



T.C.

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

**BOR ALAŞIMLI ÇELİKLERİN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ**

İbrahim Baki ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR / 2020



T.C.

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

**BOR ALAŞIMLI ÇELİKLERİN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ**

İbrahim Baki ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Levent URTEKİN

II. DANIŞMAN

Öğr. Gör. Dr. Asım GENÇ

KIRŞEHİR / 2020

TEZ BİLDİRİMİ

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

İbrahim Baki ŞAHİN



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



ÖNSÖZ

Yüksek Lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sabır ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim adamının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Doç. Dr. Levent URTEKİN'e büyük bir içtenlikle teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında tezin şekillenmesinde ve nihai hale gelmesinde katkıları olan değerli hocalarım Prof.Dr.Uğur KÖKLÜ, Doç. Dr. Hacı Bekir ÖZERKAN ve Öğr. Gör. Dr. Asım GENÇ'e teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Tezimi, ailem başta olmak üzere özellikle annem Ayten ŞAHİN'e ithaf ederim.

Aralık, 2020

İbrahim Baki ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	i
ÇİZELGE LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
BÖLÜM 3.....	7
3.1. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ) TEKNOLOJİSİ	7
3.2. ELEKTRO EROZYON ÇALIŞMA SİSTEMİ	7
3.3. ELEKTRO EROZYONUN SINIFLANDIRILMASI.....	11
3.3.1. Dalma Erozyonu	11
3.3.1.1. Dalma Erozyonunun Avantajları	11

3.3.1.2. Dalma Erozyonunun Dezavantajları.....	11
3.3.2. Tel Erozyon	12
3.3.3. Delik Delme.....	12
3.4. ELEKTRO EROZYON İŞLEM PARAMETRELERİ	13
3.4.1. İşleme parametrelerinin seçimi;.....	13
3.4.2. Elektroerozyon ile İşlemenin Temel Parametreleri	13
3.4.2.1. Elektriksel Parametreler.....	14
3.4.2.2. EEİ yönteminin elektriksel parametreleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.....	14
3.4.2.3. Elektriksel Olmayan Parametreler	15
3.4.2.4. Dielektrik sıvı parametreleri	15
3.4.2.5. Dielektrik sıvı ve uygulama yöntemleri	17
3.4.2.6. Dielektrik sıvı ve çeşitleri.....	17
3.4.2.6. Dielektrik Sıvı Karşılaştırılması	19
BÖLÜM 4.....	20
4.1. ELEKTRO EROZYON PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ	20
4.1.1. İş Parçası İşleme Hızı	20
4.1.2. Elektrot Aşınma Hızı	20
4.1.3. Aşınma Oranı.....	21
4.1.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü	21
BÖLÜM 5.....	22
MATERYAL (MALZEME) VE METOT	22
5.1. EEİ Tezgâhı.....	22
5.3. Elektrot	24
5.4.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı	25

5.5.1. Yüzey Pürüzlülük (Ra) Değerlerinin Tespiti	25
5.7. Sertlik ölçüm cihazı	28
5.8. Malzeme Seçimi	29
BÖLÜM 6.....	30
DENEY TASARIMI VE ANALİZİ.....	30
6.2. Deneysel Çalışma	31
6.2.1. İşleme Parametreleri	31
6.2.2. Deneyler Esnasında Yapılan Ölçümler	32
6.2.2.1. İş parçası ilk ve son ağırlıkları:	32
6.2.2.2. İşleme süresi:	32
6.2.2.3. Elektrot ilk ve son ağırlıkları:	32
BÖLÜM 7.....	33
DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR	33
7.1. Deney Sonuçları.....	33
7.3. Bulgular	36
7.3.1. İşleme Parametrelerinin İş parçası İşleme Hızına (İİH) Etkisi	37
7.3.2. İşleme Parametrelerinin Elektrot Aşınma Hızına (EAH) Etkisi	39
7.3.3. İşleme Parametrelerinin İş parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	42
7.3.4. İşleme Parametrelerinin Bağlı Aşınma (BA), (%) Etkisi	44
7.4 Bor Alaşımlı Çeliğin Yüzeylerinin SEM İncelemesi	46
7.5. Bor Alaşımlı Çeliğin Malzeme Yüzeylerinin Yüzey Topografya İncelemesi.....	49
BÖLÜM 8.....	51

DENEY SONUÇLARININ İSTATİKSEL ANALİZİ VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	51
8.1. Taguchi Yöntemi.....	51
8.1.1. Sinyal/Gürültü (db) Grafikleri.....	54
8.1.2. İş parçası İşleme Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)	54
8.1.3. Elektrot Aşınma Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db).....	56
8.2. Değişkenlerin Analizi (ANOVA).....	59
8.2.1. İş parçası İşleme Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları	60
8.2.2. Elektrot Aşınma Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları	61
8.2.3. İş parçası Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları....	62
SONUÇ.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	68

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Cizelge Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 3.1 Erozyon sıvıları ile diğer kullanılan sıvıları karşılaştırması	19
Çizelge 5.1 Elektro Erozyon Tezgâhının Genel Özellikleri	23
Çizelge 5.2 Elektrot malzemesinin bazı fiziksel özellikleri	24
Çizelge 5.3 Zygo Zegage Plus interferometrik objektifler ve özellikleri.....	29
Çizelge 5.4 İş Parçası Malzemesinin ağırlık oranına göre element dağılımı	29
Çizelge 6.1 Deney Tasarımı gösterimi.....	30
Çizelge 6.2 Deneylerde Kullanılan İşleme Parametreleri	31
Çizelge 7.1 Deney çıktıları.....	33
Çizelge 7.2 Deney sonuçları	33
Çizelge 7.3 Sertlik sonuçları	36
Çizelge 8.1 İşleme Performansının Çıktıları İçin Kullanılan Taguchi (L ₂₇) Ortogonal Dizisi Sinyal/gürültü (dp) değerleri	54
Çizelge 8.2 Kullanılan faktör (değişken) ve seviyeleri	55
Çizelge 8.3 İş parçası işleme Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları	61
Çizelge 8.4 Elektrot Aşınma Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	62
Çizelge 8.5 İş parçası Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin ANOVA Analizi Sonuçları	63

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1	Elektro erozyon işleme yönteminin şematik gösterimi.....8
Şekil 3.2	EEİ yönteminin fiziksel prensibi9
Şekil 3.3	Plazma kanalı10
Şekil 3.4	Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri14
Şekil 3.5	Dielektrik sıvının genel özellikleri.....15
Şekil 3.6	Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri19
Şekil 5.1	Deneylerde kullanılan EEİ tezgâhı22
Şekil 5.2	Elektrot görünümü.....24
Şekil 5.3	Mitutoyo SJ 210 yüzey pürüzlülük ölçme cihazı.....25
Şekil 5.4	Yüzey pürüzlülüğü ölçme probu ve iğnesi26
Şekil 5.5	Yüzey pürüzlülüğü ölçme yapılış gösterimi.....26
Şekil 5.6	Zygo Zegage Optik Profilometre27
Şekil 5.7	Sertlik ölçüm gösterimi ve Rockwell sertlik ölçme metoduna göre seçilmesi gereken yükler ve uçlar.....28
Şekil 5.8	Numunelerin sertlik ölçüm yapılışı.....28
Şekil 5.9	İş parçası XRD analizi29

Şekil 7.1	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi ($T_{off}=6 \mu s$)37
Şekil 7.2	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na ($T_{off}=24 \mu s$).....37
Şekil 7.3	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'na etkisi ($T_{off}=48 \mu s$)38
Şekil 7.4	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi ($T_{off}=6 \mu s$)39
Şekil 7.5	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi ($T_{off}= 24 \mu s$)40
Şekil 7.6	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi ($T_{off}=48 \mu s$)41
Şekil 7.7	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi ($T_{off}=6 \mu s$)42
Şekil 7.8	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi ($T_{off}=24 \mu s$)43
Şekil 7.9	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi ($T_{off}= 48 \mu s$).....43
Şekil 7.10	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin Bağlı Aşınma etkisi ($T_{off}=6 \mu s$)45
Şekil 7.11	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin Bağlı Aşınma etkisi ($T_{off}=24 \mu s$)45
Şekil 7.12	Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin Bağlı Aşınma etkisi ($T_{off}=48 \mu s$)46
Şekil 7.13	2'nolu numune; akım:6A Vurum süresi T_{on} :50 Vurum Bekleme süresi (T_{off}):6 İİH:34,9(gr/dak), EAH:1,29(gr/dak), R_a :0.010(μm)46

Şekil 7.14	5'nolu numune; akım:6A Vurum süresi $T_{on}:100$ $T_{off}:24$ İİH:36,5(gr/dak), EAH:0,67(gr/dak), $R_a:0.012(\mu m)$47
Şekil 7.15	12'nolu numune; akım:12A Vurum süresi $T_{on}:50$ $T_{off}:6$ İİH:82,2(gr/dak), EAH:9,26(gr/dak), $R_a:0.019(\mu m)$47
Şekil 7.16	15'nolu numune; akım:12A Vurum süresi $T_{on}:100$ $T_{off}:24$ İİH:139,4(gr/dak), EAH:7.08(gr/dak), $R_a:0.037 (\mu m)$47
Şekil 7.17	16'nolu numune; akım:12A Vurum süresi $T_{on}:200$ $T_{off}:48$ İİH:273(gr/dak), EAH:27.07(gr/dak), $R_a:0.052 (\mu m)$48
Şekil 7.18	20'nolu numune; akım:24A Vurum süresi $T_{on}:50 \mu s$ $T_{off}:6 \mu s$ İİH:230(gr/dak), EAH:20(gr/dak), $R_a:0.227 (\mu m)$48
Şekil 7.19	23'nolu numune; akım:24A Vurum süresi $T_{on}:100 \mu s$ $T_{off}:24 \mu s$ İİH:247,2(gr/dak), EAH:50(gr/dak), $R_a:0.36 (\mu m)$48
Şekil 7.20	2'nolu numune yüzey topografya görüntüsü; akım:6A Vurum süresi $T_{on}:50$ $T_{off}:6$ İİH:34,9(gr/dak), EAH:1,29(gr/dak), $R_a:0.010(\mu m)$49
Şekil 7.21	5'nolu numune yüzey topografya görüntüsü; akım:6A Vurum süresi $T_{on}:100$ $T_{off}:24$ İİH:36.5(gr/dak), EAH:0,67(gr/dak), $R_a:0.012(\mu m)$49
Şekil 7.22	12'nolu numune topografya görüntüsü; akım:12A Vurum süresi $T_{on}:50$ $T_{off}:6$ İİH:82,2(gr/dak), EAH:9,26(gr/dak), $R_a:0.019(\mu m)$49
Şekil 7.23	15'nolu numune topografya görüntüsü; akım:12A Vurum süresi $T_{on}:100$ $T_{off}:24$ İİH:139,4(gr/dak), EAH:7.08(gr/dak), $R_a:0.037$ (μm)50
Şekil 7.24	20'nolu numune yüzey topografya görüntüsü; akım:24A Vurum süresi $T_{on}:50 \mu s$ $T_{off}:6 \mu s$ İİH:230(gr/dak), EAH:20(gr/dak), $R_a:0.227 (\mu m)$50

Şekil 7.25	23'nolu numune yüzey topografya görüntüsü; akım:24A Vurum süresi $T_{on}:100\ \mu s$ $T_{off}:24\ \mu s$ İİH:247,2(gr/dak), EAH:50(gr/dak), $R_a:0.36\ (\mu m)$50
Şekil 8.1	İİH için S/N oranı ortalamaları grafiği.....55
Şekil 8.2	İş parçası işleme hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği55
Şekil 8.3	Elektrot aşınma hızı için oranı ortalamaları grafiği56
Şekil 8.4	Elektrot aşınma hızı için sinyal/gürültü(db) grafiği.....57
Şekil 8.5	İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü hızı için oranı ortalamaları grafiği.....58
Şekil 8.6	İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği.....58

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler Açıklama

I	Boşalım akımı, A
P	Elektrolit püskürtme basıncı, Bar
R_a	İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü, μm
T_{on}	Vurum süresi, μs
T_{off}	Bekleme süresi, μs

Kısaltmalar Açıklama

BA	Bağıl aşınma, %
EAH	Elektrot Aşınma Hızı, mm^3/dak
EEİ	Elektro Erozyon ile İşleme
İİH	İş parçası İşleme Hızı, mm^3/dak

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bor Alaşımlı Çeliklerin Elektro Erozyon ile İşleme Performansının Belirlenmesi

İbrahim Baki ŞAHİN

**Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İleri Teknolojiler Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Levent URTEKİN

II. Danışman: Öğr. Gör. Dr. Asım GENÇ

Bu çalışmada, Bor Alaşımlı Çeliğin elektro erozyon ile işleme yöntemiyle işlenebilirliği araştırılmıştır. EEİ deneylerinde takım malzemesi olarak bakır elektrot kullanılmış olup, dielektrik sıvısı olarak standart dielektrik sıvısı tercih edilmiştir. Deneyler sırasında üç farklı parametre değişken olarak seçilmiş olup, bu parametreler; boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresidir. İşleme parametrelerinin iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) olan etkileri incelenmiştir. Taguchi'nin tam faktöriyel dizisi uygulanarak deneyler yapılmıştır. Taguchi Tam Faktöriyel Metodolojisi'ne göre işleme parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğü boşalım akımının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Vurum süresinin artması ile İİH ve EAH değerleri artarken, elektrot aşınmasının azaldığı tespit edilmiştir. Her bir işleme seviyesi için ideal işleme parametrelerinin farklı seviyelerde olduğu belirlenmiştir. İş parçası işleme hızı için ideal işleme parametreleri, akım, vurum süresi ve vurum bekleme süresi için sırasıyla 12 A, 100 μ s ve 50 μ s olarak

bulunmuştur. EAH için ideal işleme parametreleri, akım için 24 A, vurum süresi için 100 μ s, vurum bekleme süresi için ise 6 μ s olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için ideal işleme parametreleri, akım, vurum süresi ve vurum bekleme süresi için sırasıyla 12 A, 50 μ s ve 24 μ s olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; İş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), İş parçası yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımının artmasıyla birlikte artış gösterdiği, İİH, İş parçası yüzey pürüzlülüğü değerlerinin vurum süresinin artmasıyla birlikte artış gösterdiği gözlenmiştir.

Aralık 2020, 68 sayfa

Anahtar Sözcükler: elektro erozyon ile işleme, bor alaşımlı çelik, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

Determination of Electrical Discharge Machining Performance of Boron Alloy Steels

İbrahim Baki ŞAHİN

**Kırsehir Ahi Evran University
Graduate School of Sciences and Engineering
Department of Advanced Technologies**

Supervisor: Doç. Dr. Levent URTEKİN

II. Supervisor: Öğr. Gör. Dr. Asım GENÇ

In this study, the machinability bor alloy steel material by electrical discharge machining method was investigated. Copper electrode was used as tool material and gas oil was preferred as dielectric liquid. During the experiments, three different parameters were selected as variables; discharge current, pulse on time and pulse off time. The outcomes of machining parameters on material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR) and average surface roughness (Ra) have been investigated. Experiments were carried out by applying Taguchi's full factorial sequence. Experiments were carried out by applying Taguchi's full factorial sequence. Optimum levels of processing parameters were determined according to Taguchi full factorial methodology. As a result of the experimental studies; It has been observed that Material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR) and average surface roughness (Ra) increase with the increase of discharge current, MRR, workpiece surface roughness values increase with increasing stroke time. It has been determined that the ideal processing parameters for each

processing level are at different levels. Ideal machining parameters for workpiece machining speed were found to be 12 A, 100 μ s and 50 μ s for current, pulse on time and pulse off time, respectively. Ideal machining parameters for surface roughness were determined as 12 A, 50 μ s, and 24 μ s for current, pulse on time and pulse off time, respectively. As a result of the experimental studies; It has been observed that Material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR), workpiece surface roughness increase with the increase of discharge current, I_{IIH}, workpiece surface roughness values increase with increasing stroke time.

December 2020,68 pages

Keywords: Boron steel, Material Removal Rate, Electrode Wear Rate, Surface Roughness

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte imalatta kullanılan malzeme çeşitleri de artmaktadır. Aynı zamanda bu çeşitlilik, ısı direnci, mukavemet, sertlik ve karmaşık geometrik şekillerin özellikleri bu malzemelerin geleneksel işleme yöntemlerini kullanmasını zorlaştırmakta ve yeni üretim yöntemlerini kullanmayı zorunlu hale getirmektedir.

