sahip (8, 12, 16 ve 20 mm) ve % 99,99 saflıktaki elektrolitik bakırların elektrot malzemesi olarak kullanıldığı deneylerde işparçası olarak TS EN X155CrVMo12 (DIN 1.2379), soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Deneylerde işleme parametreleri olarak; boşalım tepe akımı (9, 15 ve 21 A), vurum süresi (t_s) (10, 20, 45 μ s), vurum bekleme süresi (t_p) (6, 30, 300 μ s), aralık gerilimi 55 Volt ve işleme zamanı olarak 20 dakika alınmasıyla elde edilen deneysel sonuçlar sonraki kısımlarda detaylı bir şekilde verilmiştir.

4.1 İşleme Parametrelerinin İşparçası İşleme Hızına (İİH) Etkisi

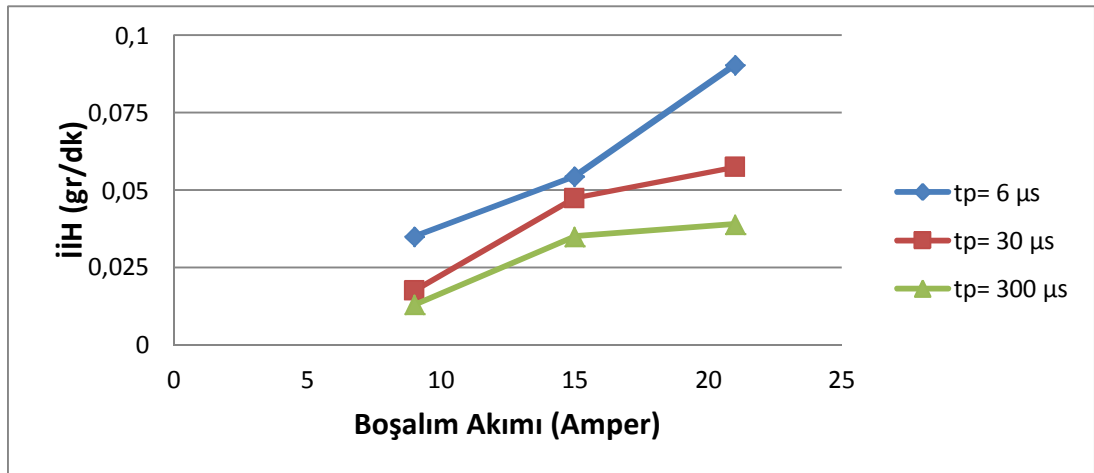
Elektroerozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir ve elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 4.1.1- 4.1.24).



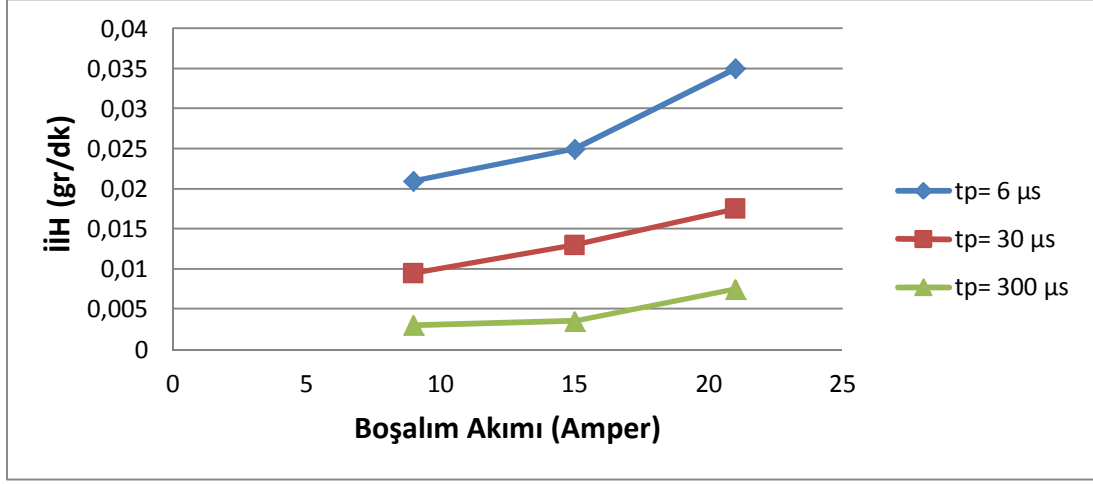
Şekil 4.1.1 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 10 µs)



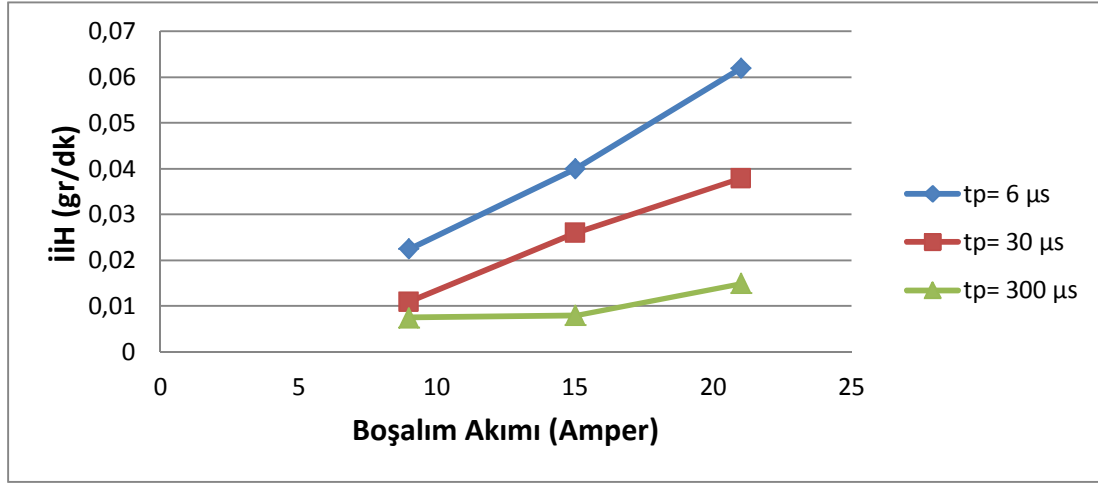
Şekil 4.1.2 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 20 µs)



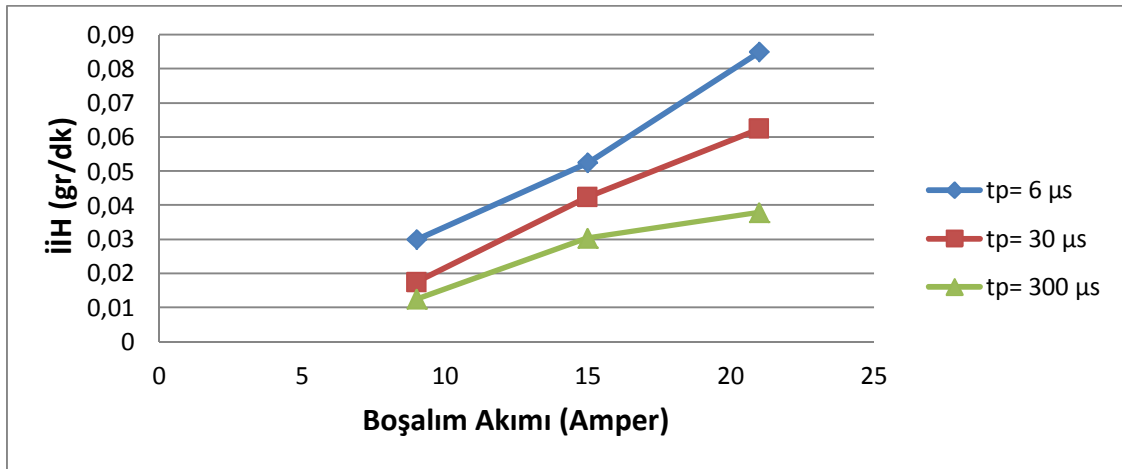
Şekil 4.1.3 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 45 µs)



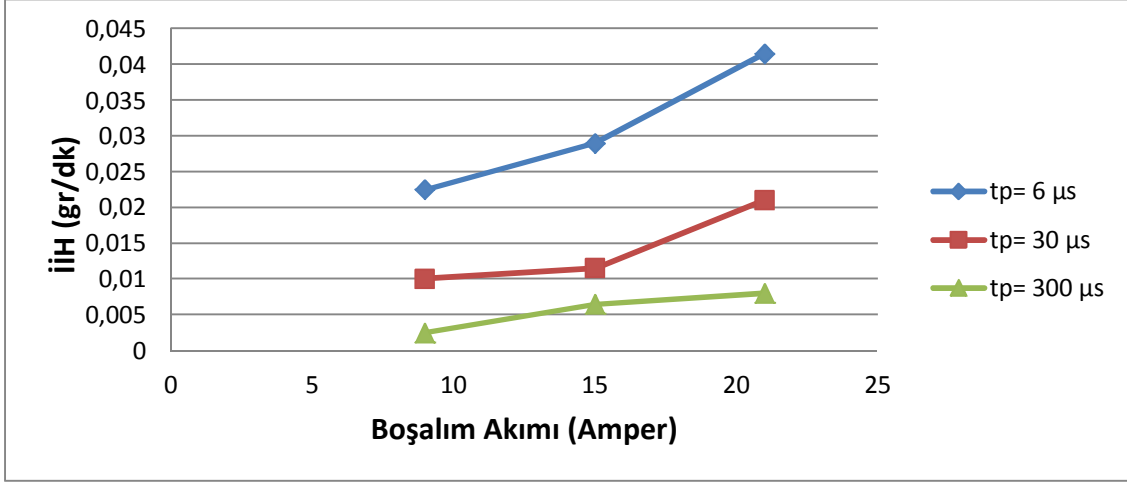
Şekil 4.1.4 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi
(16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 10 μ s)



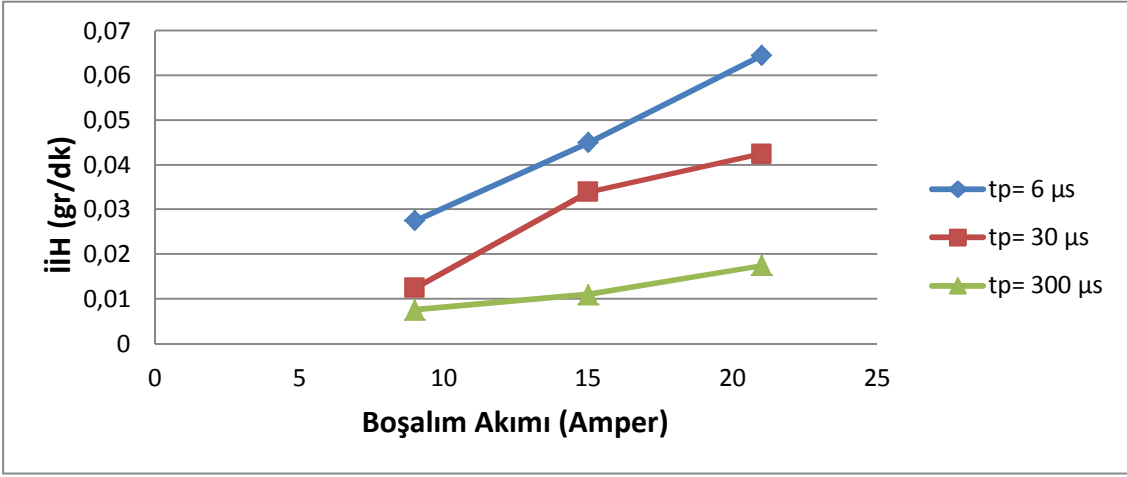
Şekil 4.1.5 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi
(16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 20 μ s)



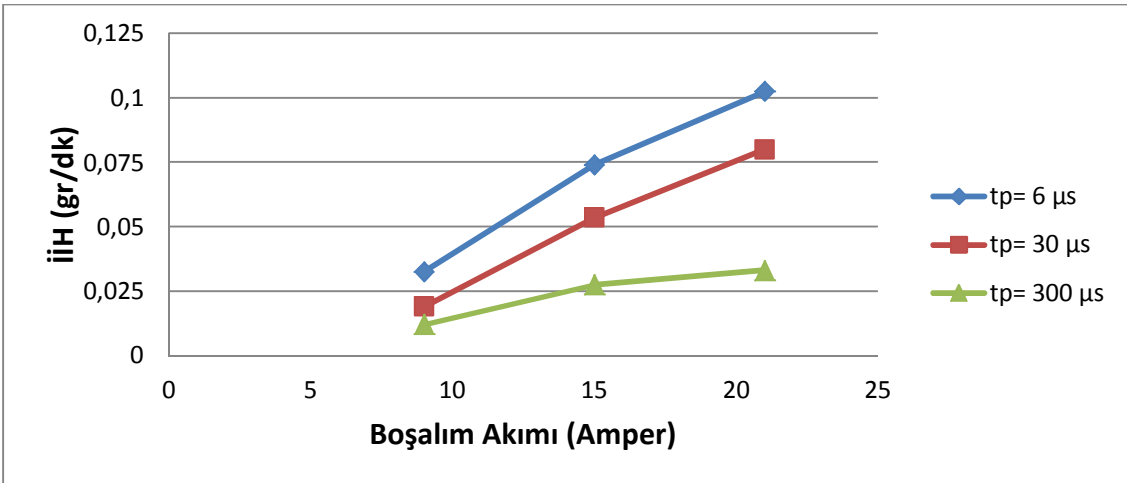
Şekil 4.1.6 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi
(16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 45 μ s)



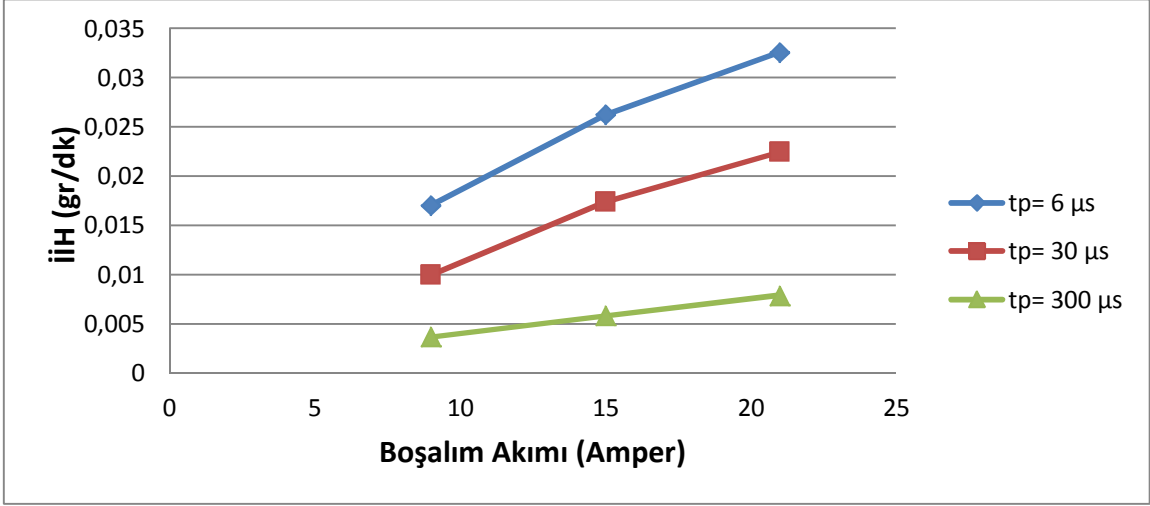
Şekil 4.1.7 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 10 μs)



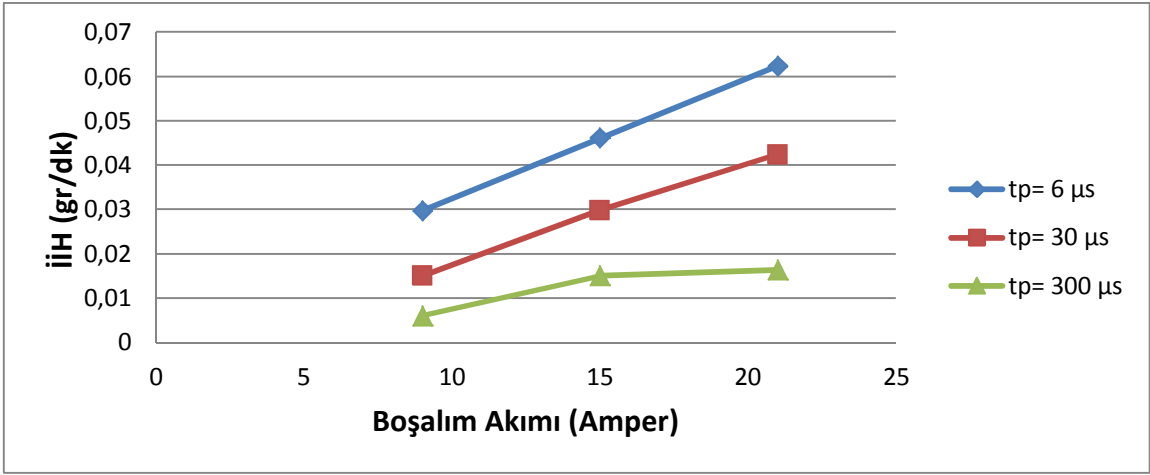
Şekil 4.1.8 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 20 μs)



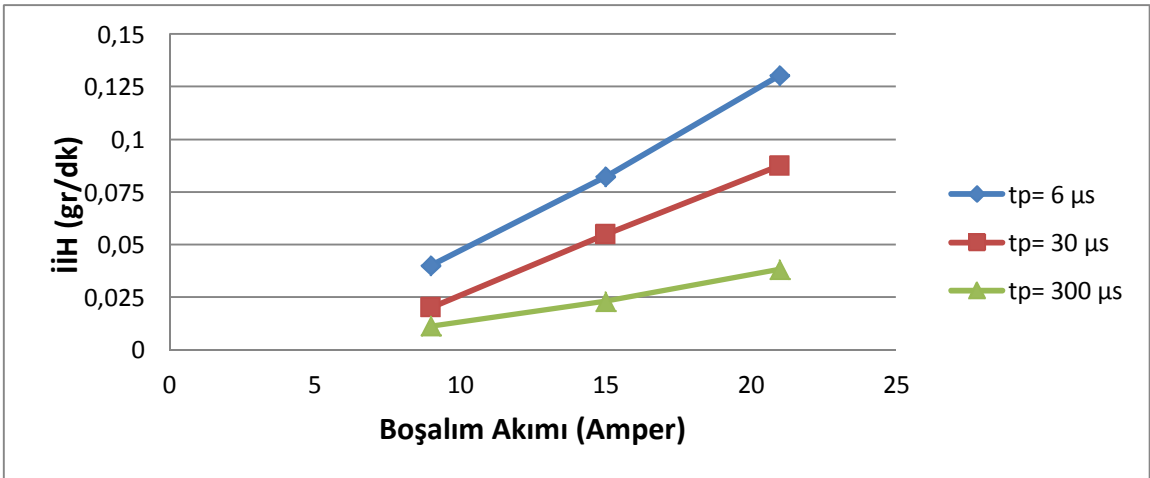
Şekil 4.1.9 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 45 μs)



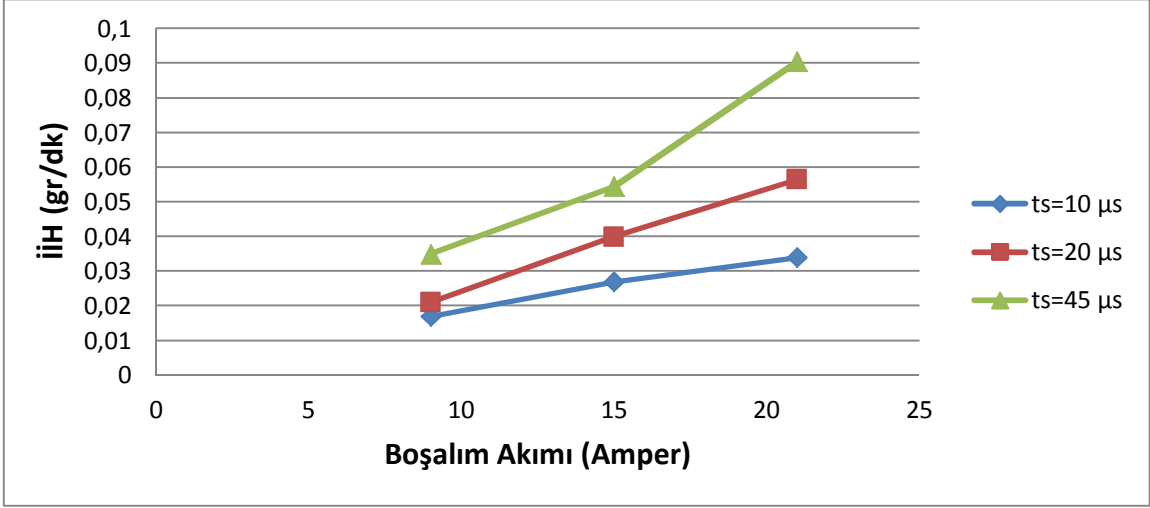
Şekil 4.1.10 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin iiH'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 10 µs)



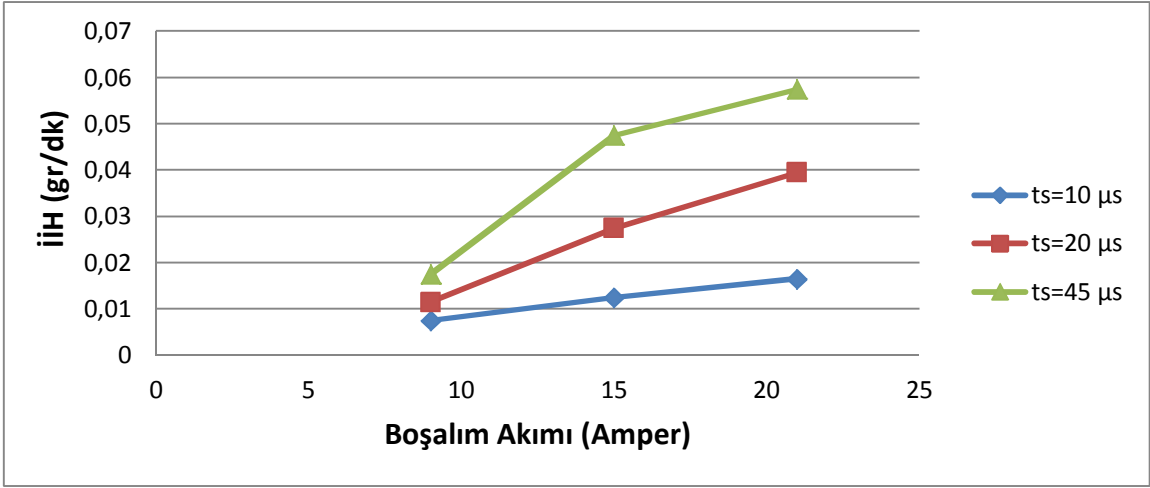
Şekil 4.1.11 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin iiH'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 20 µs)



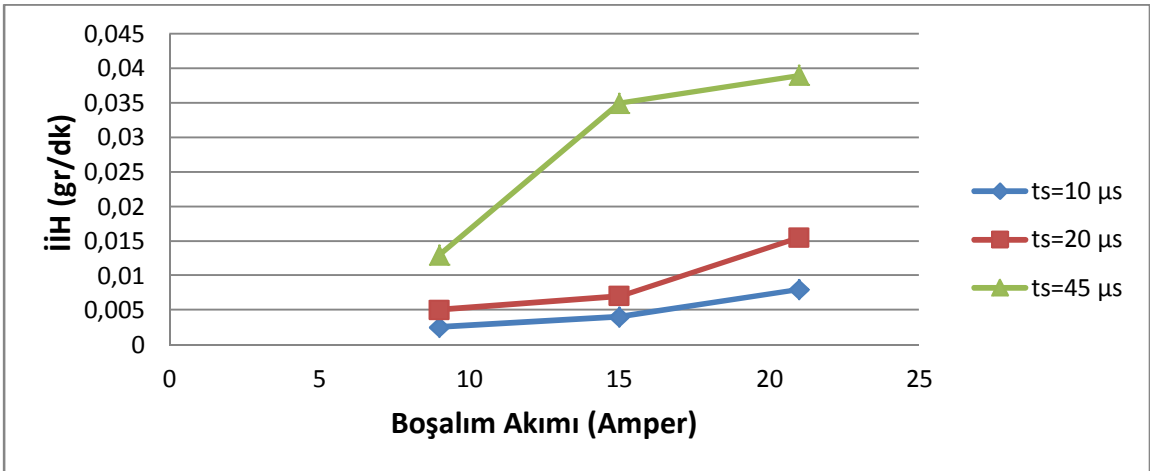
Şekil 4.1.12 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin iiH'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum süresi 45 µs)



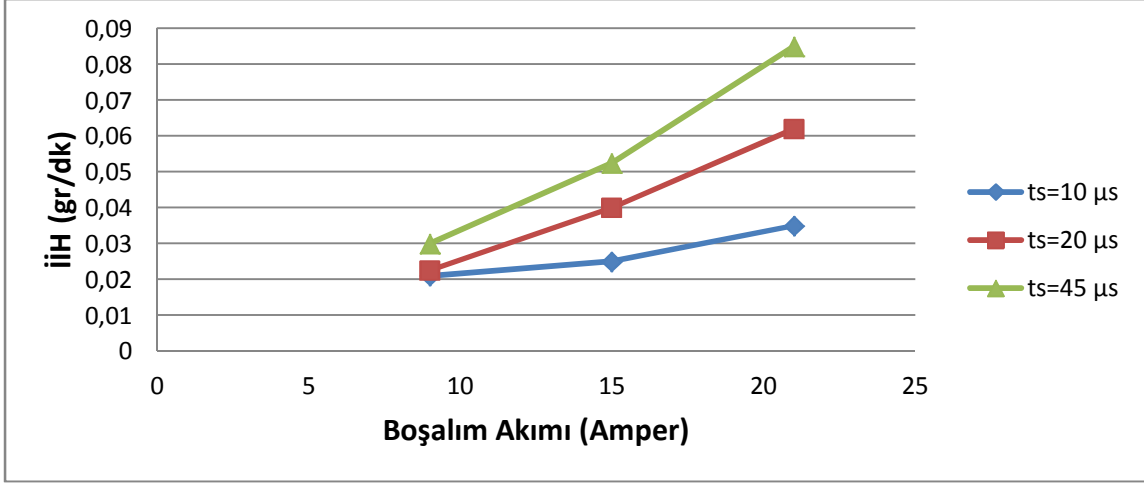
Şekil 4.1.13 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μs)



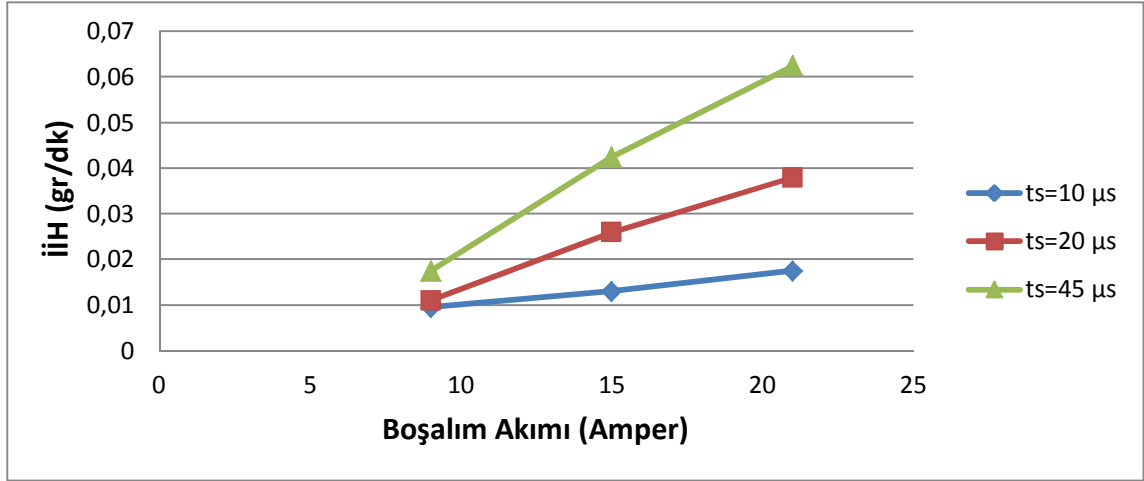
Şekil 4.1.14 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μs)



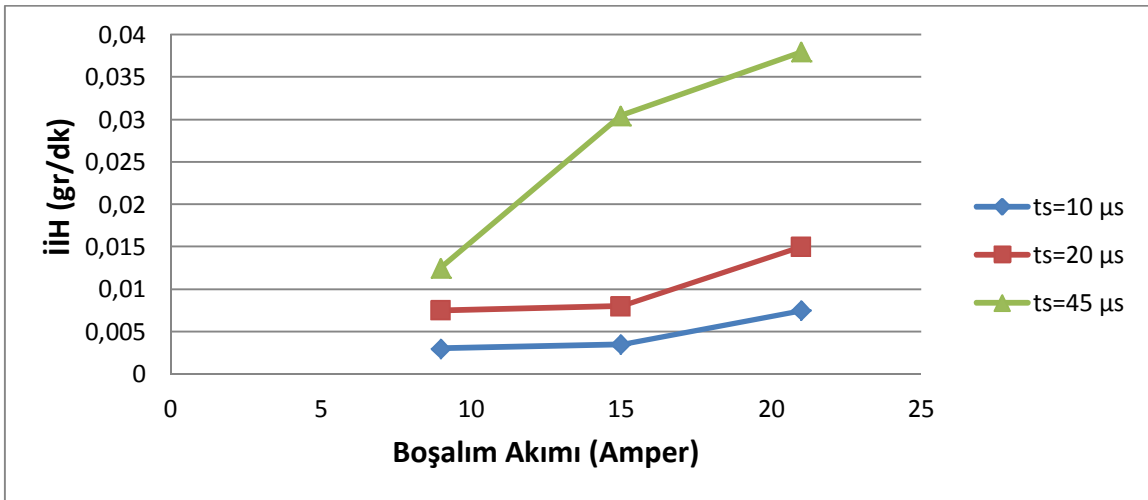
Şekil 4.1.15 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (20 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μs)



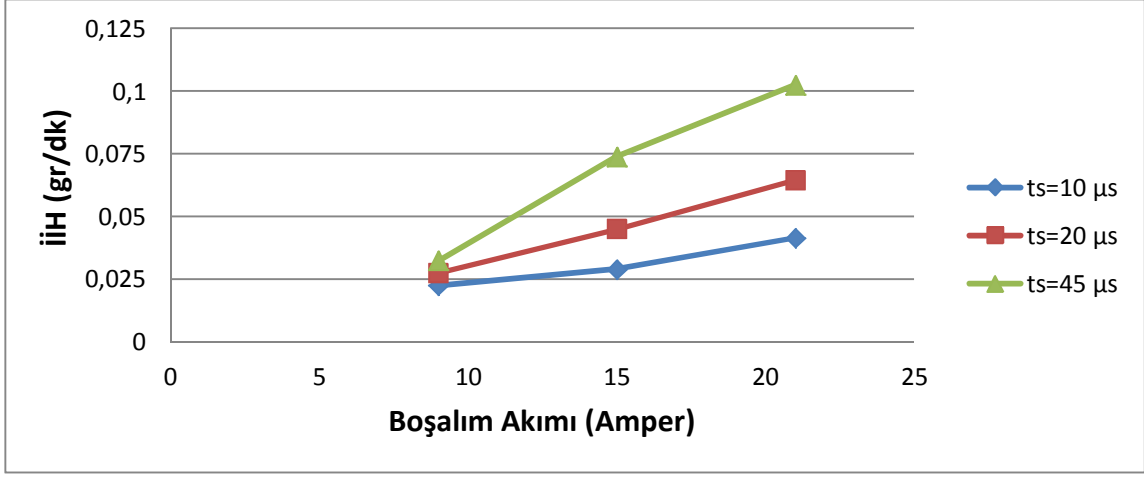
Şekil 4.1.16 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μs)



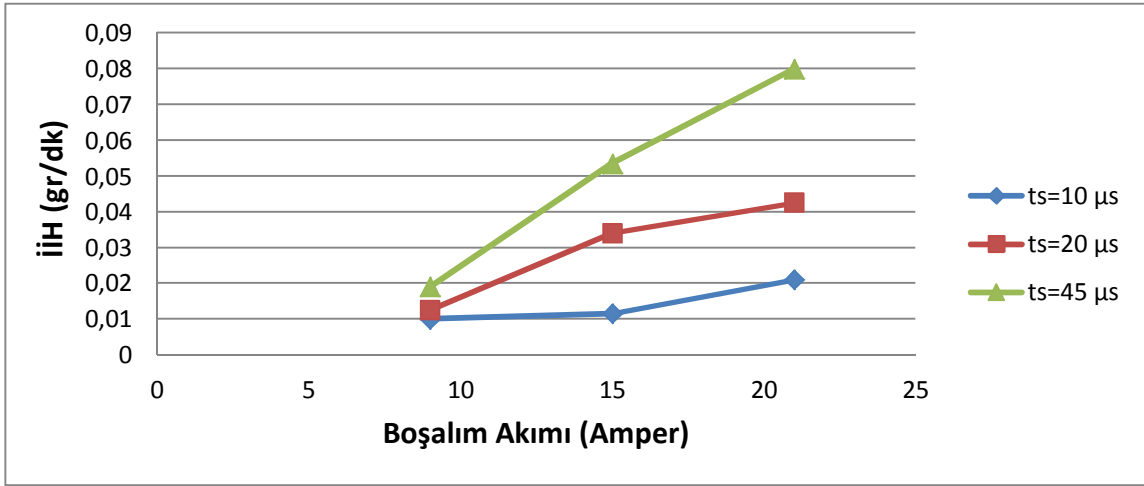
Şekil 4.1.17 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μs)



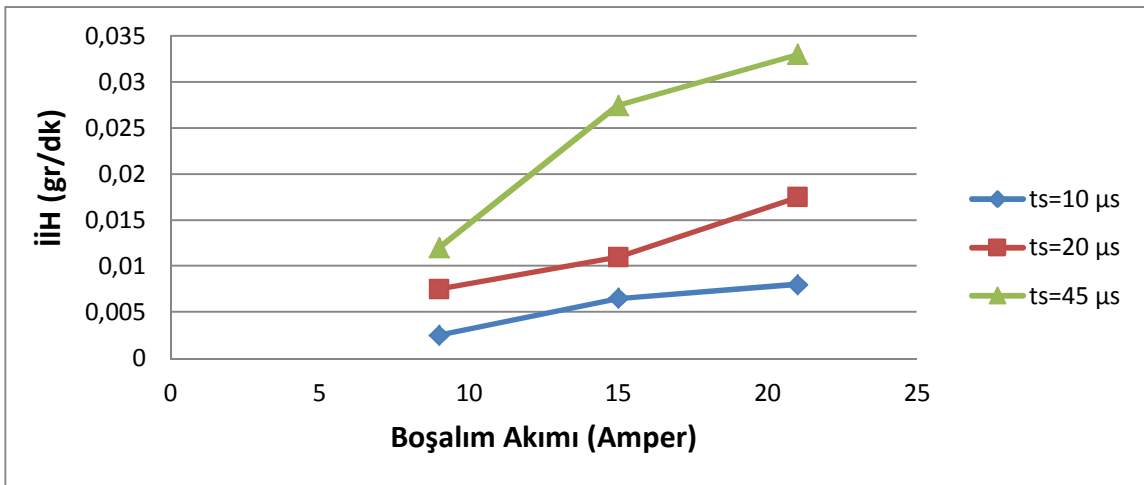
Şekil 4.1.18 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (16 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μs)



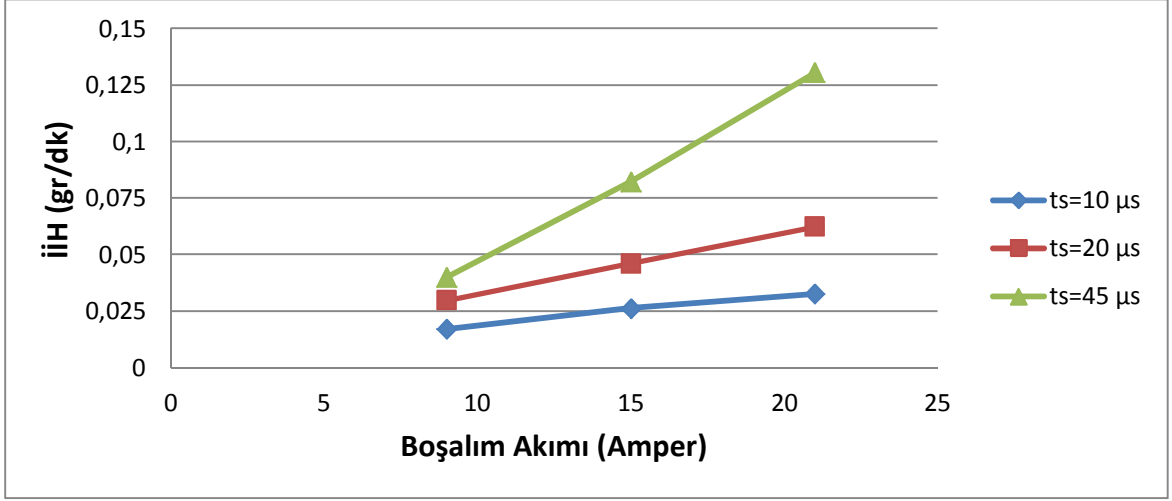
Şekil 4.1.19 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μs)



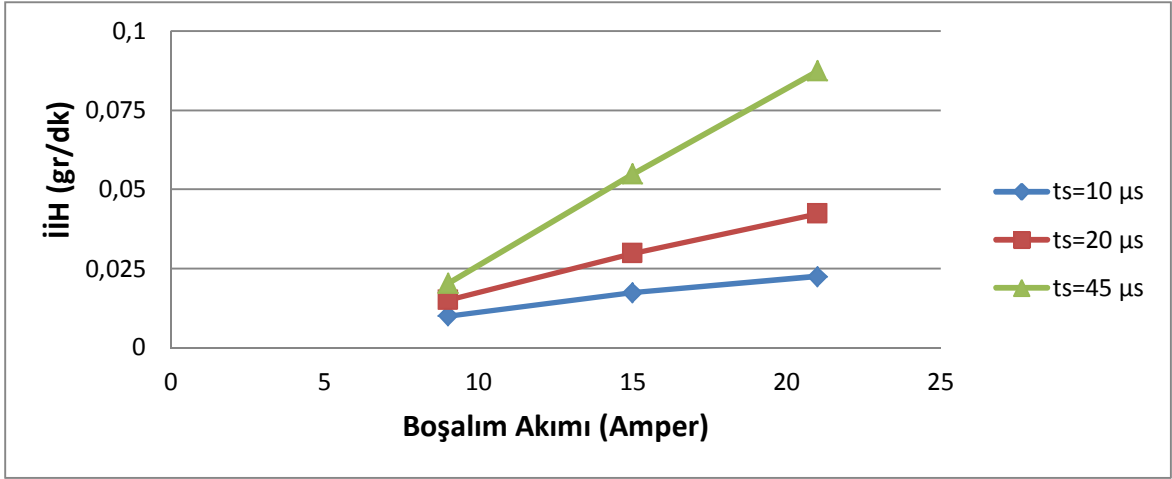
Şekil 4.1.20 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30)



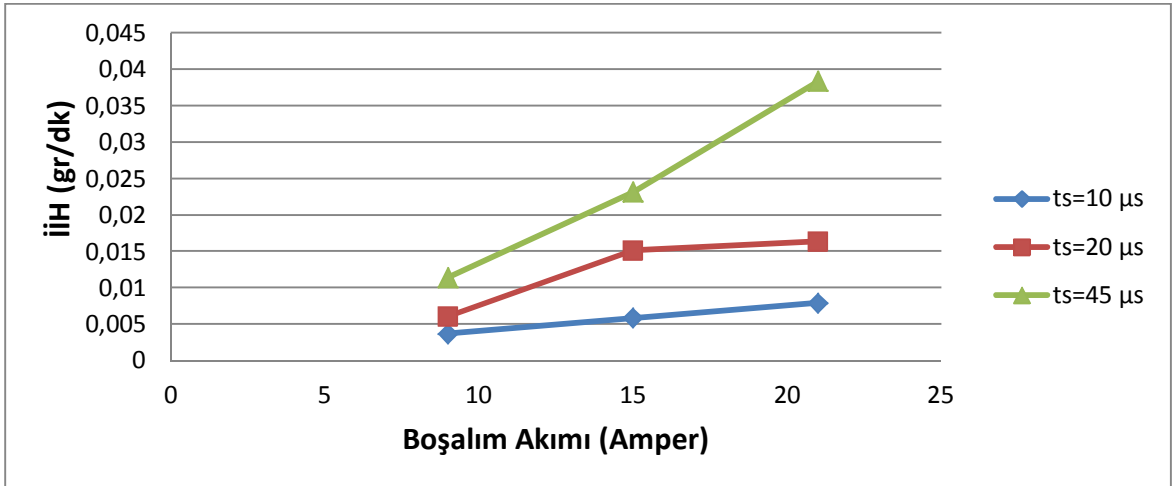
Şekil 4.1.21 Boşalım akımı ve vurum süresinin iiH'na etkisi (12 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300)



Şekil 4.1.22 Boşalım akımı ve vurma süresinin $\ddot{i}H$ 'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurma bekleme süresi 6 μs)



Şekil 4.1.23 Boşalım akımı ve vurma süresinin $\ddot{i}H$ 'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurma bekleme süresi 30 μs)

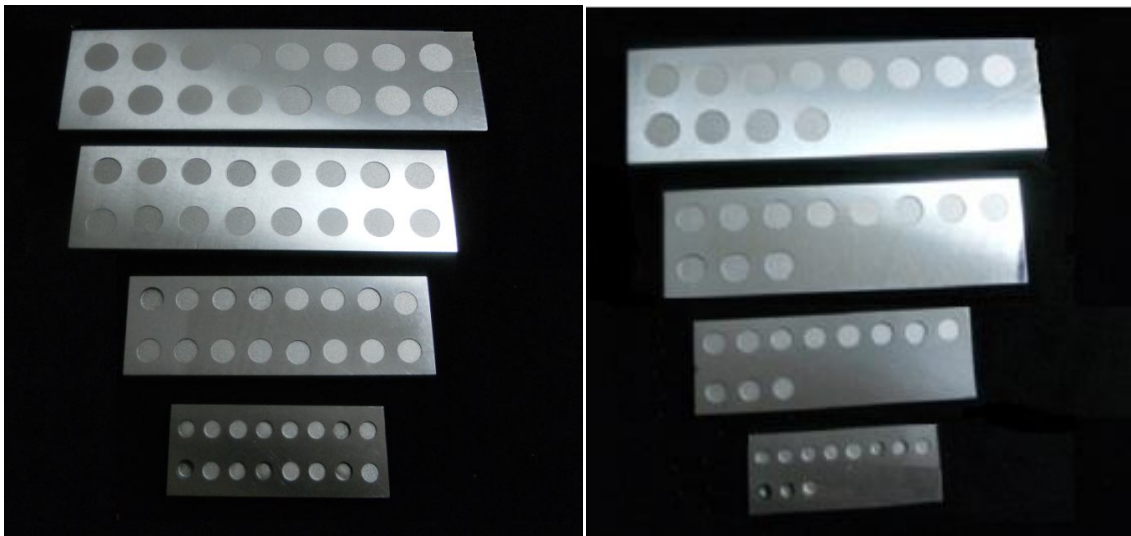


Şekil 4.1.24 Boşalım akımı ve vurma süresinin $\ddot{i}H$ 'na etkisi (8 mm çaplı elektrota ait işparçası ve vurma bekleme süresi 300 μs)

Yapılan deneysel çalışmalarda işparçası işleme hızının boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla birlikte arttığı, vurum bekleme süresinin artmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Bu olgunun nedeni aşağıda belirtilmiştir.