Bugün imalat; geleneksel imalat ve geleneksel olmayan imalat olarak ikiye ayrılır. Geleneksel imalat yöntemlerinde tornalama, frezeleme, delme ve kesme; bu yöntem, kesici takım ile iş parçası arasında fiziksel temastan sonra takım tezgâhları ve kesici takımların yardımıyla birlikte kesici takım veya iş parçasına belirli bir hareket vererek gerçekleşir. Bu yöntemi kullanırken, kesici takım, kesici alete veya iş parçasına uygulanan bir kuvvetle iş parçası üzerinde bir dalma işlemi gerçekleştirir. İş parçasının fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak, dalma işlemi zorlaşır ve elde edilen ürünün yüzey pürüzlülüğü ve ölçüsel doğruluğu olumsuz etkilenebilir. Alışılmadık bir imalat yönteminde; iş parçası ile herhangi bir fiziksel temas olmaksızın kullanılan bir tür enerji ile iş parçası istenen şekle getirilebilir. Yöntemin temeli şu prensibe dayanmaktadır: Enerjinin belirli bir alana yoğunlaştırılmasıyla, alanın eritilmesi, buharlaştırılması ve sıvılaştırılması yoluyla alan iş parçasından uzaklaştırılır. Elektrik, kimyasal veya termal enerji genellikle koparma işlemini gerçekleştirmek için kullanılır. Bu yeni yöntemlerin kullanılması, iş parçası ile doğrudan temas olmaması nedeniyle birçok avantaj sağlar.

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri elektro-erozyonla işlemedir [(EEİ), (EDM) (Electrical Discharge Machining)]. Bu yöntem dalma EEİ ve Tel EEİ yöntemleri olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Dalma Erozyon yöntemi; çalışma prensibi, iletkenliği daha yüksek olan elektrotu dielektrik akışkan içerisinde iş parçasına yaklaştırmak ve iş parçası yüzeyindeki partikülleri eritme ve buharlaşma yardımı ile kontrollü deşarj yardımıyla uzaklaştırmaktır. Tel erozyon yöntemi; iş parçası ile silindir tarafından sürekli dönen elektrot arasında meydana gelen elektrik deşarjı ile iş parçasını buharlaştırarak veya eriterek iş parçasını oluşturma yöntemidir.

Bu yöntemlerin gelişmesiyle birlikte geleneksel imalat yöntemleriyle işlenmesi zor olan sertliği, kararlılığı ve mikroyapısı yüksek malzemelerin işlenmesi çok kolay hale gelmiştir. Bu nedenle havacılık, otomotiv, medikal, kalıp imalatı, kazı vb. Mikromekanik sistemin gelişmesi ile sürekli gelişen mikromekanik sistemin ihtiyaç duyduğu mikroyapı malzemelerini üretebilmek için yeni yöntemler ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada mikro sertlik değeri yüksek olan malzemenin (bor alaşımlı çeliğin) farklı vurum bekleme süresi, vurum süresi ve akım değerlerinde işlenebilirliği incelenmiştir. İşleme sonrasında oluşan yüzey pürüzlülüğüne, yüzey topografyasına, işleme sonrası işlenen yüzeylerdeki sertlik değişimleri incelenmiştir ve çıkan sonuçlar yorumlanmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüz imalat endüstrisinde, ileri teknolojiler kullanılarak çeşitli metaller, seramikler ve kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemenin geniş bir kullanım alanı ve yüksek mukavemet özellikleri olduğundan, bunları klasik imalat yöntemleriyle kalıplamak zordur ve bilim adamlarını ve endüstri çalışanlarını yeni imalat yöntemlerine yönlendirirler [1].

Mükemmel özelliklere sahip işlenmesi zor malzemeler, havacılık, otomobil, kesici takımlar, kalıplar ve model imalat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, son derece gelişmiş aşınma direnci, ısı direnci, korozyon direnci ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu yeni gelişmiş teknik malzemeler makine üreticilerine büyük ekonomik faydalar sağlamış, ürün özellikleri iyileştirilmiş ve birçok yerde karmaşık geometrik tasarımlarda kullanılmaya isteklidir, bu da geleneksel üretim yöntemlerini bu malzemelerin kalıplanması için uygunsuz hale getirir. Bu nedenle, üreticiler ve araştırmacılar geleneksel olmayan üretim yöntemlerine odaklanır ve yeni üretim yöntemleri aramaya başlamışlardır[2].

Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılan ve ticari olarak kullanılan yöntemlerden biri elektro-erozyon yöntemidir (EEİ) [2]. Özellikle çok sert malzemeleri ve karmaşık geometrileri rahatlıkla işleyebilme yeteneği, bu yöntemi en çok tercih edilen geleneksel olmayan üretim yöntemi haline getirmektedir. EEİ, iletken elektrotları iletken olmayan bir dielektrik sıvıya daldırıp birbirlerinden uzak tutarak (iş parçası elektrotları arasındaki mesafe 10-40µm aralığındadır) ve deşarj uygulamasını kontrol ederek, EEİ bu şekilde iletkene uygulanır. İş parçasında çift elektrik sıvısı ile tedavi alanından uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde elektrotlar, iş parçasında üretilmek istenen işleme boşluğunun geometrisine göre üretilir. Elektro-erozyon işleme (EEİ), sert malzemelerin ve karmaşık şekillerin gerekli boyut ve hassasiyetle işlenebildiği bir üretim yöntemidir. EEİ ile işlenen iş parçalarının en önemli özelliği iletkenliktir. EEİ için, geleneksel üretim yöntemlerinde etkin bir şekilde işlenen iş parçalarının sertliği ve tokluğu gibi özellikler önemli değildir. Öte yandan, iyi işleme özellikleri, malzemenin termal ve elektriksel iletkenliğine bağlıdır. EEİ'nin %80'i esas olarak kalıp imalat

sanayiinde kullanılmaktadır. Çeşitli özel üretim tesislerinde nispeten nadiren kullanılmaktadır. EEİ yöntemi, dalma elektro erozyon, tel elektro erozyon ve delik delme olarak üç yönteme ayrılmıştır ve elektrik iletken bütün metallerin, alaşımların ve birçok metal karbür malzemenin işlenmesinde kullanılmaktadır.

Endüstride, EEİ yöntemi basınçlı döküm kalıplarında, soğuk şekillendirme kalıplarında, dövme kalıplarında, enjeksiyon kalıplarında, toz sıkıştırma kalıplarında, kesme ve kırma kalıplarında, cıvata başlı şişirme kalıplarında ve alet imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Alet ve kalıp imalatının yanı sıra, ultra küçük pompalar, motorlar, robotlar, nükleer güç reaktörlerinin çeşitli parçaları ve havacılık endüstrisi ile ilgili parçalar gibi mikro elektromekanik sistemlerin üretimi gibi birçok alanda da kullanılmaktadır [3, 4].

Bu yöntemde elektrot ve iş parçası birbiriyle temas halinde olmadığından kesme kuvveti ve olumsuz etkileri oluşmayacaktır. Bu nedenle, EEİ yöntemi kırılkan, kırılkan ve kırılkan parçaların (işleme sırasında kırılabilen) işlenmesi için vazgeçilmez bir yöntem haline gelmiştir. Ek olarak, EEİ yöntemi, geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan parçaların işlenmesi sırasında çok fazla zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabilir [5, 6].

EEİ yöntemi ile yapılan bazı çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

Özerkan, dielektrik sıvıya metal tozu katılmış EEİ' de, yüzey pürüzlülüğü, İş parçası işleme hızı, EAH, bağıl aşınma, İş parçası mikroyapısı ve İş parçası yüzey sertliği gibi temel performans çıktılarının işleme parametreleri ile gösterdiği değişimi incelemiştir. Bu amaçla, prizmatik çelik İş parçası, prizmatik bakır elektrot, borik asit ve grafit tozları katılmış gazyağı dielektrik kullanılarak farklı vurum sürelerinde işleme deneyleri yapılmıştır. Deneyler neticesinde, vurum süresinin ve dielektrik sıvı içine karıştırılan farklı tozların ve konsantrasyonlarının EEİ' de temel performans çıktıları üzerinde etkili olduğu görülmüştür [2].

Lee ve arkadaşları WC iş parçalarında işleme parametrelerinin işleme performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımının, gerilimin ve vurum süresinin artması ile arttığı, ancak, belli bir dielektrik sıvı basıncı ve vurum ara süresi için optimum değerlerin olduğu belirtilmiştir [7].

EEİ'de yüzey kalitesi ve yüzey pürüzlülük değerlerini etkileyen parametreler: İş parçası malzemesi, elektrot malzemesi, boşalım akımı, vurum süresi, dielektrik sıvısı türü, uygulama şekli, içerisine katılan çeşitli metal ve metal olmayan tozlar, uygulama basıncı elektrot ve İş parçası kutuplaşması, işleme akımı, işleme süresi ve elektrot boyutu olarak sıralanabilir [8-11].

Chen ve Mahdivan, EEİ ile işlemede en iyi yüzey kalitesini bulmayı hedeflemişlerdir. Araştırmaları sonucu en uygun vurum süresi ve vurum bekleme süresi ile yüksek erozyon oranının ve en iyi yüzey kalitesinin elde edileceğini görmüşlerdir[12] .

Hourmand ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Al-Mg₂Si metal matrisli kompozit malzemesine EEİ'de İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğü performansı çıktıları açısından incelemişlerdir. Deneylerde boşalım akımı olarak: 3, 6 ve 9 A ve vurum süresi olarak: 10, 100 ve 200 µs farklı değerler kullanılmıştır. Deney çıktılarını değişken analizi (ANOVA) yaparak İİH ve EAH değerleri için matematiksel bağıntılar elde etmişlerdir. Yapılan mikro yapı analizinde boşalım voltaj değerleri, boşalım akımı ve vurum süresi, yüzey profiline doğrudan etki eden parametreler olduğunu saptamışlardır [2].

Sharif vd., EEİ'de giriş parametrelerinin EEİ sürecinin özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, iş parçası olarak 316L paslanmaz çelik ve elektrot olarak bakır emdirilmiş grafit kullanarak deneyleri, iki seviyeli tam faktöriyel deney tasarımı ile gerçekleştirmişlerdir. Malzeme kaldırma oranı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) için varyans analizi (ANOVA) ve matematiksel modelleme geliştirdikleri çalışmalarında, sonuç olarak maksimum akımın tüm değişken tepkilerde en önemli etken olduğunu vurgulamışlardır [13].

Jose vd., Cu20W80 alaşımı elektrot malzemesini kullanarak farklı vurum süresi ile yaptığı deneysel çalışmada boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla iş parçası işleme hızının arttığını, boşalım akımı ve vurum süresi arttıkça, iş parçası yüzey pürüzlülüğünün de arttığını gözlemlemiştir.[14]

Gopalakannan ve Senthilvelan, 316L ve 17-4 PH paslanmaz eliğın EEİ ile işlenmesinde meydana gelen boşalım akımının İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İş parçaları bakır, bakır-tungsten ve grafit gibi farklı elektrot malzemeleri ile işlenmiştir. Boşalım akımının artmasıyla; İİH, elektrot aşınması, yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirtilmiştir. Deneysel sonuçlara göre; bakır elektrot ile en yüksek talaş kaldırma oranının elde edildiğı görölmüştür. Bakır tungsten elektrot ile düşük elektrot aşınmasının sağılandığı, düzgün yüzey kalitesi ve iyi bir boyutsal doğırluğun sağılandığı savunulmuştur.[15]

EEİ ile ilgili araştırmalar incelendiğinde, bu çalışmaların genellikle performans sonuçlarına odaklandığı görölmektedir. İmalat endüstrisinin düşük zaman, düşük maliyet ve yüksek kalite beklentileri ile başa çıkmayı amaçlayan araştırmada, iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), bağıl aşınma (BA) ve yüzey pürüzlülüğü (R_a) ıktısına özel önem verilmektedir.

Bu yapılan çalışmada ise; bor alaşımlı bir elik için iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, bağıl aşınma, iş parçası yüzey pürüzlülüğü, mikro sertliğı ve mikro yapı özellikleri gibi temel performans çıktılarının işleme parametreleri ile gösterdiği değışimin deneysel olarak incelenmiştir.

BÖLÜM 3

3.1. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ) TEKNOLOJİSİ

EEİ, yaygın olarak kullanılan, geleneksel olmayan malzeme işleme tekniklerinden biridir. Elektro erozyon, malzemenin bir elektrot ile bir iş parçası arasında tekrarlanan elektrik boşalım dizileri aracılığıyla meydana gelen kıvılcımın termal enerji ile iş parçasını ergiterek küçük parçacıkların kopartıldığı bir süreçtir. EEİ tekniği ile elektriği ileten bütün malzemeler sertliğinden ve diğer mekanik özelliklerinden çok fazla etkilenmeden kolaylıkla işlenebilir. Sertleştirilmiş çeliklerde, sert metallerde ve imalatı zor olan malzemeler için oldukça uygun bir işleme yöntemidir.[16]

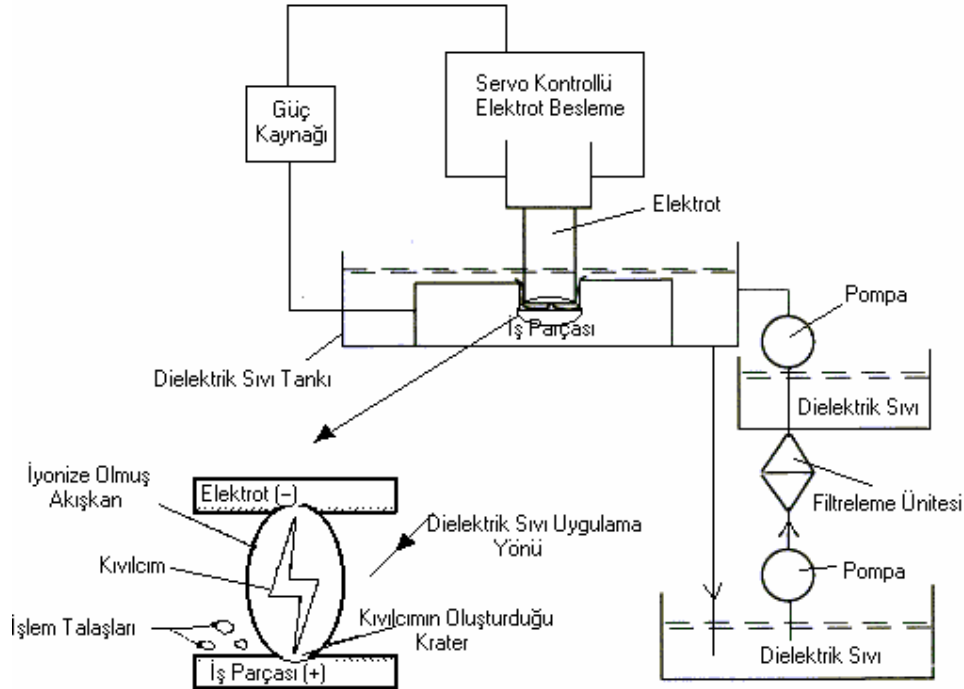
Elektro erozyon yönteminde iş parçası genellikle pozitif kutuplanır. Bu yüzden anot adını alır ve elektrot ise negatif tarafa bağlanır, katot olarak adlandırılır. Ters durum da söz konusudur. İş parçası ile elektrot temas halinde değildir ama birbirilerine çok yakındır. Özellikle kullanılacak olan elektrot, işlenecek malzemenin özelliğine göre uygun seçilmektedir. Parça işlenmesi sırasında dielektrik sıvı kullanıldığından, kullanılacak olan sıvı uygun seçilmelidir. Genel olarak kullanılan sıvılar; gaz yağı, transformatör yağı, saf su vb. Parçanın yüzey özelliği ve hassasiyeti önemli ölçüde etkilenmektedir.[16]

3.2. ELEKTRO EROZYON ÇALIŞMA SİSTEMİ

Elektro erozyon ile işleme çalışma prensibi Şekil 3.1’de gösterildiği gibidir. Takım katot terminaline, iş parçası anot terminaline bağlanır. Güç kaynağı geçişleri ile potansiyel farklar uygulandıktan sonra kıvılcım formundaki 10 saniyelik aralıklarla yeterince yüksek elektriksel deşarjlar meydana gelir. Kırınımına uğrayan dielektrik sıvı iyonları, pozitif iyonlara doğru ivme kazanır ve iletkenlik gösteren bir boşalma kanalı (plazma kanalı) meydana gelir. İşleme sırasında, iş parçası ile elektrot düzgün konumlandırılarak aralarında dielektrik sıvısı olacak şekilde bir çalışma boşluğu oluşturulur. Çalışma boşluğunun genişliğine ve dielektrik sıvının iletkenliğine bağlı olarak bir voltaj uygulanır, genişleyen plazma kanalı ve sıvının dielektrik direncini aşınca bir akım oluşturur. Plazma kanalındaki $T=10000\text{ K}$ ’in üzerindeki sıcaklıklar iş parçası ve elektrotun yüzeyindeki malzemenin ergitme ve buharlaşma sürecini oluşturur. Akım

kesilince, ergimiş malzeme, plazma kanalının kaybolmasından sonra dielektrik sıvı püskürtme uygulaması ile hızlı bir şekilde süpürülür. Tek bir boşalım, iş parçası yüzeyinde krater şeklinde bir çukur oluşturur. Boşalım zamanı, boşalım akımı veya dielektrik sıvının cinsi gibi aşınma parametrelerine bağlı olarak tipik krater çapları değişir [16].

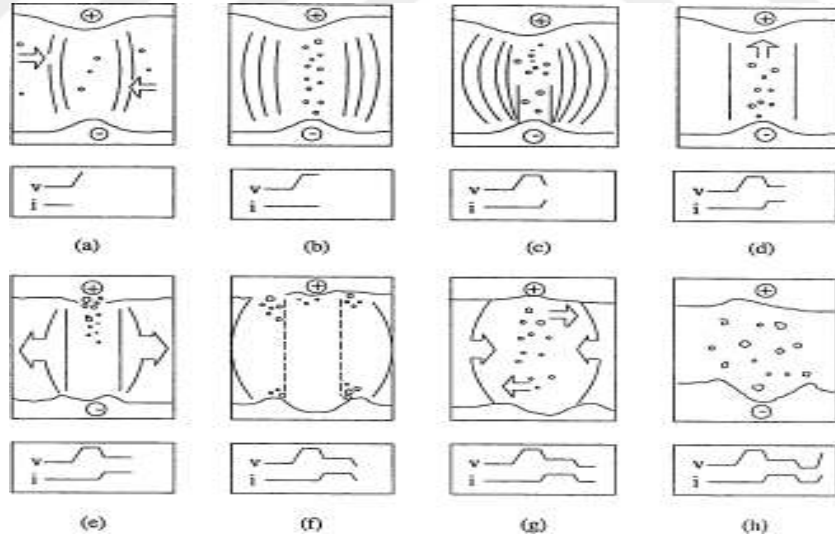
Plazma geçidinin elektrik direncindeki ani düşüş, akım yoğunluğunun çok yüksek miktarlara ulaşmasına izin verir, bu da moleküller ile iyonlaşma artışına neden olur ve güçlü manyetik alan (10000-12000°C) aralığında elektrotlar üzerinde çok yüksek bir sıcaklığa neden olur. Bu yüksek sıcaklık kıvılcımı, iş parçası ile takım arasında yeterince az miktarda metal parçacıklarının sıvılaştığı ve aşındığı sonucu ortaya çıkan yeterince baskı kuvveti oluşturur [19].



Şekil 3.1. Elektro erozyon işleme yönteminin şematik gösterimi [1].

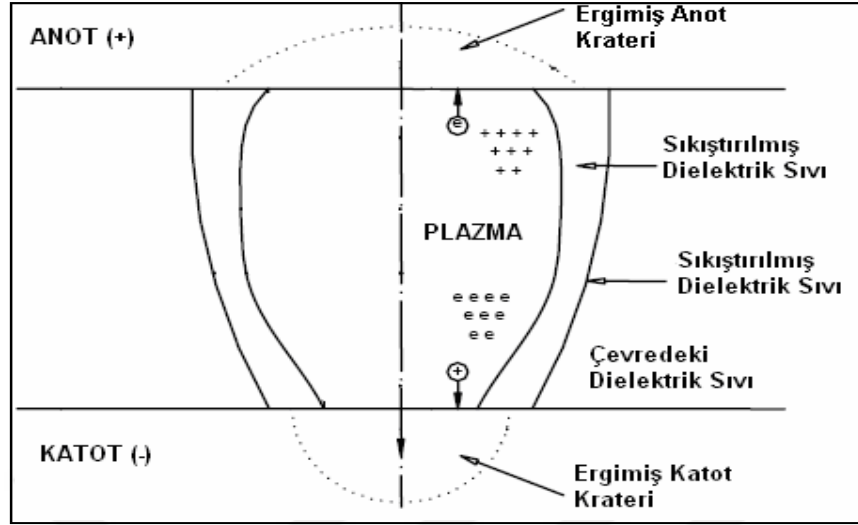
Bir EEİ'de iş parçası, elektrot (kesici takım) ve dielektrik sıvı olmak üzere üç ana bileşen mevcuttur. Bu üç ana bileşen arasındaki fiziksel olaylar Şekil 3.2'de sırasıyla verilmiştir. Başlangıçta iş parçası ve elektrot, işleme aralığındaki boşlukta bulunan bir dielektrik sıvı tarafından yalıtılmış durumdadır. İşleme aralığına yüksek gerilim (80-200 V) uygulandığında oluşan elektrik alan sonucunda, dielektrik sıvıda bulunan ince parçacıklar işleme aralığı

boyunca bir köprü oluşturur ve bu parçacıklar güçlü elektromanyetik alan noktalarında yoğunlaşır (Şekil 3.2.b). Bu durum, iki elektrot arasındaki aralıkta oluşan köprü üzerinden dielektrik sıvının deiyonizasyonu veya bozunmasıyla sonuçlanır. Dielektrik sıvının bozunması ile işleme aralığındaki gerilim düşer ve akım değeri tezgâhın ayar değerine yükselir. Oluşan plazma kanalı (Şekil 3.2.c) vurum süresi süresince genişler ve bu sırada kabarcık ve ısı açığa çıkar (Şekil 3.2.d, e). Plazma kanalının etrafında oluşan buhar kabarcıkları ve dielektrik sıvı plazma kanalının gelişimini sınırlar, giren enerji çok küçük bir hacimde yoğunlaşır (Şekil 3.2.f). 3 J/mm^3 'e kadar ulaşan enerji yoğunlukları, plazma sıcaklığının 40000 OK 'e ulaşmasına neden olur. Plazma basıncı 3 kbar'a kadar yükselebilir. Akım durduğunda plazma kanalı hızla deiyonize olur. Ancak gaz kabarcıkları biraz süre daha o pozisyonda kalır (Şekil 3.2.g). Deiyonizasyonla birlikte plazma kanalında basınç ve sıcaklık da düşer. Elektrottaki boşalım basıncı altında, aşırı ısınmış ve ergimiş malzeme anlık kaynamaya ve sıvı kürecikleri yaymaya başlar. Daha sonra dielektrik sıvı ergimiş malzemeyi katılaştırarak ortamdan uzaklaştırır (Şekil 3.2.). Bu döngü işlemin sonuna kadar her bir boşalım için tekrarlanır.



Şekil 3.2. EEİ yönteminin fiziksel prensibi[17]

Bu çevrim süresince yüksek enerji plazması iş parçası malzemesinin özelliklerine göre elektrot ve iş parçasını farklı olarak etkiler. Çoğu metaller ve bazı ergime noktası düşük olan seramikler için plazma aşağıda açıklanacağı gibi iş parçasından ve elektrottan malzeme kaldırır. Şekil 3.3, EEİ' de plazma oluşumunu ve vurum süresi sonunda oluşan ergimiş kraterleri göstermektedir.



Şekil 3.3. Plazma kanalı[1, 17]

Vurum süresinin başlangıcında hızlı hareket eden elektron bombardımanından dolayı ilk olarak anot erir. Birkaç mikro saniye sonra tekrar katılaşmaya başlar. Büyük kütleli pozitif iyonların daha düşük hareket kabiliyetleri sebebi ile iş parçasının ergimesi daha geç olur. İş parçasında oluşan plazma yarıçapı elektrota göre daha küçük ancak derinliği daha büyüktür. Bu nedenle iş parçasının iç kısımlarına doğru noktasal bir ısı akısı olduğu kabul edilir. Böylece bölgesel ısınma hem ergimeye hem de iş parçasının ısı soyulmasına sebep olur. Isıl soyulma, malzemenin aşırı yüksek sıcaklık farklılığı kaynaklı iç ısıl gerilimlerin neden olduğu mekanik bir oluşum olarak düşünülmektedir. Bekleme süresi esnasında, boşalım kanalı kaybolur ve dielektrik sıvı ergimiş malzemeyi ve/veya ince tabakalı parçacıkları kısmen ortamdan uzaklaştırır. Elektrot yüzeylerini soğutur. Sıvı malzemenin bir kısmı yüzeyde tekrar katılaşır. Dielektrik sıvının yoğunluğu ve yüksek yüzey gerilimi, düşük plazma yayılma hızı sağlar ve böylece malzemeyi aşındırmak için ısıyı yoğunlaştırır [1, 17].

3.3. ELEKTRO EROZYONUN SINIFLANDIRILMASI

3.3.1. Dalma Erozyonu

Genellikle en iyi bilinen elektro erozyonla işleme tekniği dalma erozyon yöntemidir. İki elektrot tezgâhlarına çalışma tezgâhı ve takım tutucusu olan makine parçaları üzerine yerleştirilir. Elektrotların elektriksel iletkenliği kontrol edilir. Elektrotlar pompa yardımıyla dielektrik sıvı içine daldırılır. Yaygın kullanılan dielektrik EEİ işleme sıvıları gaz yağı, petrofer ve transformatör yağıdır. Gerekli şekil ve boyutu elde etmek için işleme yapmak üzere NC kontrol ünitesindeki işleme parametreleri ayarlanır. Voltaj uygulanır ve uygulanan voltaj iş parçasına darbe formunda boşalma akımı başlatır. Her kıvılcım, iş parçası yüzeyinden ince bir boşlukta ergimeye ve buharlaşmaya yetecek kadardır ve boşalım rastgele gerçekleşmektedir. Bu dönemde deşarj akımı 0,5-400 A aralığında, 40-300 V uygulanan voltaj aralığında ve darbe süresi 2 ila 2000 µm arasında değişebilir. Ergitilmiş malzemenin iş parçasında birikmesini önlemek için farklı yıkama yöntemi uygulanır ve yıkama işlemi hızlandırır. Her tezgâhta olduğu gibi elektro erozyon tezgâhının da avantajları ve dezavantajları vardır [18] .

3.3.1.1. Dalma Erozyonunun Avantajları

- İşleme sonucu çapak oluşmaz.
- Bir operatör birden fazla tezgâhı çalıştırabilir.
- İstenildiği gibi kalıp boşluğu verilebilir.
- İşlemede parçanın sertliği önemli değildir.
- Karmaşık şekilleri işlemek mümkündür.
- Elektrik iletkenliği olan her malzeme işlenebilir [18].

3.3.1.2. Dalma Erozyonunun Dezavantajları

- Tüketilen enerji miktarı diğer tezgâhlara oranla fazladır.
- İş parçasının elektrik iletkenliğinin olması gerekir.
- Kaldırılan talaşı malzemeden uzaklaştırmak zordur.
- Elektrot aşınmasından dolayı şekil sapmaları oluşur [18].

3.3.2. Tel Erozyon

Tel erezyon, kısaca özetlemek gerekirse metalin üzerinde yüksek yoğunlukta elektrik akımı geçirilen bir tel vasıtası ile kesme işidir. Bu işlem makinalarda, farklı elektriksel kutuplara elektrot iliştilir, kesim yapılan parçaya yaklaştığı zamanda elektriksel boşalmaları sayesinde yüksek bir ısı ortaya çıkarmakta ve kısmi metal ergimesi ile parçacık yok edilerek değişiklik sağlanmaktadır. Partikül kaldırma hızı, her bir arktaki enerji miktarı ve her arkın geçen süresine göre değişiklik göstermektedir. İşlemin ilk kısmında, yapılan iş parçasının biçimi bir koordinat yüzeyi içerisinde, çizimdeki her bir elemana nokta, daire ve çizgi numaraları isimlendirilerek şekillendirilmektedir. İşlemin ikinci kısmında ise kesme yolu vasıtası ile esas biçimi ortaya çıkmaktadır. Kesme süreci başlatıldığında tel kesme güzergâhını takip ederek kesme süreci tamamlanmaktadır. Tel erozyon tezgâhları yoğunlukla telin çapları 0,10~0,4 mm aralığında farklılık gösteren molibden, pirinç ve tungsten tel elektrotlar kullanımı tercih edilmektedir. Bu da ister istemez parça yüzeyinde oluşan maksimum radyus miktarı 0,4 mm'yi geçmeyecek hale getirmektedir. Tel erezyon işleme tezgâhlarında genel kural olarak tel (+), tabla ise (-) yüklü olmaktadır. Kesim işlemi; telin parçaya yaklaşması ile meydana gelen ark ile gerçekleşmektedir. Ark anında 8000~12000 °C civarında ısı oluşmaktadır.

3.3.3. Delik Delme

Hızlı delik delme, özellikle hızlı, doğru küçük ve derin delik delme uygulamaları için tasarlanmıştır. Çok yüksek hızda, elektrik ileten bir malzeme üzerinde delik açmak için elektrot tüpü (normalde pirinç veya bakır malzeme) kullanır. Delik çapı 0.3mm'den 3.0mm'e kadar olabilir. Bu teknoloji, havacılık, enerji, kesme aletleri, otomotiv, medikal, kalıp ve kalıp endüstrilerinde delik işleme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızlı delik delme tezgahı ile tungsten karbür, pirinç ve her çeşit çelik üzerinde 0.3mm'den 3.0mm çap aralığında 400 mm derinliğe kadar bu yöntemle delebilme işlemi yapılabilmektedir.

3.4. ELEKTRO EROZYON İŞLEM PARAMETRELERİ

EEİ, işlem parametrelerinin sayısına bağlıdır. Bu parametreler, giriş özelliklerini değiştirerek EEİ işlemlerinin çıktı performansını etkiler. Bu yüzden parametreler dikkatli ve düzgün bir biçimde seçilmelidir. İşleme parametre seçiminde aşağıda verilenlere dikkat edilmelidir[19].

3.4.1. İşleme parametrelerinin seçimi;

- İşleme parametreleri seçilirken aşağıda verilen ipuçlarından faydalanılabilir;
- Tezgâha iş ve elektrotu bağladıktan sonra yapılacak işe uygun işleme ayarları seçilmelidir. Örneğin sıcak dövme kalıbı yapılacak işe yüksek akım $>12,5A$ olmalıdır. Plastik enjeksiyon kalıpları için akım $3A \sim 12,5A$, ince ve parlak yüzeyler için ise düşük akım $\leq 3A$ kullanılması uygun olur.
- İşlenecek malzemenin ne olduğu önemlidir, hard metaller için nispi olarak daha yüksek ve ters polariteli güç seviyeleri kullanılır. Alüminyum gibi malzemeler ise çok küçük güç seviyeleri ile bile yüksek oranda aşındırılabilir.
- Hızlı işlemler isteniliyor ve yüzey pürüzlülüğü önemli değil ise yüksek kademeli akımlar, daha çok zamana yaymak ve daha pürüzsüz yüzeyler için daha düşük kademeli akımlar seçilmelidir.
- İşlemenin yapıldığı yüzeyin genişliği de (elektrotun alnı) çok önemli bir parametredir. İnce (alın yüzeyi küçük) bir elektrottan yüksek akım geçirilirse elektrot tahmin edilenden daha fazla aşınır.
-

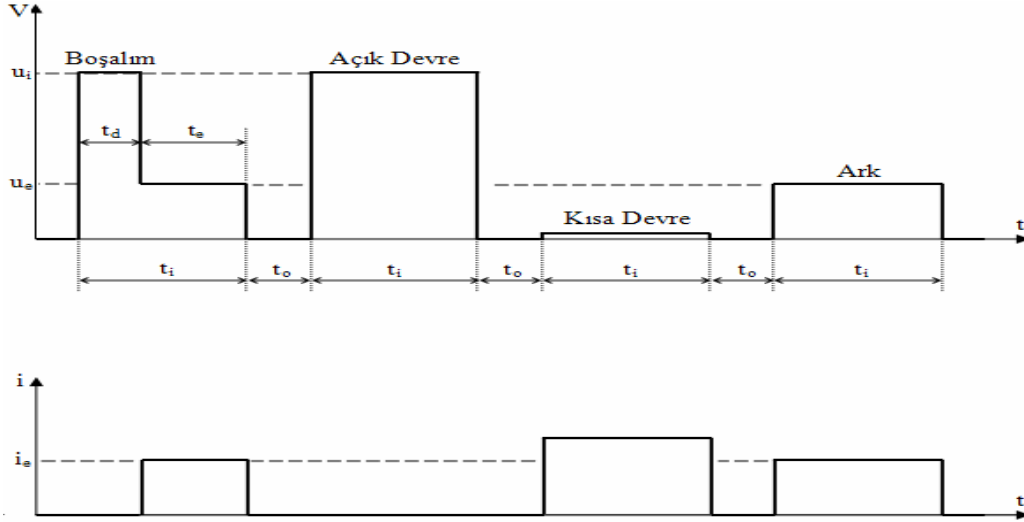
3.4.2. Elektroerozyon ile İşlemenin Temel Parametreleri

EEİ ile işlemenin çok parametrelili 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. İş parçası malzemesi fiziksel özellikleri,
5. Elektrot malzemesi fiziksel özellikleri

3.4.2.1. Elektriksel Parametreler

İşleme aralığındaki elektriksel boşalım işleminin tipik gerilim ve akım değişimleri $u(t)$, $I(t)$ ile karakterize edilir. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için tipik vurum karakteristikleri Şekil 3.1’te gösterildiği gibidir. [3, 20]



Şekil 3.4. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri [13].