Elektroerozyonla işlemede işparçası işleme hızı işparçasına verilen enerjiye bağlıdır bu da boşalım akımı ve vurum süresiyle doğru orantılıdır (Eşitlik 2.4). Boşalım akımı ve vurum süresinin artması boşalım enerjisinin ve (dielektrik sıvının patlaması sonucu oluşan) vurum kuvvetinin artmasını sağlar. Boşalım enerjisinin artması işparçasının daha fazla ısınmasına neden olarak işparçasından daha fazla miktarda malzemenin giderilmesine neden olarak işparçası işleme hızının artmasını sağlar. Bu nedenle boşalım akımındaki artış işparçası işleme hızının artmasına neden olmaktadır.

Vurum bekleme süresi arttıkça işparçası işleme hızı azalmaktadır bunun nedeni ise vurum bekleme süresinin artması ile etkin işleme zamanının azalmış olmasıdır. Bu yüzden işleme zamanı vurum bekleme süresinin artmasıyla önemli bir şekilde yükselir. Kısa vurum bekleme süresi malzeme kaldırma miktarını ve elektrot aşınma miktarını azaltır, ama vurum bekleme süresinin azaltmanın bir limiti vardır. Vurum bekleme süresi, bir önceki boşalımdan sonra dielektrik sıvının de-iyonizasyonuna (tekrar yalıtkan hale gelmesi) müsaade edecek kadar uzun olmalıdır [9].



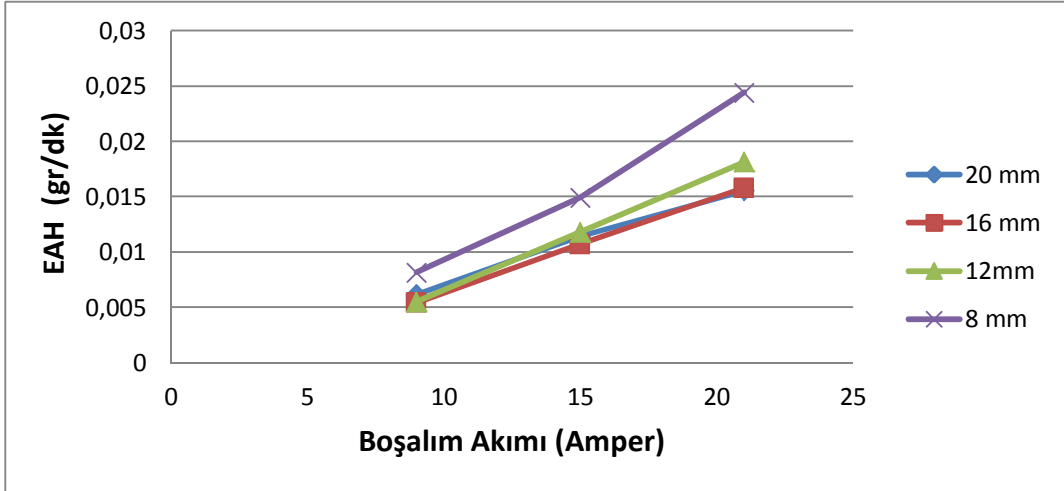
a)

b)

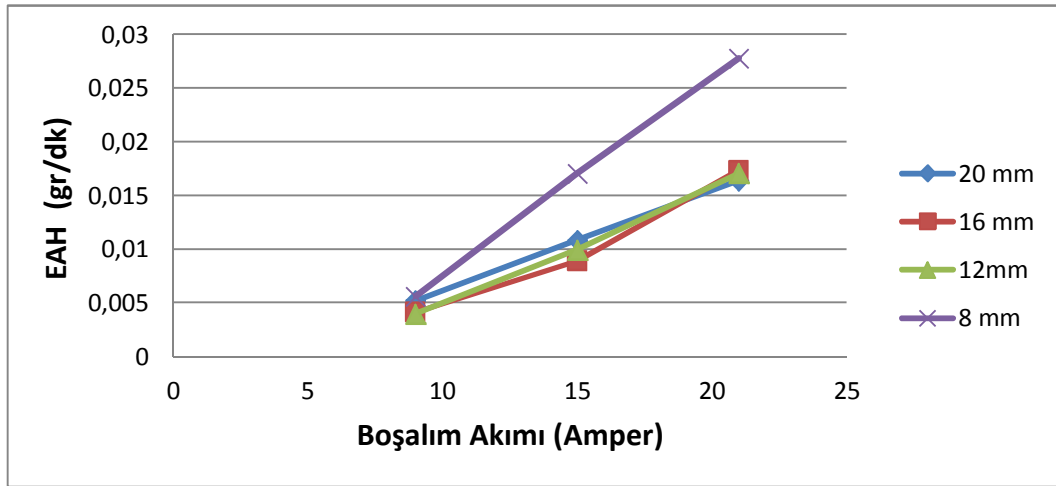
Şekil 4.1.25 İşparçalarının deneylerden sonraki görünümü a) önden, b) arkadan görünüm

4.2 İşleme Parametrelerinin Elektrot Aşınma Hızına (EAH) Etkisi

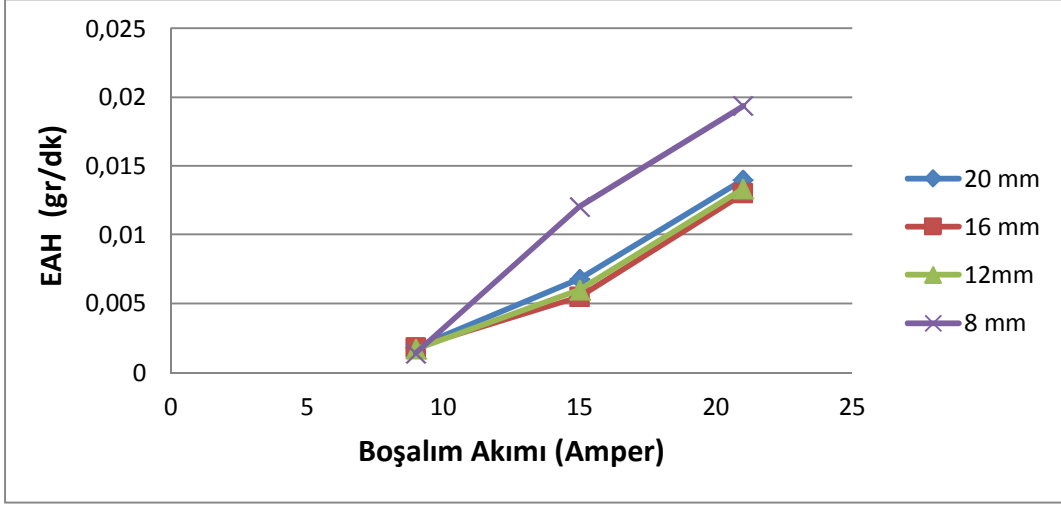
Elektroerozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin elektrot aşınma hızına etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir. Elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 4.2.1- 4.2.21).



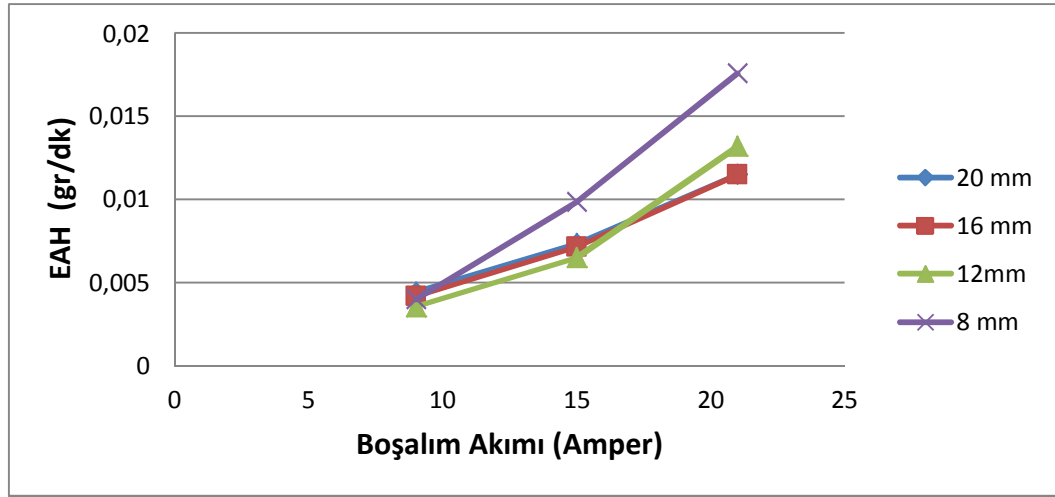
Şekil 4.2.1 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 6 µs, vurum süresi 10 µs)



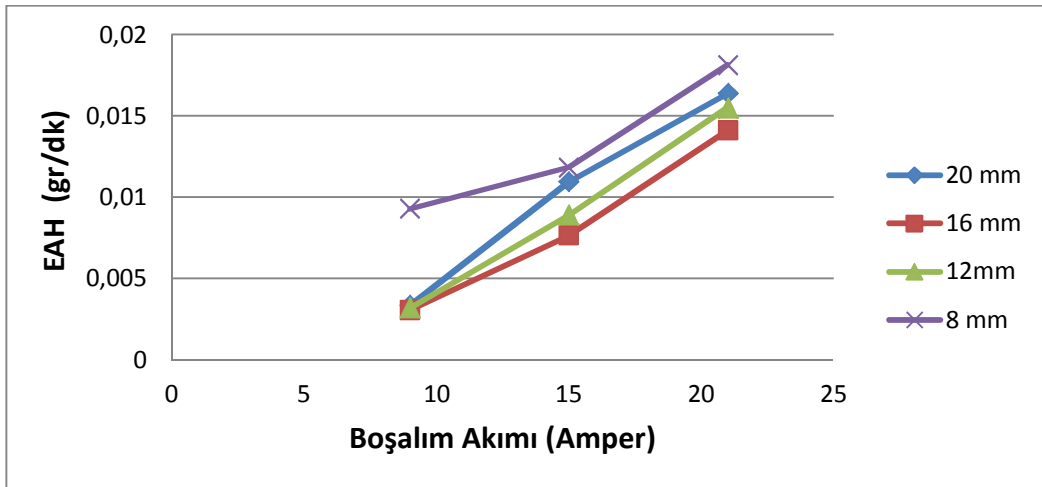
Şekil 4.2.2 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 6 µs, vurum süresi 20 µs)



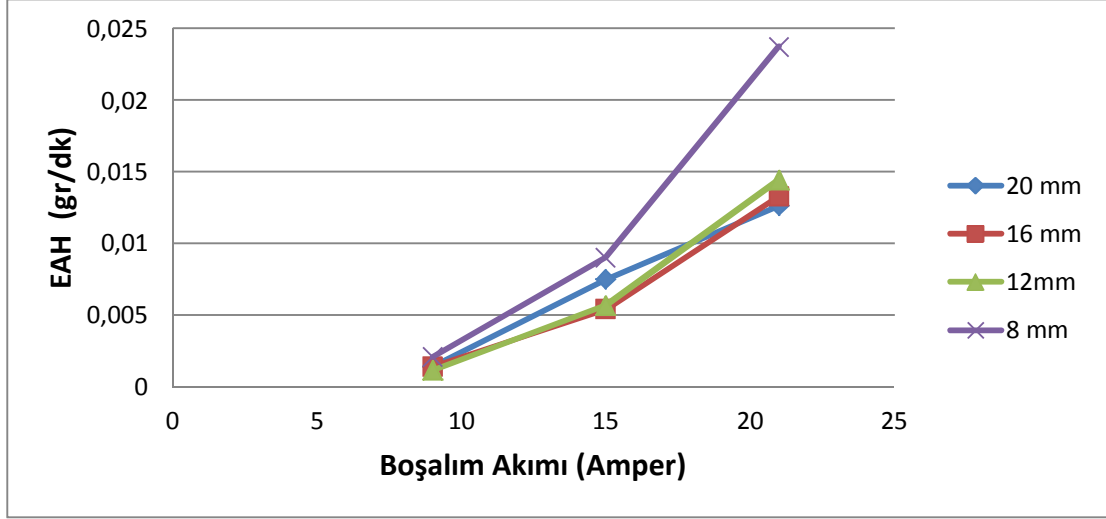
Şekil 4.2.3 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 6 μ s, vurum süresi 45 μ s)



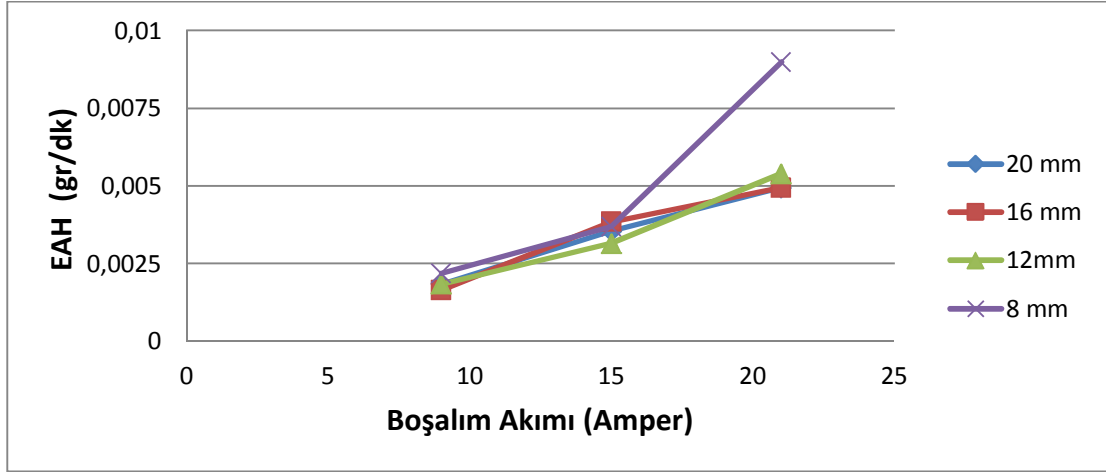
Şekil 4.2.4 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 30 μ s, vurum süresi 10 μ s)



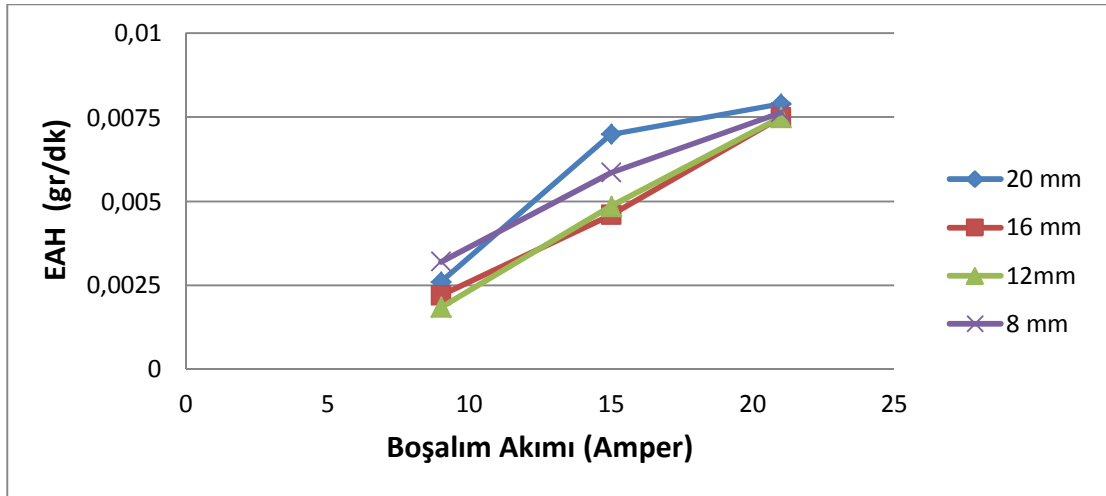
Şekil 4.2.5 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 30 μ s, vurum süresi 20 μ s)



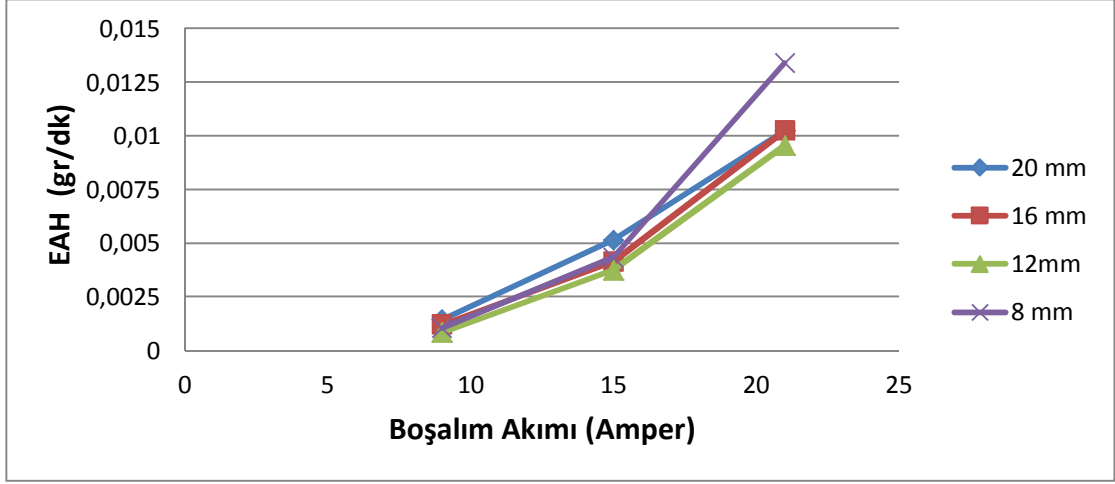
Şekil 4.2.6 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 30 µs, vurum süresi 45 µs)



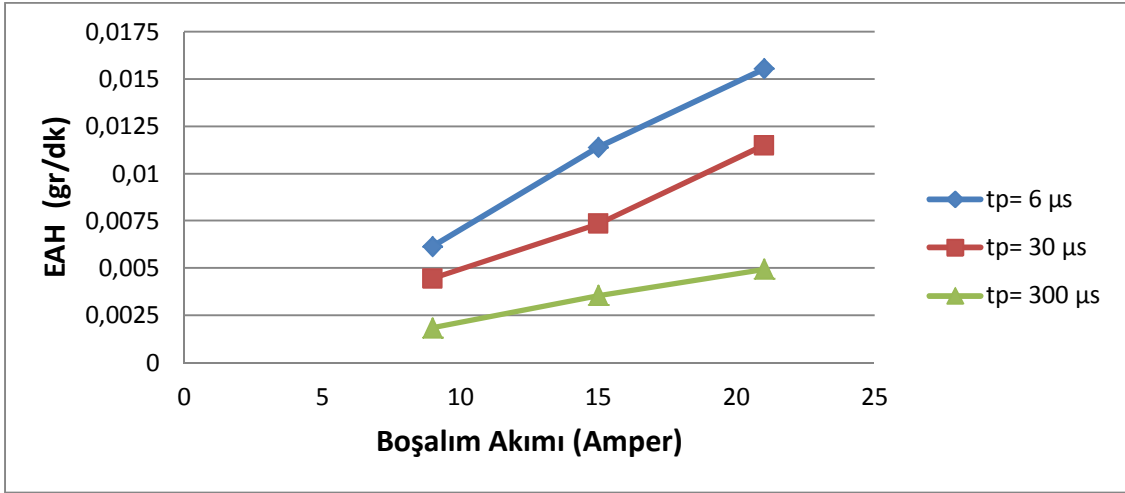
Şekil 4.2.7 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 300 µs, vurum süresi 10 µs)



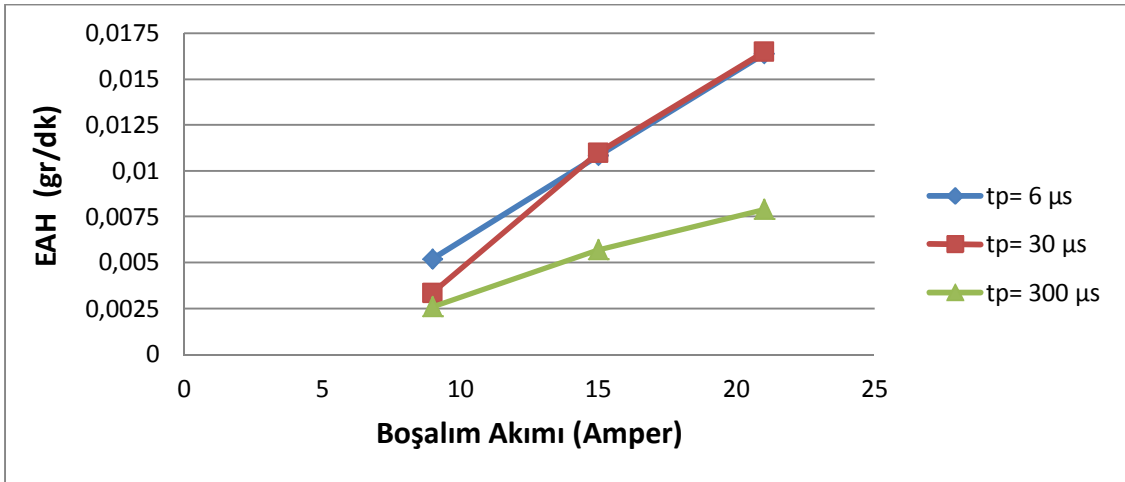
Şekil 4.2.8 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 300 µs, vurum süresi 20 µs)



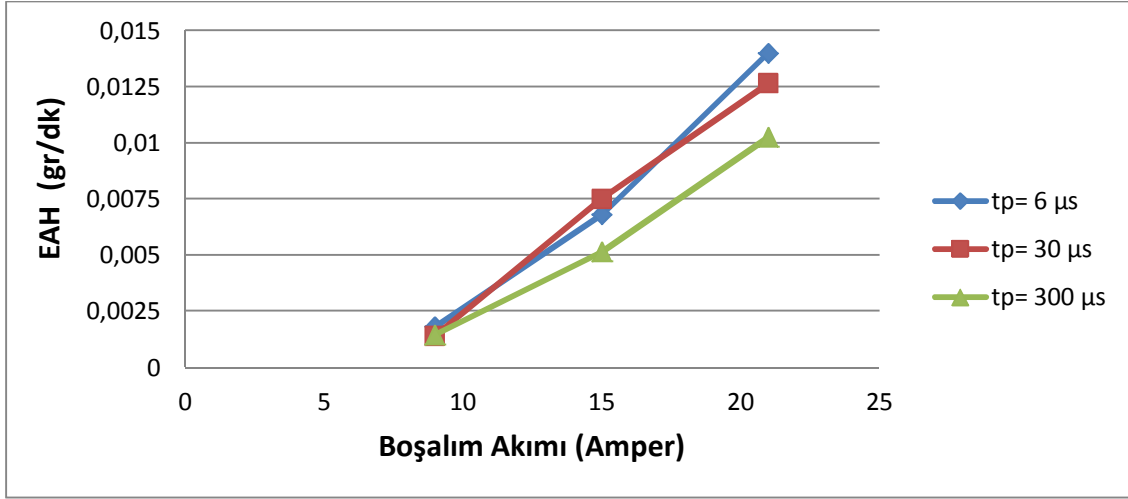
Şekil 4.2.9 Farklı çaptaki elektrotlar için boşalım akımının EAH'na etkisi (vurum bekleme süresi 300 μ s, vurum süresi 45 μ s)



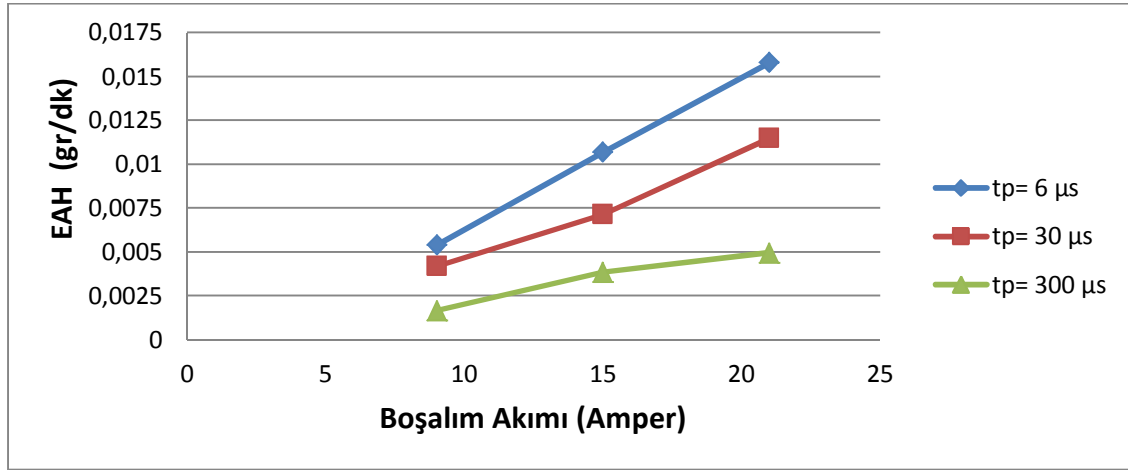
Şekil 4.2.10 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (20 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 μ s)



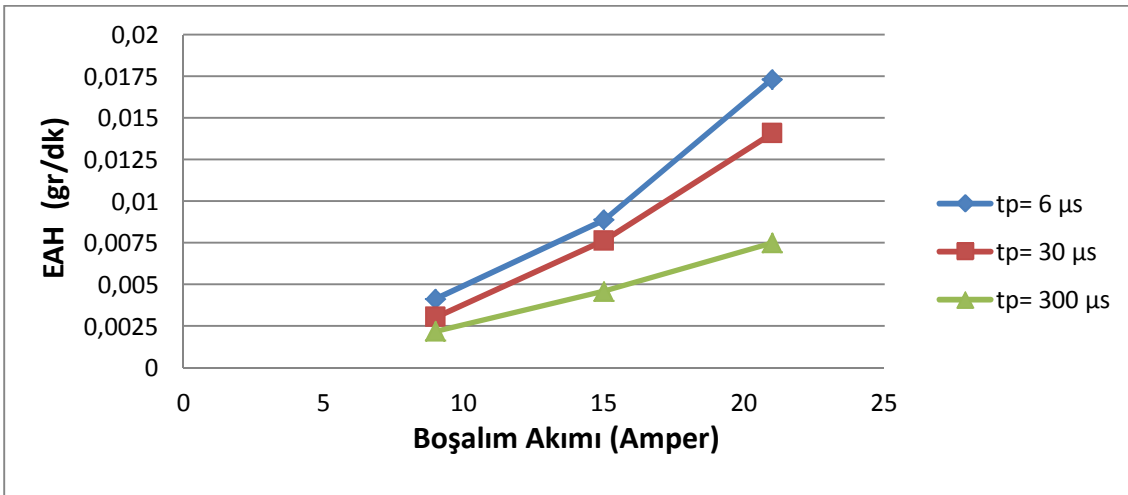
Şekil 4.2.11 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (20 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 μ s)



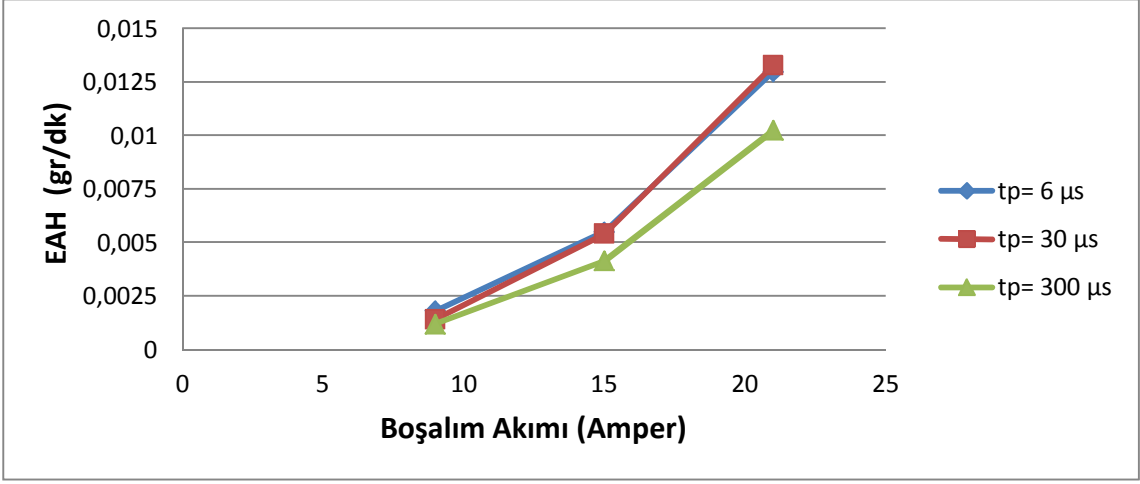
Şekil 4.2.12 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (20 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 µs)



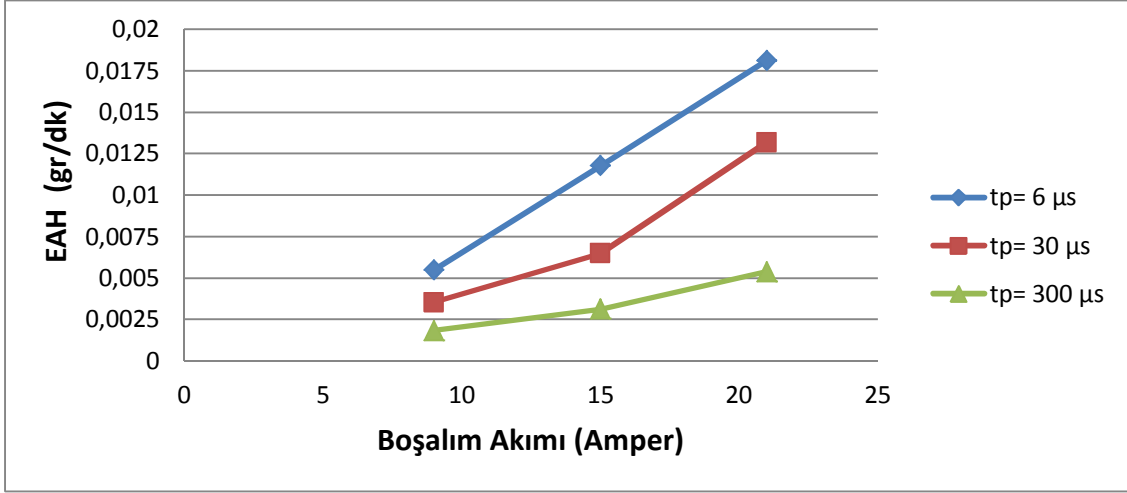
Şekil 4.2.13 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (16 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 µs)



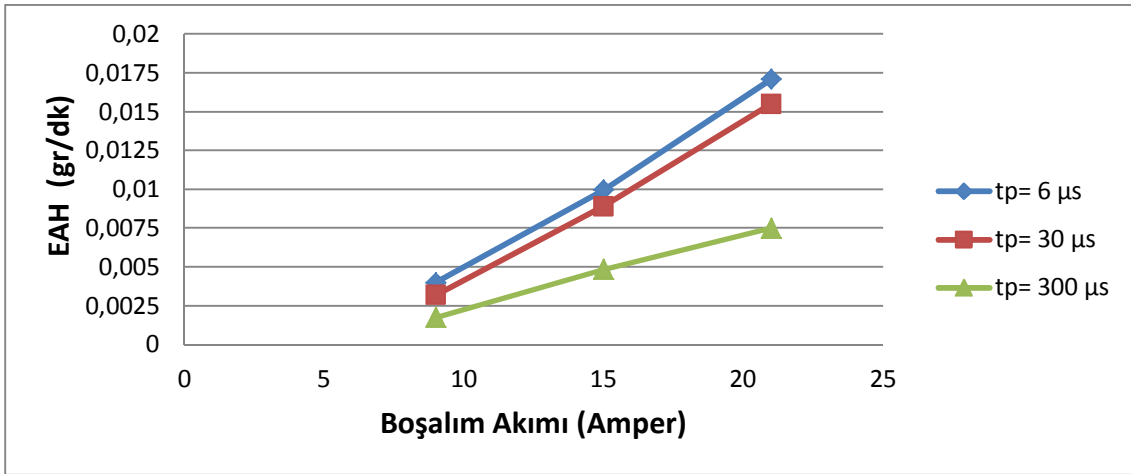
Şekil 4.2.14 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (16 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 µs)