3.4.2.2. EEİ yönteminin elektriksel parametreleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Boşalım gücü (P_e): Bir boşalım süresince uygulanan güçtür. Aşağıdaki formülasyonla ifade edilir.

$$P_e(t) = u_e + i_e \dots \dots \dots (3.1)$$

Vurum enerjisi (W_s): Boşalım süresince işleme aralığına uygulanan enerjidir. Aşağıdaki formülasyonla hesaplanmaktadır.

$$W_s = \int t d V_{d(t)} i_{d(t)} d(t) \sim V_d \dot{I}_d t_d$$

$$W_s = \int_{t_d} V d(t) \cdot i d(t) \cdot dt \approx V_d \cdot \dot{I}_d \cdot t_d$$

Boşalım gerilimi (u_e) : Boşalımın devam ettiği süre içinde ölçülen gerilimdir.

Boşalım akımı (i_e) : Boşalım süresince işleme aralığından geçen akımdır.

Boşalım (vurum) süresi (t_e) : İşleme aralığı boyunca akımın boşaldığı süredir.

Gecikme süresi (t_a) : Boşalım öncesinde dielektrik sıvının iyonlaşması için geçen süredir.

Vurum süresi (t_i) : Gerilimin ilk uygulama anı ile boşalmanın bitiş anı arasında geçen toplam süredir.

$$t_i = t_e + t_d \dots \dots \dots (3.3)$$

Bekleme süresi (t_0) : Birbiri ardına oluşan iki boşalım arasında geçen süredir.

Vurum çevrim süresi (t_p): Vurum süresi ile bekleme süresinin toplamını ifade eder.

$$t_p = t_i + t_o \dots \dots \dots (3.4)$$

Açık devre gerilimi (u_i): Boşalmanın olmadığı anda işleme aralığında görülen gerilimdir.

Ortalama çalışma gerilimi (U): İşleme süresince boşalım aralığında ölçülen gerilimin aritmetik ortalamasıdır.

Ortalama çalışma akımı (I): İşleme süresince boşalım aralığından geçen akımın aritmetik ortalamasıdır.

Vurum frekansı (f_p): Elektrot ve iş parçası arasında birim zamanda (sn) vurum jeneratörü tarafından oluşturulan vurumların sayısıdır.

3.4.2.3. Elektriksel Olmayan Parametreler

Elektrotun dönmesi, dielektrik sıvısı ve takımın yıkanması gibi elektriksel olmayan parametreler de EEİ ölçütlerini etkilemektedir. Elektriksel olmayan parametrelerden bazıları; iş parçası, elektrot, dielektrik sıvısının tipi, takım elektrotunun dönmesi vb. dir[19].

Elektrot; elektrik ileten metallere gerilim uygulandığında elektrot ismini alırlar. Genellikle iyi bir iletkenlik ve dirence bakılarak bakır (Cu), pirinç, grafit, bakır tungsten, gümüş tungsten gibi elektrot çeşitleri seçilir. Dikdörtgen, kare, silindirik, dairesel gibi birçok şekil kullanılır. Seçilen elektrot kolay işlenebilir olmalıdır. Kolay bulunabilmeli ve maliyeti düşük olmalıdır. Ergime sıcaklığı yüksek olmalıdır. İş parçası ile uyumu dikkate alınmalıdır.

İş parçası; kalıp malzemeleri, alaşımlar, süper alaşımlar ve kesilmesi çok zor olan titanyum alaşımları gibi elektriksel iletken birçok malzeme olarak kullanılır. Seçilen iş parçasının elektrot ile uyumuna dikkat edilmelidir.

3.4.2.4. 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 [18,19]. 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 genellikle deiyonize (saf) su kullanılır. Saf su demir iş parçalarının 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 [20]. EDM işleminde kullanılacak dielektrik sıvıda bozunum gerilimine ulaşınca kadar dielektrik sıvının yalıtkan kalması için yüksek dielektrik dayanıma sahip olmalıdır. Bozunum sonrası hızlı bir şekilde iyonize olmalıdır; etkili soğutma yapabilmesi için ısı kapasitesi yüksek olmalıdır ve püskürtme yeteneğine sahip olması gerekir[21] .

EEİ ile işlemede dielektrik sıvının görevleri,

- i) Fiziksel olarak dielektrik sıvı elektrotlar üzerinde toplanan yükü bozunum gerilimine ulaşınca kadar belirli bir süre tutar.
- ii) Dielektrik sıvı, boşalımı dar bir kanalda tutar. Böylece İş parçası 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 İş parçası 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[22].

Dielektrik sıvıdan beklenen genel özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- i) Dielektrik sıvı kıvılcım boşalımından sonra hızlı bir şekilde deiyonize 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 elektrotun ömrünü azaltır ve işleme zamanını arttırır.
- iv) Kimyasal olarak nötr olmalıdır; elektrotta, iş parçasına, 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.

3.4.2.5. Dielektrik sıvı ve uygulama yöntemleri

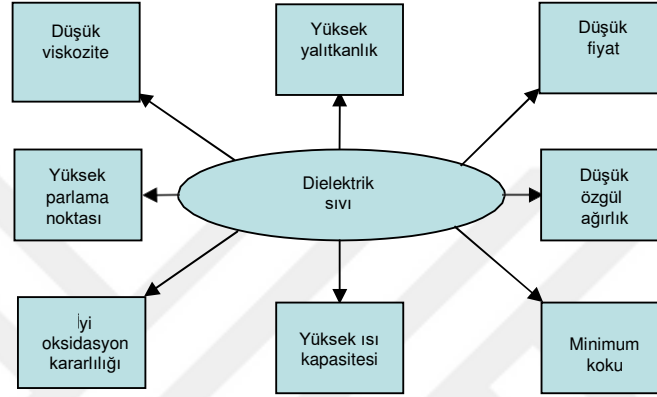
EEİ yönteminde genellikle, hidrokarbon bazlı (parafin, sıvı madeni yağlar, gazyağı vb.) ve silikon bazlı yağlar dielektrik sıvı olarak kullanılmaktadır.

3.4.2.6. Dielektrik sıvı ve çeşitleri

En yaygın kullanılan EDM dielektrik sıvıları, hafif yağlama yağları, transformatör yağlar, silisyum esaslı yağlar ve gazyağı gibi çeşitli petrol ürünleri ve özellikle tel erozyonu (wire – EDM) için su’ dur. Kullanılan yağlar, yüksek yoğunluk ve vizkoziteye sahip olmalıdırlar. Bu yağlar, boşalım kanalı ve boşalım enerjisinin düzenli bir şekilde oluşmasını sağlar fakat ara bölgeye püskürtülmeleri zorluklar çıkarabilir. EDM işleminde en yaygın kullanılan dielektrik sıvı, gazyağıdır.

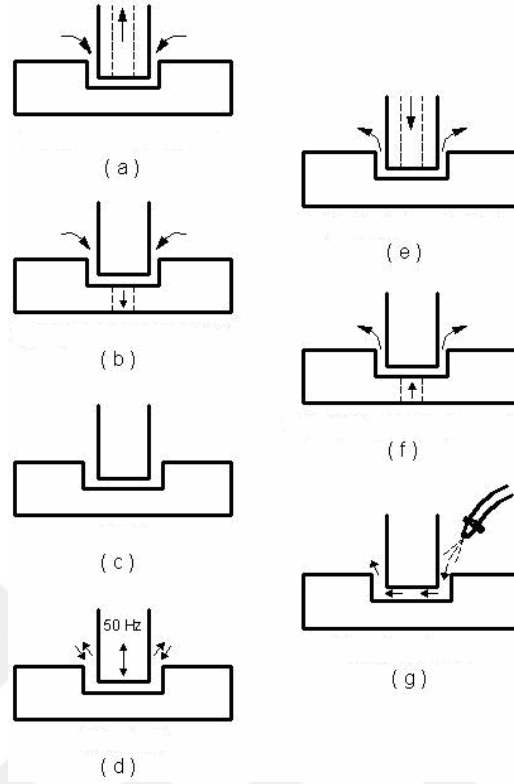
İşleme artıklarını işleme bölgesinden uzaklaştırmak, boşalım gerilimi değerine ulaşınca kadar

elektrik yalıtkanlığını koruyacak yeterli elektriksel dirence sahip olmak ve boşalım sonrasında çok hızlı bir şekilde deiyonize olabilmek, boşalım etkisiyle ısınan bölgeyi soğutma gibi temel özellikleri vardır[2]. İdeal bir dielektrik sıvının sahip olması gereken özellikler Şekil 3.5’te görülmektedir.



Şekil 3.5. Dielektrik sıvının genel özellikleri [14]

Dielektrik kıvılcımının oluşturulduğu yerdir. Üzerine gerilim yeterli mesafede uygulanınca iyonize olur ve elektrik akımını akıtır. Dielektrik sıvı olmadan Elektro-erozyon yapmak mümkün değildir. Bunun yanında kopan talaş parçalarının uzaklaştırılması ve işleme alanının soğutulması görevlerini de dielektrik sıvı yapar. Dielektrik sıvının viskozitesi ve dielektrik malzemenin davranışları erozyon işlemine etki eden önemli parametrelerdir. Dielektrik sıvı uygulamasında, dielektriğin elektrot ve iş parçası arasında uygun biçimde dolaşması sağlanır. Dielektrik uygulaması kararlı işlemenin oluşumu, iyi tolerans ve yüzey kalitesi elde etmede ana rolü oynamaktadır. Yetersiz uygulama elektrot aşınmasını artırırken işleme süresini de uzatmaktadır[23]. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri

a) elektrot içinden emme, b) iş parçası içinden emme, c) statik, d) titreşimli, e) elektrot içinden püskürtme, f) iş parçası içinden püskürtme, g) yanıl püskürtme [3]

3.4.2.6. Dielektrik Sıvı Karşılaştırılması

Yapılan tüm deneylerde dielektrik sıvı olarak standart erozyon sıvısı kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Erozyon sıvıları ile diğer kullanılan sıvıları karşılaştırması [3].

Ürün / Parametre	Gazyağı	Mazot	Standart erozyon sıvıları
Parlama noktası	40°C	52°C	103°C-125°C
Rahatsız Edici Koku	Yüksek	Yüksek	Yok
Dielektrik Özellik	Düşük, Geçici	Düşük, Geçici	Çok iyi
Oksitlenme	Yüksek	Yüksek	Yok
Korozyon	Var	Var	Yok
Asit Oluşumu	Var	Var	Yok
Yangın Riski	Var	Var	Düşük
Filtre Edilebilme	Çok Düşük	Çok Düşük	Çok İyi
Talaş Taşıyabilme	Düşük	Düşük	Çok İyi
Çevre ve İşçi Sağlığı	Çok Kötü	Çok Kötü	Çok İyi

BÖLÜM 4

4.1. ELEKTRO EROZYON PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ

4.1.1. İş Parçası İşleme Hızı

İş parçası işleme hızı birim zamanda kaldırılan malzeme miktarını verir. İş parçasın üzerinden kaldırılan malzeme; akım, vurum süresi, vurum bekleme süresi, kutuplama gibi parametrelerin değişimine bağlıdır. İİH, EEİ ile işlemeden önce ve sonra iş parçası malzemesinin ağırlık farkının işleme süresine oranıdır. Başlangıçtaki ağırlık iş parçasının işlenmeden önceki ağırlığıdır. Son ağırlık ise iş parçasının işlendikten sonraki ağırlığıdır. Bu ağırlıklar terazi yardımı ile ölçülür. EEİ, aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmaktadır.

$$\text{İş Parçası İşleme Hızı} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{dak}} \right] = \text{İHH} = \frac{\text{İş parçası toplam aşınma hacmi}[\text{mm}^3]}{\text{Toplam işleme süresi}[\text{dak}]}$$

4.1.2. Elektrot Aşınma Hızı

EEİ sırasında oluşan kıvılcımlardan dolayı takımın aşınma meydana gelir. Takım yani elektrot hızı (EAH), EEİ ile işleme öncesi ve sonrası, takımın ağırlık farkının işleme süresine oranıdır ve aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır [18].

$$\text{Elektrot Aşınma Hızı} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{dak}} \right] = \text{EAH} = \frac{\text{Elektrot toplam aşınma hacmi}[\text{mm}^3]}{\text{Toplam işleme süresi}[\text{dak}]}$$

4.1.3. Aşınma Oranı

Aşınma oranı yani bağıl aşınma (BA), takım aşınma oranı ve malzeme uzaklaştırma oranının oranıdır. Takım ve iş parçası malzemesinin aynı seçilmesi bu oranı iyileştirir. Boşalım akımı ve vurum süresi aşınma oranını önemli ölçüde etkiler. Düşük ergime sıcaklığına sahip olan elektrotlar, yüksek ergime sıcaklığına sahip elektrotlara göre daha fazla aşınmaktadır. Bundan dolayı düşük ergime sıcaklığındaki elektrotlarda elde edilen aşınma oranları daha yüksektir. Aşınma oranı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır[18].

$$\text{Bağıl aşınma } [\%] = BA = \frac{\text{Elektrot aşınma hızı}[EAH]}{\text{İş parçası işleme hızı}[İHH]} \times 100$$

4.1.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü

Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), EEİ'de ürün kalitesini ve maliyetini etkileyen önemli bir faktördür. Yüzey pürüzlülüğü, yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçülür. Yüzey kalitesi; termal olarak etkilenen iki katman tarafından belirlenir. Beyaz katman, açılma işlemi sırasında dielektrik akışkan tarafından hızla soğutulan erimiş metalin oluşturduğu katmandır. Isıdan etkilenen bölge, yeniden yapılanma katmanının altında kalan katmandır. Bu durum, metalin metalürjik özelliklerini değiştirmesi nedeniyle oluşur. Isıdan etkilenen bölgenin altında kalan alan ana malzemedir ve bu alan EEİ işleminden etkilenmez[18].