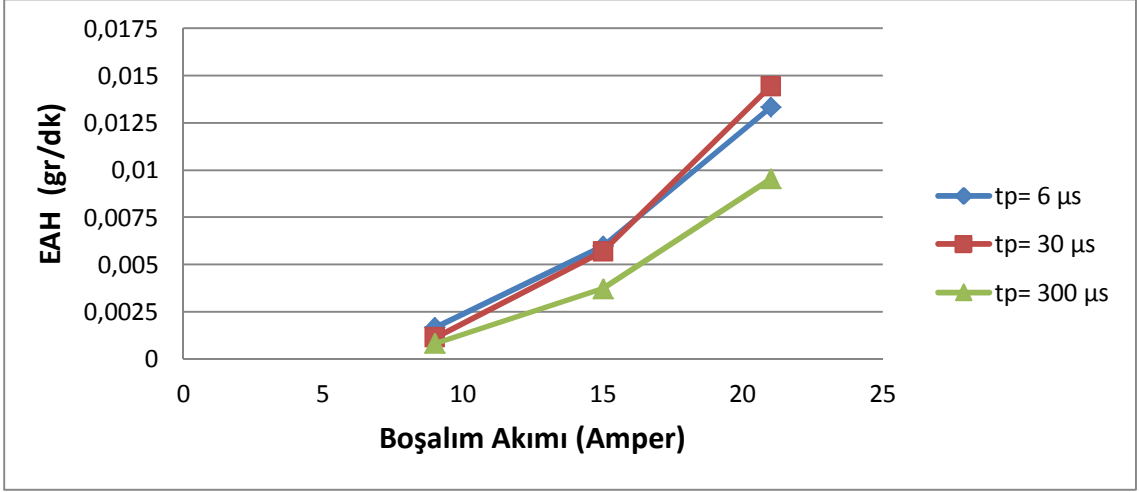
Şekil 4.2.15 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (16 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 µs)



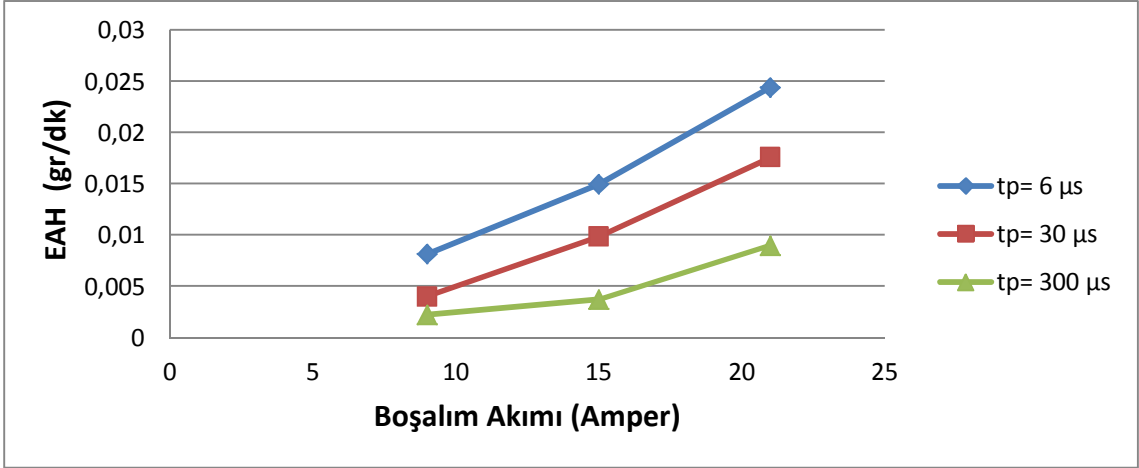
Şekil 4.2.16 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (12 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 µs)



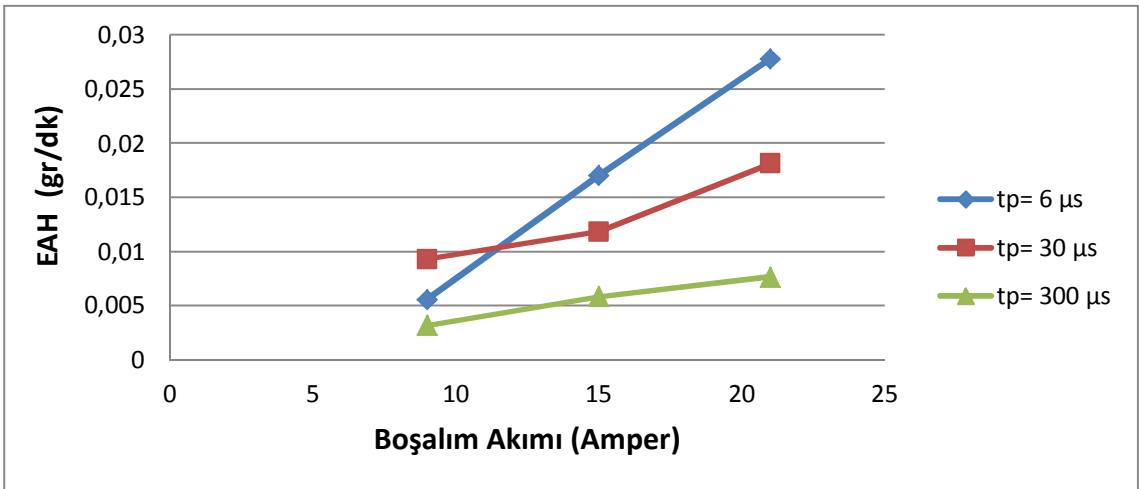
Şekil 4.2.17 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (12 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 µs)



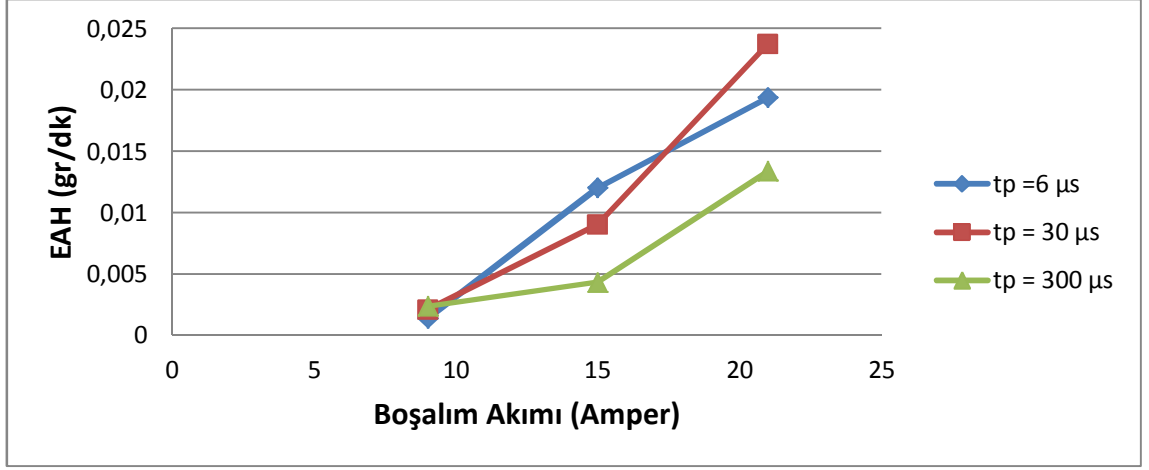
Şekil 4.2.18 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (12 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 μs)



Şekil 4.2.19 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (8 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 μs)



Şekil 4.2.20 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (8 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 μs)



Şekil 4.2.21 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi (8 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 μs)

Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı arttıkça elektrot aşınma hızının boşalım akımıyla beraber arttığı, vurum bekleme süresinin artmasıyla elektrot aşınma hızının kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir. Elektrot aşınma hızı için vurum süresinin etkisinin az olduğu ve işleme şartlarına göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür

EEİ'de akımdaki artış boşalım enerjisini arttıracığından (Eşitlik 2.4) elektrot yüzeyinde oluşacak kraterden daha fazla malzemenin ergimesine ve buharlaşmasına neden olur. Bu da artan boşalım akımıyla beraber EAH'nın artmasına yol açar. Vurum bekleme süresi arttıkça etkin işleme zamanının azalmasından dolayı elektrot aşınma miktarı vurum bekleme süresiyle birlikte azalma göstermiştir.

Farklı vurum süreleri ve boşalım akımlarında yapılan deneylerde vurum süresinin elektrot aşınma hızına etkisi işleme şartlarına göre farklılıklar göstermiştir. Farklı çapa sahip (8, 12, 16 ve 20 mm) tüm elektrotlar için boşalım akımının 9 A olduğu deney şartlarında, tüm vurum bekleme sürelerinde (6, 30, 300 μs) vurum süresi arttıkça elektrot aşınma hızı vurum süresiyle birlikte azalma göstermiştir.

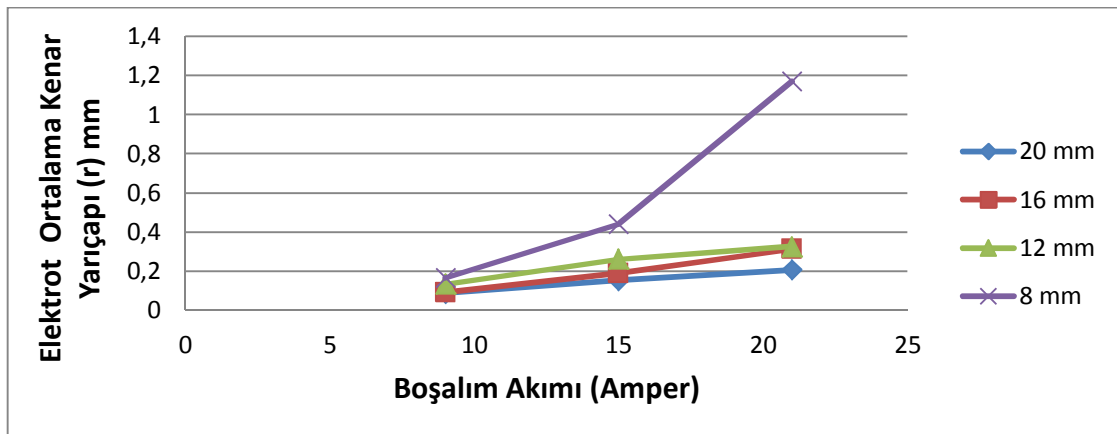
Boşalım akımının 15 A olduğu deney grubu için, vurum bekleme süresinin 6 μs ve 30 μs'lik değerlerinde vurum süresinin artması elektrot aşınma miktarının azalmasına yol açarken, vurum bekleme süresinin 300 μs' ye çıkması elektrot aşınma miktarının artmasına neden olduğu görülmüştür.

Boşalım akımının 21 A olduğu deney grubu için, vurum bekleme süresinin 6 μ s'lik değerlerinde, vurum süresinin artmasıyla elektrot aşınma miktarı azalırken, vurum bekleme süresinin 30 μ s ve 300 μ s'lik değerleri için vurum süresinin artması elektrot aşınma miktarının artmasına neden olduğu görülmüştür. Vurum süresinin artmasıyla elektrot aşınma miktarının azalmasının başlıca nedenleri;

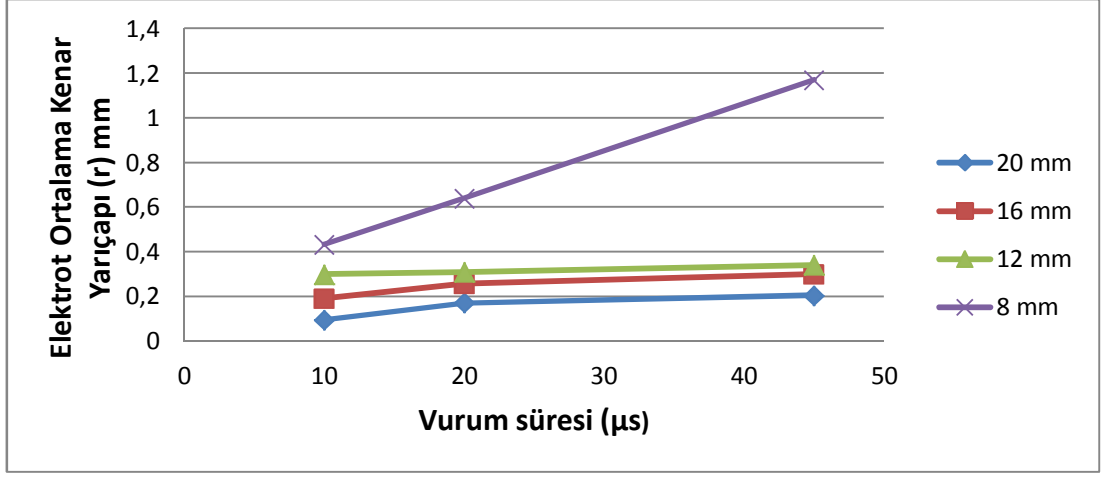
Artan vurum süresi nedeniyle plazma kanalının genişlemesi ve bunun sonucunda boşalım noktalarında enerji yoğunluğunun azalması. Ayrıca vurum süresinin artmasıyla ergimiş kraterden takım (elektrot) gövdesine ısı transferi için daha fazla zamanın olması nedeniyle kraterden daha az malzeme kaldırmanın gerçekleşmesi. Son yapılan çalışmalarda karbonun hidrokarbon esaslı dielektrik sıvılardan ve karbon çeliğinden oluşan ergiyik metalden ayrılarak elektrot yüzeyine bağlandıkları belirtilmiştir, bunun sonucunda da elektrot aşınma direncinde artış olduğu görülmüştür [24].

4.3 İşleme Parametrelerinin Elektrot Kenar Aşınması Üzerine Etkisi

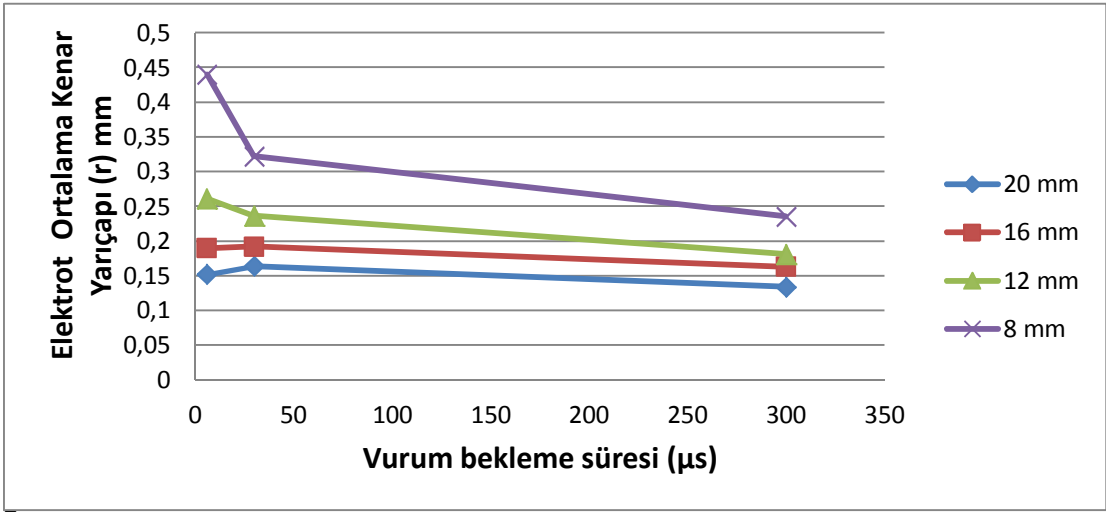
Farklı çaplarda (8, 12, 16 ve 20 mm) silindirik formda bakır elektrotlar ve farklı işlem parametreleriyle gerçekleştirilen deneylerde, elektroerozyon işlem parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresi) kenar aşınması üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elektrot kenar yarıçapları, kenar aşınmalarının göstergesi olarak alınmış ve bu değer bulunurken elektrot kenarlarından 0,01 μ m hassasiyete sahip profil projeksiyon cihazıyla 4 farklı noktadan (90'ar derece arayla) 50'şer ölçüm alınmıştır, daha sonra bu 4 ölçümün aritmetik ortalaması alınarak her elektrot için kenar aşınma sonucu oluşan ortalama kenar yarıçap değerleri bulunmuştur.



Şekil 4.3.1 Boşalım akımının elektrot ortalama kenar yarıçapına etkisi (vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s)



Şekil 4.3.2 Vurum süresinin elektrot ortalama kenar yarıçapına etkisi (boşalım akımı 21 A, vurum bekleme süresi 6 μs)

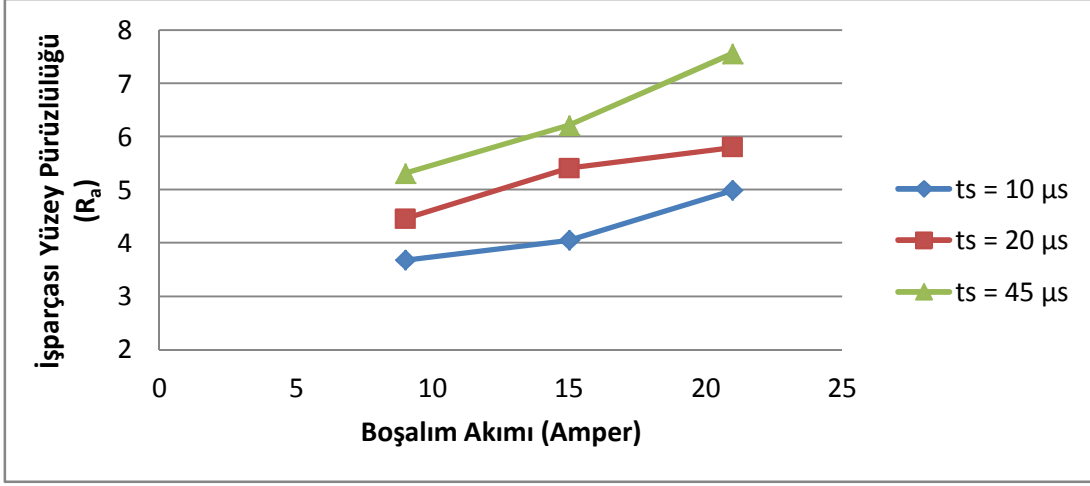


Şekil 4.3.3 Vurum bekleme süresinin elektrot ortalama kenar yarıçapına etkisi (boşalım akımı 15 A, vurum süresi 45 μs)

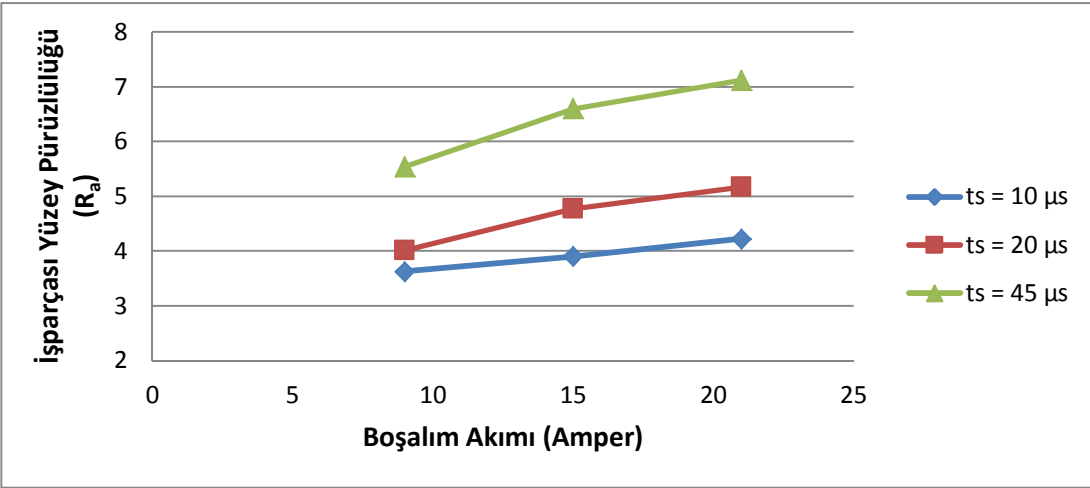
Yapılan deneysel çalışmalarda elektrot ortalama kenar yarıçapı değerinin boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla birlikte arttığı, vurum bekleme süresinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Deneylerde elektrot kenar yarıçap değerlerinin elektrot çapı arttıkça (8 mm' den 20 mm'ye doğru) küçüldüğü görülmüştür.

4.4 İşleme Parametrelerinin İşparçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

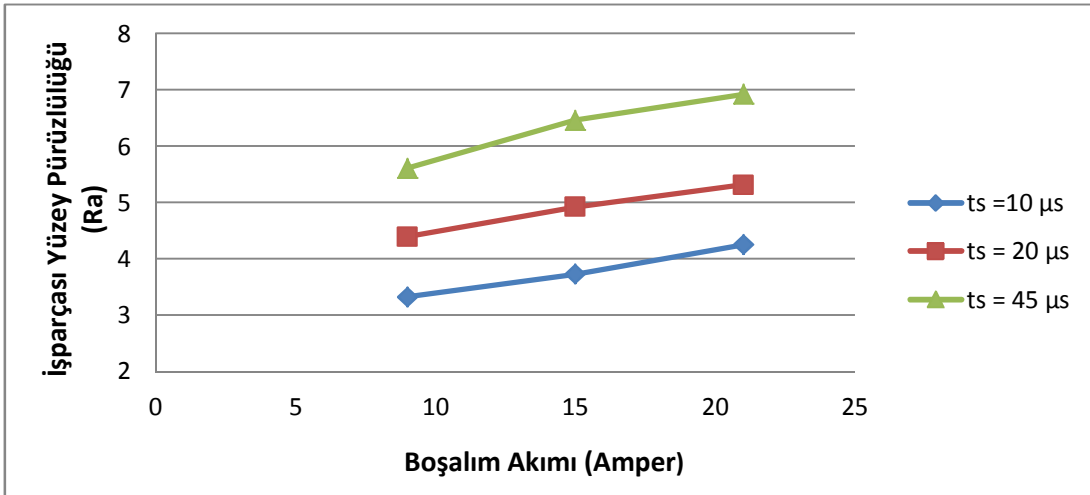
Elektroerozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir. Elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 4.4.1- 4.2.24).



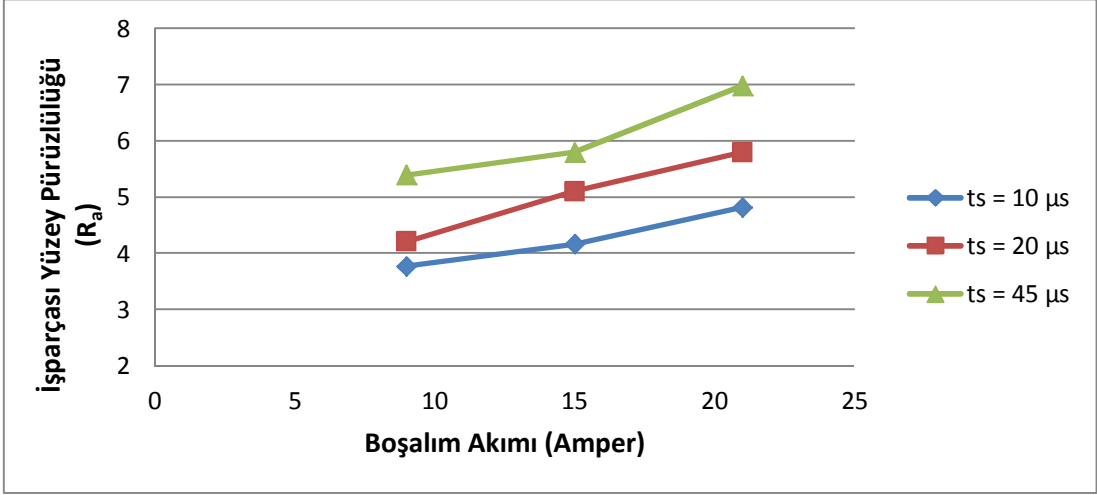
Şekil 4.4.1 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 µs)



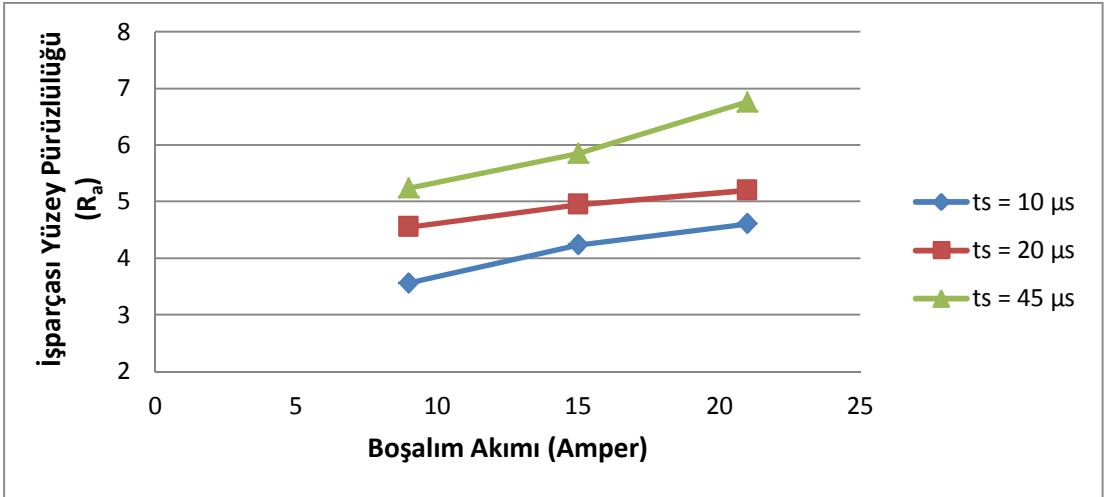
Şekil 4.4.2 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 µs)



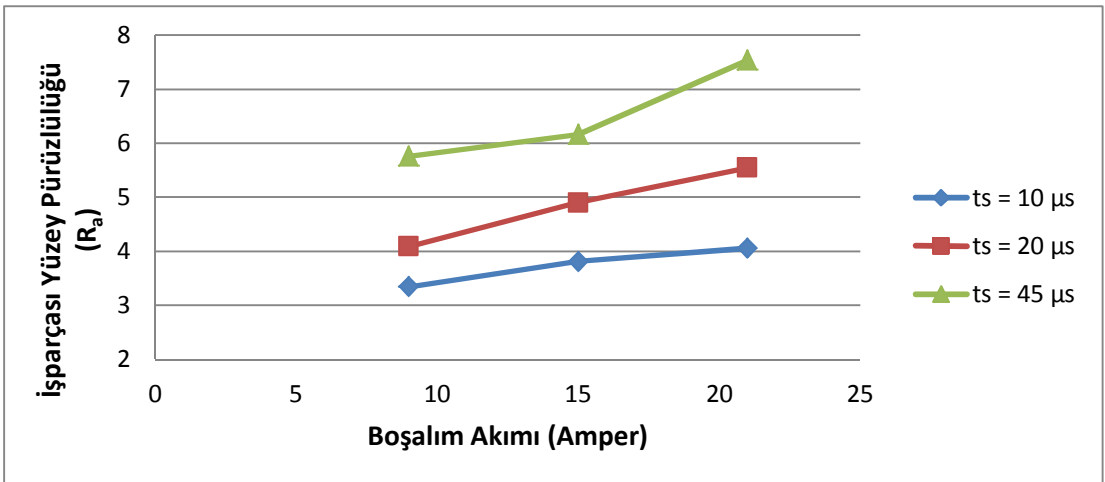
Şekil 4.4.3 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 µs)



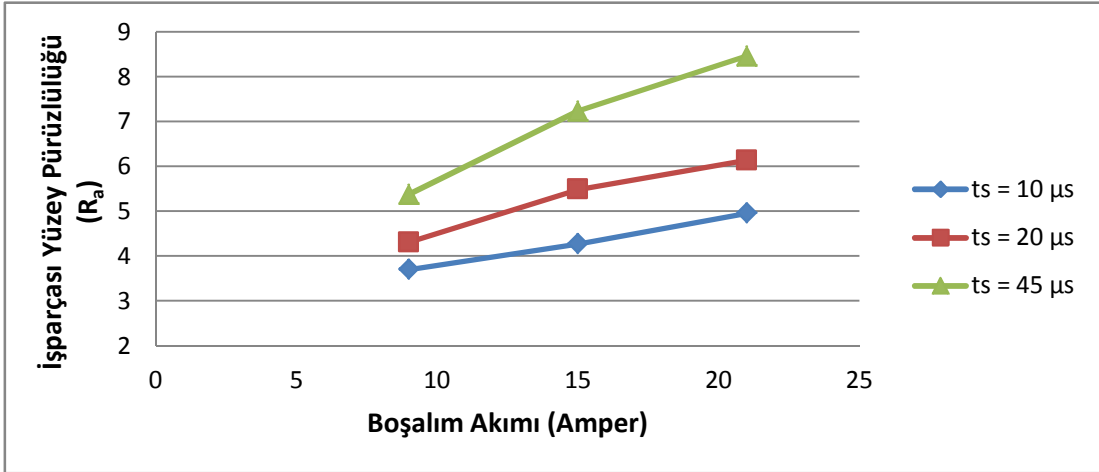
Şekil 4.4.4 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 µs)



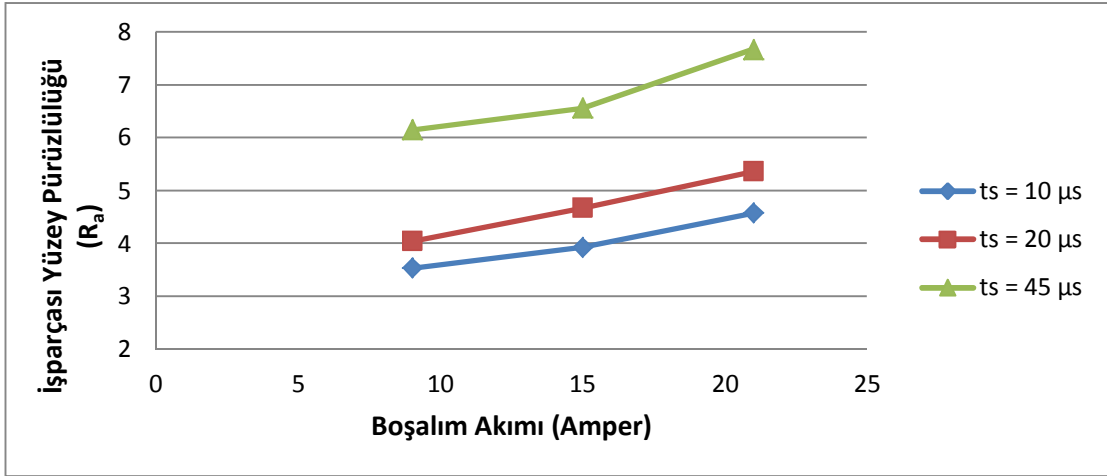
Şekil 4.4.5 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 µs)



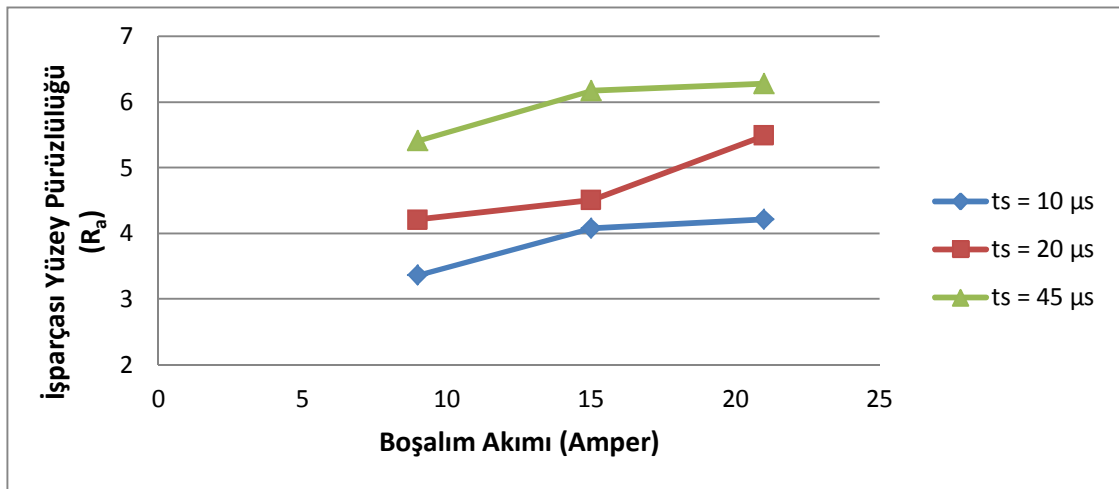
Şekil 4.4.6 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 µs)



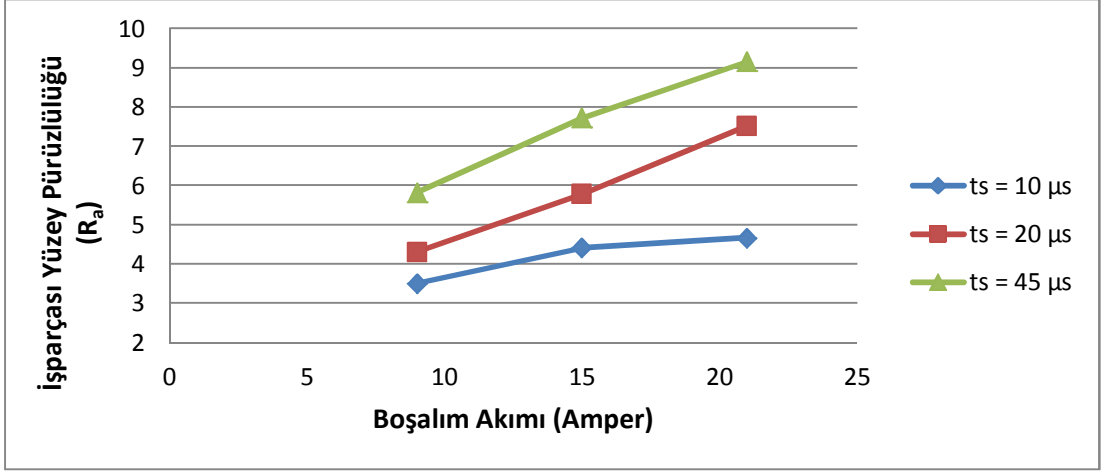
Şekil 4.4.7 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μs)



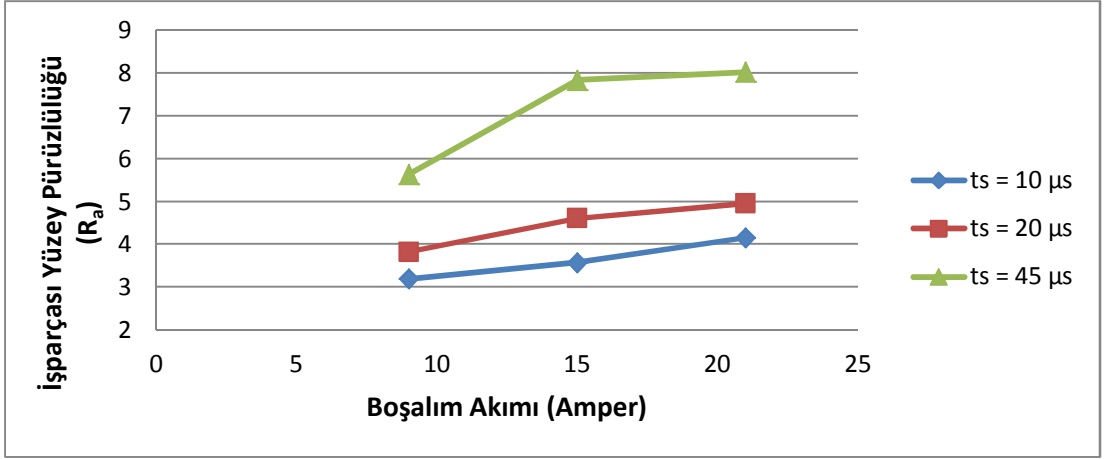
Şekil 4.4.8 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μs)



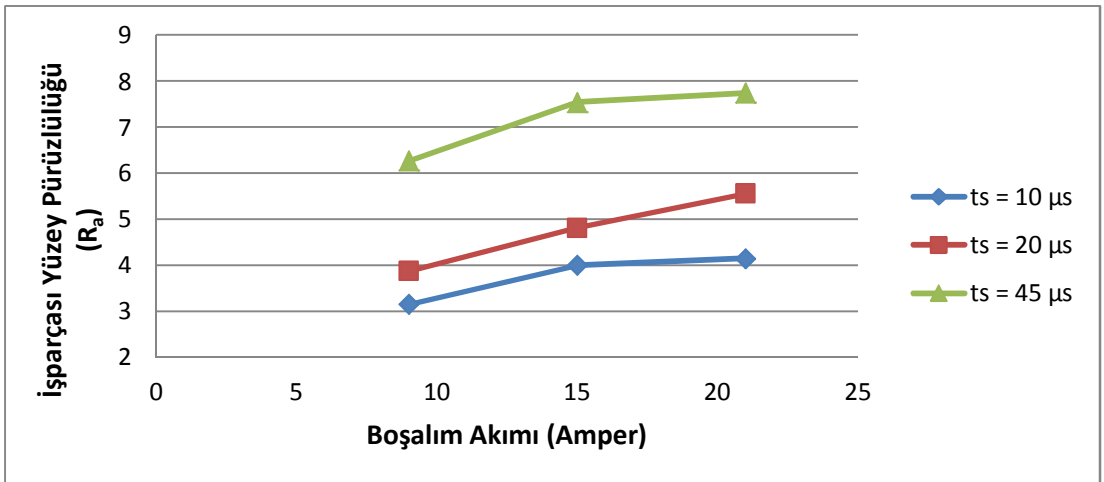
Şekil 4.4.9 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μs)