BÖLÜM 5

MATERYAL (MALZEME) VE METOT

5.1. EEİ Tezgâhı

Deneyisel çalışmalarda Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Takım Tezgâhları Laboratuvarında bulunan FURKAN marka, “K1 Z-NC” tip (Şekil 5.1) endüstriyel elektro erozyon tezgâhı kullanılmıştır. Tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan EEİ tezgâhı

Çizelge 5.1. Elektro Erozyon Tezgâhının Genel Özellikleri

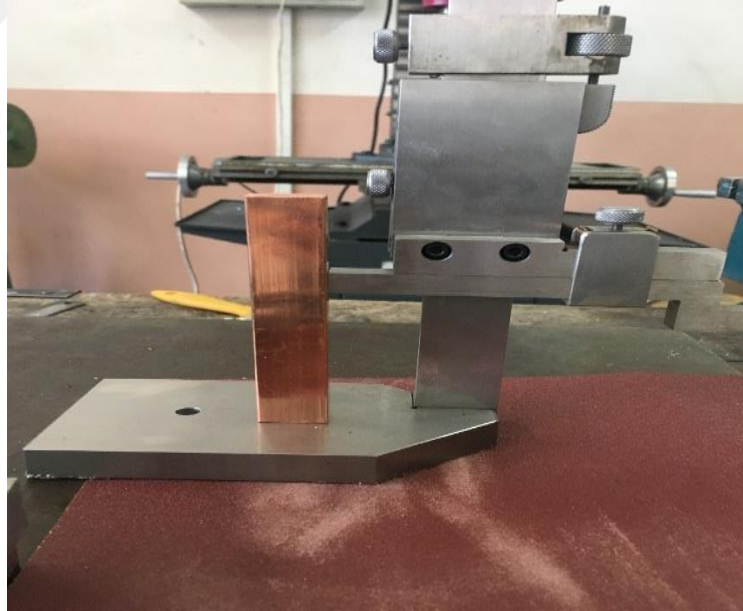
Güç jeneratörü	
Maksimum çalışma akımı	50 A
Maksimum talaş kaldırma (%20 Aşınma)	Grafit - / Çelik + , 350 mm ³ /dak.
Güç seviyesi kademeleri	21 Kademeli-elle kontrol 1/32 1/16 3/32 1/8 3/16 1/4 5/16 3/8 1/2 5/8 3/4 7/8 1 5/4 6/4 7/4 2 2,5 3 3,5 4
Minimum elektrot aşınması	% 0,5
Elde edilebilecek en ince yüzey	1,5 µm (Ra)
Makine gövdesi	
İş tablası ölçüleri (XxY)	550 x 250 mm
Tabla hareket ölçüleri (XxY)	300 x 200 mm
Tabla kızakları	Tümüyle taşlanmış kırılmalı yataklı, konik kamalı
Tabla hareket mekanizması	Trapez vidalı, elle kontrol
İşleme tankı (XxYxZ)	860 x 470 x 280
Maksimum iş parçası ölçüleri (XxYxZ)	660 x 410 x 200 mm
Z eksen	
Hareket kursu	160 mm
Okuma hassasiyeti	0,01 mm
Kaba hareket kızıağı	Tümüyle taşlanmış kırılmalı yataklı
Kaba hareket mekanizması	Trapez vidalı, elle kontrol
Maksimum elektrot ağırlığı	15 kg
Dielektrik sistemi	
Dielektrik depo ölçüleri	950 x 580 x 600 mm
Ağırlık	
Toplam tezgâh ağırlığı	2000kg

5.3. Elektrot

Deneylerde kara lamel formunda 20x10 bakır elektrotlar kullanılmıştır. Deneylerde boyları 15 mm ve %99,99 saflıktaki elektrolitik bakırlar elektrot malzemesi olarak kullanılmıştır ve şekil 5.2’de ise görüntüsü verilmiştir. Çizelge 5.2’de Elektrot malzemesi fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. 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 5.2. Elektrot görünümü

5.4.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

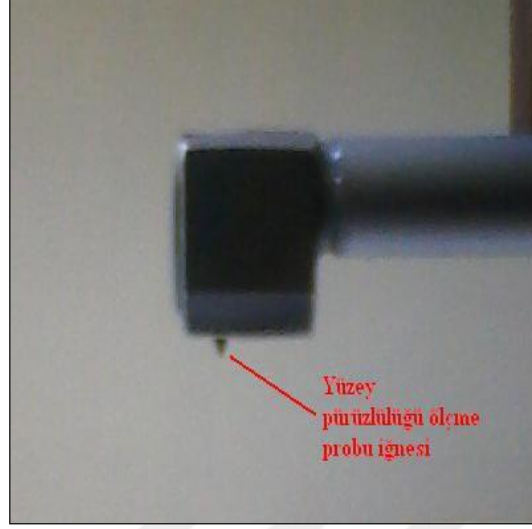
Deneyisel çalışmalarda Mitutoyo SJ 210 yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük cihazı Şekil 5.3’de sunulmuştur. Uzun araştırmalar sonrası bulunan bu cihazın en önemli özelliği ölçüm probu üzerinde yer alan ölçüm iğnesinin yaklaşık 0,5 mm prop dışında yer almasıdır. Bu sayede 0,5 mm’ye kadar olan kanalların yüzey pürüzlülüğü ölçümleri kolaylıkla yapılmaktadır. Bu cihazın kullanım yerlerine göre çeşitli özel propları da bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülük cihazı Resim 5.3’de sunulmuştur.



Şekil 5.3. Mitutoyo SJ 210 yüzey pürüzlülük ölçme cihazı

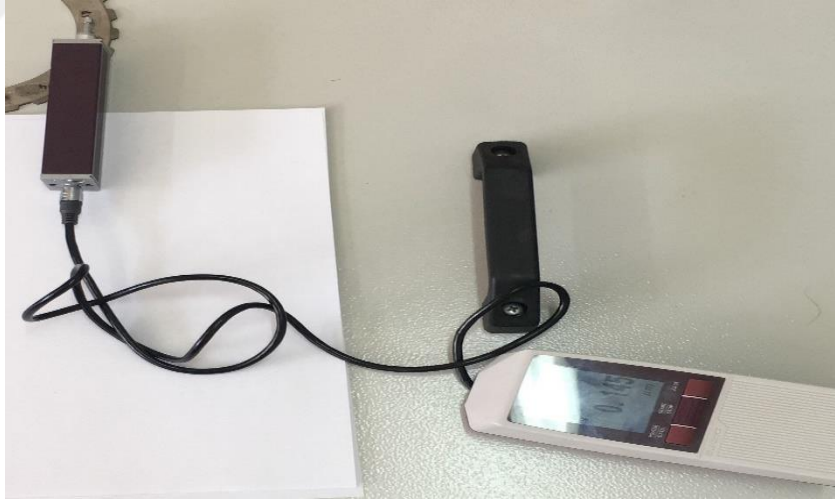
5.5.1. Yüzey Pürüzlülük (Ra) Değerlerinin Tespiti

Yüzey pürüzlülük ölçümleri genelde düzlem yüzeyler üzerinden yapılmaktadır ve bu durumda ölçüm probunun iğne uzunluğu çok fazla önemli değildir. Daha sonra, Mitutoyo SJ 210 model yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazının prop iğne uzunluğu yarıçapları yaklaşık 0,5 mm olan işlenmiş iş parçasının yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için yeterli olmuştur. Mitutoyo SJ 210 model yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazının prop ve iğnesi Şekil 5.4’de görülmektedir.



Şekil 5.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçme probu ve iğnesi

Deneyler sonrasında elde edilen iş parçalarının yüzey pürüzlülük değerleri aynı yüzey üzerinden alınan üç yüzey pürüzlülüğü değerinin ortalaması ile hesaplanmıştır.

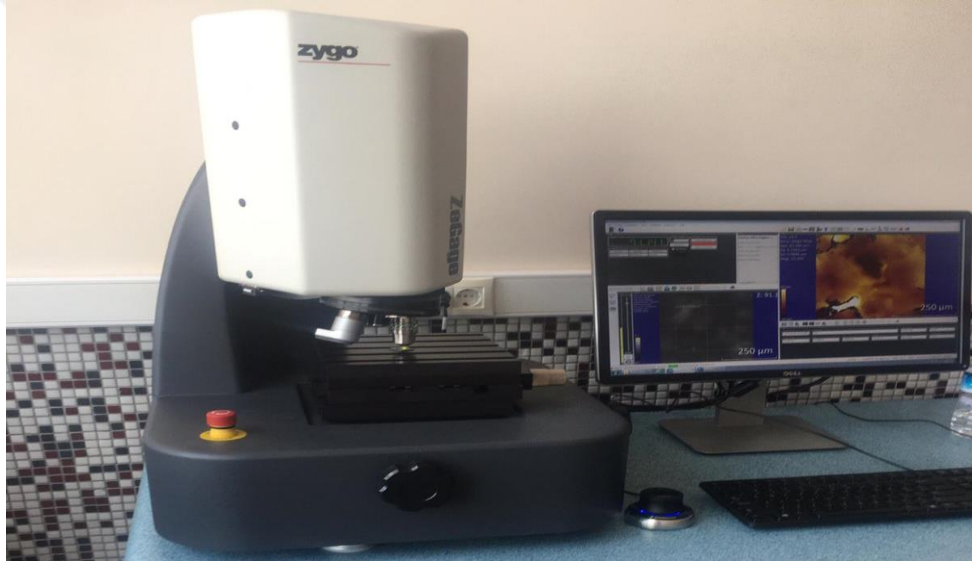


Şekil 5.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçme yapılış gösterimi

Her bir işleme sonrası için yüzey pürüzlülüğü ölçme işlemi başlamadan önce ölçüm probu ve iş parçası malzemesi arasındaki aç, gönye yardımı ile ölçülmüş ve doğru ölçüm alınması sağlanmıştır. Ayrıca kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçme aleti son derece hassas olduğundan delik yüzeyine en ufak bir temassızlık halinde ölçme işlemi kendiliğinden sonlanmıştır.

5.6. Optik Profilometre

Uygulamada, optik bir profilleyici malzemeyi dikey olarak tarar. Görüş alanındaki malzeme odak düzleminde girişim oluşturur. Test materyalindeki her bir yükseklik seviyesi farklı bir zamanda en uygun odağa (ve dolayısıyla en büyük girişim ve kontrast) değerine ulaşır. İyi kalibre edilmiş optik profilometrelerde, bir nanometrenin altında hassasiyet elde etmek mümkündür. Çalışmalarda kullanılan optik profilometre Zygo Zegage profilometredir. Bu cihazın diğer bir adı beyaz ışık interferometresidir. Bu isim ışık kaynağının beyaz ışık olmasından gelir. Ölçümlerde kullanılan profilometre Şekil 5.6’da verilmektedir.



Şekil 5.6. Zygo Zegage Optik Profilometre

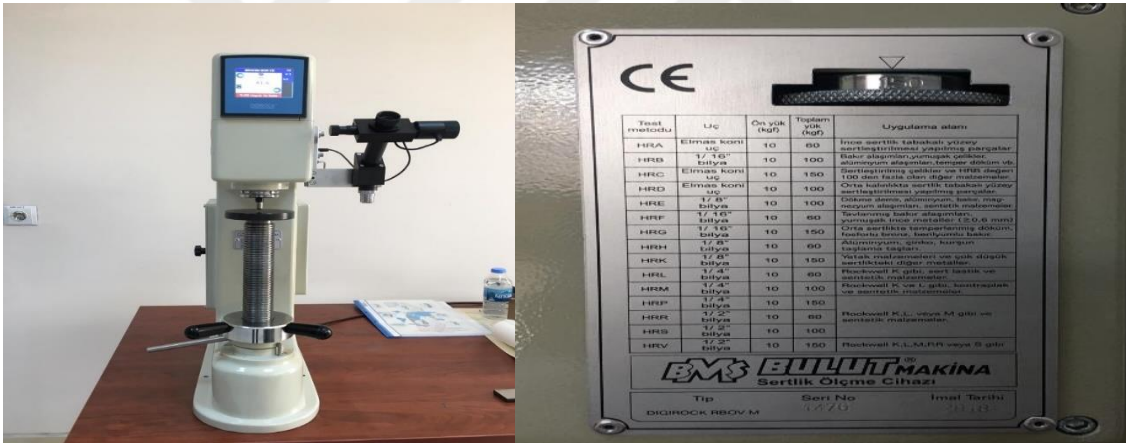
Ölçümlerde kullanılan profilometre cihazın özellikleri Çizelge 5.3’de verilmektedir.

Çizelge 5.3. Zygo Zegage Plus interferometrik objektifler ve özellikleri

Özellik	Zygo 2.75X Michelson	Zygo 20X Mirau	Zygo 50X Mirau
Büyütme Faktörü	2.75	20	50
İnterferometre Tipi	Michelson	Mirau	Mirau
Çalışma Uzaklığı (mm)	4.5	4.7	3.4
Nümerik Açıklık	0.08	0.4	0.55
Optik Çözünürlük (μm)	3.56	0.71	0.52

5.7. Sertlik ölçüm cihazı

Deneyisel çalışmada testlerin uygulama kolaylığı, diğer metodlara nazaran daha seri sonuçlar alınabilme özelliği, bu metodla test yapan sertlik ölçme cihazlarının optik ölçüm gerektiren (Brinell, Vickers) metodlarına nazaran daha ucuz olması yüzünden pratikte en çok kullanılan sertlik ölçme metodudur seçilmiştir. 1200 elmas koni uç veya çeşitli çaptaki bilya uçların yaptığı penetrasyon derinliğinin ölçülmesi metoduna dayanır. Test edilecek malzemeye uygun olarak uç ve yük seçildikten sonra malzemeye 10 kgf'lık bir ön yük uygulanır. (Bu Rockwell Superficial metodunda 3 kgf dur). Bunun amacı malzemedeki oksit, tufal vb gibi farklılıkların elimine edilerek teste başlamaktır. Şekil 5.7- 5.8'de deneylerde kullanılan sertlik ölçüm cihazı ve yapılışı gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Sertlik ölçüm cihazı ve Rockwell sertlik ölçme metoduna göre seçilmesi gereken yükler ve uçlar



Şekil 5.8. Numunelerin sertlik ölçüm yapılışı

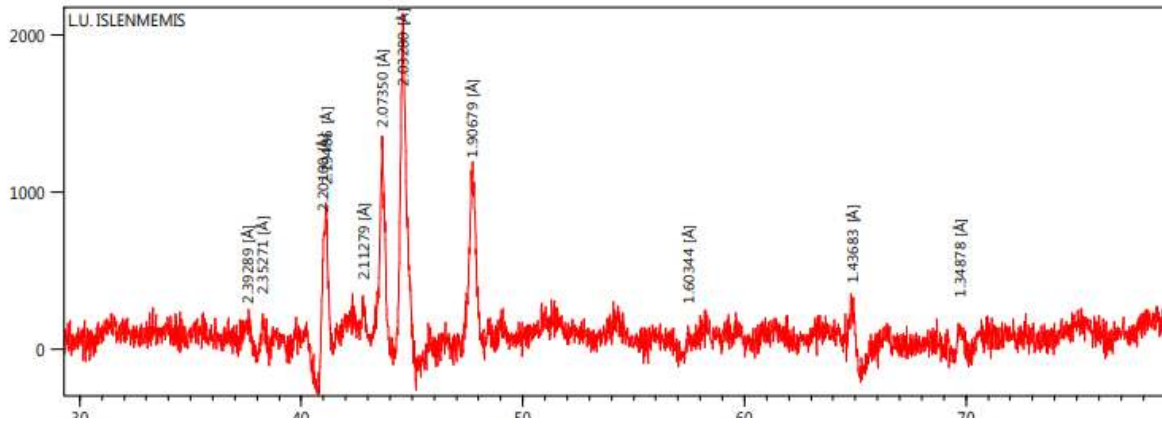
5.8. Malzeme Seçimi

Elektro erozyon ile iş parçası malzemesi olarak Bor alaşımlı çelik seçilmiştir. Aşağıdaki tabloda bor katkılı çelik içinde bulunan elementler ağırlıkça verilmiştir. Çizelge 5.4’ de İş Parçası Malzemesinin ağırlık oranına göre element dağılımı verilmiştir. Analizler Çemaş Döküm A.Ş. firmasında yapılmıştır.

Çizelge 5.4. İş Parçası Malzemesinin ağırlık oranına göre element dağılımı

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	Nb	Ti	B
0,1	0,3	1,2	0,01-0,03	0,05-0,01	<0,001	0,18	0,01	0.002	0.04	0,1	0,0001

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknoloji Tasarım Merkezinde yapılan XRD analizi sonucunda elde edilen bulgular Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. İş parçası XRD analizi

BÖLÜM 6

DENEY TASARIMI VE ANALİZİ

Taguchi'nin tam faktöriyel dizi deney tasarımına göre deneyler planlanmış ve üç farklı faktör işlem parametresi olarak seçilmiştir. Bu parametreler; boşalım akımı (I), vurum süresi (T_{on}), vurum bekleme süresi (T_{off})'dır. İş parçası işleme derinliği 0,5 mm olarak ayarlanmıştır. Yani 0,5 mm'deki işleme derinliğine göre deneyler yapılmıştır. İşleme derinliği yapılan bütün deneylerde sabit tutulmuştur. Uygulanan girdi parametrelerin, deney sonrası elde edilecek malzeme kaldırma oranı, elektrot aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir.

Boşalım akımı olarak 6 A, 12 A ve 25 A seçilmiştir. Vurum süresi (T_{on}) 50 μs , 100 μs ve 200 μs ve Vurum Bekleme süresi (T_{off}) da 6 μs , 24 μs ve 48 μs seçilmiştir. Taguchi L_{27} dikey dizinine göre uygulanan deney tasarımı Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deney Tasarımı gösterimi

No	Güç Akım	Vurum süresi (T_{on})	Vurum bekleme süresi (T_{off})
1	6A	50 μs	6 μs
2	6A	50 μs	24 μs
3	6A	50 μs	48 μs
4	6A	100 μs	6 μs
5	6A	100 μs	24 μs
6	6A	100 μs	48 μs
7	6A	200 μs	6 μs
8	6A	200 μs	24 μs
9	6A	200 μs	48 μs
10	12A	50 μs	6 μs
11	12A	50 μs	24 μs
12	12A	50 μs	48 μs
13	12A	100 μs	6 μs
14	12A	100 μs	24 μs
15	12A	100 μs	48 μs
16	12A	200 μs	6 μs
17	12A	200 μs	24 μs
18	12A	200 μs	48 μs
19	24A	50 μs	6 μs
20	24A	50 μs	24 μs

21	24A	50 μs	48 μs
22	24A	100 μs	6 μs
23	24A	100 μs	24 μs
24	24A	100 μs	48 μs
25	24A	200 μs	6 μs
26	24A	200 μs	24 μs
27	24A	200 μs	48 μs

İş parçaları, işleme öncesi ve sonrası temizlenip kurutulduktan sonra 0,005 gr hassasiyete sahip HANA marka terazi ile tartılmıştır. Her iş parçası için bulunan hacimsel fark işleme süresine bölünerek iş parçası işleme hızı değeri hesaplanmıştır. Aynı şekilde elektrotlar işleme öncesi ve sonrası temizlenip kurutulduktan sonra tartılmıştır. Aradaki hacimsel fark yoğunluk değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir elektrot için elde edilen hacimsel fark işleme süresine bölünerek elektrot aşınma hızı belirlenmiştir.