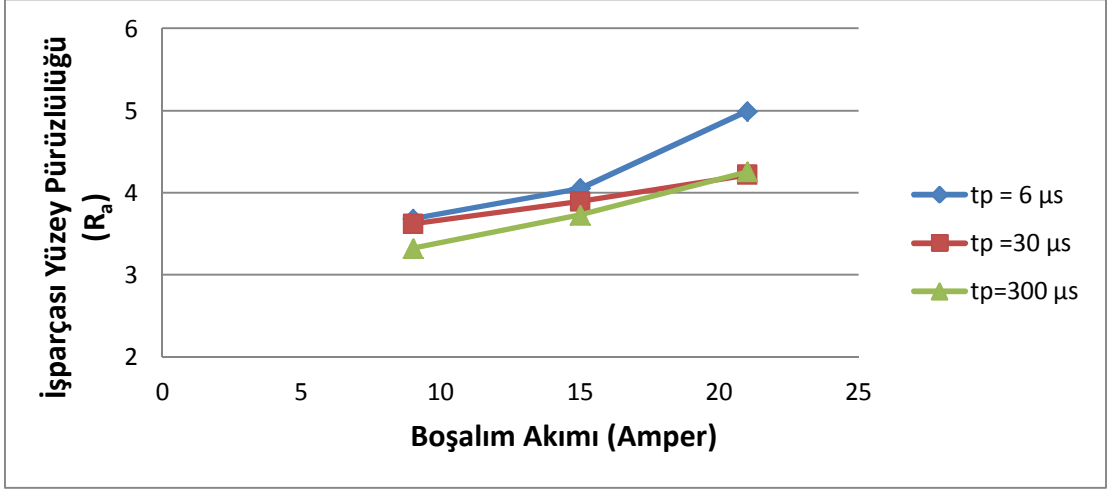
Şekil 4.4.10 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 μs)



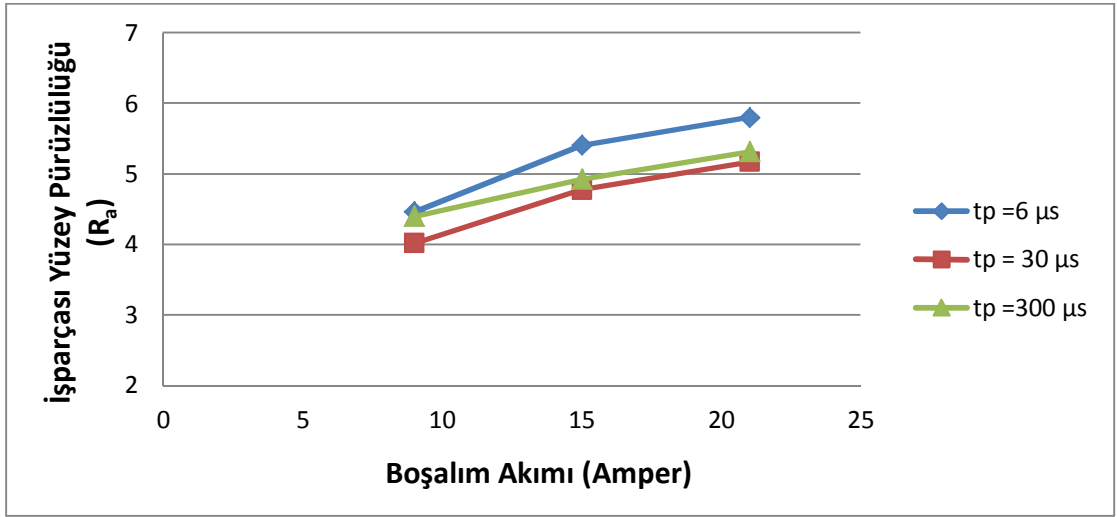
Şekil 4.4.11 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 μs)



Şekil 4.4.12 Boşalım akımı ve vurum süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 μs)



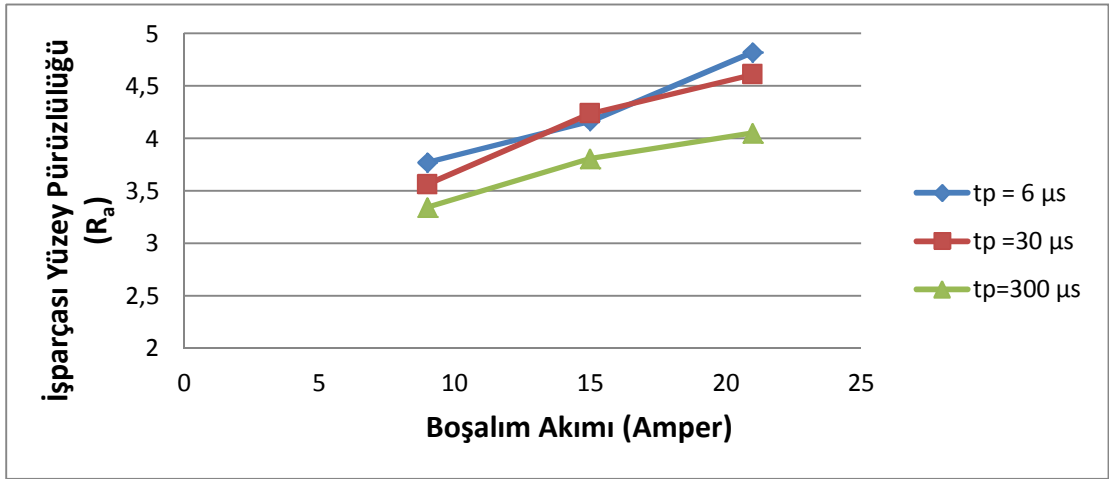
Şekil 4.4.13 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum süresi 10 µs)



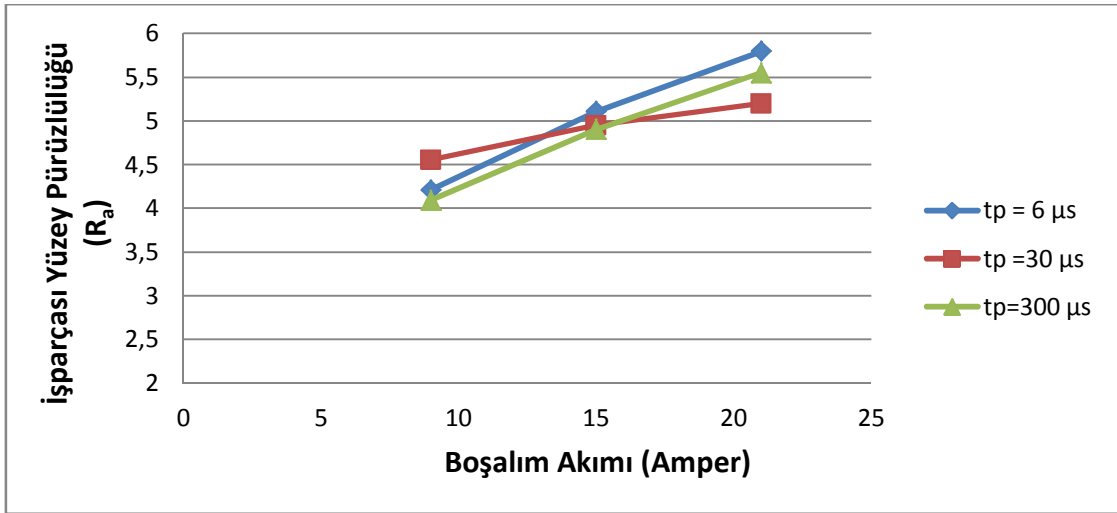
Şekil 4.4.14 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum süresi 20 µs)



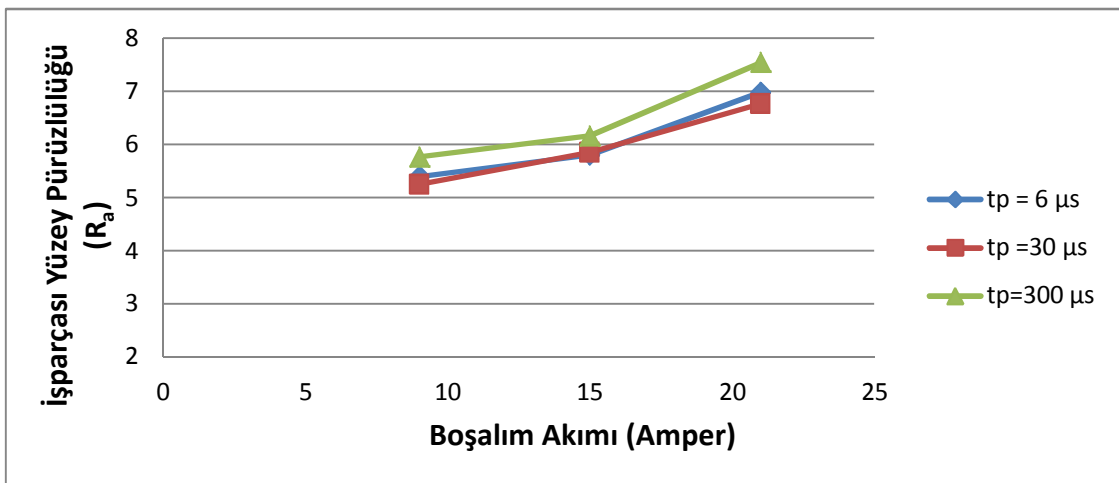
Şekil 4.4.15 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum süresi 45 µs)



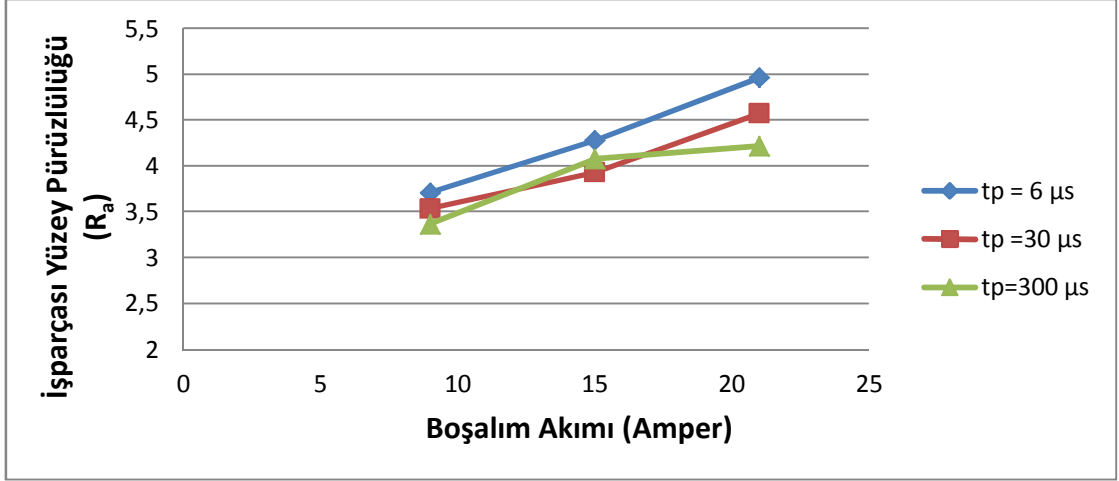
Şekil 4.4.16 Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş süresi 10 µs)



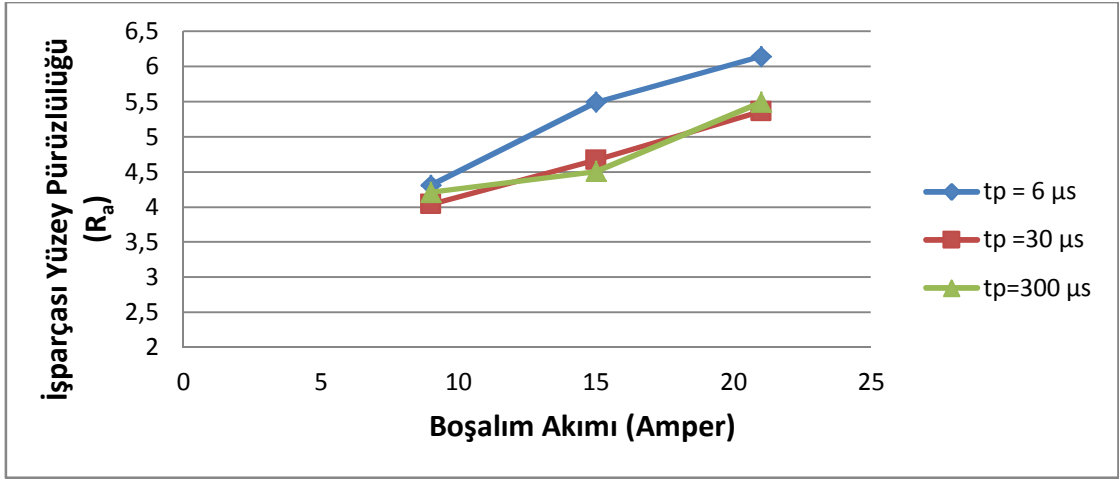
Şekil 4.4.17 Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş süresi 20 µs)



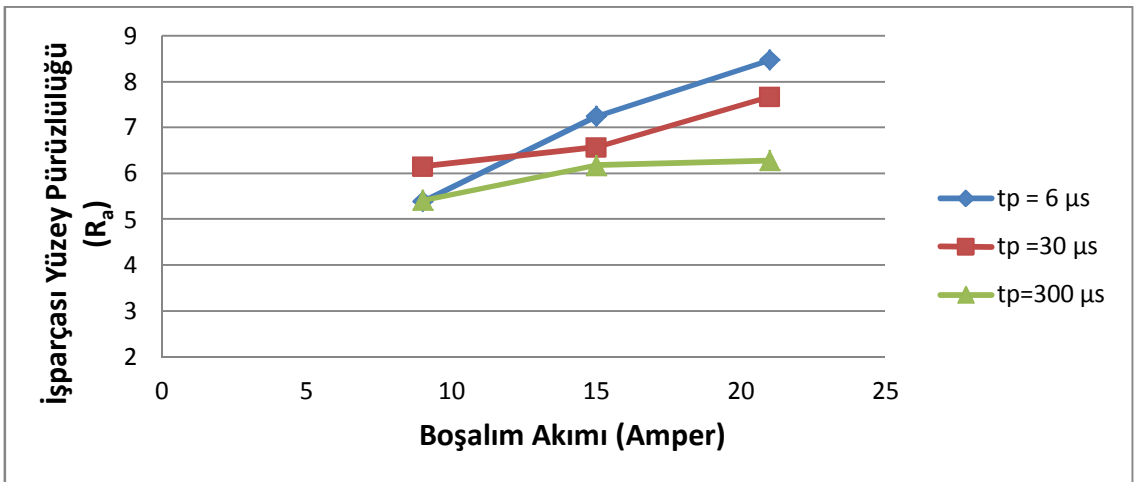
Şekil 4.4.18 Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş süresi 45 µs)



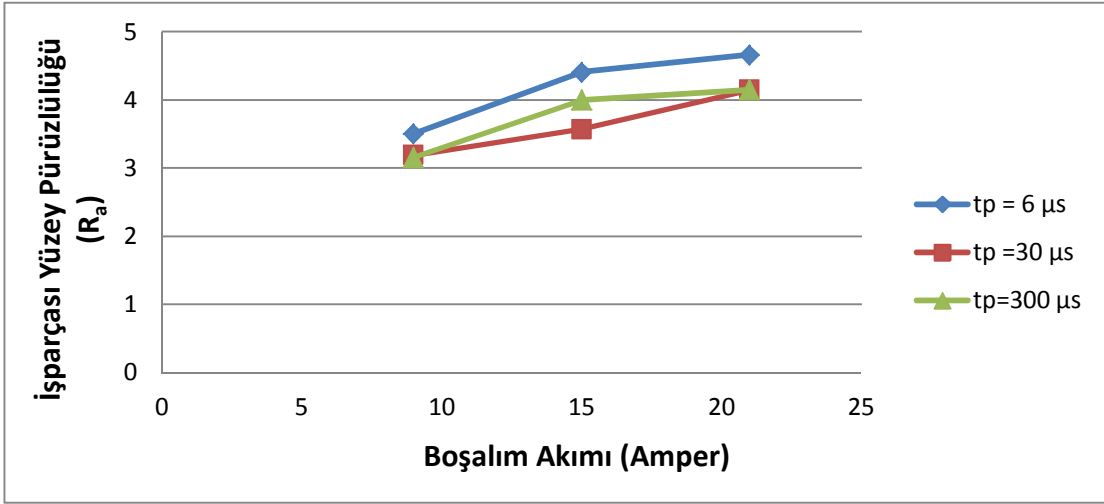
Şekil 4.4.19 Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş süresi 10 µs)



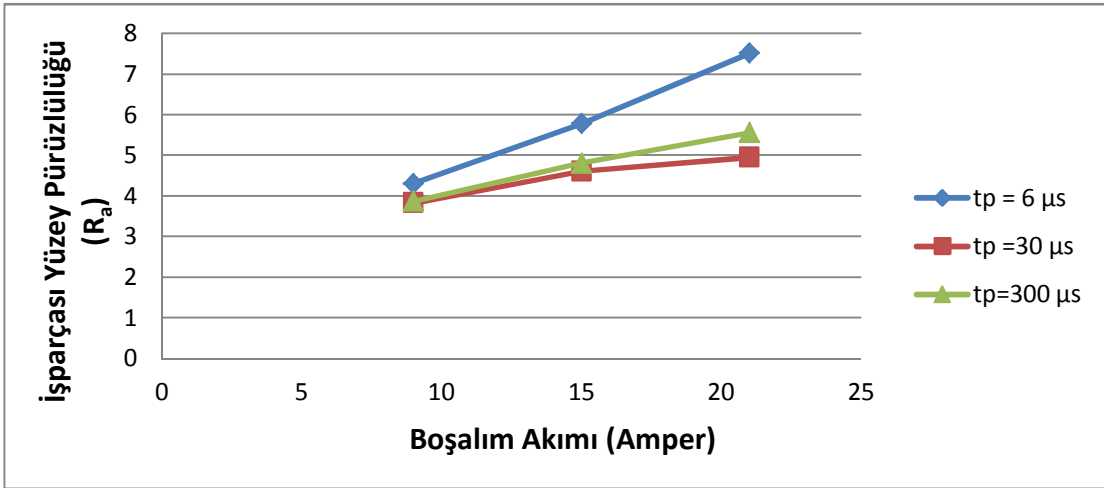
Şekil 4.4.20 Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş süresi 20 µs)



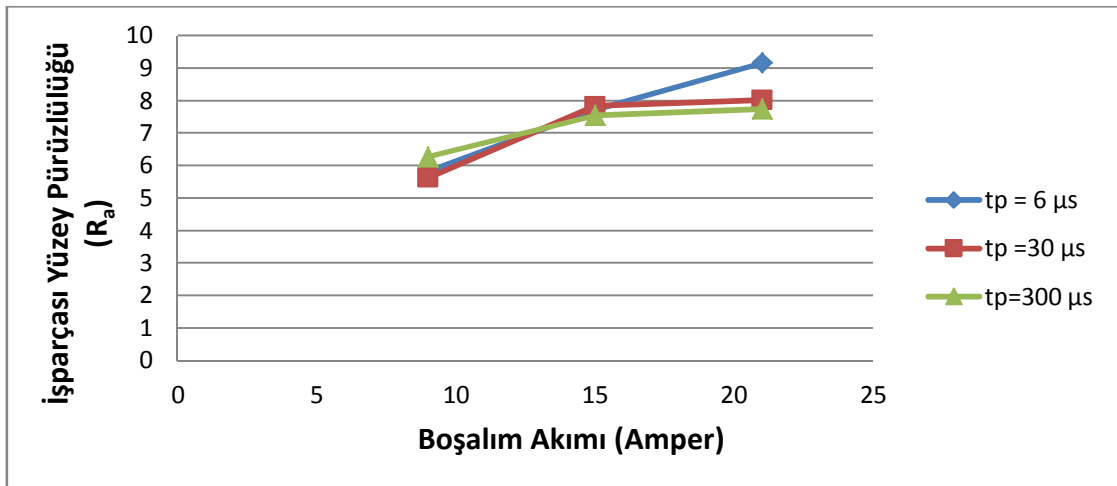
Şekil 4.4.21 Boşalım akımı ve vuruş bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vuruş süresi 45 µs)



Şekil 4.4.22 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum süresi 10 µs)



Şekil 4.4.23 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum süresi 20 µs)



Şekil 4.4.24 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum süresi 45 µs)

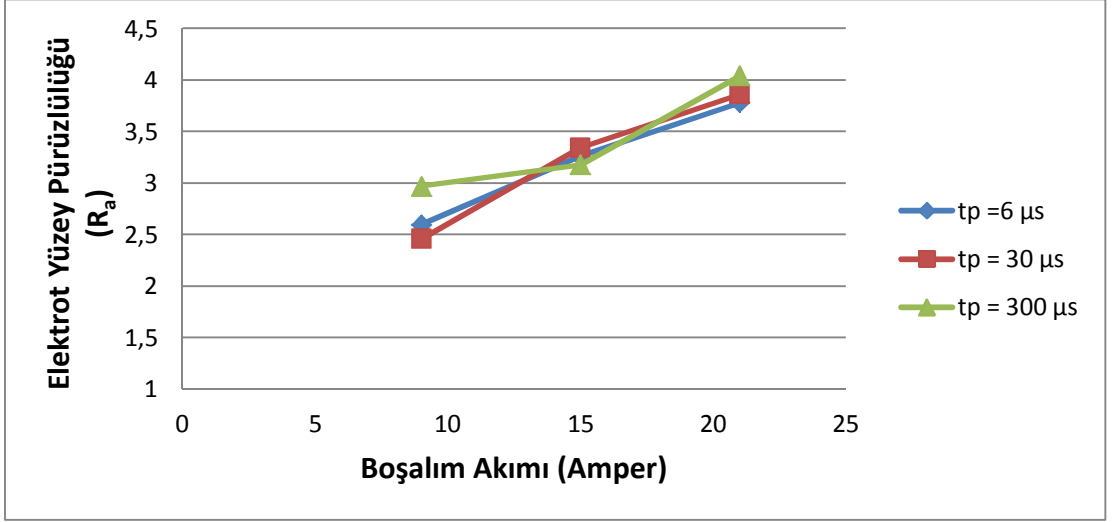
Elektroerozyonla işleme sırasında işlenmiş yüzeylerde ergime, buharlaşma ve dielektrik sıvının patlaması sonucu oluşan tepkisel kuvvetten dolayı çeşitli boyutlarda boşalım kraterleri (yüzey pürüzlülüğü) oluşmaktadır bu nedenle dalma erozyon ile işlenmiş yüzeyin topografyası düzensiz haldedir [15].

Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı ve vurum süresi arttıkça işparçası yüzey pürüzlülük değerinin arttığı gözlenmiştir. Bu olgunun nedeni ise boşalım enerjisinin boşalım akımı ve vurum süresiyle orantılı olmasıdır. Yüksek boşalım enerjisi, yüksek boşalım akımı ve yüksek vurum süresiyle ilişkilidir (Eşitlik 2.4). Boşalım akımı ve vurum süresi yüksek olduğu zaman kıvılcım yoğunluğu (enerji yoğunluğu) ve boşalım gücü daha fazla olur bu da işparçası yüzeyinde daha derin ve geniş krater oluşumuna neden olacak miktarda malzeme kaldırılmasını sağlayarak işparçasının yüzeyinin daha pürüzlü bir hal almasına neden olur.

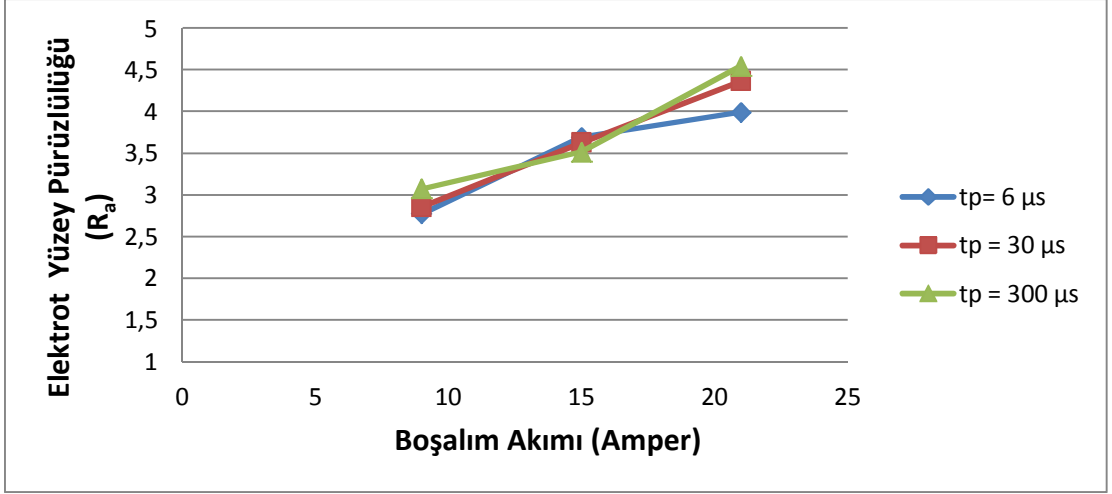
Ayrıca yapılan deneysel çalışma sonucunda vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülük değerine etkisinin çok az olduğu görülmüştür.

4.5 İşleme Parametrelerinin Elektrot Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

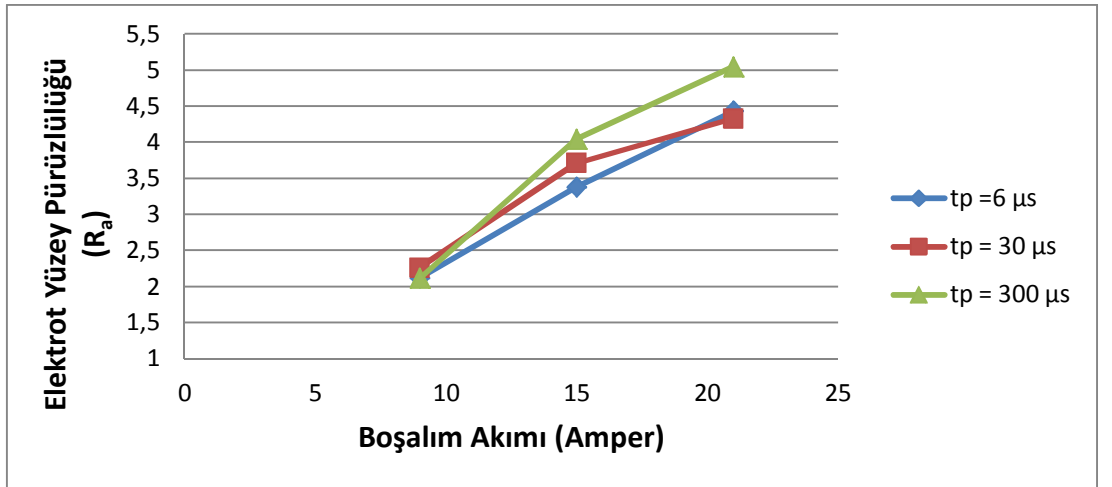
Elektroerozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir. Elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 4.5.1- 4.5.21).



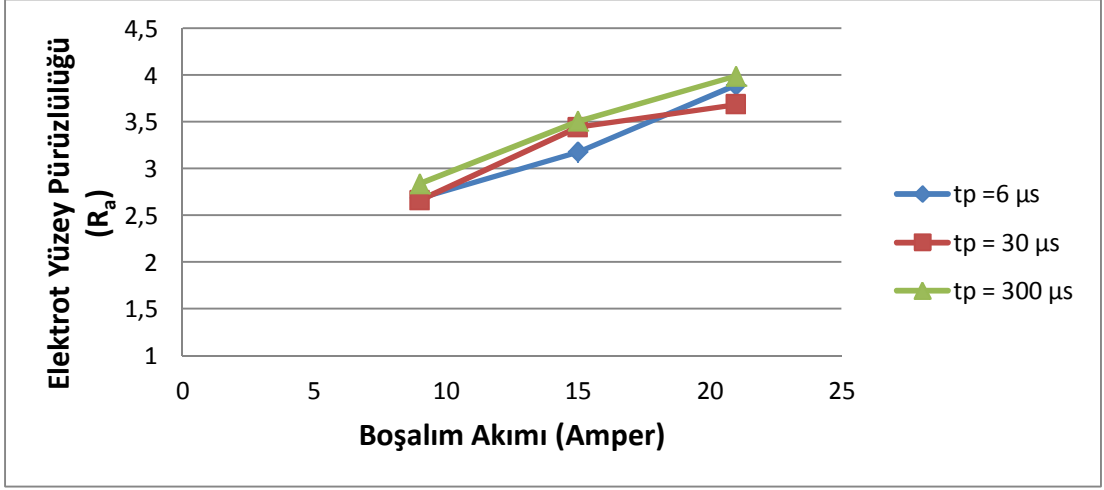
Şekil 4.5.1 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 µs)



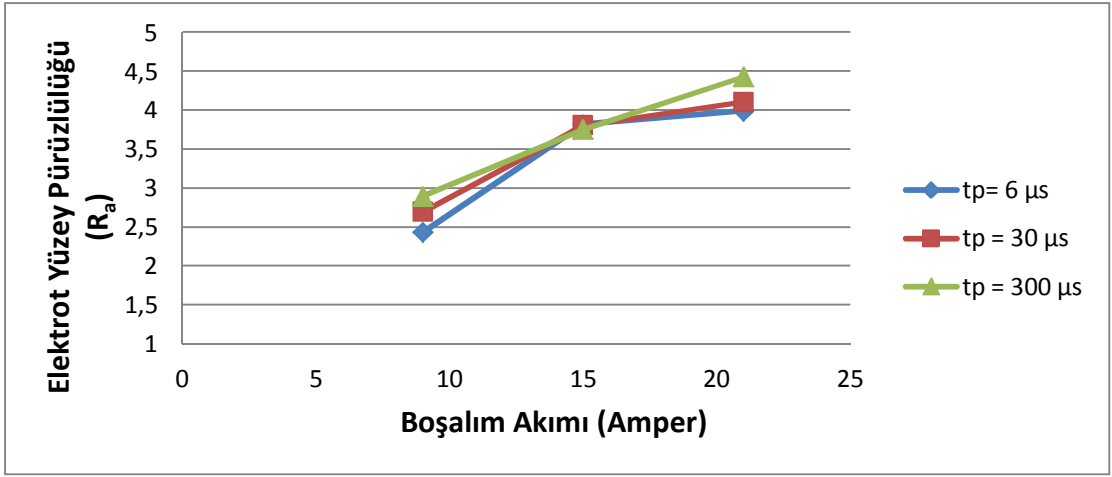
Şekil 4.5.2 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 µs)



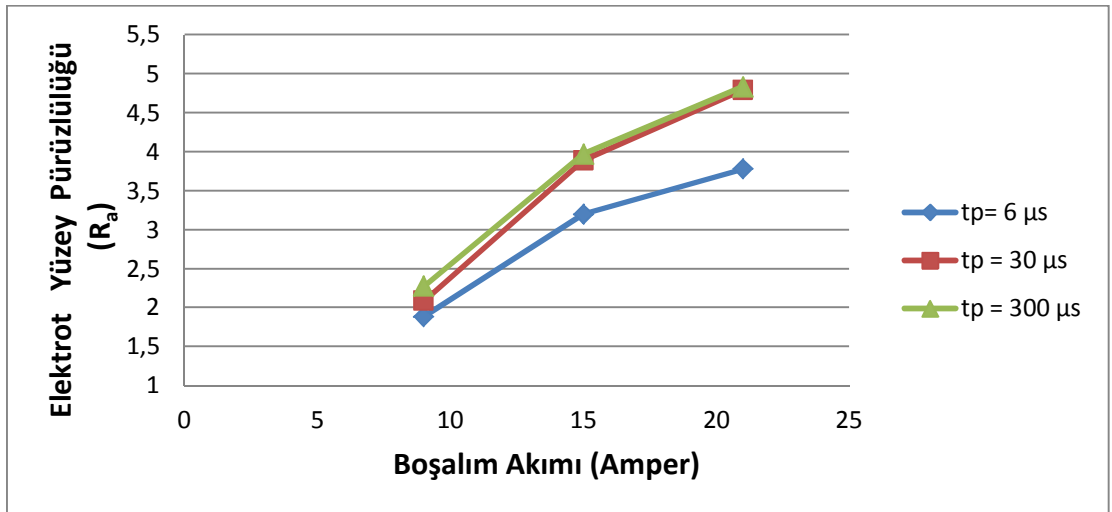
Şekil 4.5.3 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 µs)



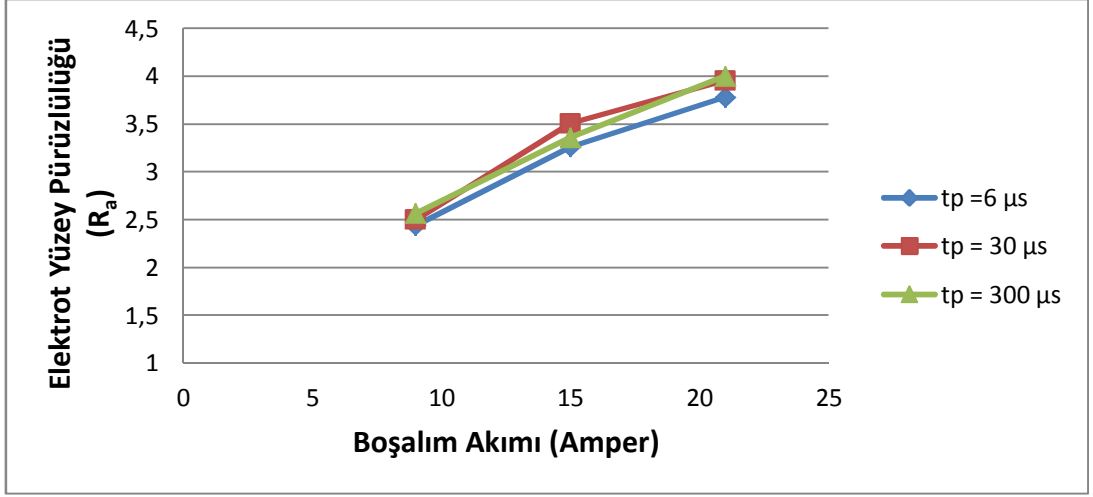
Şekil 4.5.4 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 μs)



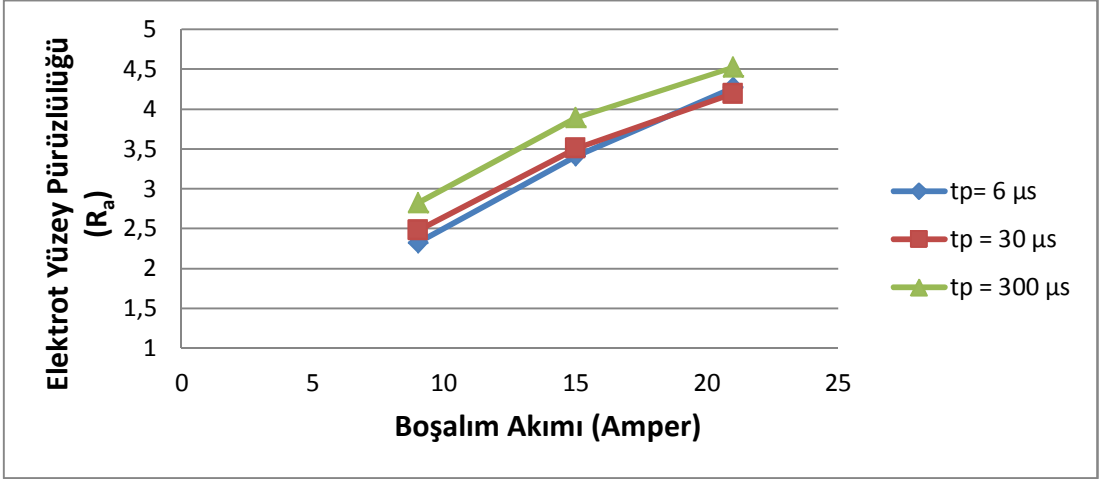
Şekil 4.5.5 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 μs)



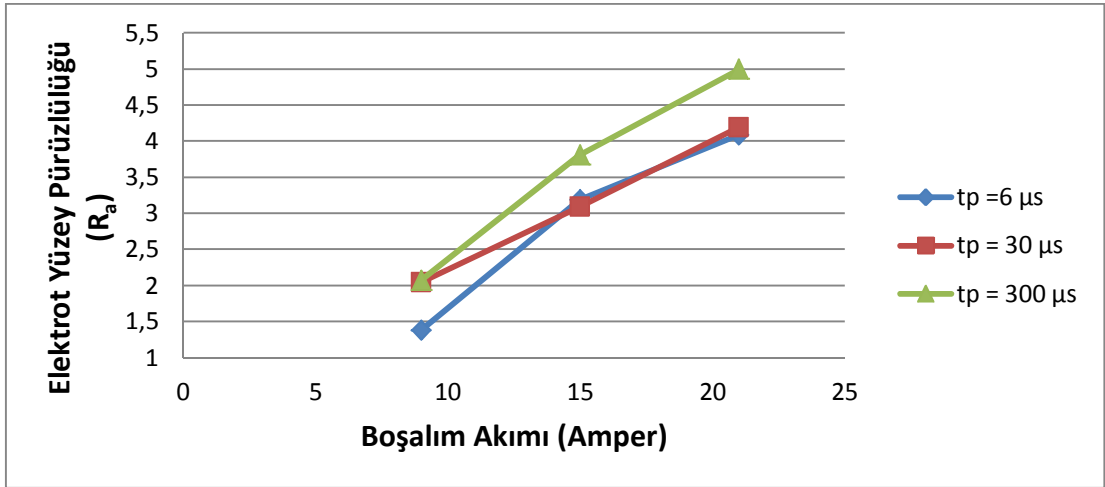
Şekil 4.5.6 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 μs)



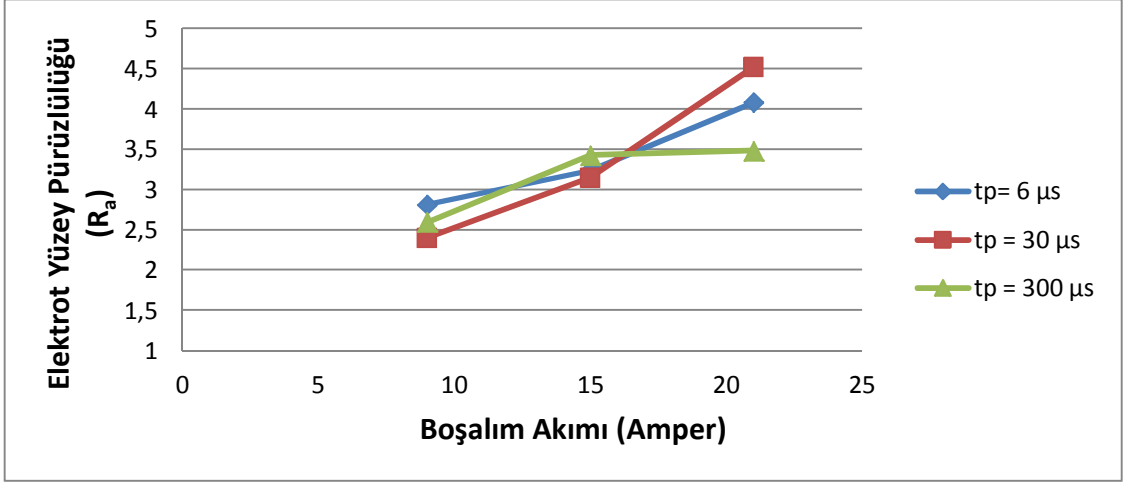
Şekil 4.5.7 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 µs)



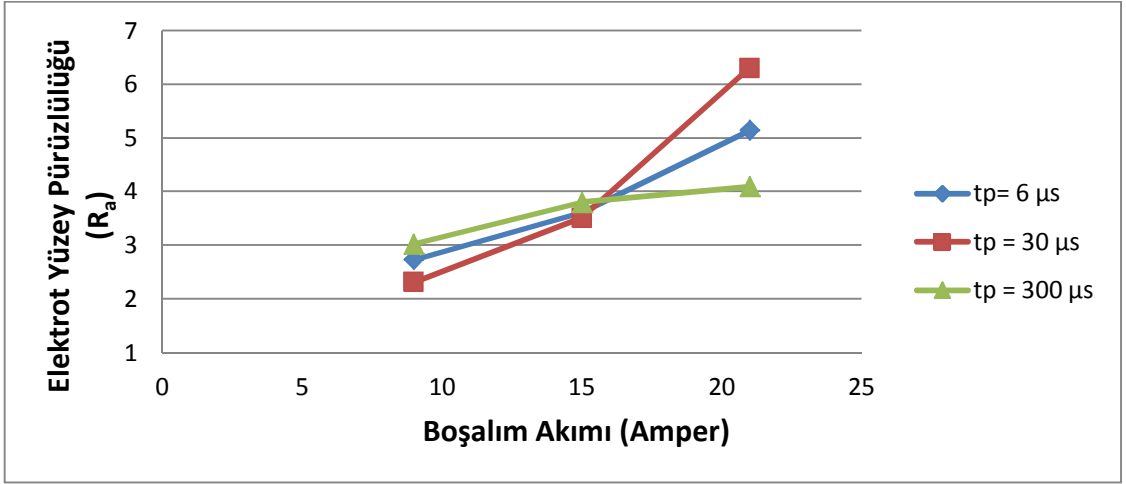
Şekil 4.5.8 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 µs)



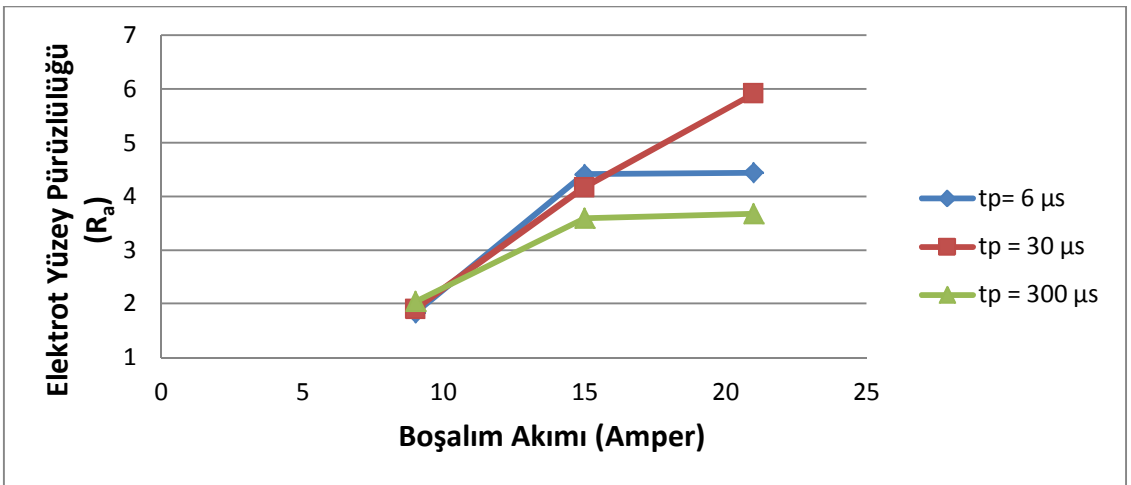
Şekil 4.5.9 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 µs)



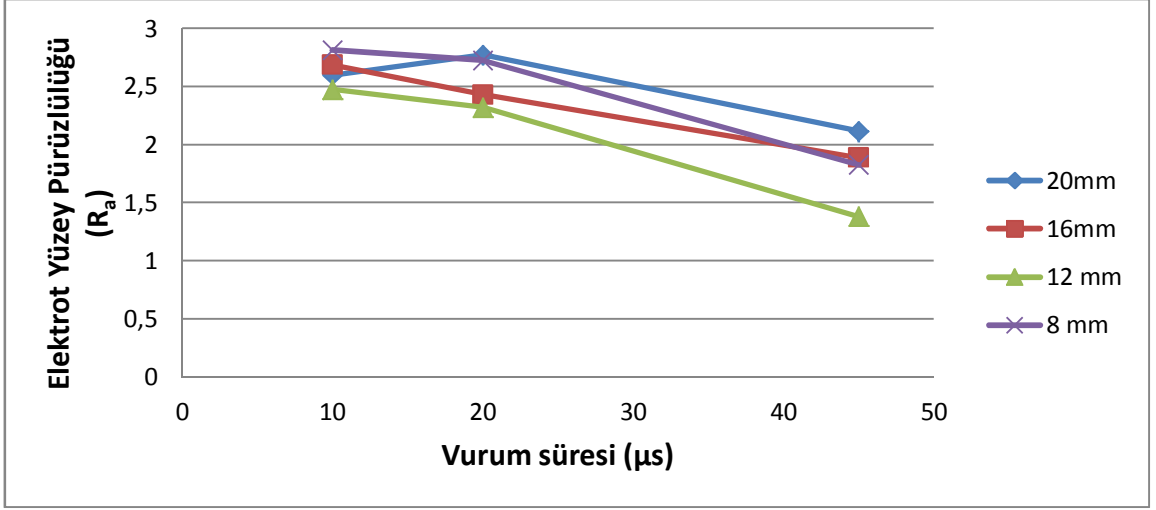
Şekil 4.5.10 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektrot, vurum süresi 10 µs)



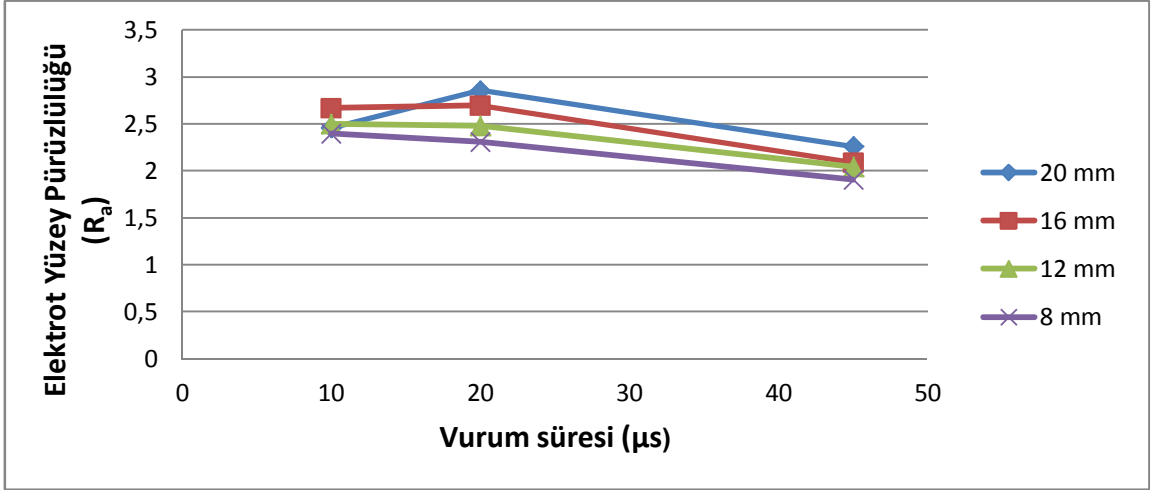
Şekil 4.5.11 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektrot, vurum süresi 20 µs)



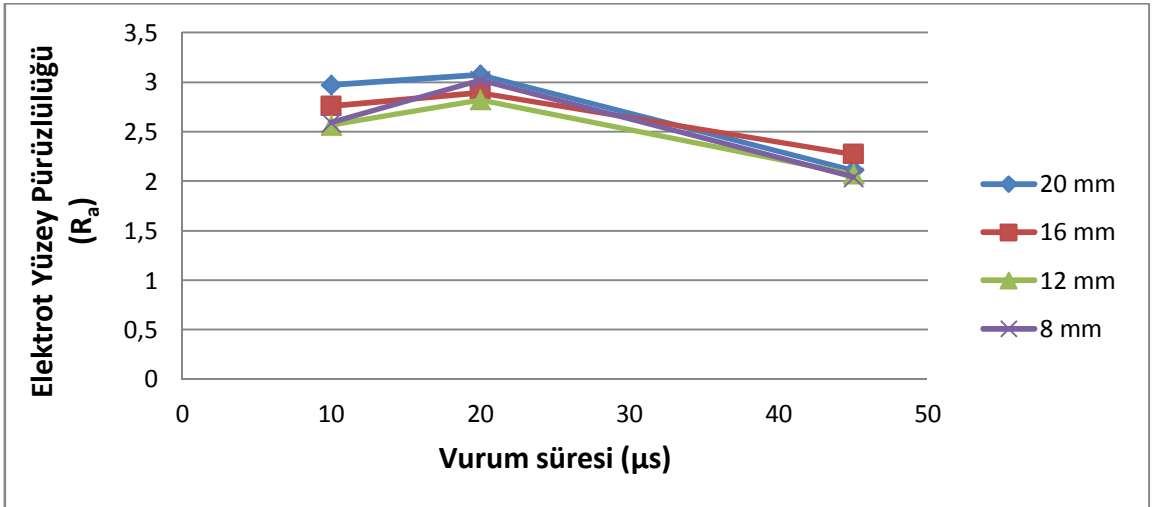
Şekil 4.5.12 Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektrot, vurum süresi 45 µs)



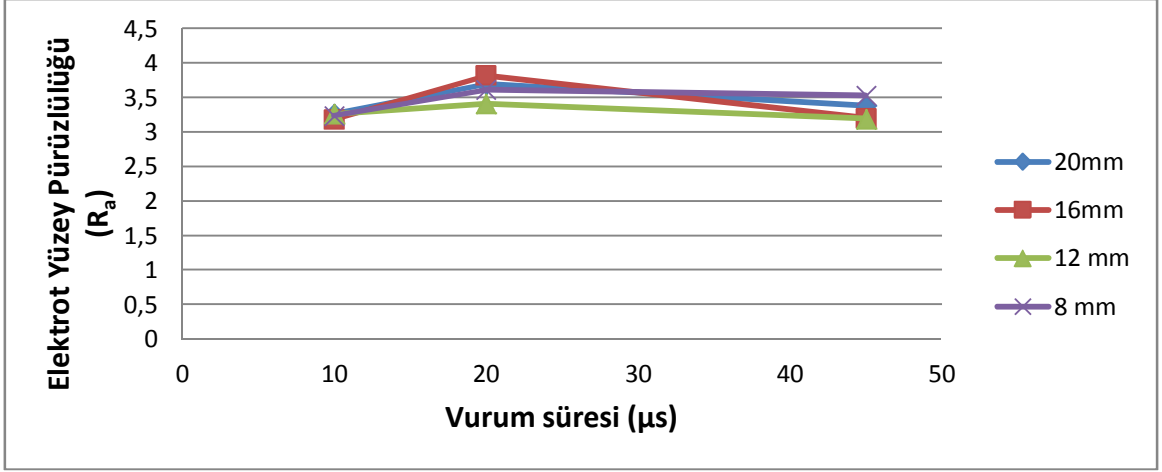
Şekil 4.5.13 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 9 A vurum bekleme süresi 6 μs)



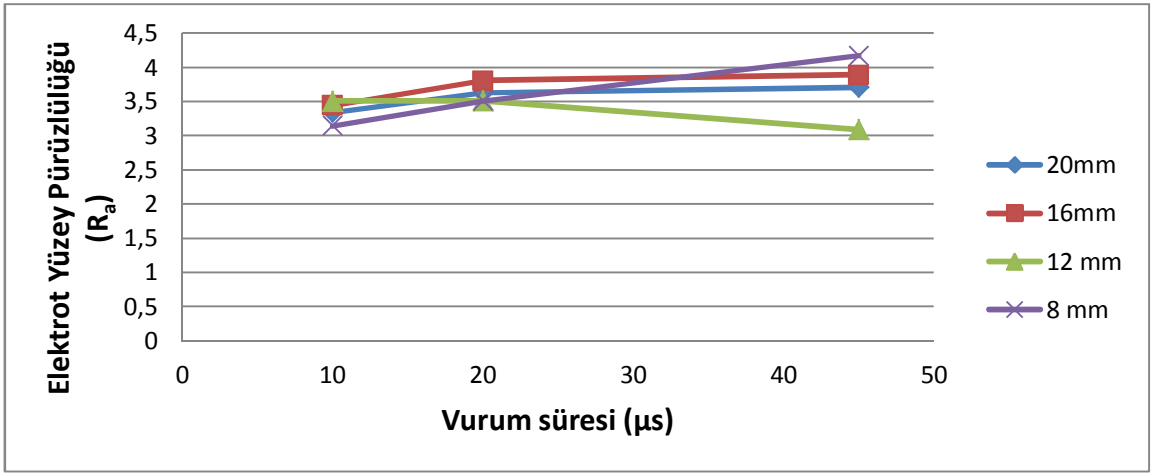
Şekil 4.5.14 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 9 A, vurum bekleme süresi 30 μs)



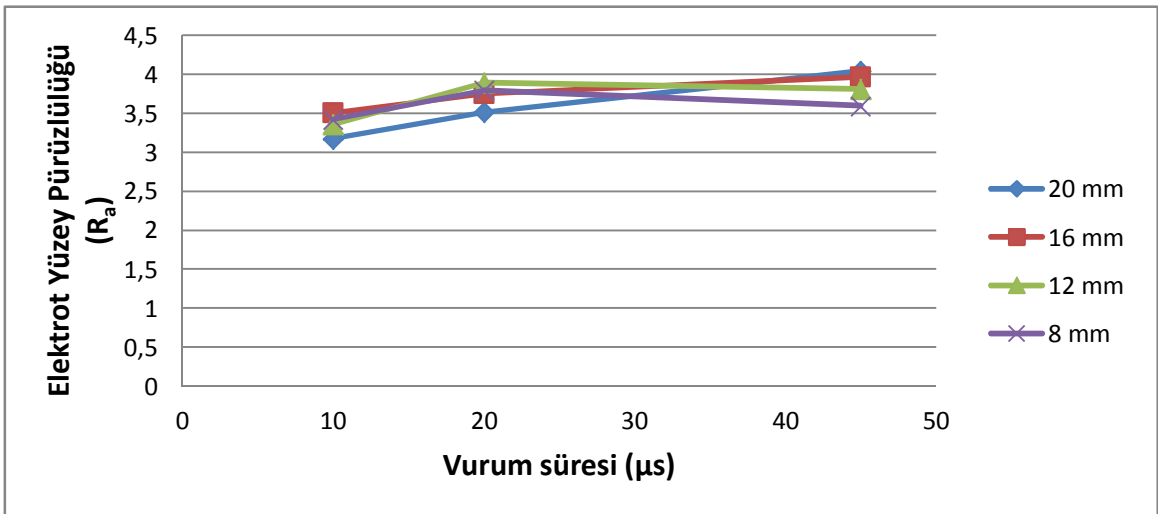
Şekil 4.4.15 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 9 A, vurum bekleme süresi 300 μs)



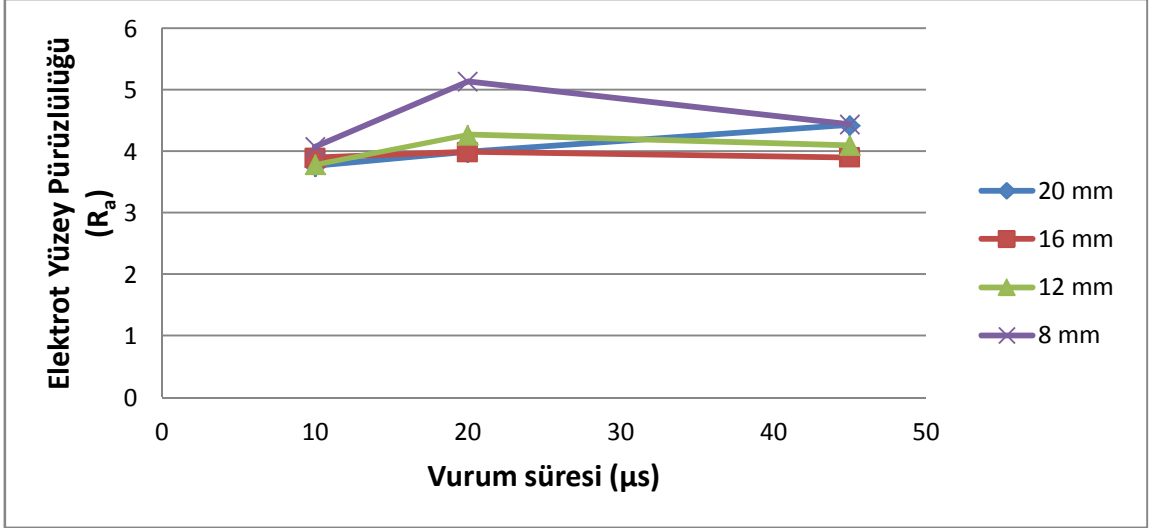
Şekil 4.5.16 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 15 A, vurum bekleme süresi 6 μs)



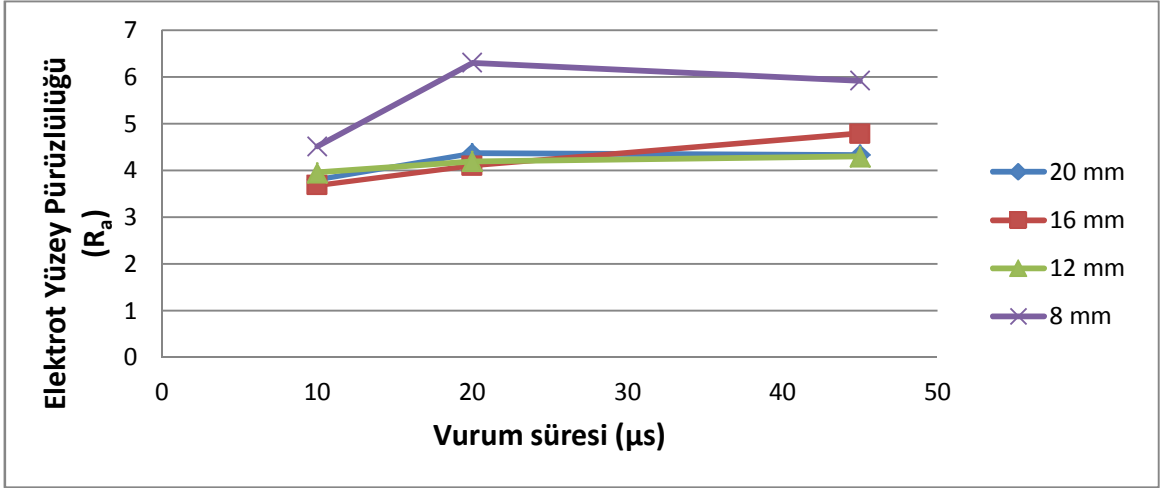
Şekil 4.5.17 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 15 A, vurum bekleme süresi 30 μs)



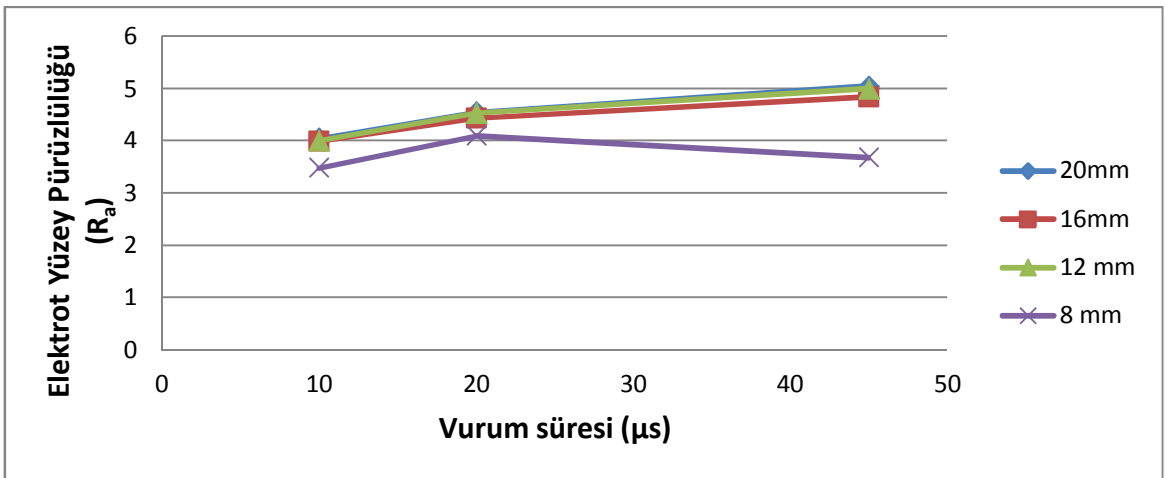
Şekil 4.5.18 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 15 A, vurum bekleme süresi 300 μs)



Şekil 4.5.19 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 21 A, vurum bekleme süresi 6 μs)



Şekil 4.5.20 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 21 A, vurum bekleme süresi 30 μs)



Şekil 4.5.21 Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğüne etkisi (boşalım akımı 21 A, vurum bekleme süresi 300 μs)

Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı arttıkça elektrot yüzey pürüzlülük değerinin arttığı gözlenmiştir. Bu olgunun nedeni ise boşalım enerjisinin boşalım akımıyla orantılı olmasıdır. Yüksek boşalım enerjisi, yüksek boşalım akımı ve yüksek vurum süresiyle ilişkilidir (Eşitlik 2.4). Boşalım akımı yüksek olduğu zaman kıvılcım yoğunluğu (enerji yoğunluğu) ve boşalım gücü daha fazla olur bu da işparçası ve elektrot yüzeyinde daha derin ve geniş krater oluşumuna neden olacak miktarda malzeme kaldırılmasını sağlayarak elektrot yüzey pürüzlülük değerinin artmasına neden olur.

Yapılan deneysel çalışmalarda vurum süresinin elektrotların yüzey pürüzlülük değerine üzerine etkisinin az olduğu ve işlem şartlarına göre değişkenlik gösterdiği gözlenmiştir. Farklı çapa sahip tüm elektrotların (8, 12, 16 ve 20 mm) kullanılmasıyla yapılan deneylerde, boşalım akımının 9 A olduğu işleme şartlarında vurum süresi arttıkça elektrot yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma gözlenmiştir. Boşalım akımının 15 A değerinde vurum süresinin artmasıyla genel olarak elektrot yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür sadece 12 mm çaplı elektrotlarla vurum bekleme süresinin 6 ve 30 μ s olduğu işleme şartlarında, vurum süresinin artması elektrot yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olmuştur. Boşalım akımının 21 A olduğu işleme şartlarında vurum süresinin artmasıyla birlikte elektrot yüzey pürüzlülük değerlerinin de vurum süresiyle birlikte arttığı görülmüştür.

Elektroerozyonla işleme sırasında hidrokarbon kökenli dielektrik sıvı kullanılması durumunda, işlem esnasında bu dielektrik sıvıdan ayrılan karbon atomlarının elektrot yüzeyine yapışmasıyla elektrotların aşınma direncinin arttığı bilinmektedir [69]. Elektrot yüzey pürüzlülüğünün vurum süresiyle azalmasının nedeni olarak; dielektrik sıvıdan ayrılan karbon atomlarının elektrot yüzeylerine yapışması (çökmesi), ve böylece hem elektrotları aşınmaya karşı dirençli hale getirmesi hem de elektrot yüzeylerinin karbon atomlarıyla kaplanmasından dolayı elektrotların yüzeylerinin daha düzgün bir yüzey profiline sahip hale gelişi olduğu düşünülmektedir. Boşalım akımının 9 A olduğu deney şartları için durum böyle olurken, boşalım akımının 15 A ve 21 A olduğu deney şartlarında ise vurum süresinin artmasıyla elektrot yüzey pürüzlülük değerlerinde büyük bir çoğunlukla artış görülmüştür. Bunun nedeni olarak ise yüksek akım şiddetlerinde, elektrot aşınması miktarının, elektrot yüzeyine karbon çökmesine

göre daha baskın hale gelmesi böylelikle elektrot yüzey pürüzlülüğünün artması olarak düşünülmektedir.

Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar sonucunda vurum bekleme süresinin artmasıyla genel olarak elektrot yüzey pürüzlülük değerinde az da olsa bir artış görülmüştür.

4.6 Enerji Yoğunluğu

Bu çalışma kapsamında elektroerozyonla işleme yönteminde yeni bir parametre olarak enerji yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Elektroerozyonla işleme yönteminde verilen enerjinin yoğunluğundaki değişimin, işparçası işleme hızı, işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması üzerine etkisi incelenmiştir.

Elektroerozyonla işleme yöntemlerinde, kıvılcımlar çeşitli elektrik devreleri tarafından üretilir ve bunların her birinin farklı gerilim ve akım dalga şekilleri vardır. Bu ardışık dalga şekillerin aynı ya da en azından benzer olduğu durumlarda, her bir boşalım (darbe) başına düşen enerji aşağıdaki şekilde kolayca hesaplanır (Eşitlik 4.1) [19].

$$W_s = \int_0^{t_d} Q(t) dt \quad (4.1)$$

Buradaki t_d , boşalım süresini, $Q(t)$ her bir boşalımda uygulanan toplam güçü ifade etmektedir. $Q(t)$ değeri ise boşalım gerilimi (V_d) ile boşalım akımının (i_d) çarpımına eşittir (Eşitlik 4.2).

$$Q(t) = V_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt \quad (4.2)$$

2. eşitliğin 1. eşitliğin içine eklenmesiyle, aşağıdaki eşitlik elde edilir (Eşitlik 4.3).

$$W_s = \int_0^{t_d} V_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt \quad (4.3)$$

Vurum süresi, boşalım (darbe) süresi ile gecikme süresinin toplamına eşittir (Eşitlik 4.4).

$$t_s = t_d + t_i \quad (4.4)$$

Gecikme süresi, boşalım süresiyle karşılaştırıldığında sabit ve çok kısa bir süredir. Bu yüzden ihmal edilebilir ve vuruş süresi yaklaşık olarak, boşalım süresine eşit alınabilir (Eşitlik 4.5) [19].

$$t_s \approx t_d \quad (4.5)$$

Bu durumda ise her bir boşalım başına düşen enerji aşağıdaki şekilde hesaplanır (Eşitlik 4.6) [19].

$$E = \int_0^{t_s} V_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt$$

$$E \approx V_d \cdot i_d \cdot t_s \text{ (Watt .sn) (Joule)} \quad (4.6)$$

(4.6) no'lu eşitlikteki boşalım enerjisi tek bir pulse (darbe) içindir. Toplam uygulama zamanı içerisinde "n" adet puls (darbe) oluşmaktadır. Böylece uygulama zamanı içinde elektrot ve işparçası arasına gönderilen toplam enerjinin miktarı Eşitlik 4.7 ile ifade edilir

$$E_T = n \cdot E \quad (4.7)$$

Uygulama zamanı içerisinde tekrarlanan pulse (darbe) sayısı "n", uygulama zamanının toplam çevrim süresine (vuruş ve vuruş bekleme süresinin toplamı) bölünmesiyle bulunur (4.8) nolu eşitlik. Bu eşitlikteki " T_{top} " ifadesi toplam uygulama zamanını ifade etmektedir. Her deney süresi 20 dk alındığından, toplam uygulama zamanımız 20 dk olmuştur. Ancak işparçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızı (gr/dk) cinsinden hesaplandığından dolayı enerji yoğunluğu hesabı yapılırken 20 dk içinde verilen enerji yerine birim zaman içerisinde verilen enerji yoğunluğu göz önüne alınmalıdır. Bu yüzden Eşitlik 4.8'de ki " T_{top} " ifadesi 1 dk olarak alınmıştır, daha sonra bu süre enerji yoğunluğu hesabı yapılırken mikrosaniye'ye çevrilerek hesaba katılmıştır. Böylece birim dakikalık uygulama zamanı içerisinde işparçası ve elektrot arasına uygulanan toplam enerji miktarı hesaplanabilir. Bu eşitlikteki "k" değeri elektroerozyonla işleme sırasında işleme bölgesindeki metalsel talaş parçacıklarının dielektrik sıvı tarafından temizlenmesi için elektrodun tekrarlanan bir şekilde yukarı, çıkıp aşağı inmesinden dolayı, boşalımın gerçekleşmediği süreyi ifade etmek için kullanılan bir katsayıdır.

Bizim işleme parametrelerimiz için bu “k” değeri 0.5 olarak hesaplanmıştır. “k” değeri hesaplanırken; elektrodun iniş kalkış hızı, elektrodun malzeme üzerinde kalma zamanı, elektrodun işparçası malzemesi üzerinden maksimum yükselme miktarı ve işleme zamanı göz önüne alınmıştır. Bu değerler ise tüm deney boyunca sabit olarak alınmaktadır. Bu yüzden “k” değeri tezgâh üzerinden direk olarak seçtiğimiz bir katsayı değildir, seçilen bu sabit değerlere göre her farklı deney için hesaplanmalıdır.

$$E_T = k \cdot V_d \cdot i_d \cdot t_s \cdot \left(\frac{T_{top}}{t_s + t_p} \right) \quad (4.8)$$

Toplam enerji miktarı eşitliğinin her iki tarafı da, deşarj etki alanına bölüldüğünde enerji yoğunluğu elde edilmiş olur. (Eşitlik 4.9)

$$E_D = \frac{E_T}{A_{ön}} \quad (4.9)$$

Toplam enerji miktarı eşitliğinin (Eşitlik 4.8), enerji yoğunluğu eşitliğinde (Eşitlik 4.9) yerine yazılmasıyla, aşağıdaki eşitlik elde edilir (Eşitlik 4.10).

$$E_D = \frac{k \cdot V_d \cdot i_d \cdot t_s \cdot \left(\frac{T_{top}}{t_s + t_p} \right)}{A_{ön}} \quad (4.10)$$

Farklı çaplara sahip (8, 12, 12 ve 20 mm) elektrolitik bakırların elektrot malzemesi olarak kullanılmasıyla yapılan deneysel çalışmada, boşalım tepe akımı (9, 15, 21 A), vurum süresi (10, 20, 45 μ s), vurum bekleme süresi (6, 30, 300 μ s), aralık gerilimi 55 volt ve deney süresi olarak 20 dk alınmıştır.

Elektroerozyonla işleme yönteminde ortalama boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresine göre değişkenlik göstermektedir. Vurum süresinin değerinin artmasıyla ortalama boşalım değeri artarken, vurum bekleme süresinin artmasıyla ortalama boşalım akımı değeri azalmaktadır [37]. Bu yüzden toplam enerji miktarının hesaplanmasında boşalım akımı (i_d) yerine kullanılacak olan ortalama akım değerleri

vurum ve vurum bekleme sürelerine göre yeniden Eşitlik 4.11'in yardımıyla hesaplanmıştır [54,63].

$$I_{ort} = I_{Tep} \cdot \frac{\text{darbe zamanı}}{\text{gecikme zamanı} + \text{darbe zamanı} + \text{darbe bekleme zamanı}} \quad (4.11)$$

Gecikme zamanı, darbe (boşalım) zamanı ile karşılaştırıldığında çok kısa bir süredir. Bu yüzden ihmal edilebilir böylelikle vurum süresi yaklaşık olarak boşalım (darbe) süresine eşit alınabilir [19]. Bu bilgiye dayanarak eşitlik 4.11' de ki gecikme süresi ortalama çalışma akımı hesabı yapılırken ihmal edilmiştir.

Tüm deney setleri için aralık gerilimi 55 Volt olarak alınmıştır. Elektroerozyonla işleme yönteminde kıvılcımın atlamaya başlamasıyla birlikte voltaj değeri hızla boşalım voltaj değerine kadar düşerken akım değeri hızla boşalım akımı değerine kadar yükselmektedir. Boşalım voltaj değeri yaklaşık olarak 15 – 25 Volt arasında bir değerdir [7,37,44,56]. Bu yüzden enerji yoğunluğu hesabı yapılırken ortalama boşalım gerilimi olarak 25 Volt alınmıştır.

Deşarj etki alanı ($A_{ön}$) olarak ise elektrotların ön alın yüzeylerinin alanları alınmıştır bu değer mm^2 cinsinden hesaplanmıştır

Enerji yoğunluğu hesabı yapılırken her çap için ayrı ayrı enerji yoğunlukları hesaplanarak, enerji yoğunlukları ile işparçası işleme hızı, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması değişim grafikleri elde edilmiştir.

Enerji yoğunluğu eşitliğine göre (Eşitlik 4.10) vurum bekleme süresinin (t_p) sıfır alınması enerji yoğunluğunun artmasına neden olduğu görülmektedir ama bu işlem pratikte geçerli olmamaktadır vurum bekleme süresi hiçbir zaman sıfır yapılmamalıdır. Vurum bekleme süresi en azından işleme bölgesinden metelsel talaşların temizlenmesi ve dielektrik sıvının tekrar de-iyonize olmasına yetecek kadar uzun olmalıdır. Eğer vurum bekleme süresi sıfır yapılırsa elektrotlar arasındaki elektrik alan sürekli olacağı için, ark kanalıda sürekli olacak ve koparılan metelsel talaşlar ortamdan uzaklaştırılamayacaktır. Bu durumda hep aynı nokta erozyona uğrayacağı için işparçasında istenmeyen

tahribatlar oluşacaktır. Yine aynı şekilde işleme aralığındaki koparılan metalsel talaş miktarının aşırı fazla olması işparçası ve elektrot arasında elektriği ileten yollar gibi görev almasıyla kısa devreler oluşur, kısa devre oluşumunda maksimum akım geçişi olurken talaş kaldırma işlemi gerçekleşmemektedir. Ayrıca işleme bölgesindeki elektroerozyon sonucu oluşan metalsel talaşların yetersiz temizlenmesi halinde, bu metalsel talaşlar kıvılcım oluşumlarını bozup kıvılcım oluşumunu kararsız hale getirerek malzeme kaldırma miktarını azaltabilir [9,20,37].

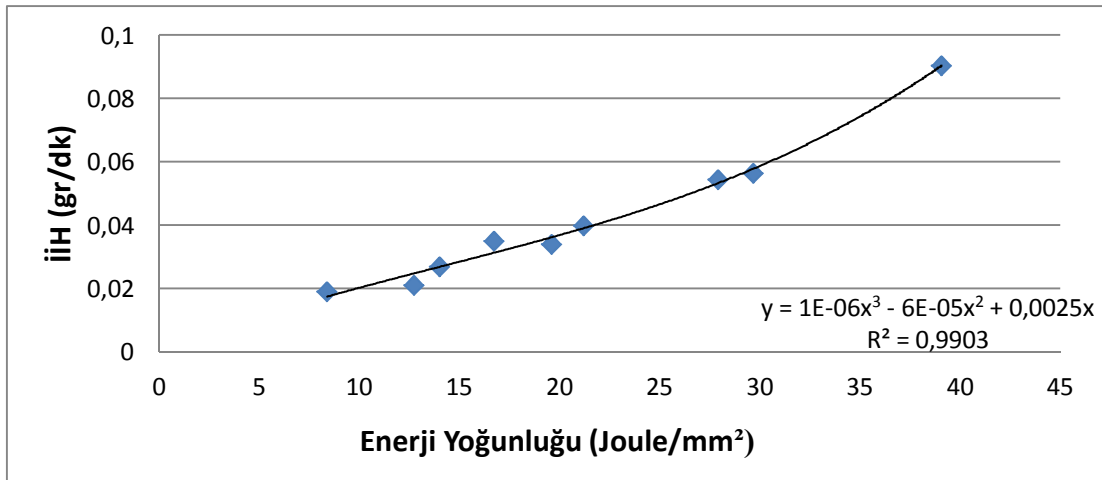
Vurum bekleme süresi, işleme bölgesindeki metalsel artıkların daha etkin bir şekilde temizlenebilmesi için birim zamanda işleme aralığından koparılan talaş miktarı arttıkça artış göstermelidir. Ama vurum bekleme süresindeki artış gereğinden fazla olmamalıdır, vurum bekleme süresindeki gereğinden fazla artış etkin işleme zamanının azalmasına neden olarak işparçası işleme hızını düşürür. Bu yüzden vurum bekleme süresinin, birim zamanda işleme bölgesinden kaldırılan metalsel malzeme miktarıyla orantılı olacak şekilde optimum olduğu bir değer vardır. Bu optimum değer altında ve üstünde işparçası işleme hızı düşmektedir. Vurum bekleme süresinin optimum değerinin altındayken, işparçası işleme hızının düşmesinin nedeni işleme bölgesinin yetersiz temizlenmesi sonucu oluşan arklar, kısa devre, kötü ve kararsız boşalımlardır. Vurum bekleme süresinin optimum değerinin üstünde işparçası işleme hızının düşmesinin nedeni ise işleme zamanının gereksiz yere uzatılmasıyla birlikte etkin işleme zamanının azalmasıdır. Vurum bekleme süresi artması; işlem bölgesinden metalsel talaşların daha iyi bir şekilde temizlenmesi neden olarak arkların, kısa devrelerin, kötü ve kararsız boşalımların oluşmasını engellediği için, işparçası işleme hızını arttırabilir. Ama enerji yoğunluğu eşitliğine göre (Eşitlik 4.10), vurum bekleme süresinin artması enerji yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır, enerji yoğunluğu azalırken, işparçası işleme hızının artması bir çelişki gibi gözükse de yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı aslında bir çelişki değildir.