6.2. Deneysel Çalışma

6.2.1. İşleme Parametreleri

Yapılan literatür taraması ile 3 farklı akım değerinin (6A, 12A, 24A), 3 farklı vurum süresinin (50 μs , 100 μs , 200 μs), 3 farklı vurum bekleme süresinin (6 μs , 24 μs , 48 μs) deneyler için uygun olacağı düşünülmüştür. Yapılan deneylerde kutuplama, işleme aralığı, geri çekme süresi, dielektrik sıvı cinsi, dielektrik sıvı uygulama yöntemi, iş parçası ve elektrot geometrileri sabit tutulmuştur. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri Çizelge 6.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Deneylerde Kullanılan İşleme Parametreleri

Deney Parametresi	Değer
Boşalım Tepe Akımı (Amper) (A)	6 12 24
Vurum süresi (μs)	50 100 200
Vurum bekleme süresi (μs)	6 24 48
Malzeme üzerinde kalma (sn)	5
Elektrot Kutbu	-

6.2.2. Deneyler Esnasında Yapılan Ölçümler

Deneyler esnasında yapılan ölçümler aşağıda sunulmuştur:

6.2.2.1. İş parçası ilk ve son ağırlıkları:

İşleme öncesi nihai ölçülerine getirilen iş parçaları 0,005 gr hassasiyetinde dijital terazi ile tartılmış ve kaydedilmiştir. İşleme tamamlandıktan sonra iş parçaları basınçlı hava yardımı ile temizleme ve kurutma işlemine tabi tutularak tekrar tartılmış ve ilk ölçüm ile işleme sonrası ölçüm arasındaki fark kaldırılan talaş miktarı olarak hesaplanmıştır.

6.2.2.2. İşleme süresi:

Her bir iş parçası için deneyler esnasında EEİ işlemi ilk kıvılcım boşalımı gerçekleşmesi ile kıvılcım sonlanması arasındaki süre bir kronometre yardımı ile ölçülmüştür.

6.2.2.3. Elektrot ilk ve son ağırlıkları:

Her deney için ayrı ayrı kullanılan elektrotlar işleme öncesinde tartılmış ve kaydedilmiştir. İşlem tamamlandıktan sonra elektrot içerisine basınçlı hava tutulmuş ve kurutma işlemi yapılmıştır. Daha sonra elektrot ilk ağırlığı ile son ağırlığı arasındaki fark hesaplanmıştır. Ölçümler yine 0,005 gr hassasiyetindeki dijital terazi ile yapılmıştır.

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR

7.1. Deney Sonuçları

Bu çalışmada, yapılan tüm deneylerde 42.6 HRC'ye sertlikteki bor alaşımlı çelik ve elektrot olarak 10x20 mm kare lamel %99,99 saflıktaki elektrolitik bakır çubuklar kullanılmıştır. Deney tasarımında üç farklı parametre kullanılarak toplamda 27 farklı deney yapılmıştır. Her deney farklı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Her deney öncesi ve sonrası hem iş parçaları hem de elektrotlar hassas terazide tartılarak kütle kayıpları hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.1.'de gösterilmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra iş parçasının ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) ölçülmüş ve İHH, EAH BA değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.2.). Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi (L_{27}) 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 (İHH, EAH, iş parçası yüzey pürüzlülüğü) hangi önem sırasıyla etki ettiği bulunmuştur.

Çizelge 7.1. Deney çıktıları

No	Akım	Ton	Toff	Malzeme Deney öncesi ağırlık	Malzeme Deney sonrası ağırlık	Takım Deney öncesi ağırlık	Takım Deney sonrası ağırlık	Zaman
1	6A	50 μ s	6 μ s	86,430	86,220	166,735	166,725	3,52
2	6A	50 μ s	24 μ s	86,220	85,680	166,705	166,685	15,26
3	6A	50 μ s	48 μ s	85,680	85,020	166,670	166,655	15,26
4	6A	100 μ s	6 μ s	85,020	84,145	166,680	166,670	19,06
5	6A	100 μ s	24 μ s	84,145	83,875	166,760	166,755	7,23
6	6A	100 μ s	48 μ s	83,875	83,525	166,700	166,705	7,01
7	6A	200 μ s	6 μ s	83,525	83,265	166,705	166,705	7,25
8	6A	200 μ s	24 μ s	83,265	82,725	166,755	166,760	5,19
9	6A	200 μ s	48 μ s	82,725	82,270	166,750	166,750	10,50

10	12A	50 μ s	6 μ s	82,270	81,935	166,700	166,660	9,38
11	12A	50 μ s	24 μ s	81,935	81,400	166,740	166,740	2,20
12	12A	50 μ s	48 μ s	81,400	81,045	166,780	166,740	4,19
13	12A	100 μ s	6 μ s	81,045	80,695	166,725	166,715	3,38
14	12A	100 μ s	24 μ s	80,695	80,385	166,510	166,505	2,01
15	12A	100 μ s	48 μ s	80,385	80,090	166,745	166,730	2,07
16	12A	200 μ s	6 μ s	85,840	85,235	166,700	166,700	2,13
17	12A	200 μ s	24 μ s	85,235	84,670	166,705	166,705	3,36
18	12A	200 μ s	48 μ s	84,670	84,240	166,500	166,500	2,49
19	24A	50 μ s	6 μ s	83,890	83,550	166,735	166,700	1,12
20	24A	50 μ s	24 μ s	83,550	83,205	166,680	166,650	1,30
21	24A	50 μ s	48 μ s	83,205	83,040	166,705	166,635	0,55
22	24A	100 μ s	6 μ s	83,040	82,810	166,800	166,770	0,42
23	24A	100 μ s	24 μ s	82,810	82,285	166,680	166,600	1,42
24	24A	100 μ s	48 μ s	82,285	81,840	166,715	166,625	1,48
25	24A	200 μ s	6 μ s	81,840	81,200	166,665	166,650	1,36
26	24A	200 μ s	24 μ s	81,200	80,410	166,645	166,635	1,54
27	24A	200 μ s	48 μ s	80,410	79,730	166,620	166,580	1,48

Çizelge 7.2. Deney sonuçları

Akım, (A)	Vurum süresi μ s	Vurum bekleme süresi, μ s	Deney No	İİH(gr/dak)	EAH(gr/dak)	BA, (%)	Ra, (μ m)
6	50	6	1	0,05431971	2,586653	4,761905	0,011
		24	2	0,03498996	1,295924	3,703704	0,010
		48	3	0,0427655	0,971943	2,272727	0,012
	100	6	4	0,04602841	0,526039	1,142857	0,011
		24	5	0,0365705	0,677231	1,851852	0,012
		48	6	0,04988597	0,712657	1,428571	0,011
	200	6	7	0,03505933	0,539374	1,538462	0,011
		24	8	0,1015801	0,940557	0,925926	0,026
		48	9	0,04200129	0,184621	0,43956	0,011

Çizelge 7.2 (Devam). Deney sonuçları

Akım, (A)	Vurum süresi μs	Vurum bekleme süresi, μs	Deney No	İİH(gr/dak)	EAH(gr/dak)	BA, (%)	Ra, (μm)
12	50 μs	6	10	0,0352048	0,0041523	11,9403	0,045
		24	11	0,2293185	0,0012858	0,56074	0,012
		48	12	0,08225209	0,0092678	11,2676	0,019
	100	6	13	0,09633911	0,0027525	2,85714	0,028
		24	14	0,1537698	0,0024801	1,61290	0,029
		48	15	0,139414	0,0070888	5,08474	0,037
	200	6	16	0,2730144	0,0270758	9,91735	0,052
		24	17	0,1846405	0,000326	0,17699	0,029
		48	18	0,1526989	0,0177556	11,6279	0,034

Akım, (A)	Vurum süresi μs	Vurum bekleme süresi, μs	Deney No	İİH(gr/dak)	EAH(gr/dak)	BA, (%)	Ra, (μm)
24	50	6	19	0,2833333	0,0291666	10,2941	0,028
		24	20	0,230	0,020	8,69565	0,227
		48	21	0,180131	0,0764192	42,4242	0,1198
	100	6	22	0,3285714	0,0428571	13,0434	0,029
		24	23	0,3088235	0,0470588	15,2381	0,027
		48	24	0,2472222	0,050	20,2247	0,036
	200	6	25	0,400	0,009375	2,34375	0,29
		24	26	0,4157895	0,0052631	1,26582	0,032
		48	27	0,3777778	0,0222222	5,88235	0,037

7.2. Sertlik ölçüm sonuçları

Bor alaşımlı çeleğin sertlik değeri Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında ilk olarak işlenmemiş numunenin sonra farklı parametrelerde işlenmiş numunelerin işlenmiş bölgelerinden sertlik değerleri ölçülmüştür ve Çizelge 7.3’de sertlik sonuçları sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 7.3. İş parçası sertlik sonuçları

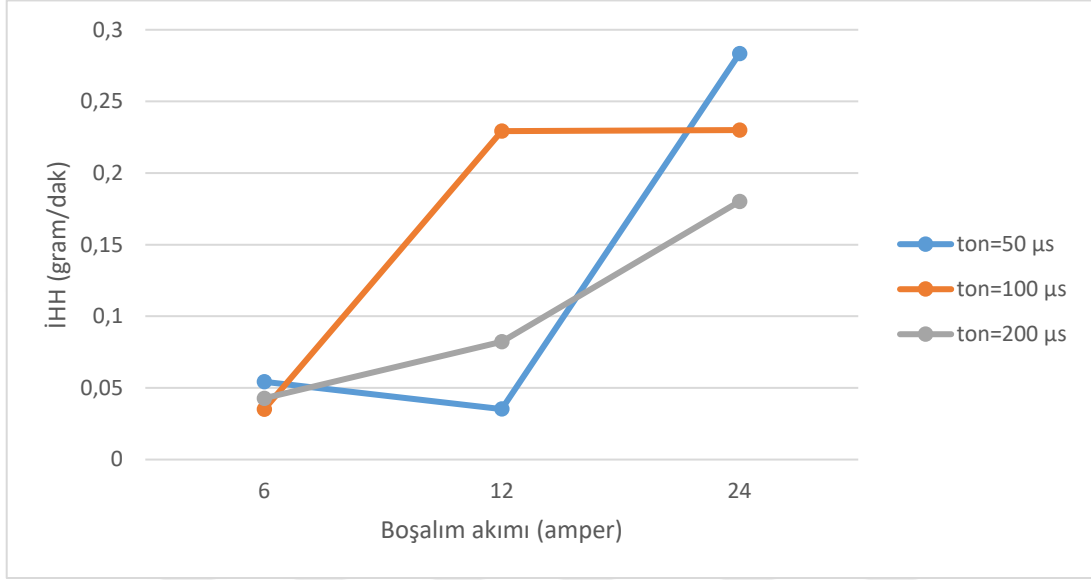
İşlenmemiş numune	2 nolu numune	5 nolu numune	12 nolu numune	15 nolu numune	16 nolu numune	20 nolu numune	23 nolu numune
42,6	33,5	35,9	36	37	33,9	39,4	38,1

7.3. Bulgular

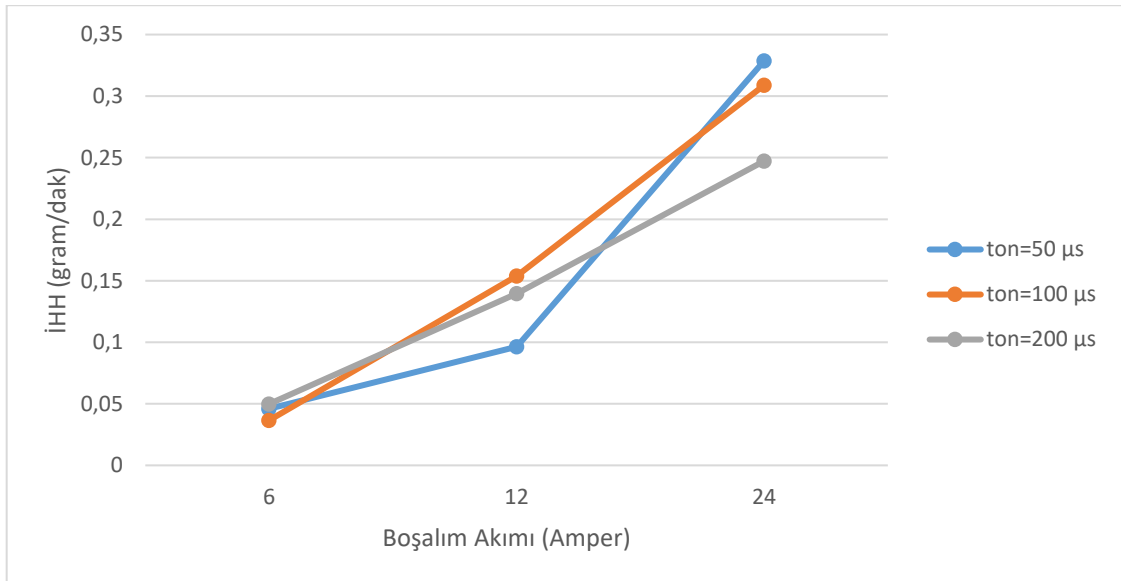
Elektro erozyon ile işleme (EEİ) yönteminde kullanılan çeşitli işlem parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi), işleme performansı çıktıları (İş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, iş parçası yüzey pürüzlülüğü) üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde işleme parametreleri olarak; boşalım akımı (I) (6, 12 ve 24 A), vurum süresi (T_{on}) (50, 100, 200 μs), vurum bekleme süresi (T_{off}) (6, 24, 48 μs), kullanılmıştır ve elde edilen deneysel sonuçlar sonraki kısımlarda detaylı bir şekilde verilmiştir.

7.3.1. İşleme Parametrelerinin İş parçası İşleme Hızına (İİH) Etkisi

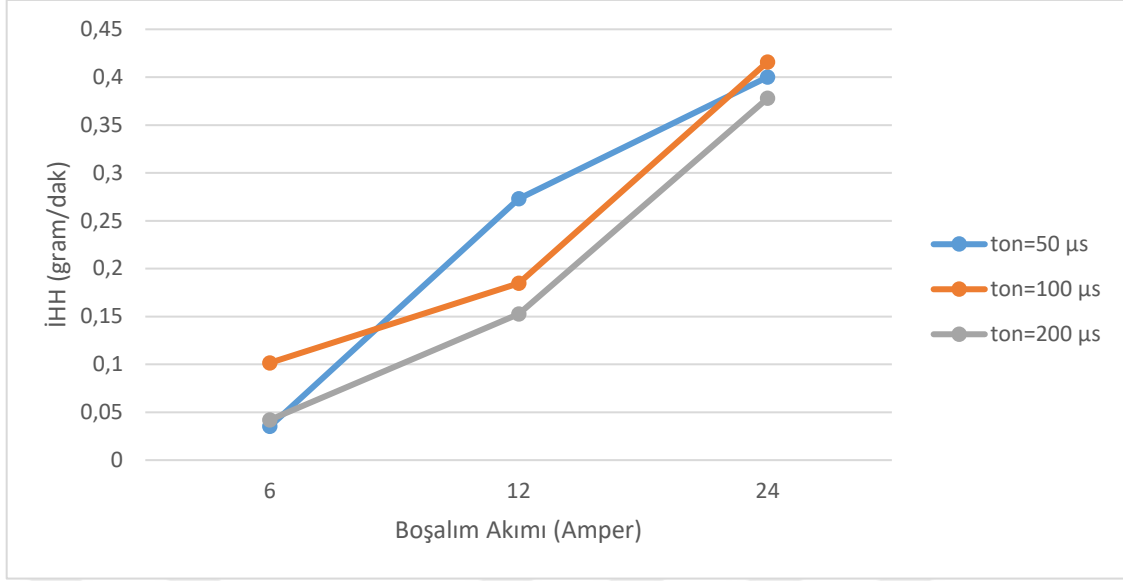
Elektroerozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin İİH'ya etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir ve elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 7.1- Şekil 7.3).