Enerji yoğunluğu için ANOVA analizinde yapılmıştır ve enerji yoğunluğu için bizim çalışma aralığımız içinde en etkili parametre olarak vurum bekleme süresi çıkmıştır. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar sonucunda vurum bekleme süresinin işparçası yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Vurum bekleme süresinin

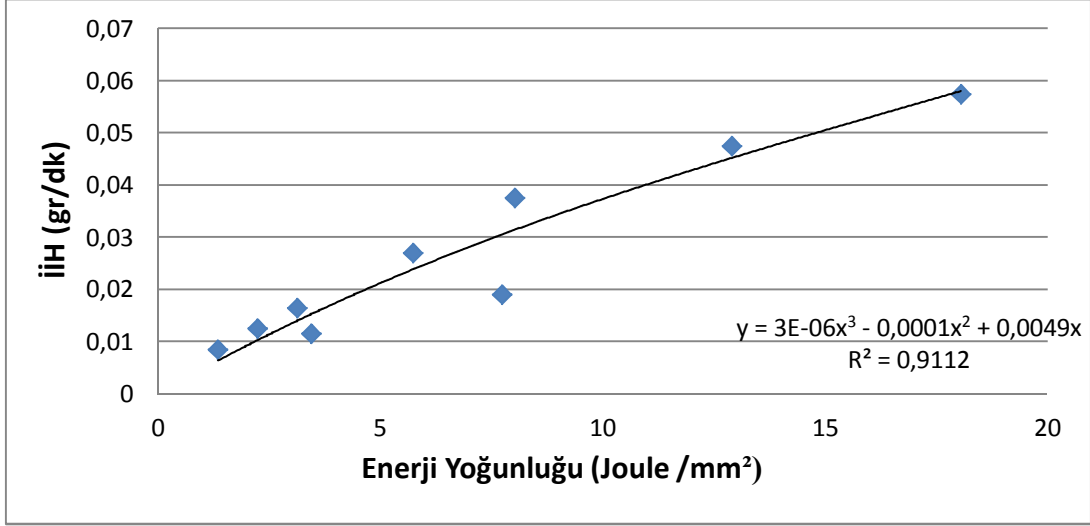
değişimi işparçası yüzey pürüzlülüğünün çok az değişmesine neden olurken, enerji yoğunluğu çok fazla değişmesine neden olmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı enerji yoğunluğu grafikleri çizilirken vurum bekleme sürelerine göre ayrı ayrı grafikler çizilmiştir (Şekil 4.6.1.1 - 4.6.1.12). Enerji yoğunluğundaki değişimin hangi parametreden dolayı gerçekleştiğini bilmek daha doğru karar verilmesine neden olabilir.

4.6.1 Enerji Yoğunluğunun İşparçası İşleme Hızına Etkisi

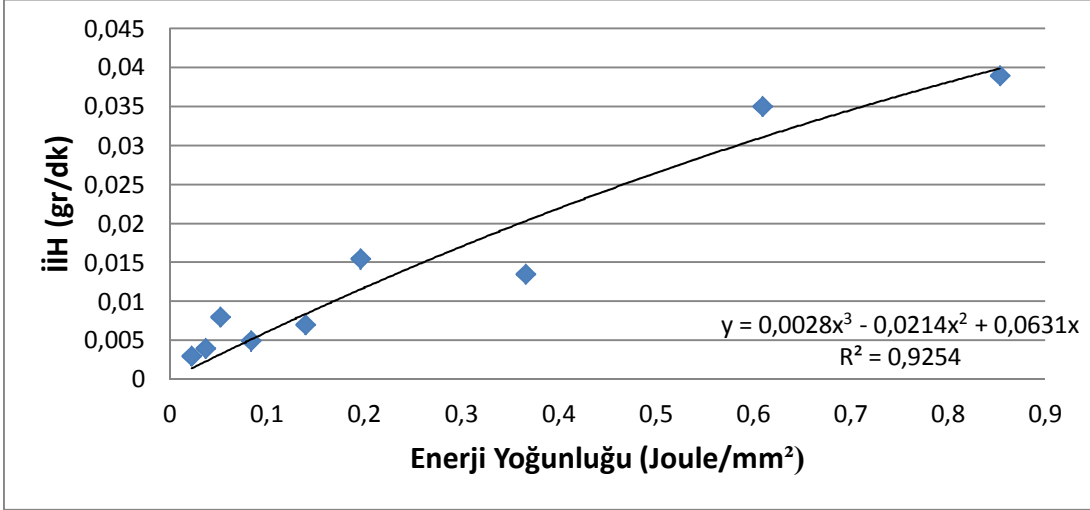
Farklı çaplarda ki (8, 12, 16 ve 20 mm) % 99,99 saflıktaki elektrolitik bakırların elektrot malzemesi olarak kullanılmasıyla elde edilen enerji yoğunluğu ile işparçası işleme hızı (İİH) arasındaki grafikler, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı vurum bekleme sürelerine (6, 30, 300 µs) göre ayrı ayrı aşağıdaki şekilde çizilmiştir.



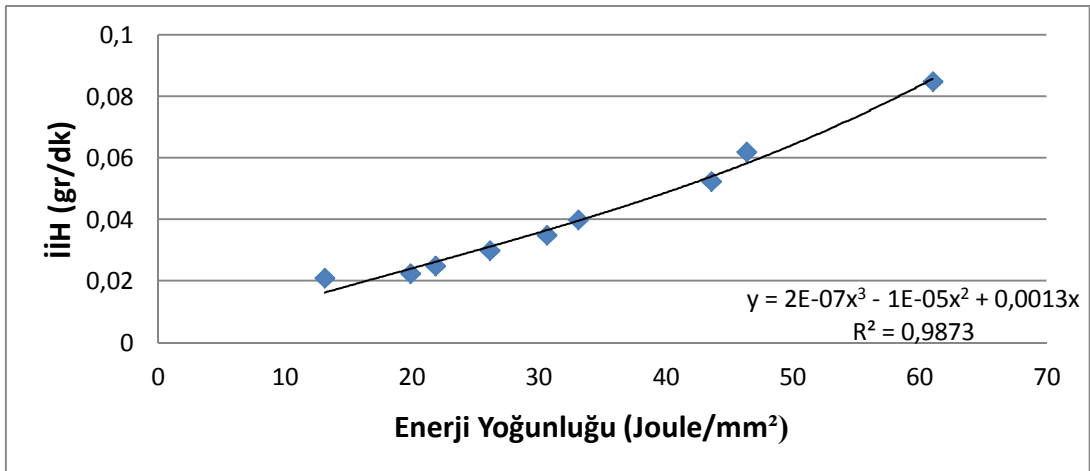
Şekil 4.6.1.1 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 6 µs)



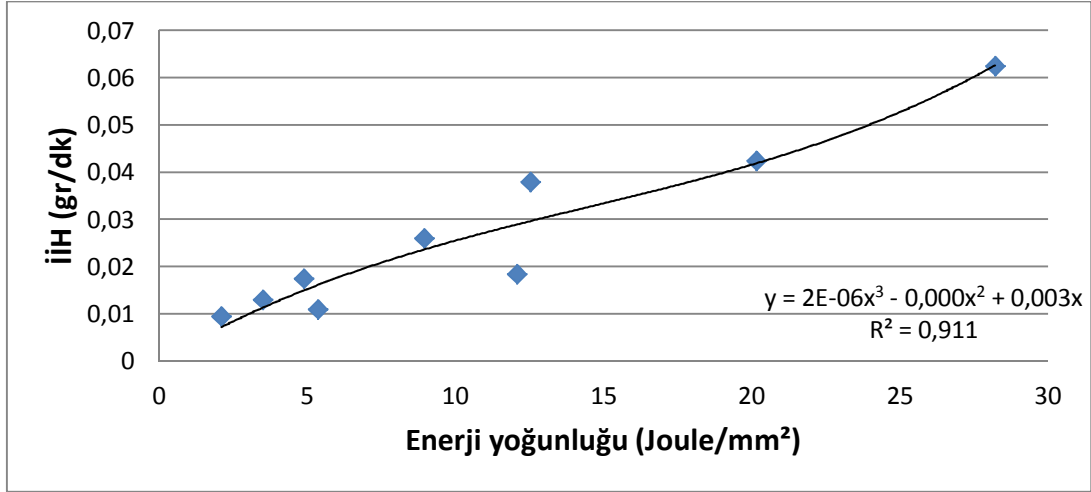
Şekil 4.6.1.2 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 30 µs)



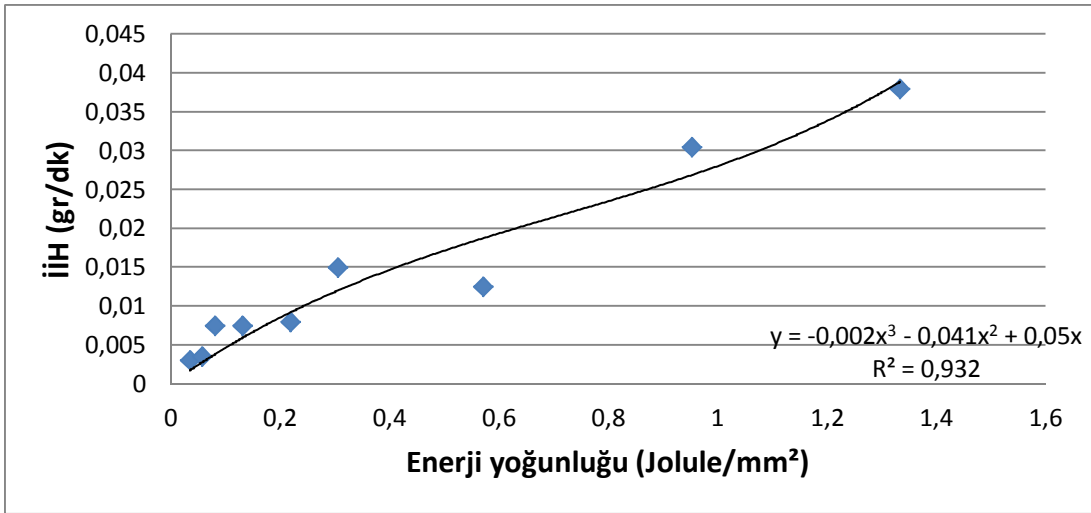
Şekil 4.6.1.3 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 300 µs)



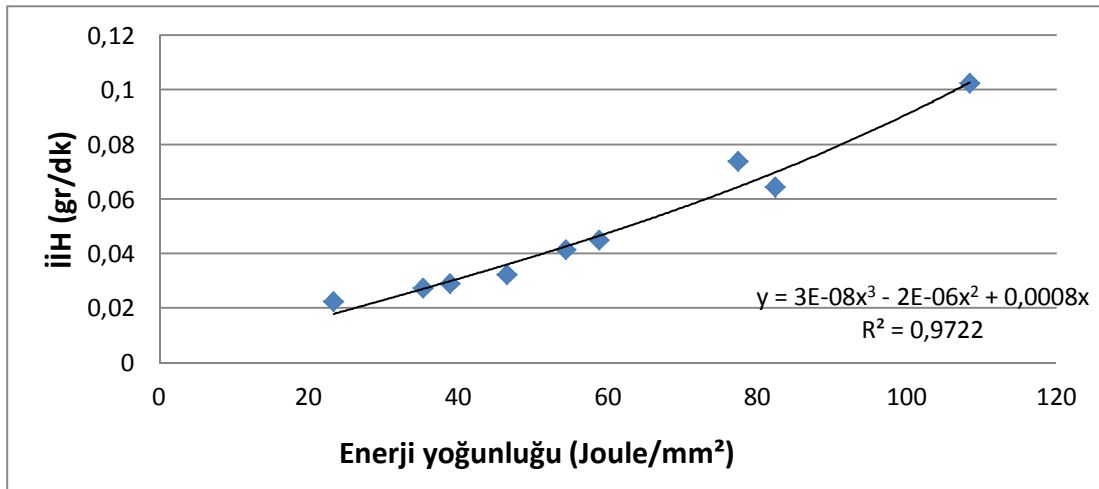
Şekil 4.6.1.4 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 6 µs)



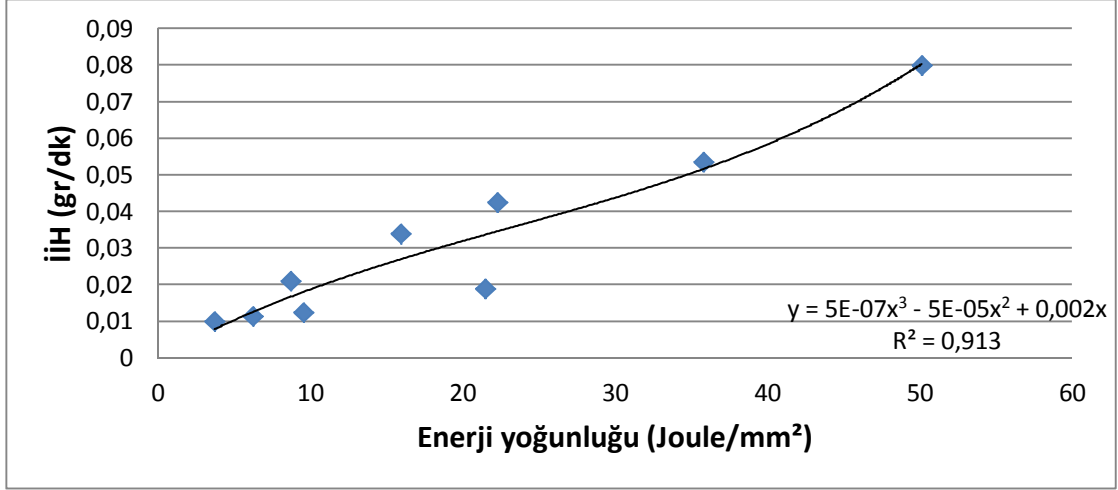
Şekil 4. 6.1.5 Enerji yoğunluğunun İiH'na etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 30 μ s)



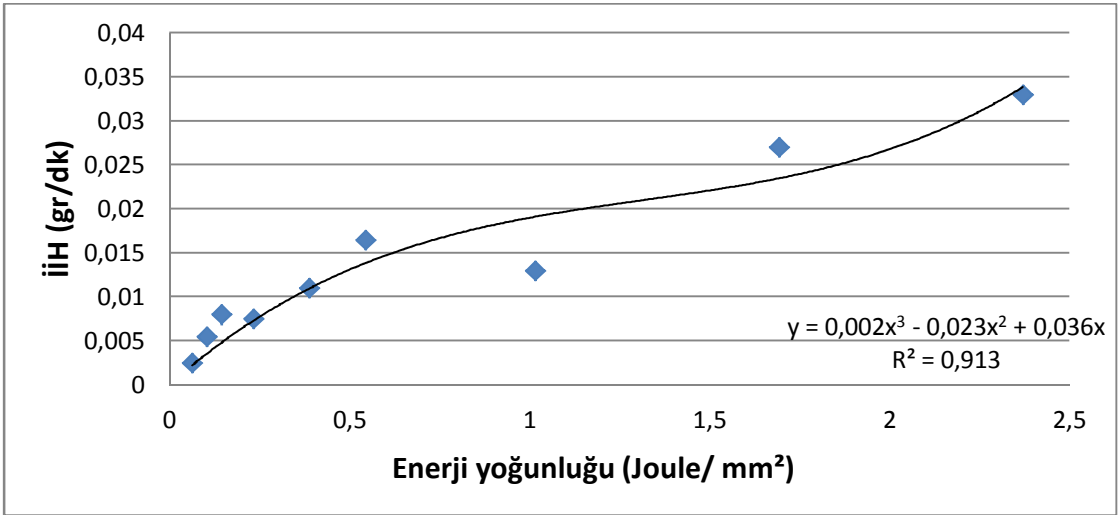
Şekil 4.6.1.6 Enerji yoğunluğunun İiH'na etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 300 μ s)



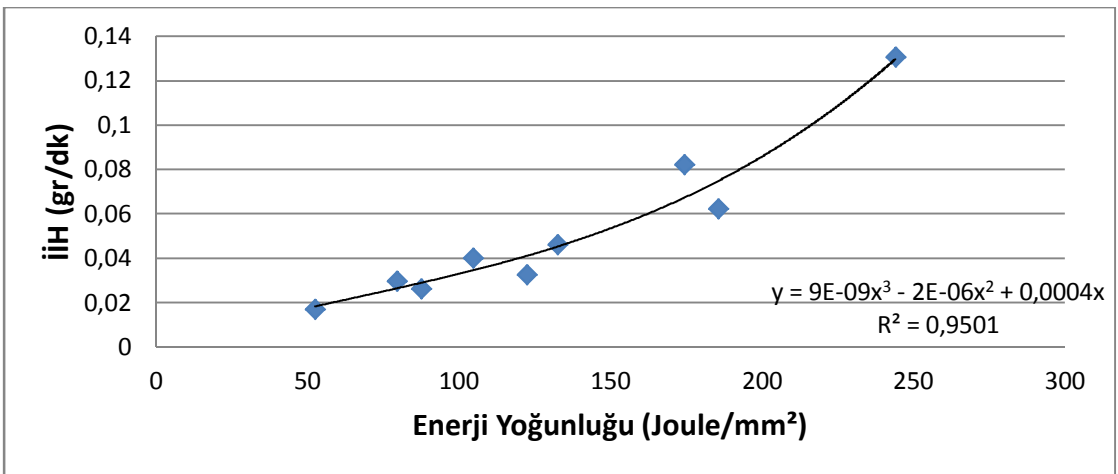
Şekil 4.6.1.7 Enerji yoğunluğunun İiH'na etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 6 μ s)



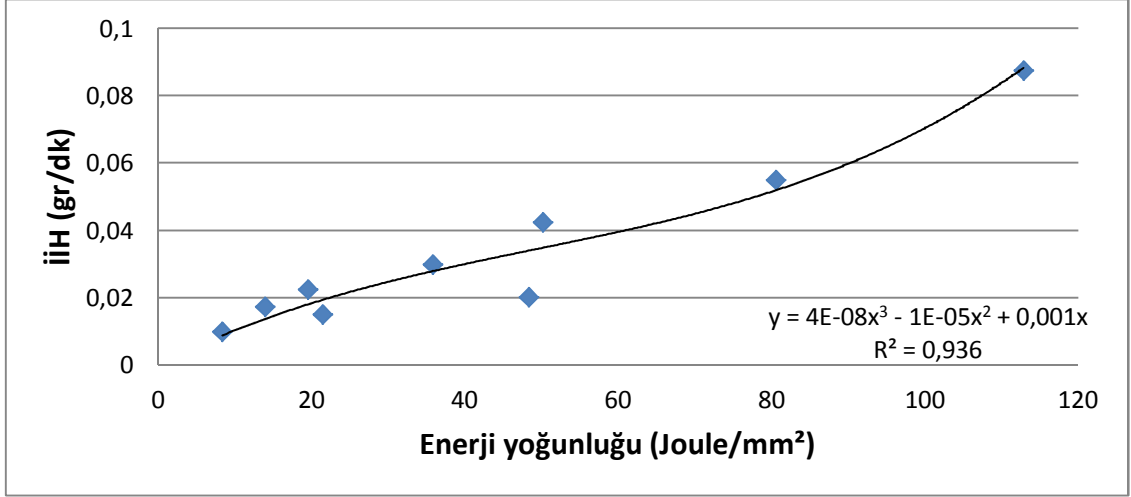
Şekil 4.6.1.8 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 30 μs)



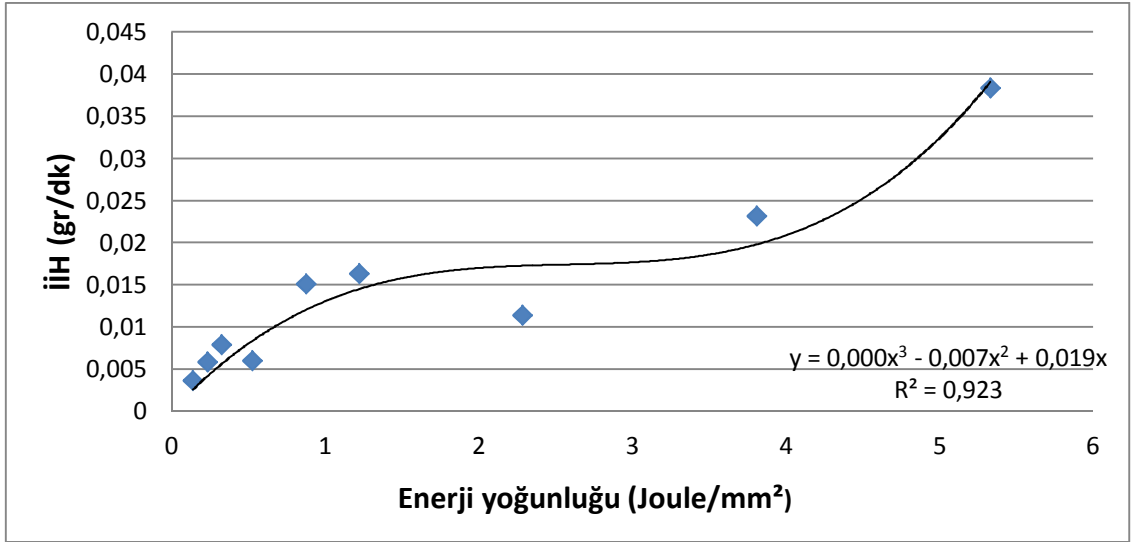
Şekil 4.6.1.9 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 300 μs)



Şekil 4.6.1.10 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 6 μs)



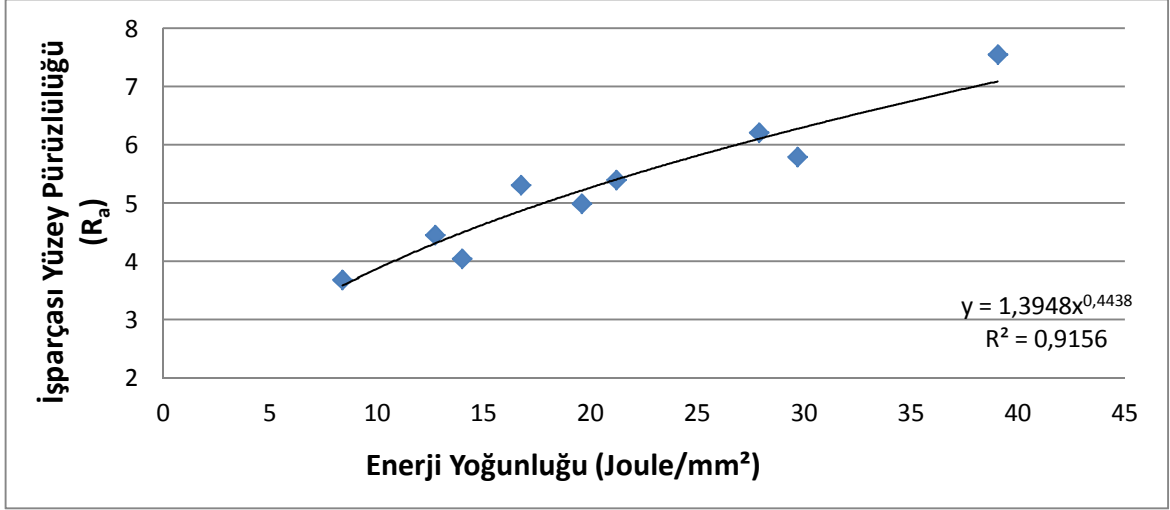
Şekil 4.6.1.11 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 30 µs)



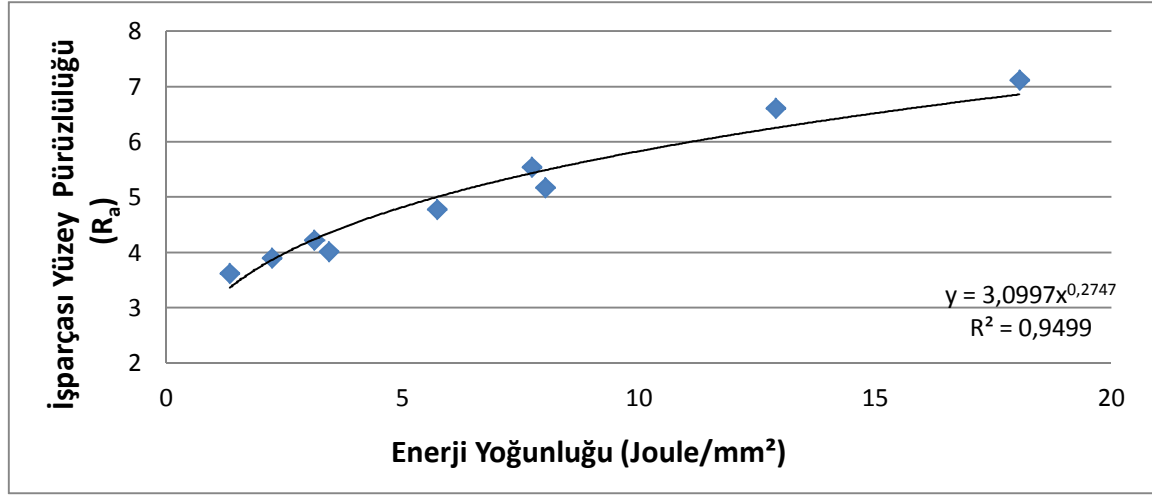
Şekil 4.6.1.12 Enerji yoğunluğunun İİH'na etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası, vurum bekleme süresi 300 µs)

4.6.2 Enerji Yoğunluğunun İşparçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

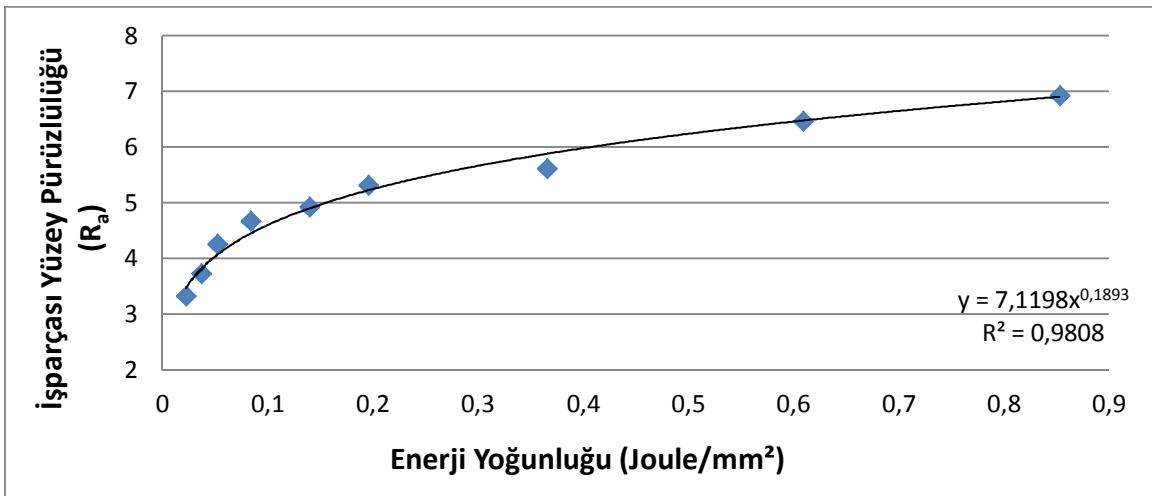
Farklı çaplara sahip (8, 12, 16 ve 20 mm) elektrolitik bakır elektrotların kullanılmasıyla elde edilen, enerji yoğunluğu ve işparçası yüzey pürüzlülüğü arasındaki grafikler, vurum bekleme sürelerine (6, 30, 300 µs) göre aşağıdaki şekilde ayrı ayrı çizilmiştir (Şekil 4.6.2.1 – 4.6.2.12).



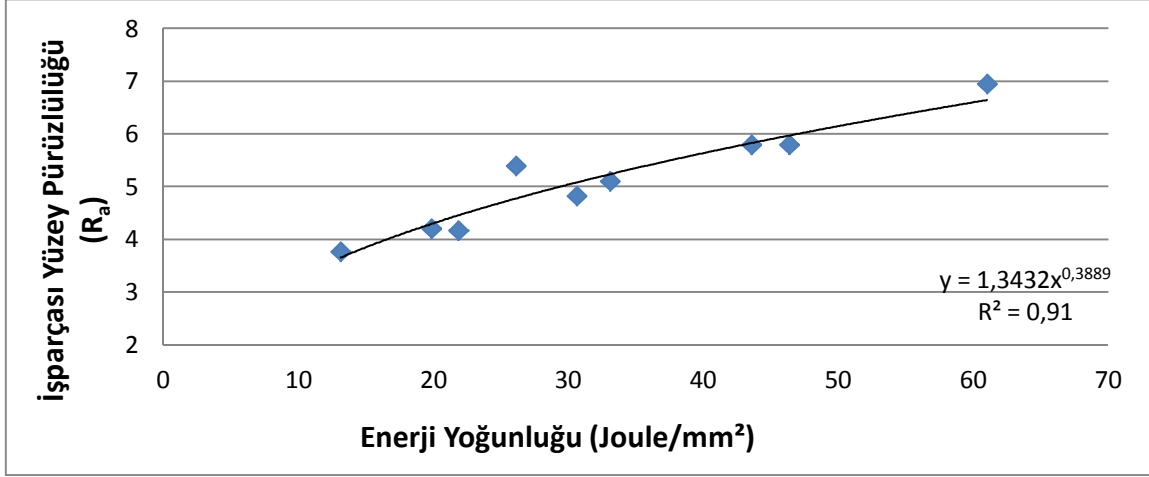
Şekil 4.6.2.1 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 µs)



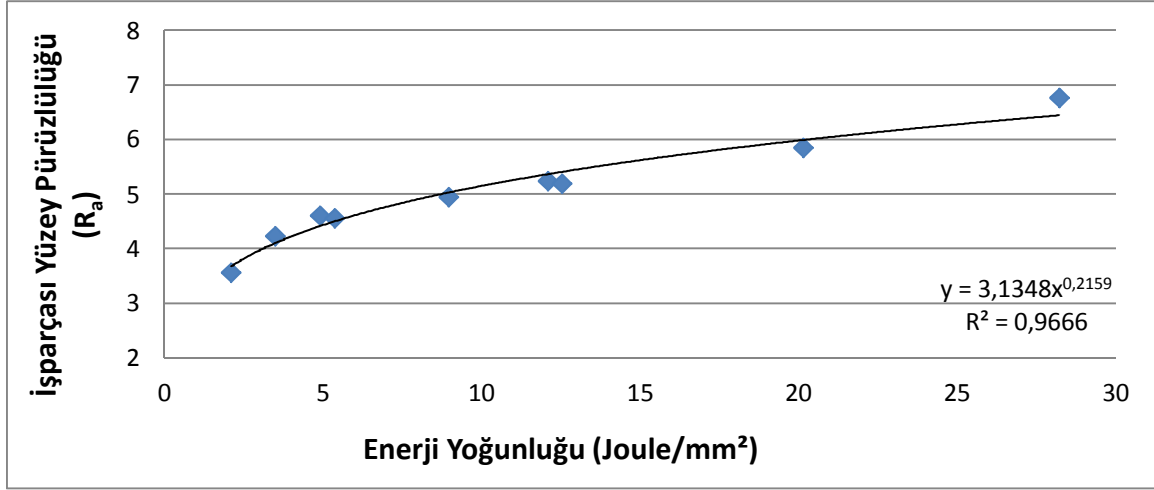
Şekil 4.6.2.2 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 µs)



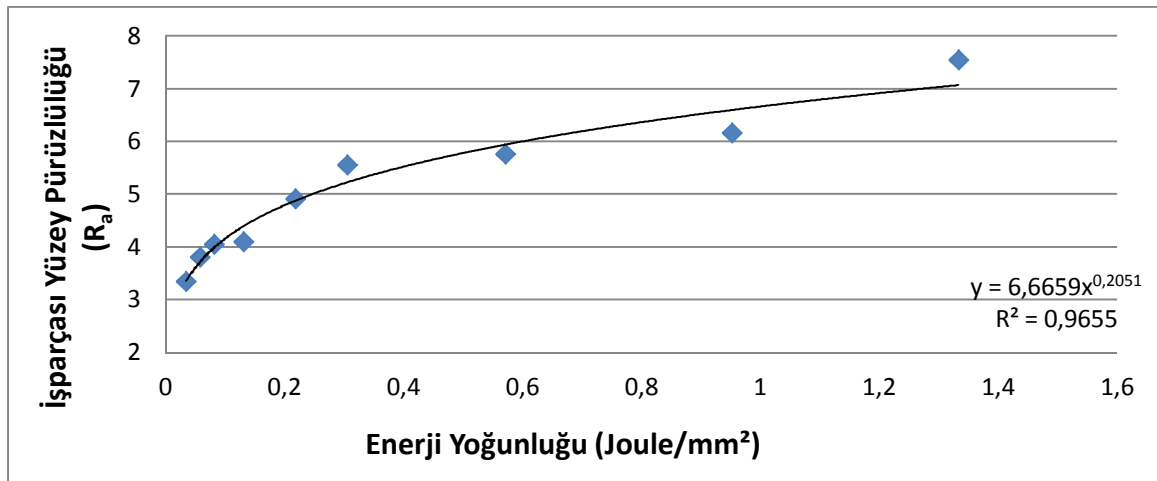
Şekil 4.6.2.3 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (20 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 µs)



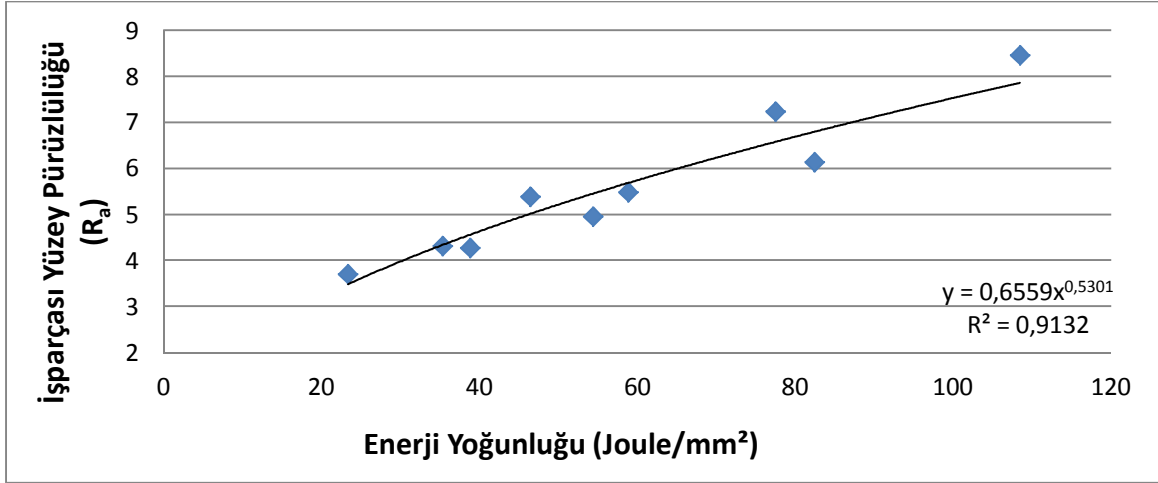
Şekil 4.6.2.4 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 µs)



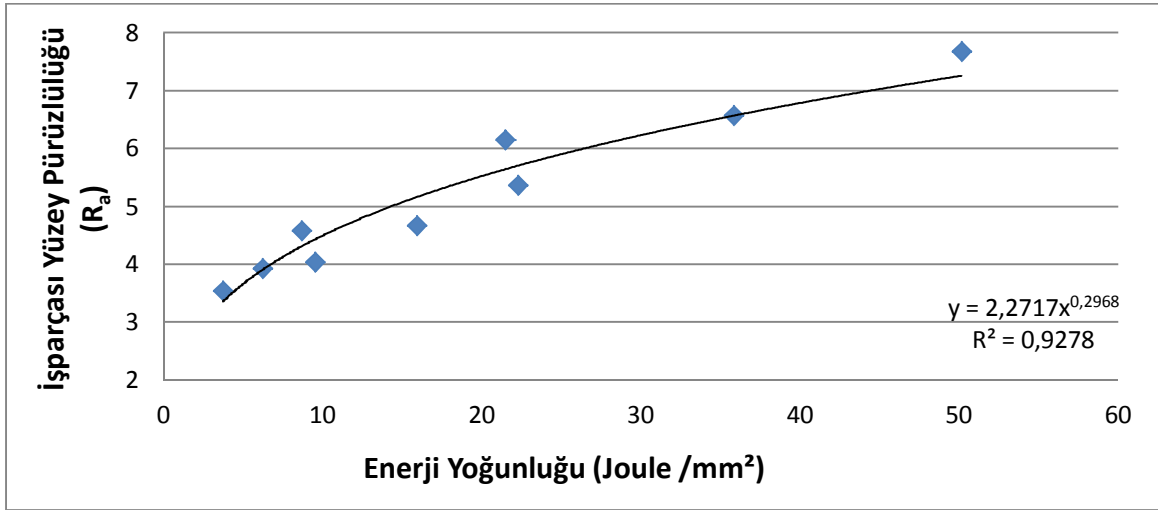
Şekil 4.6.2.5 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 µs)



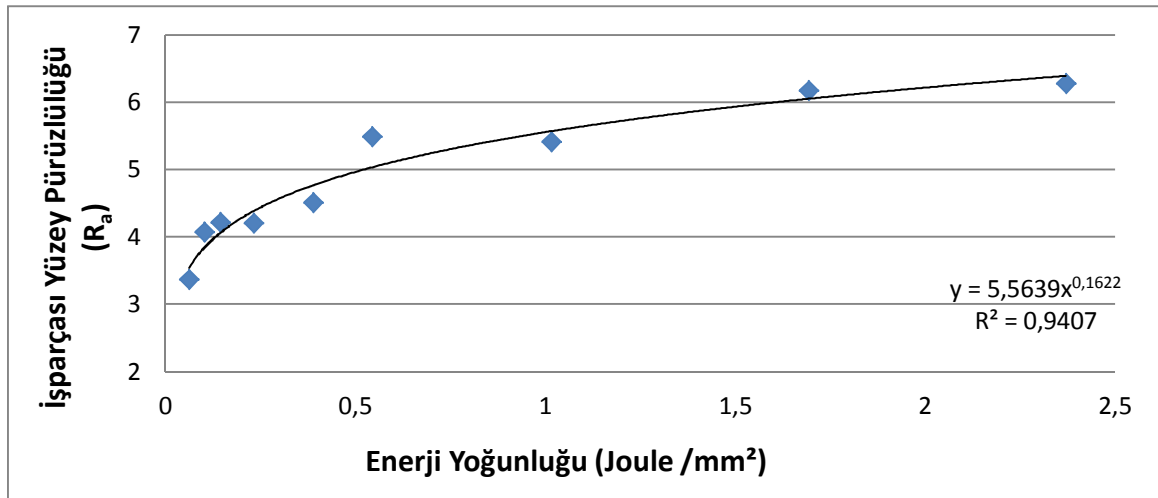
Şekil 4.6.2.6 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (16 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 µs)



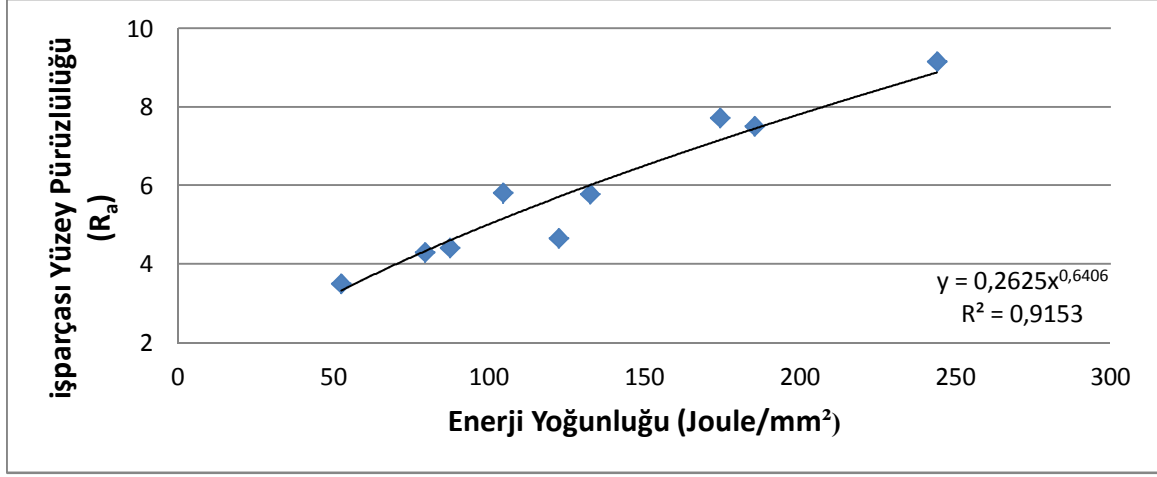
Şekil 4.6.2.7 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 µs)



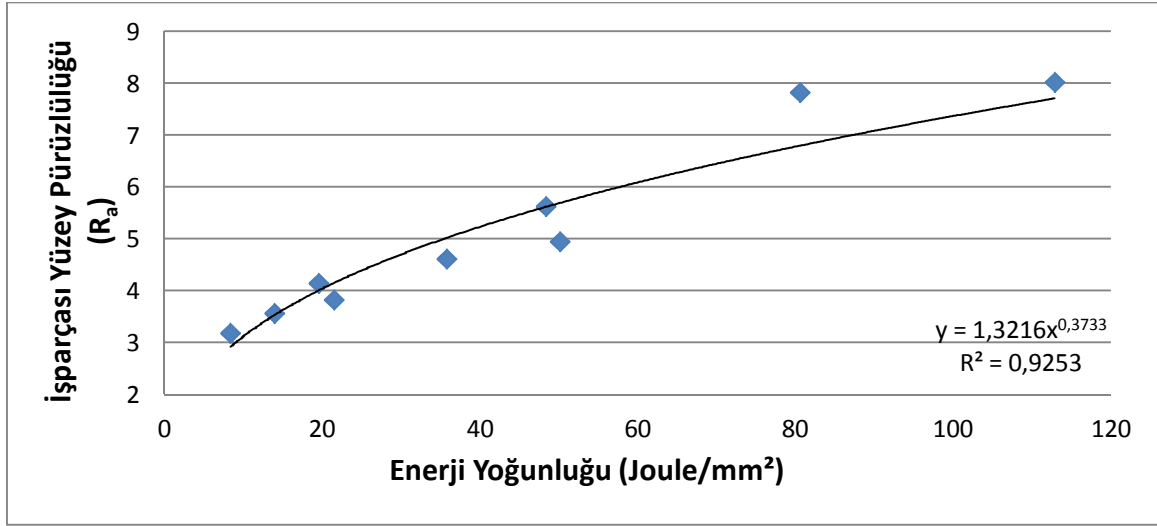
Şekil 4.6.2.8 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 µs)



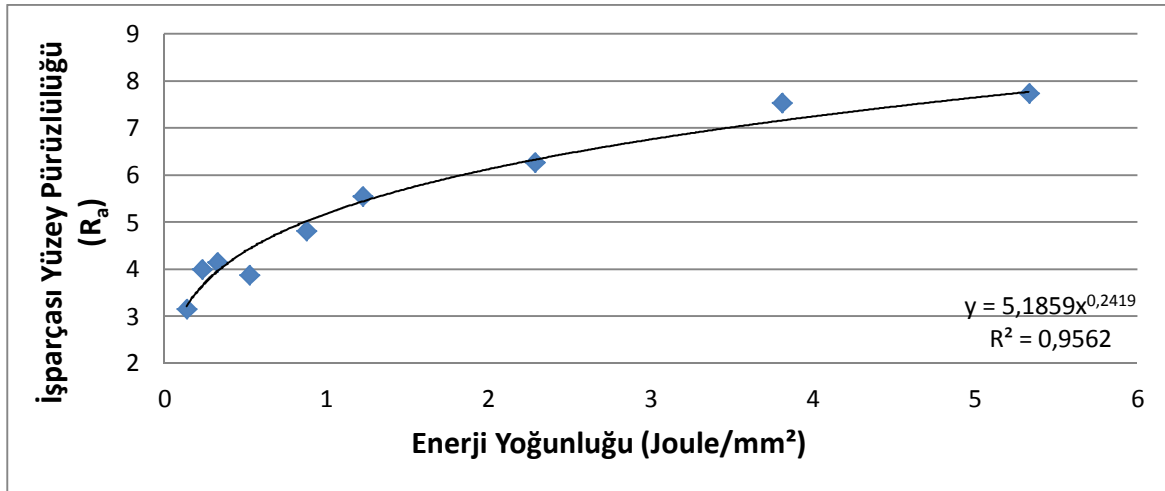
Şekil 4.6.2.9 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (12 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 µs)



Şekil 4.6.2.10 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 6 µs)



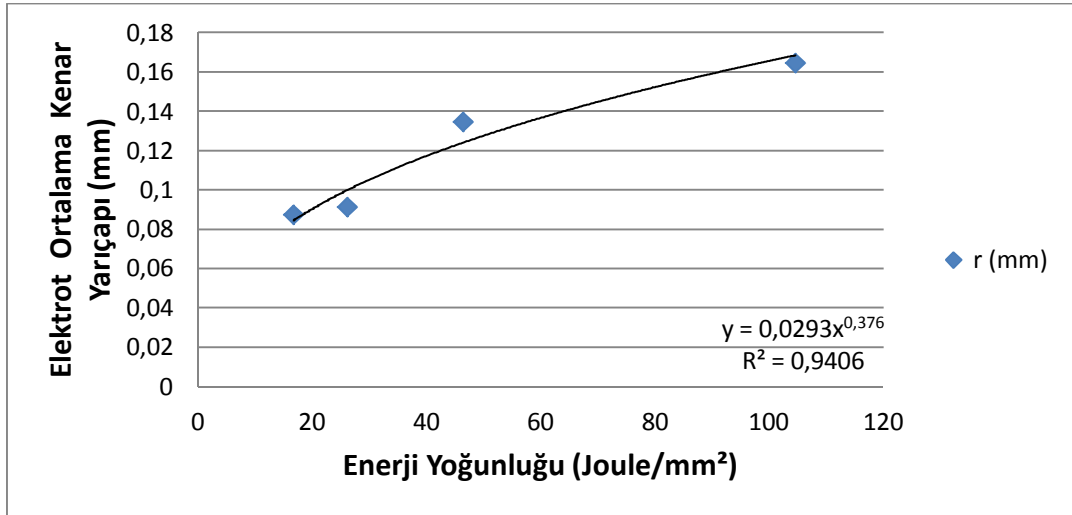
Şekil 4.6.2.11 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 30 µs)



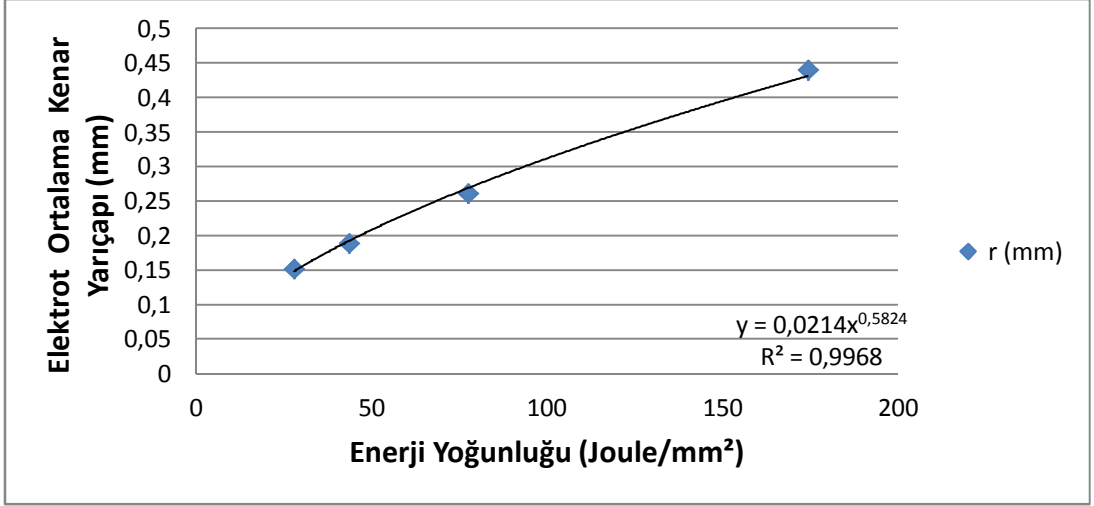
Şekil 4.6.2.12 Enerji yoğunluğunun işparçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi (8 mm çaplı elektroda ait işparçası ve vurum bekleme süresi 300 µs)

4.6.3 Enerji Yoğunluğunun Elektrot Kenar Aşınmasına Etkisi

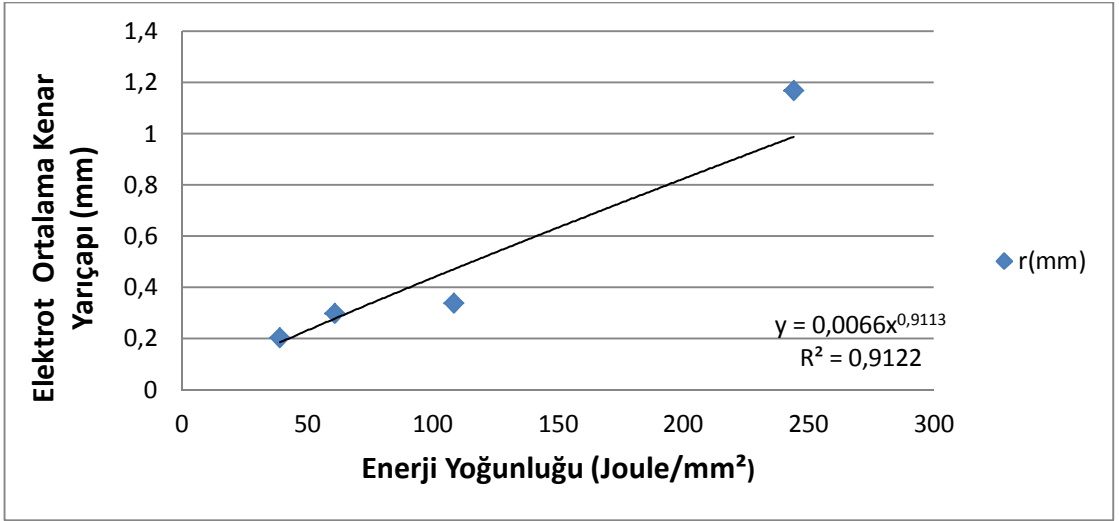
Enerji yoğunluğundaki değişimin elektrot kenar aşınması (kenar yarıçapı) üzerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Elektrot kenar aşınması üzerine enerji yoğunluğunun etkisi incelenirken, enerji yoğunluğundaki değişim sadece çap değişimine bağlı kalınarak incelenmiştir. Aynı işleme parametreleri tüm farklı çaptaki (8, 12, 16 ve 20 mm) elektrotlara uygulanmasıyla enerji yoğunluğundaki değişiminin elektrot kenar aşınması üzerine etkisi incelenmiştir. Her bir grafiğin altında her 4 farklı çap için uygulanan aynı işleme parametreleri belirtilmiş olup, bu işleme parametreleri kullanılarak her çap için ayrı ayrı enerji yoğunluğu Eşitlik 4.10 yardımıyla hesaplanmıştır. Enerji yoğunluğu ile elektrot kenar aşınması arasındaki grafikler aşağıdaki şekilde elde edilmiştir (Şekil 4.6.3.1- 4.6.3.7).



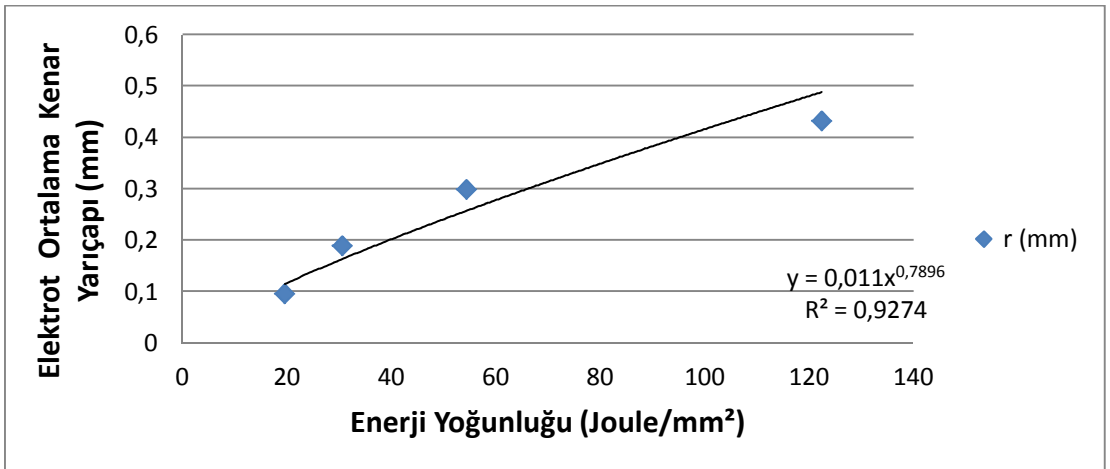
Şekil 4.6.3.1 Enerji yoğunluğunun elektrot kenar yarıçapına etkisi (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s)



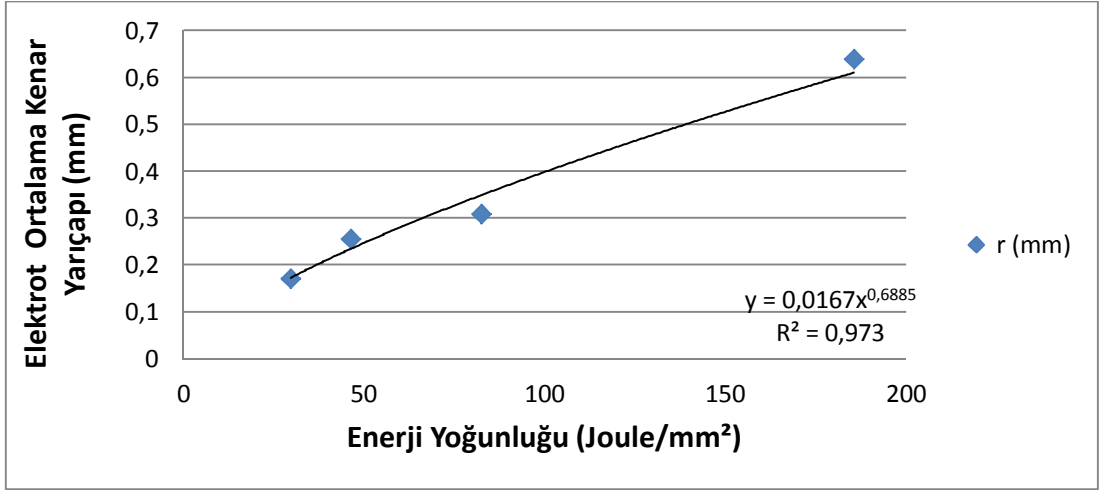
Şekil 4.6.3.2 Enerji yoğunluğun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 15 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s)



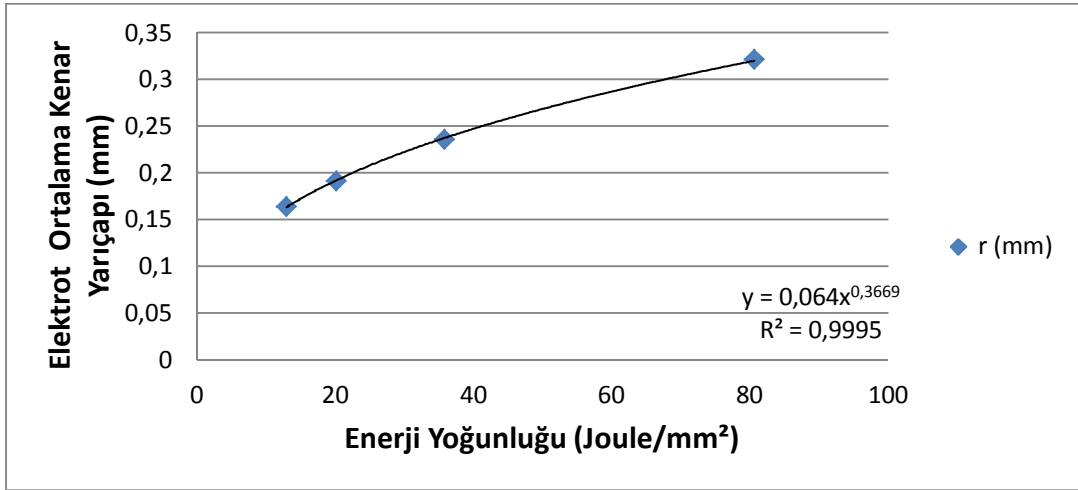
Şekil 4.6.3.3 Enerji yoğunluğun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 21 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s)



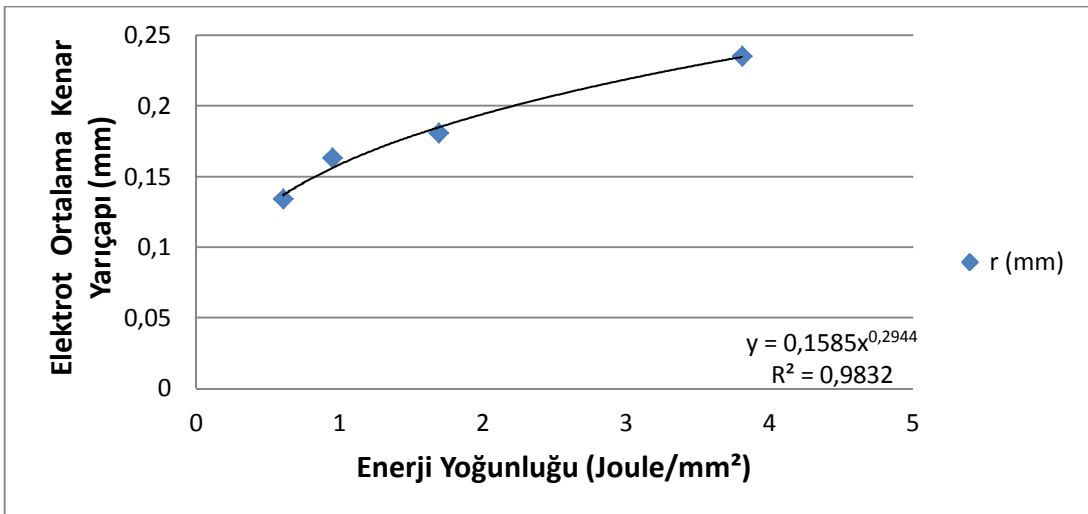
Şekil 4.6.3.4 Enerji yoğunluğun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 21 A, vurum süresi 10 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s)



Şekil 4.6.3.5 Enerji yoğunluğun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 21 A, vurum süresi 20 µs, vurum bekleme süresi 6 µs)



Şekil 4.6.3.6 Enerji yoğunluğun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 15 A, vurum süresi 45 µs, vurum bekleme süresi 30 µs)



Şekil 4.6.3.7 Enerji yoğunluğun elektrot kenar yarıçapına etkisi (Boşalım akımı 15 A, vurum süresi 45 µs, vurum bekleme süresi 300 µs)

Yapılan deneysel çalışmalarda, işparçası işleme hızı (İİH) ve işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin enerji yoğunluğunun artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. İşparçası işleme hızı ve enerji yoğunluğu arasındakî en iyi yaklaşım 3. dereceden polinom şeklinde olurken, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve enerji yoğunluğu arasındakî en iyi yaklaşım üstel fonksiyon şeklinde olmuştur.

Ayrıca çalışma sonucunda aynı işleme parametrelerinin farklı çaplara sahip (8, 12, 16 ve 20 mm) elektrotlara uygulanmasıyla elektrot kenar ortalama yarıçap değerlerinin, elektrotların çapı küçüldükçe arttığı görülmüştür. Bunun nedeni ise; işleme parametrelerinin aynı olmasından dolayı elektrotlara verilen enerji miktarları aynıdır buna karşın elektrot çaplarının farklı olması boşalım alanlarının farklı olmasına neden olarak elektrotların enerji yoğunluk değerlerinin birbirinden farklı olmasına sebep olmaktadır. Elektrot çapının küçülmesi (20 mm'den 8 mm'ye doğru) boşalım alanının küçülmesine ve enerji yoğunluğunun artmasına neden olur Eşitlik 4.10'a göre. Aynı işleme şartlarında daha küçük çaplı elektrot kullanılarak enerjinin daha yoğun bir şekilde verilmesi ise elektrot kenar yarıçap değerinin (kenar aşınma) değerlerinin artmasına neden olduğu görülmüştür. Elektrot kenar aşınması ve enerji yoğunluğu arasındakî en iyi yaklaşım üstel fonksiyon şeklinde olmuştur. Ayrıca aynı işleme parametrelerinde ve işleme zamanında elektrot çapının küçültülerek enerjinin daha yoğun şekilde verilmesi işleme derinliğinin artmasına neden olmaktadır.

4.7. Değişkenlerin Analizi (ANOVA)

Deney veya çalışma sonuçlarının güvenilirliği için istatistiksel analizlerin yapılması gerekmektedir. Taguchi yöntemi tek cevap özelliklerini optimize etmek için tasarlanmıştır. Bir çıktı için en büyük en iyiyken, diğer çıktı için en küçük en iyi olması istenebilir bu nedenle çoklu çıktıların optimizasyonu karışıktır. Bunun için çok değişkenli varyans analizi (ANOVA) kullanılarak parametrelerin sonuçlar üzerindeki etki yüzdeleri ve güven düzeyleri belirlenmektedir [64]. Bu çalışmada Statgraphics istatistik programı kullanılarak varyans analiz yöntemi (ANOVA) uygulanmıştır ve işleme parametrelerinin (boşalım akımı, vuruş süresi, vuruş bekleme süresi ve elektrot çapı) işleme performansının çıktıları (İİH, EAH, elektrot kenar aşınması, işparçası ile elektrot yüzey pürüzlülükleri ve enerji yoğunluğu) üzerine etkileri incelenmiştir.

4.7.1 İşparçası İşleme Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Çizelge 4.1 İşparçası İşleme Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Parametre	Kar. Top. (SS)	Ser. Der.(d.f)	Ort. Kar. Top.	F - oranı	P- değeri
Boşalım Akımı	5,52704	2	2,76352	61,84	0,0000
Vurum süresi	7,15649	2	3,57825	80,07	0,0000
Vurum bek. sür.	7,32263	2	3,66132	81,93	0,0000
Elektrot çapı	0,271957	3	0,0906522	2,03	0,1149
Hata	4,37947	98	0,0446884	-	-
<u>Düzeltilmiş Top.</u>	<u>24,6576</u>	<u>107</u>			

ANOVA analizi işparçası işleme hızına işlem parametrelerinin etkilerini ortaya çıkarmak için uygulanmıştır. P değerinin sıfıra yakın olması demek parametrelerin etkinliğinin fazla olduğunu göstermektedir. P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95'dir. Her bir parametrenin yüzde olarak katkısını bulmak için o parametrenin kareler toplamı, toplam kareler toplamına bölünür. Toplam kareler toplamı ise her parametrenin kareler toplamının toplanmasıyla elde edilir (Eşitlik 4.12).

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_D + SS_E \quad (4.12)$$

Bu eşitlikteki; SS_A boşalım akımının kareler toplamı, SS_B vurum süresinin kareler toplamı, SS_C vurum bekleme süresinin kareler toplamı, SS_D elektrot çaplarına ait olan kareler toplamı, SS_E ise hata değerinin kareler toplamıdır.

$$SS_T = 5,52704 + 7,15649 + 7,32263 + 0,271957 + 4,37947 = 24,6576$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = (SS_A/SS_T) \times 100 = (5,52704/24,6576) \times 100 = \% 22,4$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = (SS_B/SS_T) \times 100 = (7,15649/24,6576) \times 100 = \% 29$$

$$\text{Vurum bek. sür. yüzde katkısı} = (SS_C/SS_T) \times 100 = (7,32263/24,6576) \times 100 = \% 29,6$$

$$\text{Elektrot çapının yüzde katkısı} = (SS_D/SS_T) \times 100 = (0,271957/24,6576) \times 100 = \% 1,1$$

İşparçası işleme hızına etkiyen işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre, vurum bekleme süresi, vurum süresi, boşalım akımı ve elektrot çapıdır. Elektrot çapının işparçası işleme hızına etkisinin çok küçük olduğu görülmüştür.

4.7.2 Elektrot Aşınma Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Çizelge 4.2 Elektrot Aşınma Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Parametre	Kar. Top. (SS)	Ser. Der.(d.f)	Ort. Kar. Top.	F - oranı	P- değeri
Boşalım Akımı	0,783688	2	0,391844	157,93	0,0000
Vurum süresi	0,0221415	2	0,0110707	4,46	0,0140
Vurum bek. sür.	0,258599	2	0,129299	52,11	0,0000
Elektrot çapı	0,0984525	3	0,0328175	13,23	0,0000
Hata	0,243154	98	0,00248116	-	-
<u>Düzeltilmiş top.</u>	<u>1,40603</u>	<u>107</u>			

P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95' dir.

$$SS_T = 0,783688 + 0,0221415 + 0,258599 + 0,0984525 + 0,243154 = 1,40603$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = (SS_A/SS_T) \times 100 = (0,783688/1,40603) \times 100 = \% 55,7$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = (SS_B/SS_T) \times 100 = (0,0221415/1,40603) \times 100 = \% 1,57$$

$$\text{Vurum bek. sür. yüzde katkısı} = (SS_C/SS_T) \times 100 = (0,258599/1,40603) \times 100 = \% 18,3$$

$$\text{Elektrot çapının yüzde katkısı} = (SS_D/SS_T) \times 100 = (0,0984525/1,40603) \times 100 = \% 7$$

Elektrot aşınma hızına etkiyen işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre, boşalım akımı, vurum bekleme süresi, elektrot çapı ve vurum süresidir. Vurum süresinin elektrot aşınma hızına etkisinin çok az olduğu görülmüştür.

4.7.3 İşparçası Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Çizelge 4.3 İşparçası Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Parametre	Kar. Top. (SS)	Ser. Der.(d.f)	Ort.Kar.Top.	F - oranı	P- değeri
Boşalım Akımı	36,9157	2	18,4579	93,43	0,0000
Vurum süresi	126,006	2	63,0032	318,92	0,0000
Vurum bek. sür.	3,82161	2	1,91081	9,67	0,0001
Elektrot çapı	1,82026	3	0,606752	3,07	0,0313
Hata	19,3602	98	0,197553	-	-
<u>Düzeltilmiş top.</u>	<u>187,924</u>	<u>107</u>			

P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95' dir.

$$SS_T = 36,9157 + 126,006 + 3,82161 + 1,82026 + 19,3602 = 187,924$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = (SS_A/SS_T) \times 100 = (36,9157/187,924) \times 100 = \% 19,6$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = (SS_B/SS_T) \times 100 = (126,006/187,924) \times 100 = \% 67,05$$

$$\text{Vurum bek. sür. yüzde katkısı} = (SS_C/SS_T) \times 100 = (3,82161/187,924) \times 100 = \% 2,03$$

$$\text{Elektrot çapının yüzde katkısı} = (SS_D/SS_T) \times 100 = (1,82026/187,924) \times 100 = \% 0,96$$

İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileyen işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre, vurum süresi, boşalım akımı, vurum bekleme süresi ve elektrot çapıdır. Elektrot çapının ve vurum bekleme süresinin işparçası ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkisinin çok küçük olduğu görülmüştür.

4.7.4 Elektrotların Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Çizelge 4.4 Elektrotların Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Parametre	Kar.Top.(SS)	Ser.Der.(d.f)	Ort. Kar. Top.	F - oranı	P- değeri
Boşalım Akımı	65,061	2	32,5305	183,03	0,0000
Vurum süresi	2,14153	2	1,07076	6,02	0,0034
Vurum bek. sür.	1,14956	2	0,57478	3,23	0,0436
Elektrot çapı	0,611068	3	0,203689	1,15	0,3345
Hata	17,4176	98	0,177731	-	-
<u>Düzeltilmiş top.</u>	<u>86,3808</u>	<u>107</u>			

P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95'dir.

$$SS_T = 65,061 + 2,14153 + 1,14956 + 0,611068 + 17,4176 = 86,3808$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = (SS_A/SS_T) \times 100 = (65,061/86,3808) \times 100 = \% 75,3$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = (SS_B/SS_T) \times 100 = (2,14153/86,3808) \times 100 = \% 2,47$$

$$\text{Vurum bek. sür.yüzde katkısı} = (SS_C/SS_T) \times 100 = (1,14956 /86,3808) \times 100 = \% 1,33$$

$$\text{Elektrot çapının yüzde katkısı} = (SS_D/SS_T) \times 100 = (0,611068/86,3808) \times 100 = \% 0,7$$

Elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileyen işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre, boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi ve elektrot

çapıdır. Elektrot çapının elektrotların ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkisinin çok küçük olduğu görülmüştür

4.7.5 Elektrotların Ortalama Kenar Aşınması İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Elektrotların ortalama kenar aşınması için ANOVA analizi, elektrot ortalama kenar aşınması için kullanılan Taguchi (L₁₈) ortogonal dizisi için uygulanmıştır.

Çizelge 4.5 Elektrot Ortalama Kenar Aşınması İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Parametre	Kar.Top.(SS)	Ser.Der.(d.f)	Ort. Kar. Top.	F - oranı	P- değeri
Boşalım Akımı	0,0762004	2	0,0381002	10,47	0,0045
Vurum süresi	0,0343421	2	0,0171711	4,72	0,0397
Vurum bek. Sür.	0,0443658	2	0,0221829	6,10	0,0212
Elektrot çapı	0,0663818	2	0,0331909	9,12	0,0069
Hata	0,032755	9	0,00363944	-	-
Düzeltilmiş top.	0,254045	17			

P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95'dir.

$$SS_T = 0,0762004 + 0,0343421 + 0,0443658 + 0,0663818 + 0,032755 = 0,254045$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = (SS_A/SS_T) \times 100 = (0,0762004/0,254045) \times 100 = \% 29,9$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = (SS_B/SS_T) \times 100 = (0,0343421/0,254045) \times 100 = \% 13,5$$

$$\text{Vurum bek.sür. yüzde katkısı} = (SS_C/SS_T) \times 100 = (0,0443658/0,254045) \times 100 = \% 17,4$$

$$\text{Elektrot çapının yüzde katkısı} = (SS_D/SS_T) \times 100 = (0,0663818/0,254045) \times 100 = \% 26$$

Elektrot ortalama kenar yarıçap değerine etkileyen işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına boşalım akımı, elektrot çapı, vurum bekleme süresi ve vurum süresidir. Elektrot çapının ve boşalım akımının elektrot ortalama kenar yarıçapına etkisinin fazla olduğu görülmüştür.

4.7.6 Enerji Yoğunluğu Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Bu çalışmada uygulanan işlem parametrelerinin aralığı esas alınarak enerji yoğunluğu için ANOVA analizi yapılmıştır.

Çizelge 4.6 Enerji Yoğunluğu Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Parametre	Kar.Top.(SS)	Ser.Der.(d.f)	Ort. Kar. Top.	F - oranı	P- değeri
Boşalım Akımı	8,58E15	2	4,29E15	6,56	0,0021
Vurum süresi	1,07E16	2	5,34E15	8,17	0,0005
Vurum bek. Sür.	6,79E16	2	3,40E16	51,97	0,0000
Elektrot çapı	3,98E16	3	1,33E16	20,31	0,0000
Hata	6,40E16	98	6,53E14	-	-
Düzeltilmiş top.	1,91E17	107			

P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95'dir.

$$SS_T = 8,58E15 + 1,07E16 + 6,79E16 + 3,98E16 + 6,40E16 = 1,91E17$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = (SS_A/SS_T) = (8,58E15/1,91E17) \times 100 = \% 4,49$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = (SS_B/SS_T) = (1,07E16/1,91E17) \times 100 = \% 5,60$$

$$\text{Vurum bekleme süresinin yüzde katkısı} = (SS_C/SS_T) = (6,79E16/1,91E17) \times 100 = \% 35,5$$

$$\text{Elektrot çapının yüzde katkısı} = (SS_D/SS_T) = (3,98E16 /1,91E17) \times 100 = \% 20,8$$

Enerji yoğunluğu değerine en büyük etkileri yapan işleme parametreleri sırasıyla; vurum bekleme süresi, elektrot çapı, vurum süresi ve boşalım akımıdır. Vurum bekleme süresinin enerji yoğunluğuna etkisinin çok fazla olduğu görülmüştür.

4.8 Taguchi Yöntemi

Taguchi Metodu ortogonal dizileri kullanarak kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım tekniğidir. Faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilebilmesi yani yapılan deneysel tasarımın dengeli olması istendiğinden ortogonal diziler kullanılmaktadır. Tasarımın dengeli olması içinse faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda örnekleme yapılmalıdır [65,66].

Genellikle bir ürüne etki eden çok sayıda değişken olduğundan bu değişkenlerin optimum düzeylerini bulmak oldukça zor olacaktır. Çünkü bu çok sayıda değişkenin kendi aralarında da etkileşimleri (bir değişkenin yanıt değişkenine olan etkisi, diğer bir değişkenin hangi seviyede olduğuna bağlı ise bu iki değişken arasında etkileşim vardır

denir) olacaktır ve bu da problemi daha da zorlaştıracaktır Taguchi metodu ise, üründe ve proste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prostedeki değişkenliği en aza indirmeye çalışmaktadır [66,67].

İşleme performansının çıktılarını (İİH, EAH, işparçası yüzey pürüzlülüğü ile elektrot yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması) optimize etmek için kullanılan işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu sinyal/gürültü (s/n) oranı grafikleriyle belirlenir. Taguchi Deney Tasarımı yönteminde sinyal/gürültü oranları deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlara göre hesaplanır. Taguchi yöntemine dayanarak s/n oranları, en küçük en iyi, en büyük en iyi ve nominal değer en iyi olarak kalite değerlerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanır [68].

$$\text{En Büyük En İyi} : -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^{-2}\right] \quad (4.12)$$

$$\text{En Küçük En İyi} : -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right] \quad (4.13)$$

Bu çalışmada işleme parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi ve elektrot çapı), işleme performansının çıktılarını (İİH, EAH, işparçası ve elektrot yüzey pürüzlülükleri) ve elektrotlarda oluşan ortalama kenar aşınmalarına etkilerini optimize etmek için ayrı ayrı Taguchi Yöntemi kullanılmıştır.

İşleme performansının çıktıları ve elektrotlarda oluşan ortalama kenar aşınmaları için işlem parametrelerinin optimal kombinasyonu bulunurken Taguchi (L₁₈) ortogonal dizisi kullanılmıştır. Daha sonra sinyal/gürültü değerleri hesaplanmıştır ve hesaplanan sinyal/gürültü değerleri yardımıyla sinyal/gürültü grafikleri çizilerek optimum işleme şartları elde edilmiştir. Sinyal/gürültü değerleri hesaplanırken, işparçası işleme hızı için en büyük en iyi kalite karakteristiğine göre hesap yapılırken, elektrot aşınma hızı, işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü, elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar yarıçap değerleri için ise en küçük en iyi kalite karakteristiğine göre hesap yapılmıştır.