Şekil 7.1. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH' ya etkisi (T_{off}=6 µs)



Şekil 7.2. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'ya etkisi (T_{off}=24 µs)



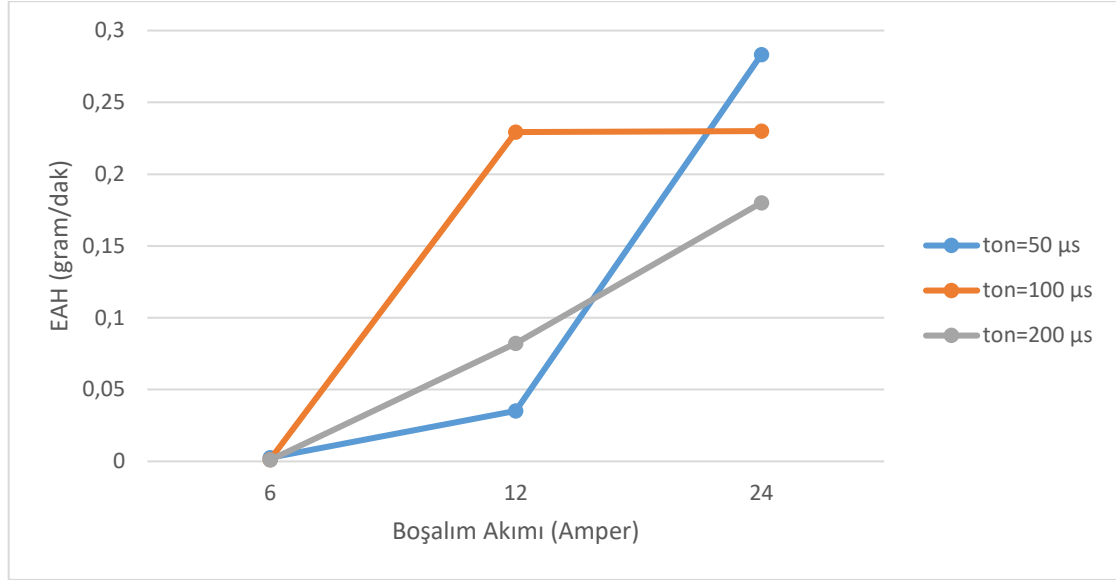
Şekil 7.3. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin İİH'ya etkisi ($T_{off} = 48 \mu s$)

Yapılan deneysel çalışmalarda iş parçası işleme hızının boşalım akımı ve vurum süresi (T_{on}) artmasıyla birlikte arttığı, vurum bekleme süresi (T_{off}) artmasıyla birlikte de arttığı görülmüştür.

İİH iş parçasına boşalan enerjiye bağlıdır; bu da boşalım akımı ve vurum süresiyle doğru orantılıdır (Eşitlik 3.2 $W_s = e(t) \times i_e(t) \times dt \approx u_e \times i_e \times i_e(t)$). Boşalım akımı ve vurum süresinin artması boşalım enerjisinin artmasını sağlar. Akımın artması, daha fazla elektronun iş parçasına düşmesi, artan T_{on} değeri ise bu düşme süresinin artışı anlamına gelmektedir. Yani vurum süresinin artışı ile boşalım enerjisi uzun süreli boşalmaktadır. Böylelikle boşalım enerjisinin artması iş parçasında daha geniş bir alanının ısınmasına neden olarak, iş parçasından daha fazla miktarda malzemenin ergitilmesine neden olarak İİH'nın artmasını sağlamaktadır. Bu nedenle boşalım akımındaki artış iş parçası işleme hızının artmasına neden olmuştur[7]. T_{off} değerinin artışı ile işleme esnasında arka arkaya boşalan kıvılcımların arasında ki bekleme süresinin artışı anlamına gelmektedir. T_{off} artış durumu, işleme boşluğunda ki işleme artıklarının daha etkili uzaklaştırılmasını sağladığı gibi İİH değeri de azalma eğilimi göstermektedir. En düşük İİH 6 A akımında ve $50 \mu s$ T_{on} süresinde yaklaşık 0,03498996 gr/dak en yüksek İİH ise 24 A akımında ve $200 \mu s$ T_{on} süresinde yaklaşık 0,4157895 gr/dak olarak hesaplanmıştır.

8.3.2. İşleme Parametrelerinin Elektrot Aşınma Hızına (EAH) Etkisi

Elektro erozyon 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 7.4- Şekil 7.6).



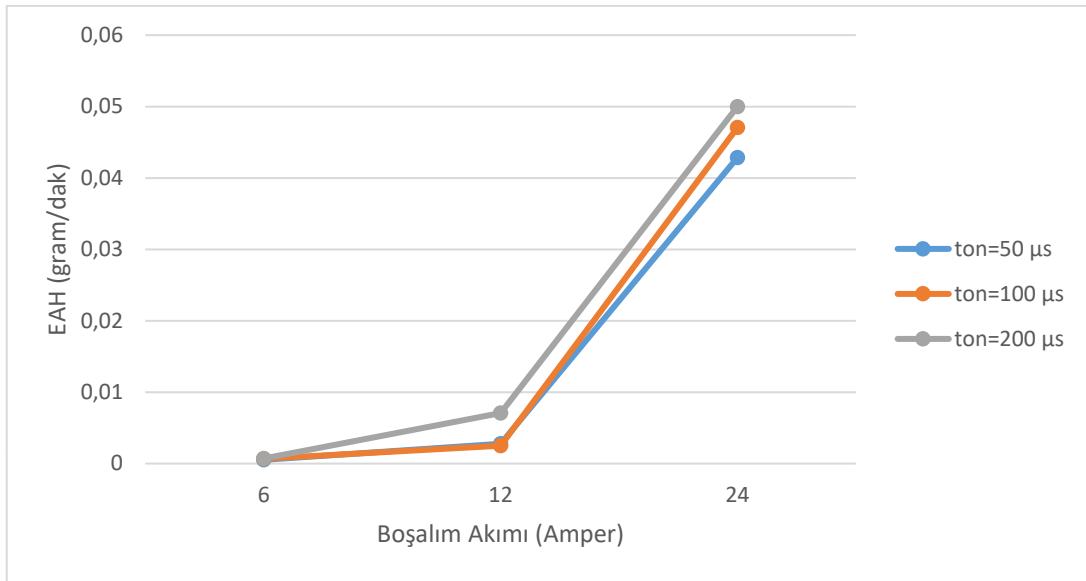
Şekil 7.4. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'na etkisi ($T_{off}=6 \mu s$)

Şekil 7.4 incelendiğinde, boşalım akımının artırılmasıyla EAH' nın arttığı görülmektedir. Enerji boşalımı sırasında akımın iletkenliğini ile ısı durumunu etkileyen elektrot ve iş parçası arasında bir plazma kanalı oluşmaktadır. Böylece boşalım akımının artmasıyla meydana gelen yüksek miktarda ki ısıl erozyonun elektrot yüzeyinde oluşan sıcaklığı artırması, takımın aşınmasının ana nedeni olarak açıklanabilir.

Aynı T_{on} değerinde akım artışı ile EAH değerinde bir artış meydana gelmiştir. Yüksek akım, yüksek kıvılcım boşalım enerjisine oluşumunu sebep olup, bu durum iş parçasından ve takımdan daha fazla malzeme ergimesine neden olur. Her akım değerinde için T_{on} artırıldığında EAH azalmıştır. Bunun nedeni, işleme esnasında elektrotun alt yüzeyinde plazma kanalının sıcaklığı nedeniyle yüksek oranda karbon birikimi olmasıdır.

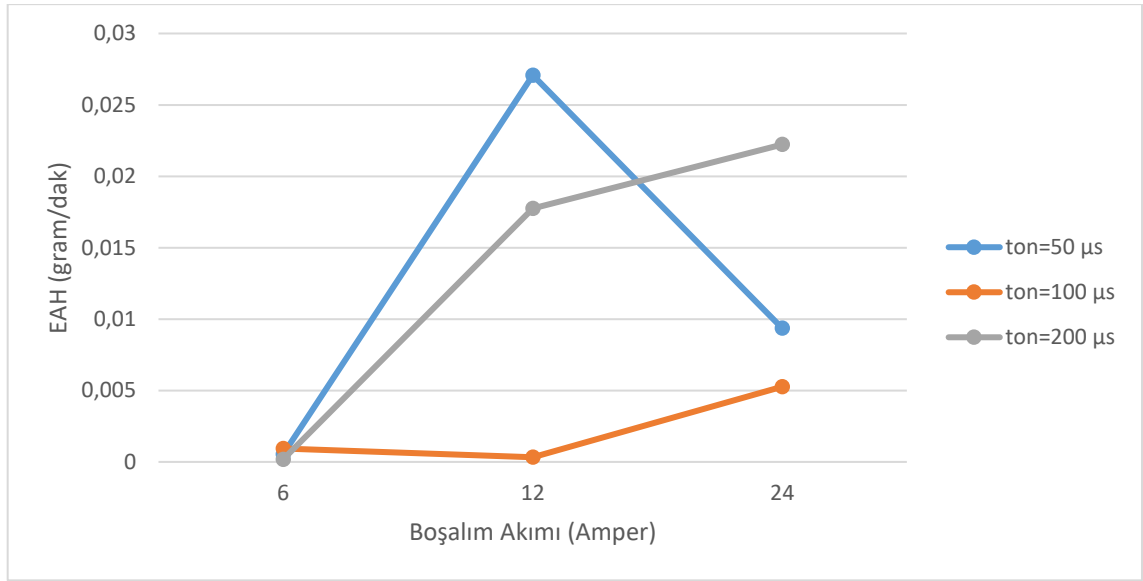
Daha uzun T_{on} süresi, bakır elektrot için aşınmaya dirençli katman olarak işlev gören ve elektrot aşınmasını azaltmaya yardımcı olan elektrot yüzeyinde karbon birikimini artırma eğilimindedir. En düşük EAH 12 A akımında ve $200 \mu s$ T_{on} süresinde yaklaşık 0,000326

gr/dak en yüksek EAH ise 6 A akımında ve 50 μs Ton süresinde yaklaşık 2,586653 gr/dak olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.5. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH' ya etkisi ($T_{off}=24 \mu s$)

T_{on} arttıkça EAH' nın önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Kıvılcımın boşalımının başlangıcında, elektronların hareketi iş parçası yakın bölgedeki iyon hareketinden fazla olmasından dolayı, iş parçasından ergitilip boşaltılan malzeme miktarına göre takım yüzeyindeki aşınma miktarı yüksektir. Diğer bir ifade ile EAH' nın azalmasındaki faktör, EAH' nın azalmasına yol açan kıvılcımların sayısının düşmesine yol açan artan T_{on} değeri ile dielektrik sıvının kirliliğinin artmasıdır. En yüksek EAH 50 μs T_{on} değerinde 2,586653 olarak ve en düşük EAH ise 200 μs değerinde 0,000326 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.6. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin EAH'ya etkisi ($T_{off}=48 \mu s$)

Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı arttıkça elektrot aşınma hızının boşalım akımıyla beraber arttığı, vurum süresinin artmasıyla elektrot aşınma hızının artıp sonra azaldığı gözlenmiştir. Elektrot aşınma hızı için vurum süresinin etkisinin az olduğu ve işleme şartlarına göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür ($Ws = u_e(t) \times i_e(t) \times dt \approx u_e \times i_e \times t$) (Eşitlik 3.2). EEI' de akımdaki artış boşalım enerjisini arttıracığından (Eşitlik 3.2) 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.

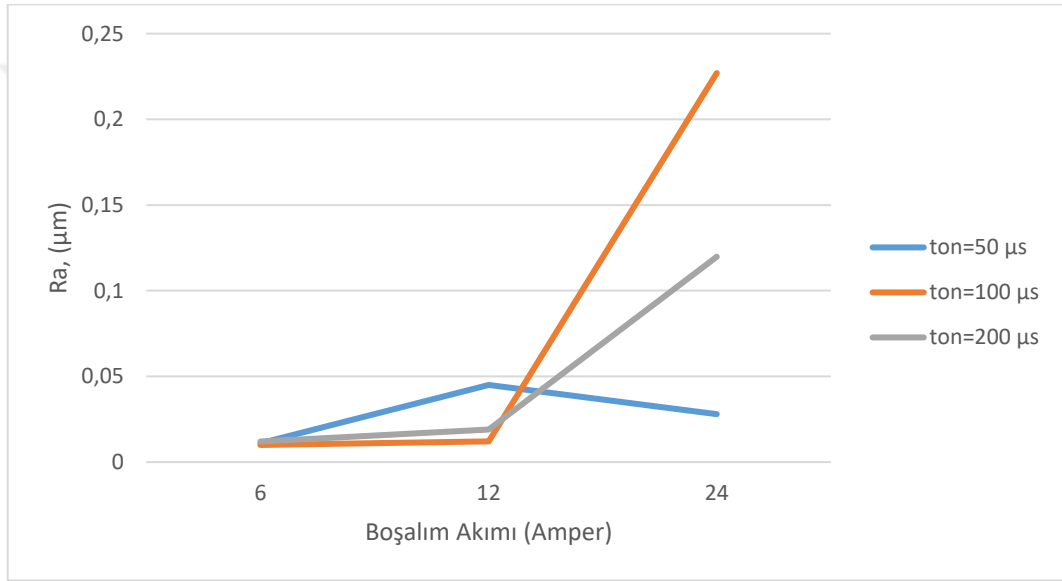
Boşalım akımının 24 A olduğu deney grubu için, vurum bekleme süresinin 50 µs ve 100 µs'lik değerlerinde vurum süresinin artması elektrot aşınma miktarının artmasına yol açarken, vurum süresinin 200 µs' ye çıkması elektrot aşınma miktarının T_{off} 6 µs' de azalmasına neden olduğu görülmüştür.

Boşalım akımının 12 A olduğu deney grubu için, vurum süresinin 50 µs, 100 µs, 200 µs değerleri için vurum bekleme süresinin artması elektrot aşınma miktarının artmasına neden olduğu görülmüştür.

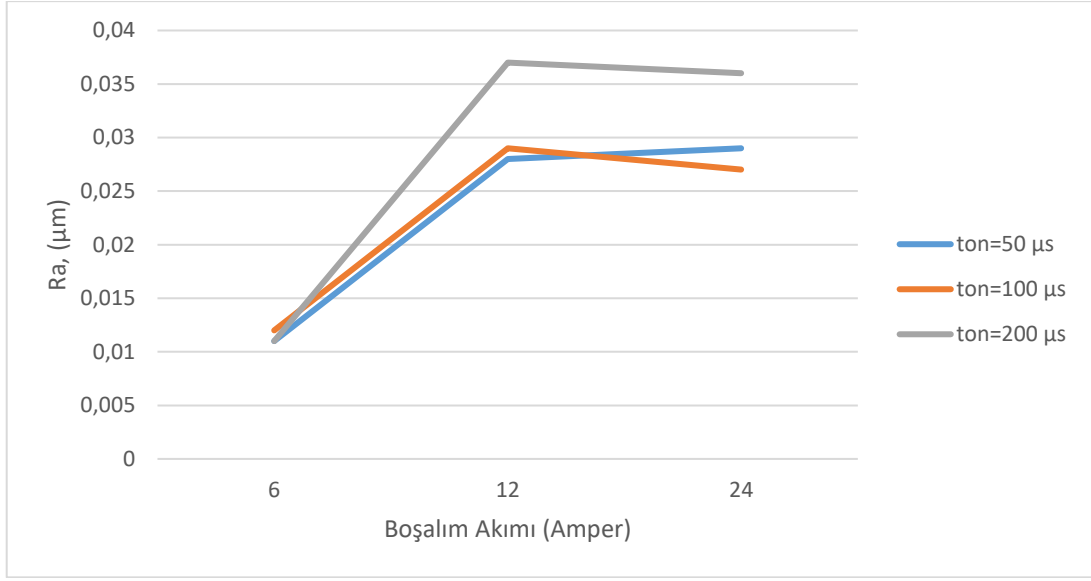
7.3.3. İşleme Parametrelerinin İş parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Elektroerozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir. Elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 7.7-Şekil 7.9)

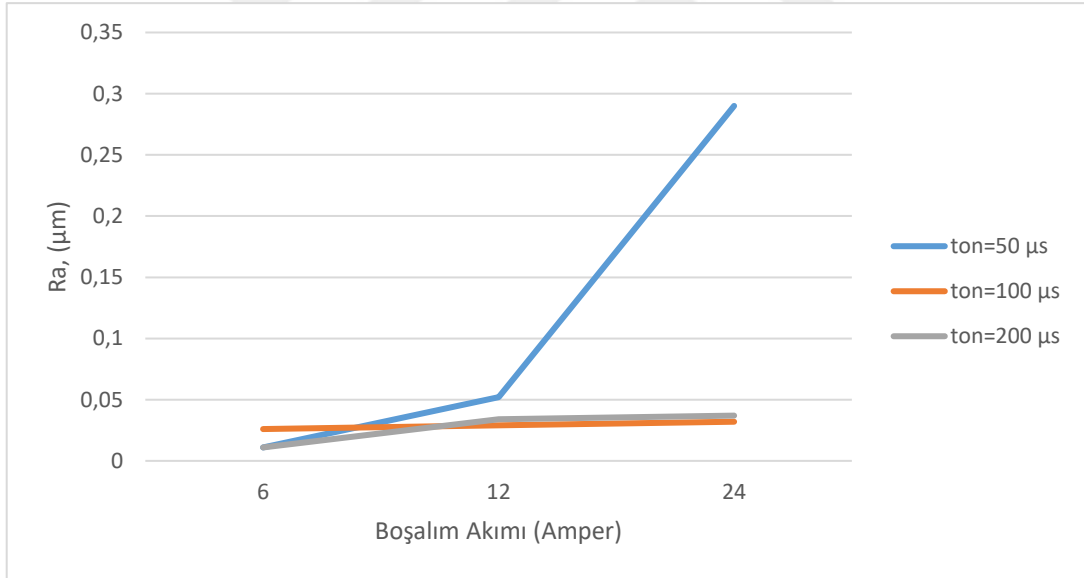
Bu teknikte imalat sonrası yüzey pürüzlülük deseni kraterli yapıdadır. Kıvılcım boşalımı İş parçası yüzeyine birbiri peşi sıra düşmesinden dolayı en son kıvılcımlar erozyon işlemini gerçekleştirdikten sonra üst üste binmiş kraterler yüzeyde pürüzlülük desenlerini meydana getirmiştir.