Çizelge 4.7 İşleme Performansının Çıktıları İçin Kullanılan Taguchi (L_{18}) Ortogonal Dizisi

sinyal/gürültü (db) değerleri												
Boşalım Akımı (Amper)	Vurum süresi (μs) t_s	Vurum bekleme süresi (μs) t_p	Elektrot çapı (mm)	İşparçası İşleme Hızı	Elektrot Aşınma Hızı	İşparçası (R_a) $\dot{I}_s.R_a$	Elektrot (R_a) $E.R_a$	İliH için (s/n) değerleri	EAH için (s/n) değerleri	İşparçası (R_a) için (s/n) değerleri	Elektrot (R_a) için (s/n) değerleri	
9	10	6	12	0,0225	0,0052	3,71	2,442	-32,9563	45,67993	-11,3875	-7,75491	
9	20	300	20	0,005	0,0026	4,395	3,078	-46,0206	51,70053	-12,8592	-9,76537	
9	45	30	20	0,019	0,0016	5,402	2,262	-34,4249	55,9176	-14,6511	-7,08985	
9	20	30	12	0,0115	0,0033	4,042	2,472	-38,786	49,62972	-12,1319	-7,86097	
9	45	6	16	0,03	0,0021	5,583	1,938	-30,4576	53,55561	-14,9374	-5,74708	
9	10	300	16	0,003	0,0021	3,466	2,885	-50,4576	53,55561	-10,7966	-9,20292	
15	20	30	16	0,026	0,0077	4,954	3,879	-31,7005	42,27019	-13,8991	-11,7744	
15	45	6	12	0,074	0,0053	7,246	3,091	-22,6154	45,51448	-17,202	-9,80198	
15	10	300	12	0,0065	0,003	4,046	3,363	-43,7417	50,45757	-12,1405	-10,5345	
15	45	300	16	0,0305	0,0044	6,244	3,993	-30,314	47,13095	-15,9093	-12,026	
15	10	30	20	0,0125	0,00735	3,791	3,385	-38,0618	42,67425	-11,5751	-10,5912	
15	20	6	20	0,04	0,01085	5,298	3,695	-27,9588	39,29141	-14,4822	-11,3523	
21	45	300	20	0,039	0,01025	6,9	5,047	-28,1787	39,78552	-16,777	-14,0607	
21	10	30	16	0,0175	0,0118	4,662	3,688	-35,1392	38,56236	-13,3714	-11,3358	
21	20	6	16	0,062	0,0174	5,891	3,989	-24,1522	35,18902	-15,4038	-12,0173	
21	10	6	20	0,034	0,01555	4,993	3,803	-29,3704	36,16539	-13,9672	-11,6025	
21	20	300	12	0,0175	0,0073	5,489	4,518	-35,1392	42,73354	-14,7899	-13,0989	
21	45	30	12	0,08	0,0142	7,675	4,098	-21,9382	36,95423	-17,7016	-12,2514	

Çizelge 4.8 Kullanılan faktör (değişken) ve seviyeleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Boşalım Akım (Amper)	9	15	21
Vurum süresi (t_s) (μs)	10	20	45
Vurum bek. süresi (t_p) (μs)	6	30	300
Elektrot Çapı (mm)	12	16	20

4.9 Sinyal/Gürültü (db) Grafikleri

Taguchi yöntemine dayanarak (L_{18}) ortogonal dizileri için sinyal/gürültü (s/n) oranları deneysel sonuçlar kullanılarak en küçük en iyi ve en büyük en iyi eşitlikleri yardımıyla hesaplanmıştır ve daha sonra işleme parametrelerinin optimal kombinasyonunun belirlenebilmesi için sinyal/gürültü (s/n) grafikleri çizilmiştir.

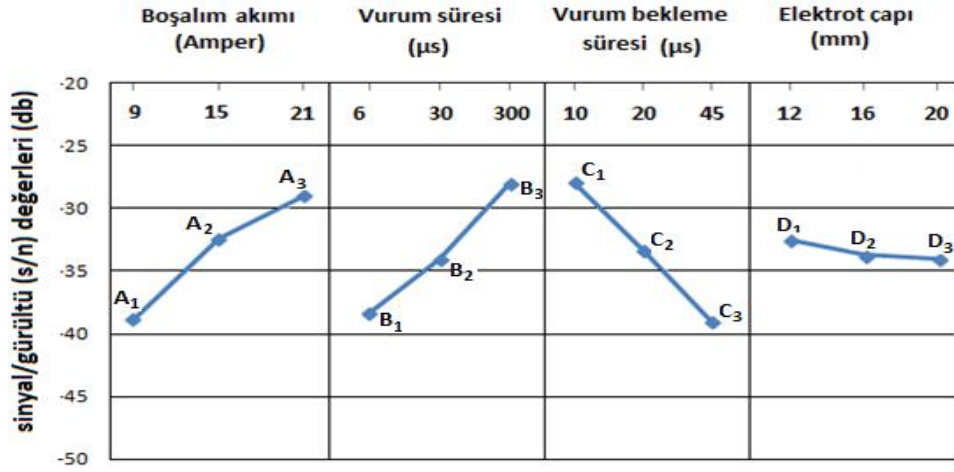
4.9.1 İşparçası İşleme Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

İşparçası işleme hızı için sinyal/gürültü (s/n) oranları en büyük en iyi eşitliğine (Eşitlik 4.12) yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere göre işparçası işleme hızı için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 4.9.1'de ki gibi çizilmiştir. Burada ki; A boşalım akımını, B; vurum süresini, C; vurum bekleme süresini ve D ise elektrot çapını temsil etmektedir.

$$A_1 = -38,8505 \text{ db} \quad B_1 = -38,2879 \text{ db} \quad C_1 = -27,9184 \text{ db} \quad D_1 = -32,5295 \text{ db}$$

$$A_2 = -32,3987 \text{ db} \quad B_2 = -33,9596 \text{ db} \quad C_2 = -33,3418 \text{ db} \quad D_2 = -33,7035 \text{ db}$$

$$A_3 = -28,9863 \text{ db} \quad B_3 = -27,9881 \text{ db} \quad C_3 = -38,9753 \text{ db} \quad D_3 = -33,0025 \text{ db}$$



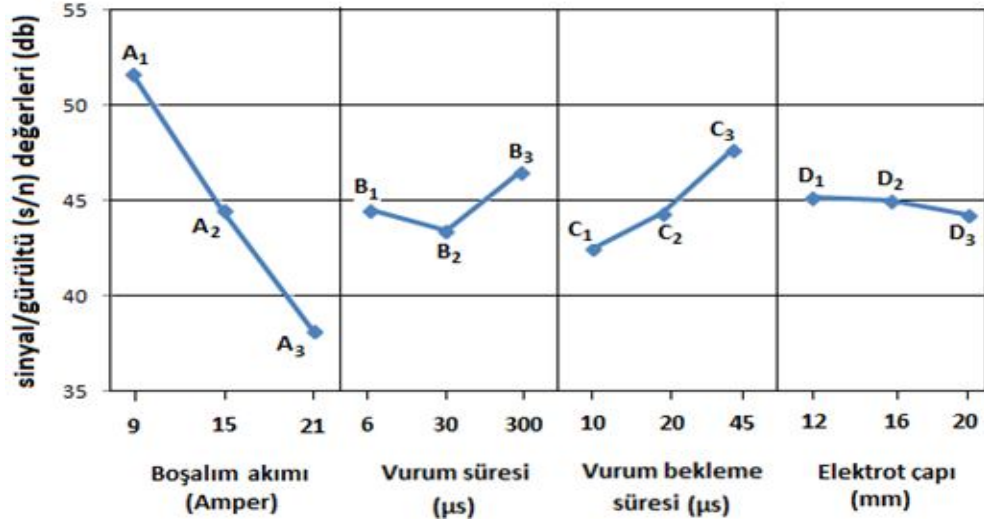
Şekil 4.9.1 İşparçası işleme hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği

İşleme parametrelerinin sinyal/gürültü (s/n) grafikleri yardımıyla optimal kombinasyonu bulunurken, her grafikteki en büyük değer seçilir. Bu bilgiye göre A₃B₃C₁D₁ kombinasyonu bizim için işparçası işleme hızının optimal işleme kombinasyonudur. A₃B₃C₁D₁ kombinasyonu (boşalım akımı 21 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s ve elektrot çapı olarak 12 mm) işleme şartına karşılık gelmektedir, bu işleme şartında yapılan deney sonucuna bakılarak, bu işleme kombinasyonunun işparçası işleme hızının en yüksek olduğu kombinasyon olduğu gözlenmiştir bu değer ise (0,1025gr/dk)'dır. Ayrıca sinyal/gürültü (s/n) grafiklerine bakılarak parametrelerin etkinlik dereceleri hakkında da yorum yapılabilmektedir. Eğer hesaplanan sinyal/gürültü değerleri arasındaki fark fazla ise yani sinyal/gürültü (s/n) grafiklerinde eğimin fazla oluşu o parametrenin daha etkili olduğunun göstergesidir. Bu bilgiye göre işparçası işleme hızı için etki oluşturan işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre, vurum bekleme süresi, vurum süresi, boşalım akımı ve elektrot çapıdır.

4.9.2 Elektrot Aşınma Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

Elektrot aşınma hızı için sinyal/gürültü (s/n) oranları en küçük en iyi eşitliği (Eşitlik 4.13) yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere göre elektrot aşınma hızı için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 4.9.2'de ki gibi çizilmiştir.

A ₁ = 51,67317 db	B ₁ = 44,51585 db	C ₁ = 42,56597 db	D ₁ = 45,16158 db
A ₂ = 44,55647 db	B ₂ = 43,46907 db	C ₂ = 44,33473 db	D ₂ = 45,04396 db
A ₃ = 38,23168 db	B ₃ = 46,4764 db	C ₃ = 47,56062 db	D ₃ = 44,25578 db



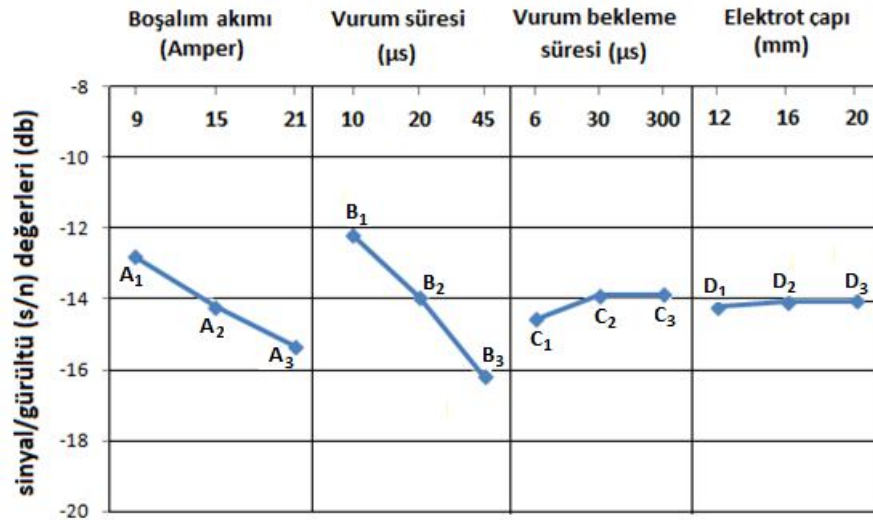
Şekil 4.9.2 Elektrot aşınma hızı için sinyal/gürültü(db) grafiği

$A_1B_3C_3D_1$ kombinasyonu bizim için elektrot aşınma hızının optimal kombinasyonudur. $A_1B_3C_3D_1$ kombinasyonu (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 45 µs, vurum bekleme süresi 300 µs ve elektrot çapı olarak 12 mm) işleme şartına karşılık gelmektedir, bu işleme şartında yapılan deney sonucuna bakılarak, bu kombinasyonun elektrot aşınma hızının en düşük olduğu işleme kombinasyonu olduğu gözlenmiştir bu değer ise (0,00085 gr/dk)'dır. Grafikler yardımıyla elektrot aşınma hızı için etki oluşturan işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre boşalım akımı, vurum bekleme süresi, vurum süresi ve elektrot çapıdır.

4.9.3 İşparçası Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü için sinyal/gürültü (s/n) oranları en küçük en iyi eşitliği (Eşitlik 4.13) yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere göre işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 4.9.3'te ki gibi çizilmiştir.

$A_1 = -12,7939$ db	$B_1 = -12,2064$ db	$C_1 = -14,5633$ db	$D_1 = -14,2256$ db
$A_2 = -14,2014$ db	$B_2 = -13,9277$ db	$C_2 = -13,8884$ db	$D_2 = -14,0529$ db
$A_3 = -15,3351$ db	$B_3 = -16,1964$ db	$C_3 = -13,8787$ db	$D_3 = -14,052$ db



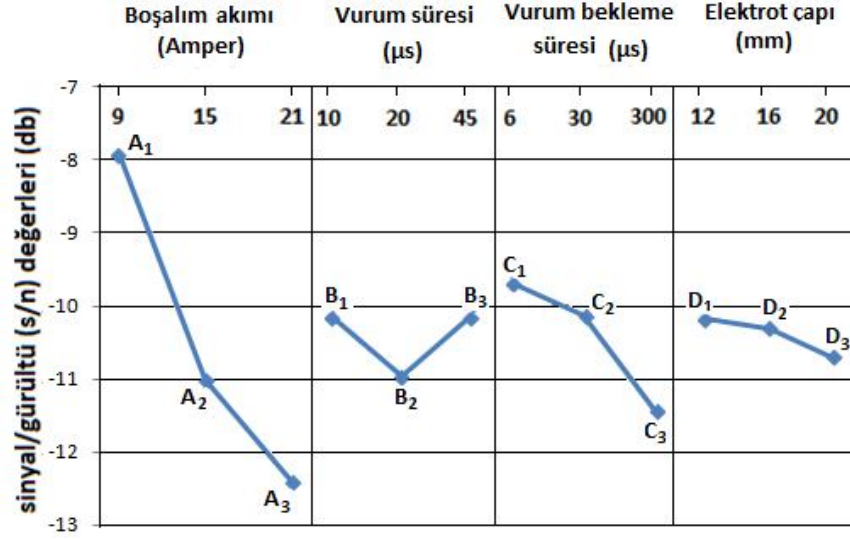
Şekil 4.9.3 İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği

$A_1B_1C_3D_3$ kombinasyonu bizim için işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü için optimal kombinasyondur. $A_1B_1C_3D_3$ kombinasyonu (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 10 μ s, vurum bekleme süresi 300 μ s ve elektrot çapı olarak 20 mm) işleme şartına karşılık gelmektedir, bu işleme şartında yapılan deney sonucuna bakılarak, bu kombinasyonun işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü için en düşük işleme kombinasyonu olduğu gözlenmiştir bu değer ise R_a (3,328 μ m)'dir. Grafikle yardımıyla işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü için etki oluşturan işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre vurum süresi, boşalım akımı, vurum bekleme süresi ve elektrot çapıdır.

4.9.4 Elektrotların Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

Elektrotların ortalama yüzey pürüzlülüğü için sinyal/gürültü (s/n) oranları en küçük en iyi eşitliği (Eşitlik 4.13) yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere göre elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğü için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 4.9.4'te ki gibi çizilmiştir.

$A_1 = -7,90352$ db	$B_1 = -10,1703$ db	$C_1 = -9,71268$ db	$D_1 = -10,2171$ db
$A_2 = -11,0134$ db	$B_2 = -10,9782$ db	$C_2 = -10,1506$ db	$D_2 = -10,3506$ db
$A_3 = -12,3944$ db	$B_3 = -10,1628$ db	$C_3 = -11,4481$ db	$D_3 = -10,7436$ db



Şekil 4.9.4 Elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğü hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği

A₁B₃C₁D₁ kombinasyonu, elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğü için optimal işleme kombinasyonudur. A₁B₃C₁D₁ kombinasyonu (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s ve elektrot çapı olarak 12 mm) işleme şartına karşılık gelmektedir, bu işleme şartında yapılan deney sonucuna bakılarak, bu kombinasyonun elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğü için en düşük işleme kombinasyonu olduğu gözlenmiştir bu değer ise R_a (1,381 μ m)'dir. Grafikle yardımıyla elektrotların ortalama yüzey pürüzlülüğü için etki oluşturan işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi ve elektrot çapıdır.

4.9.5 Elektrot Ortalama Kenar Aşınması İçin Sinyal/Gürültü Grafiği

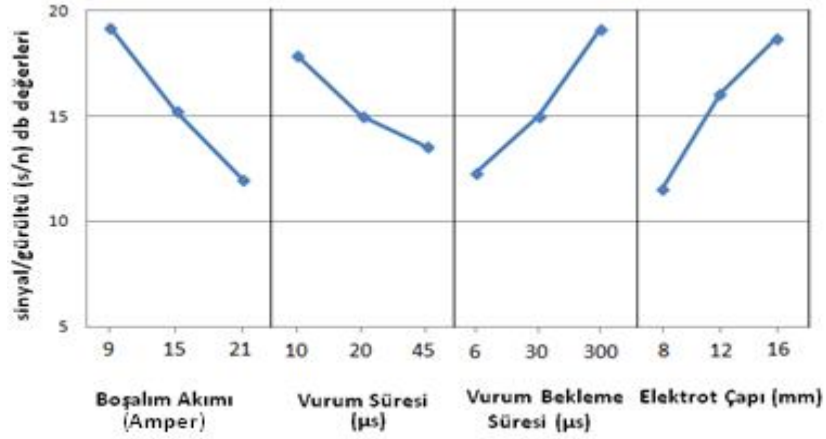
Taguchi yöntemine dayanarak (L₁₈) ortogonal dizisi için sinyal/gürültü (s/n) oranları en küçük en iyi eşitliği yardımıyla (Eşitlik 4.13) göre hesaplanmıştır ve elde edilen değerlere göre sinyal/gürültü (s/n) grafikleri çizilerek elektrot kenar yarıçapı için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu bulunmuştur.

Çizelge 4.9 Elektrot Ortalama Kenar Aşınması İçin Taguchi (L₁₈) Ortogonal Dizisi

Boşalım Akımı (Amper)	Vurum süresi t _s (μs)	Vurum bekleme süresi t _p (μs)	Elektrot çapı (mm)	Elektrot Kenar yarıçapı (mm)	sinyal/gürültü değeri (db)
9	10	6	8	0,209	13,59707
9	20	30	12	0,125	18,0618
9	45	300	16	0,065	23,74173
15	10	6	12	0,205	13,76492
15	20	30	16	0,142	16,95423
15	45	300	8	0,226	12,91783
21	10	30	8	0,3	10,45757
21	20	300	12	0,171	15,34008
21	45	6	16	0,314	10,06141
9	10	300	16	0,037	28,63597
9	20	6	8	0,225	12,95635
9	45	30	12	0,121	18,34429
15	10	30	16	0,086	21,31003
15	20	300	8	0,18	14,89455
15	45	6	12	0,261	11,66719
21	10	300	12	0,107	19,41232
21	20	6	16	0,256	11,8352
21	45	30	8	0,574	4,821762

Elektrot ortalama kenar yarıçapları için hesaplanan sinyal/gürültü (s/n) değerleri;

A ₁ = 19,22287 db	B ₁ = 17,86298 db	C ₁ = 12,31369 db	D ₁ = 11,60752 db
A ₂ = 15,25146 db	B ₂ = 15,00704 db	C ₂ = 14,99162 db	D ₂ = 16,09843 db
A ₃ = 11,98806 db	B ₃ = 13,59237 db	C ₃ = 19, 15708 db	D ₃ = 18,75643 db



Şekil 4.9.5 Elektrot ortalama kenar aşınması için sinyal/gürültü (db) grafiği

$A_1B_1C_3D_3$ kombinasyonu elektrot kenar yarıçapı için optimal işleme kombinasyonudur. $A_1B_1C_3D_3$ kombinasyonu (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 10 μs , vurum bekleme süresi 300 μs ve elektrot çapı olarak 16 mm) işleme şartına karşılık gelmektedir, bu kombinasyonun doğruluğunu test etmek için bu işleme şartına gelen elektrodun kenar yarıçap değeri profil projeksiyon cihazıyla ölçülmüştür ve bu kombinasyonun, en düşük elektrot kenar yarıçapına sahip olan işleme şartı kombinasyonu olduğu görülmüştür. Bu değer 0.037 mm olarak ölçülmüştür. Grafikle yardımıyla elektrotların kenar aşınması (kenar yarıçapı) için etki oluşturan yapan işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre boşalım akımı, elektrot çapı, vurum bekleme süresi ve vurum süresidir.

ANOVA analiziyle elde edilen işleme parametrelerin önem sırasıyla, sinyal/gürültü (db) grafiklerinin yardımıyla belirlenen önem sıraları birbiriyle örtüşmelidir. Deneylerde işleme parametrelerin seviyeleri 3 alınırken yani her parametre 3 kez değişirken, elektrot çapları 4 kez (8, 12, 16 ve 20 mm) değişmektedir. Taguchi deneysel tasarımında kullanılan (L_{18}) ortogonal dizisinde elektrot çapları için de seviyenin 3 olması gerekmektedir. Bu yüzden 12, 16 ve 20 mm çaplı elektrotlar göz önüne tutularak işleme devam edilmiştir. Ama elektrot ortalama kenar aşınması için yapılan deneysel sonuçlara göre 20 mm çaplı elektrotlarda gerçekleşen ortalama kenar aşınma değerleri, diğer elektrotlardan daha az olduğu görülmüştür. Bu nedenle elektrot ortalama kenar aşınması için kullanılan Taguchi (L_{18}) ortogonal dizisinde 8, 12 ve 16 mm çaplı elektrotlar göz önünde alınmıştır. Bu yüzden bazı işleme parametrelerinin etkinlik derecelerinde, ANOVA analizi ve sinyal/gürültü (db) grafiklerinin yardımıyla belirlenen önem sıralarında bazı farklılıklar olmuştur.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada TS EN X155CrVMo12 DIN 1.2379, soğuk iş takım çeliğinin elektroerozyonla işlenmesi sırasında işleme parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi), ve elektrot çapının işleme performansının çıktıları (işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), işparçası ile elektrot yüzey pürüzlülükleri ve elektrot kenar aşınması) üzerine etkileri incelenmiştir. Elektroerozyonla işleme yönteminde yeni bir parametre olarak da enerji yoğunluğunun etkisi incelenerek, enerji yoğunluğundaki değişimin, işparçası işleme hızı, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması üzerine etkisi incelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), işparçası ile elektrot yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması değerlerinin boşalım akımının artmasıyla birlikte artış gösterdiği, İİH, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması değerlerinin vurum süresinin artmasıyla birlikte artış gösterdiği gözlenmiştir. Elektrot aşınma hızı ise genel olarak boşalım akımının 9 A ve 15 A olduğu deney şartlarında vurum süresinin artmasıyla birlikte azalırken, boşalım akımının 21 A ve vurum bekleme süresinin (30, 300 μ s) olduğu deney şartlarında ise vurum süresinin artmasıyla artış göstermiştir. Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin az olduğu görülmüştür. İİH, EAH ve elektrot kenar aşınması değerlerinin vurum bekleme süresi arttıkça azaldığı gözlenmiştir, vurum bekleme süresinin işparçası ve elektrot yüzey pürüzlülükleri değerleri üzerine etkisinin az olduğu görülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmalarda, enerji yoğunluğunla işparçası işleme hızı (İİH), işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ve elektrot kenar aşınması arasında açık bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Enerji yoğunluğundaki artışla birlikte İşparçası işleme hızı (İİH), işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınması değerinin arttığı görülmüştür. İşparçası işleme hızı ve enerji yoğunluğu arasındaki en iyi yaklaşım 3. dereceden polinom şeklinde olurken, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrot kenar aşınmasının enerji yoğunluğu arasındaki en iyi yaklaşım üstel fonksiyon şeklinde olmuştur.

Elde edilen deneysel veriler kullanılarak Taguchi Deneysel tasarımı uygulanmıştır, (L_{18}) ortogonal dizileri kullanılarak sinyal/gürültü (s/n) oranları hesaplanmış ve sonuçlar optimize edilmiştir. İşparçası işleme hızı için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu (boşalım akımı 21 A, vurum süresi (t_s) 45 μ s, vurum bekleme süresi (t_p) 6 μ s ve elektrot çapı olarak 12 mm), elektrot aşınma hızı için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 300 μ s ve elektrot çapı olarak 12 mm), işparçası yüzey pürüzlülüğü için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 10 μ s, vurum bekleme süresi 300 μ s ve elektrot çapı olarak 20 mm), elektrot yüzey pürüzlülüğü için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 45 μ s, vurum bekleme süresi 6 μ s ve elektrot çapı olarak 12 mm) olarak elde edilmiştir. Elektrot kenar aşınmaları için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu ise (boşalım akımı 9 A, vurum süresi 10 μ s, vurum bekleme süresi 300 μ s ve elektrot çapı olarak 16 mm) olarak bulunmuştur.

Ayrıca ANOVA Analizi uygulanarak işleme parametrelerin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi) işleme performansının çıktıları (İİH, EAH, elektrot kenar aşınması, işparçası yüzey pürüzlülüğü ile elektrot yüzey pürüzlülükleri) üzerine etki yüzdeleri hesaplanmıştır.

İşparçası işleme hızına etki eden parametreler büyük etkiden küçüğe doğru sırasıyla; vurum bekleme süresi (%29,6), vurum süresi (%29), boşalım akımı (%22,4) ve elektrot çaplarıdır (%1,1). Elektrot çapının işparçası işleme hızına etkisinin çok küçük olduğu görülmüştür. Elektrot aşınma hızına etki eden parametreler büyük etkiden küçüğe

doğru sırasıyla; boşalım akımı (%55,7), vurum bekleme süresi (%18,7), elektrot çapı (%7) ve vurum süresidir (1,57). Vurum süresinin elektrot aşınma hızına etkisinin çok az olduğu görölmüştür. İşparçası ortalama yüzey pürüzlölük değerine etki eden parametreler büyük etkiden küçüğe doğru sırasıyla; vurum süresi (67,05), boşalım akımı (19,6), vurum bekleme süresi (%2,03) ve elektrot çaplarıdır (%0,96). Elektrot çapının ve vurum bekleme süresinin işparçası ortalama yüzey pürüzlölük değerine etkisinin çok küçük olduğu görölmüştür. Elektrot ortalama yüzey pürüzlölük değerine etki eden parametreler büyük etkiden küçüğe doğru sırasıyla; boşalım akımı (%75,3), vurum süresi (2,47), vurum bekleme süresi (%1,33) ve elektrot çaplarıdır (%0,7). Elektrot çapının elektrotların ortalama yüzey pürüzlölük değerine etkisinin çok küçük olduğu görölmüştür. Elektrot kenar aşınması değerine etki eden parametreler büyük etkiden küçüğe doğru sırasıyla, boşalım akımı (%29,9), elektrot çapı (%26,1), vurum bekleme süresi (%17,4) ve vurum süresidir (%13,5).

KAYNAKLAR

- [1] Erden, A., (2000). Alışılmamış İmalat Yöntemleri Atılım Üniversitesi Mekatronik/Üretim Mühendisliği Bölümü Ders Notları, Ankara
- [2] Ho, K.H. ve Newman S.T.,(2003). "State of Art Electrical Discharge Machining (EDM)", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43: 1287–1300
- [3] Drozda, J.T. ve Wick C., (1983). Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Society Of Manufacturing Engineers 1: 14-43-14-57 Michigan
- [4] Dursun, K., (2007). Elektro-erozyon İle İşlemede Tel Demeti Elektrodun Performansının Deneysel ve Teorik İncelenmesi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [5] Ertürk, C., (2004). Elektro-erozyonla Kalıpların İşlenmesinde Yöntem Parametrelerinin Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [6] Puertas, I. ve Luis, C.J.,(2003). "A Study on the Machining Parameters Optimisation of Electrical Discharge Machining" Journal of Materials Processing Technology 143-144, 521-526
- [7] Mc Geough, J.A., (1988). Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London New York, 128-147.
- [8] Abdel, H. ve El-Hofy, G.,(2005). Advanced Machining Processes (Nontraditional and hybrid machining processes" 115-127 McGraw -HILL Mechanical Engineering Series NEWYORK
- [9] Lee, S.H. ve Li, X.P., (2001). "Study of the Effect of Machining Parameters on the Machining Characteristics In Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide" Journal of Materials Processing Technology 115: 344-358
- [10] Srivastava, V. ve Pandey, P.M., (2012) "Effect of Process Parameters on the Performance of EDM Process With Ultrasonic Assisted Cryogenically Cooled Electrode "Journal of Manufacturing Processes 14: 393-402
- [11] Kuppan, P., Rajadurai A., ve Narayanan S., (2008). "Influence of EDM Process Parameters In Deep Hole Drilling of Inconel 718" The International Journal of Advanced Manufacturing 38:74-84

- [12] Ferreira, J.C., (2007). "A Study of Diehelical Thread Cavity Surface Finish Made by Cu – W Electrodes With Planetary EDM" *The International Journal of Advanced Manufacturing* 34: 1120 – 1132
- [13] Senthilkumar, V. ve Omprakash B., U (2011). "Effect of Titanium Carbide Particle Addition in the Aluminium Composite on EDM Process Parameters" *Journal of Manufacturing Processes* 13 (1) : 60-66
- [14] Joshi, S.N. ve Pande, S.S. (2009). "Development of an Intelligent Process Model for EDM" *Int J Manuf Technol* 45 : 300-317
- [15] Lin, Y.C. ve Lee, H.S.,(2008). "Machining Characteristics of Magnetic Force - Assisted EDM" *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 : 1179-1186
- [16] Zhang, Y., Liu, Y., Ji, R., Cai, B. ve Shen Y.,(2013). "Sinking EDM in Water-in-oil Emulsion" *The International Journal of Advanced Manufturing Technology* 65 (5-8): 705-716
- [17] Jahan, M.P., Wong, Y.S., ve Rahman, M.,(2009). "A study on the Quality Micro-Hole Machining of Tungsten Carbide by Micro-EDM Processusing Transistor and RC-Type Pulse Generator" *Journal of Materials Processing Technology* 209 (4): 1706-1716
- [18] Chen, S. L., Lin, M. H., Hsieh, S. F., ve Chiou, S.Y., (2008). "The Characteristics of Cutting Pipe Mechanism With Multi-Electrodes in EDM" *Journal Of Materials Processing Technology* 203:461-464
- [19] Chen, Y. ve Mahdivian, S.M., (2000). "Analysis of Electro-Discharge Machining Process and its Comparison with Experiments" *Journal of Materials Processing Technology* 104: 150-157
- [20] Sohani, M. S., Gaitonde, V. N., Siddeswarappa, B. ve Deshpande, A. S., (2009). "Investigations Into the Effect of Tool Shapes With Size Factor Consideration in Sink Electrical Disharge Machining (EDM) Process" *Int J Adv Manuf Technol* 45: 1131-1145
- [21] Ergün, Z.E. ve Çoğun, C. (2006). "Elektro erozyon ile işleme (EEİ) işparçası yüzey karakteristiklerinin deneysel incelenmesi" *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 21 (3): 427-441
- [22] Özgedik, A. ve Çoğun, C. (2011). "Elektro-Erozyon ile işlemede işleme haznesine uygulanan titreşimlerin işleme performansının çıktılarına etkileri" *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 8 (3):13 – 25
- [23] Lee, H. T., Hsu, F. C., ve Tai, T. Y., (2004). "Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode" *Materials Science and Engineering* 364 (1): 346-356
- [24] Özgedik, A. ve Çoğun, C., (2006). "An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining" *Int J Adv Manuf Technol* 27: 488-500
- [25] Chen, Y. ve Mahdavian, S. M. (1999). "Parametric study into erosion wear in a computer numerical controlled electro-disharge machining process" *Wear* 236: 350-354

- [26] Yan, B. H., Tsai, H. C. ve Huagh, F. Y., (2005). "The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium" *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45: 194-200
- [27] Amorim, F.L. ve Weingaertner, W. L. (2005). "The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of a tool steel" *Journal of Materials Processing Technology* 166: 411-416
- [28] Kansal, H. K., Singh, S., ve Kumar, P., (2007). "Effect of silicon powder mixed EDM on machining rate of AISI D2 die steel" *Journal of Manufacturing Processes* 9(1): 13-22
- [29] Kiyak, M. ve Çakır, O.,(2007). "Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel" *Journal of Materials Processing Technology* 191: 141-144
- [30] Guu, Y. H. ve Hou, M.T-K, (2007). "Effect of machining parameters on surface textures in EDM of Fe-Mn-Al alloy" *Materials Science and Engineering* 466 (1-2): 61-67
- [31] Lee, H. T. ve Tai, T. Y. (2003). "Relationship between EDM parameters and surface crack formation" *Journal of Materials Processing Technology* 142: 676-683
- [32] Çoğun, C., Kocabaş, B. ve Özgedik, A.(2004). "Elektro erozyon ile işlemede (EEİ) işparçası yüzey pürüzlülük profilinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi" *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 19 (1) : 97-106,
- [33] Salman Ö.,(2005). Dalma erozyon işlemlerinde yüzey pürüzlülük parametrelerinin genetik programlama ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [34] Salman, Ö. ve Kayacan, M. C. (2006) "Sertleştirilmiş toz metal malzemenin EDM ile işlenmesiyle oluşan yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi" *Mühendis ve Makine Cilt: 47 (560) : 16-22*
- [35] Çoğun, C. ve Akaslan, Ş. (2002). "The effect of machining parameters on tool electrode edge wear and machining performance in electric discharge machining (EDM)" *KSME International Journal*, 16 (1) : 46 – 59
- [36] Poyrazoglu, O. (1994). *Elektro erozyon - EDM Tekniği*, Tekev Yayınları, Ankara.
- [37] Furkan Mühendislik (2000), *Furkan Elektro Erozyon Tezgâhları Temel Bilgiler Kılavuzu*, Furkan Mühendislik, Ankara
- [38] Abbas, N. M., Solomon, D. G. ve Bahari., M., F. (2007). "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)" *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47:1214 – 1228
- [39] Özgedik, A., (2009). *Elektroerozyon ile İşlemede İşparçasına Uygulanan Titreşimlerin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [40] Lin, J.L., Wang, K.S., Yan, B.H. ve 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: 48–55

- [41] Jain, V.K., (2009). Advanced (Non-traditional) Machining Processes, Allied Publisher, Mumbai, India
- [42] Anıl, D., (2006). Elektroerozyon ile işlemede stereolitografi tekniği yardımıyla hızlı elektrot üretimi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- [43] Schumacher, B. M.,(2004).“After 60 years of EDM the discharge process remains stil disputed”, Journal of Materials ProcessingTechnology 149:376-381
- [44] DiBitonto, D.D., Eubank, P. T. ve Barrufet, M.A., (1989) “Theoretical models of the electrical disharge machining process. I. A simple cathode erosion model”, Journal of Applied Physics, 66 (9) : 4095 – 4103
- [45] CIRP Edition (1986), CIRP UNIFIED TERMINOLOGY,
- [46] Çoğun, C., Erden, A., (1986) “Elektro erozyon ile işleme (EDM) performansının bilgisayarlı denetiminin gerçekleştirilmesi”, 2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 17–19: 105–112
- [47] Krar, S.F., Oswald, J.W. ve Amand, J.E.St (1976)., Technology of machine tools second editon McGraw-Hill Ryerson Toronto, Canada, 444-447
- [48] Kao, C.C., Tao, J., ve Shih, A. J. (2007). “Near dry electrical disharge machining” International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 : 2273 – 2281
- [49] Leao, F.N., ve Pashby, I.R., (2004).“ A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical disharge machining” Journal of Materials Processing Technology 149: 341 – 346
- [50] Yunus, S.S.B.M., (2008). Effects of flushing on electro-disharge machined surface Thesis (Undergraduates Project Report) Faculty of Mechanical Engineering Universiti Malaysia Pahang
- [51] Erden, A., Temel, D., (1978).“Investigation on the use of water as a dielectric liquid in E.D.M.”,METU, Ankara, Türkiye, 437–440
- [52] Wong, Y.S., Lim, L.C. ve Lee, L.C.,(1995).“Effects of flushing on electro–discharge machined surfaces”, Journal of Materials Processing Technology, 48: 295–306
- [53] König, W. ve Jörres, L, (1987). “Aqueous solutions of organic compounds as dielectrics for EDM sinking”, Annals of the CIRP, 36 (1): 105–109
- [54] Vishwakarma, M., Parashar V. ve Khare V.K., (2012).“Advancement in Electric Disharge Machining on metal matrix composite materials in recent : A review”, International Journal of Scientific and Research Publications 2 (3),
- [55] Chow, H.M., Yang, L.D., Lin, C.T. ve Chen, Y.F., (2008).“ The use of SiC powder in water as dielectric for micro-slit EDM machining”, Journal of Materials Processing Technology 195:160-170
- [56] Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K.P ve Schumacher, B.M (2005) “ Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process” Annals of the CIRP, 54(2):599-622
- [57] Özgedik, A., ve Çoğun, C, (2003).“Elektro Erozyon İle İşlemede Elektrot Ön Yüzey Aşınmasının Deneysel İncelenmesi” Mühendis ve Makine 44 (521) :21-28

- [58] Yan, B.H. ve Wang, C.C., (1999). "The machining characteristics of $Al_2O_3/6061Al$ composite using rotary electro-discharge machining with a tube electrode", *Journal of Materials Processing Technology*, 95: 222–231
- [59] Patel, M.R., Barrufet, M.A., Eubank, P.T. ve DiBitonto, D.D., (1989). "Theoretical models of the electrical discharge emachining process. II. The anode erosion model", *Journal of Applied Physics*, 66 (9): 4104–4111
- [60] Şahin, Y., (2001). Talaş Kaldırma Prensipleri, Cilt 1-Cilt 2 I. Basım, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara
- [61] Türkdemir., K., (2001). Teknik Resim I, Bilal Ofset, Denizli
- [62] Jose, Marafona, J., Wykes, C., (2000). "A new method of optimising material removal rate using EDM with copper-tungsten electrodes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40 (2): 153-164
- [63] Ajan (2004), EDM Elektro Erozyon Makinası Kullanma Kılavuzu, İzmir
- [64] Narender, P.S, Raghukandan., K ve Pai B.C., (2004) " Optimization by Grey analysis of EDM parameters on machining AL-10% SiCp composites", *Journal of Materials Processing Technology* 155-156:1658-1661
- [65] Taylan, D., (2009). Taguchi deney tasarımı uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- [66] Canıyılmaz, E. ve Kutay, F., (2003). "Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım"., *Gazi Üniversitesi, Müh.Mim.Fak.Dergisi*, 18 (3):51-63,
- [67] Şirvancı, M., (1997). Kalite için deney tasarımı, Literatür yayınları, İstanbul
- [68] Lin, Y.C., Chen, Y.F., Wang. D.A. ve Lee, H.S., (2009). "Optimization of machining parameters in magnetic force assisted EDM based on Taguchi method " *Journal of Materials ProcessingTechnology* 209:3374-3383
- [69] Mohri, N., Suzuki, M., Furuya, M. ve Saito, N., (1995). "Electrode wear process in Electrical Discharge Machining" *Annals of the CIRP*, 44(1):165-168

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şükrü KOCABAŞ
Doğum yeri : Gölcük/ KOCAELİ
Doğum tarihi : 03.06.1988
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : kocabassukru@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	İhsaniye Lisesi (Y.D.A)	2006