Şekil 7.7. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi ($T_{off}=6 \mu s$)



Şekil 7.8. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi ($T_{off}=24 \mu s$)



Şekil 7.9. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi ($T_{off}=48 \mu s$)

Elektro erozyonla işleme sırasında işlenmiş yüzeylerde ergime, buharlaşma ve dielektrik sıvının patlaması sonucu oluşan tepkisel kuvvetten dolayı çeşitli boyutlarda yüzey kraterleri oluşmaktadır. Bu nedenle işlenmiş yüzeyin topografyası düzensiz haldedir [15]. Boşalım akımının artması ile daha geniş ve derin kraterlerin meydana geldiği bu işleme tekniğinin fiziksel mantığında vardır. Yüksek enerji yoğunluğu daha geniş ve derin kraterlerin ergitilmesi ve bu da daha kısa zamanda fazla malzeme erozyon edilmesi anlamına gelmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi R_a değeri akım ile artış göstermiş ve bu durum İİH değişimi ile de uyumlu olmuştur.

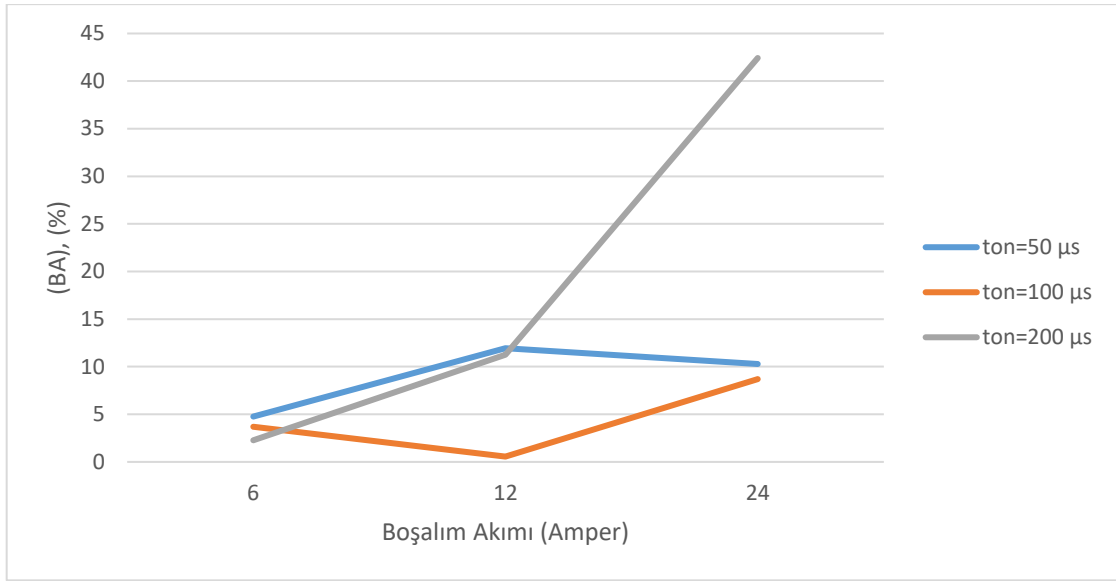
T_{on} parametresi R_a değerini etkileyen önemli girdilerden biri olmuştur. T_{on} değeri, kıvılcımın yüzeye düşme süresi olduğundan bu değerin artışı ile daha geniş ve derin ergitmeler meydana gelerek büyük kraterler oluşmuştur. En yüksek R_a değeri 0,1198 $T_{on}=50 \mu s$ akım=24 A değerinde, en düşük R_a ise 0,011 olarak $T_{on}=200 \mu s$ değerinde ölçülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmalarda boşalım akımı arttığında ve vurum süresi 50 μs 100 μs iş parçası yüzey pürüzlülük değerinin arttığı gözlenmiş ve 200 μs 'lik değerde ise sadece $T_{off}=6 \mu s$ değerinde değişim olduğu gözlenmiştir. I ve T_{on} yüksek olduğu zaman kıvılcım yoğunluğu (enerji yoğunluğu) ve boşalım gücü daha fazla olur. Bu da iş parçası yüzeyinde daha derin ve geniş krater oluşumuna neden olacak miktarda malzeme kaldırılmasını sağlayarak iş parçasının yüzeyinin daha pürüzlü bir hal almasına neden olmuştur. Ayrıca yapılan deneysel çalışma sonucunda vurum bekleme süresinin iş parçası yüzey pürüzlülük değerine etkisinin çok az olduğu görülmüştür.

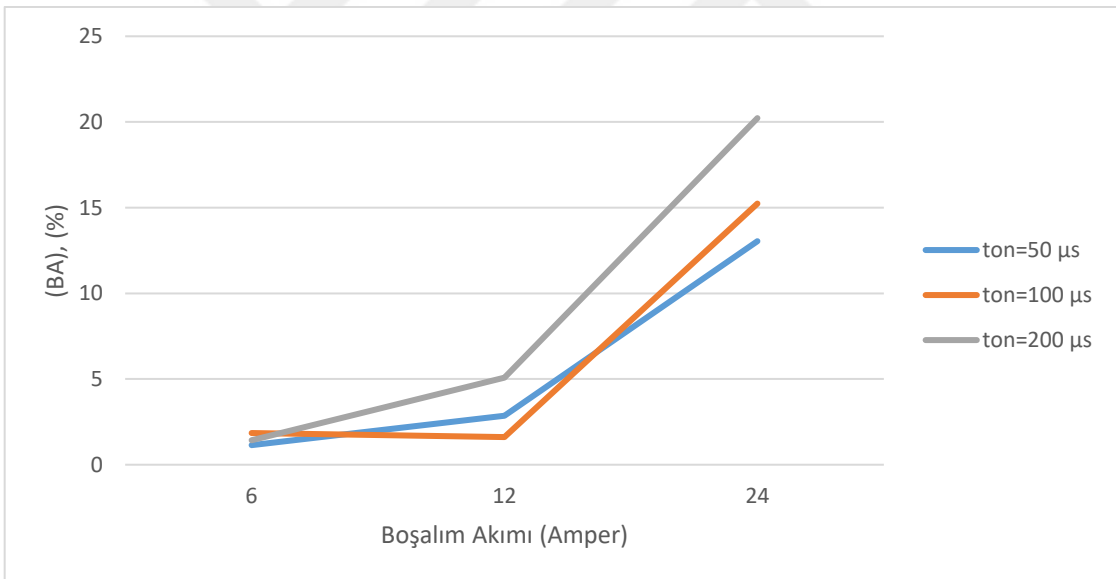
7.3.4. İşleme Parametrelerinin Bağlı Aşınma (BA), (%) Etkisi

EEİ'de genellikle daha İİH arzu edilir, ancak daha yüksek İİH daha yüksek bir EAH' ya yol açar. Bunun yanı sıra yüksek EAH, iş parçasının işlenmiş yüzey kalitesini etkileyen takım şeklini de deforme eder. Çünkü işlenmiş yüzey, takım yüzeyinin tam bir kopyasıdır. Bu sınırlamanın üstesinden, bağlı aşınma oranını (BA) yükselterek aşılabılır.

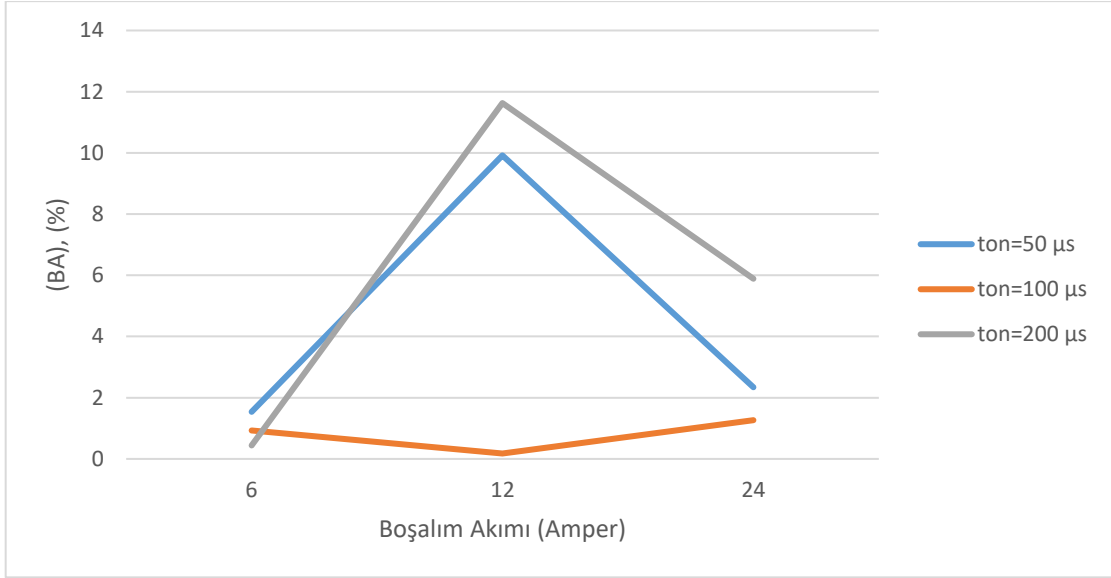
Elektro erozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin bağlı aşınma etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir. Elde edilen grafikler aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 7.10- Şekil 7.12).



Şekil 7.10. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin Bağıl Aşınmaya etkisi ($T_{off}=6 \mu s$)



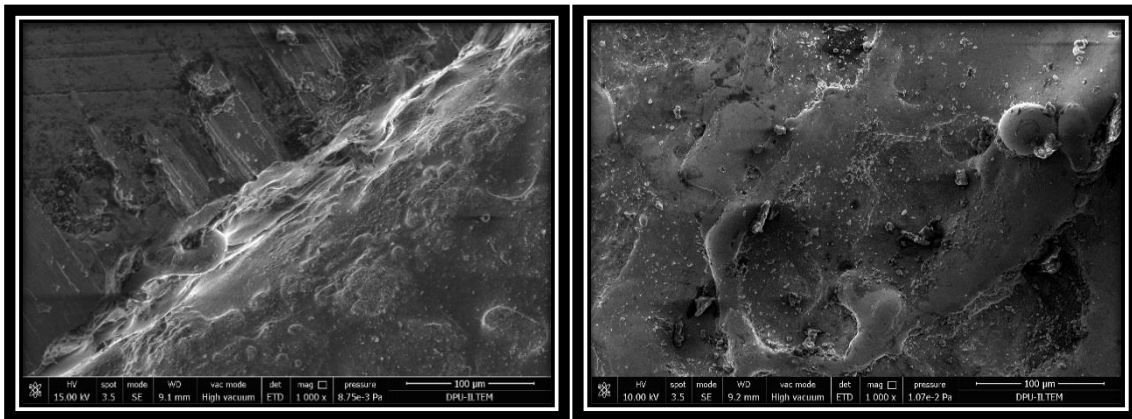
Şekil 7.11. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin Bağıl Aşınmaya etkisi ($T_{off}=24 \mu s$)



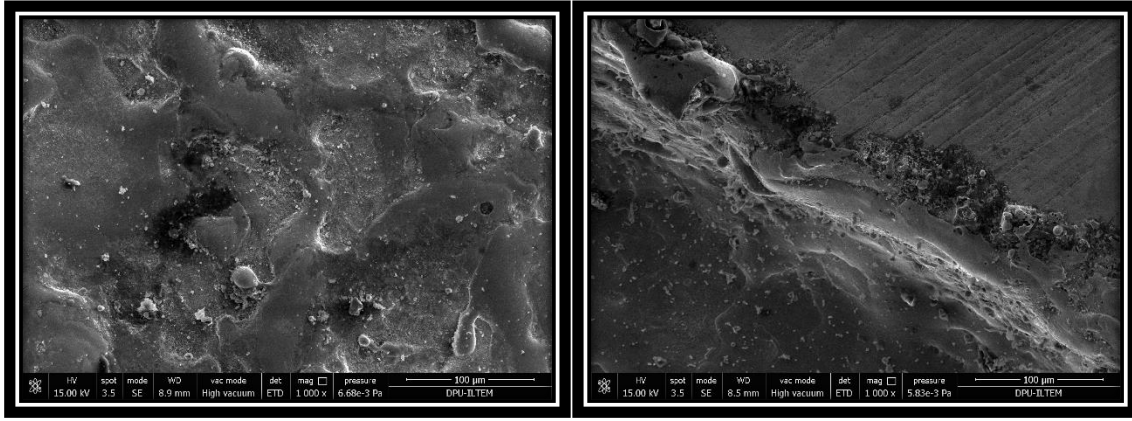
Şekil 7.12. Boşalım akımı ve vurum bekleme süresinin Bağlı Aşınmaya etkisi ($T_{off}=48 \mu s$)

7.4 Bor Alaşımli Çeliğin Yüzeylerinin SEM İncelemesi

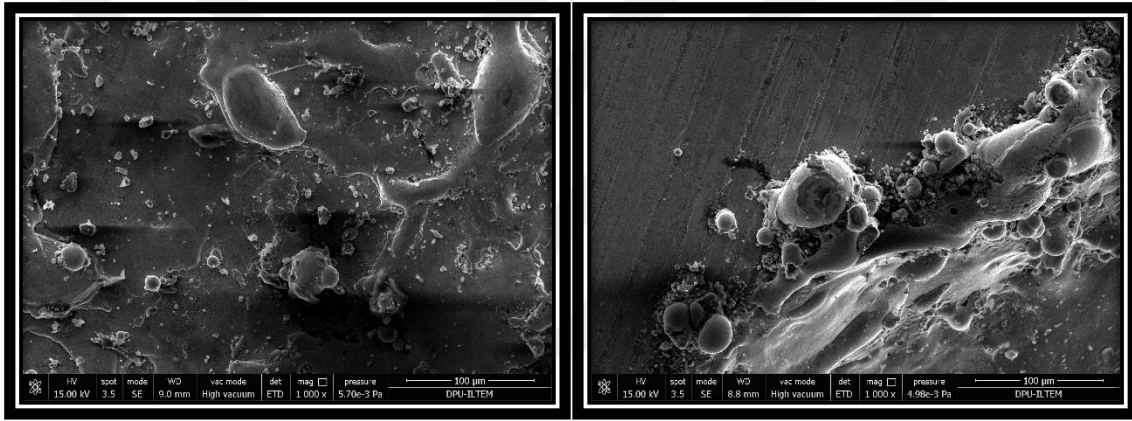
Şekil 7.13- Şekil 7.19 yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Boşalım akımının artmasıyla oluşan yüzey hasarlarının da artmıştır. İş parçası yüzeyine daha yoğun bir enerji boşalımının olması sonucu olarak yüzeyden daha fazla malzeme erozyon edilmiştir. Yüzeyden kaldırılan malzeme miktarının artması, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü de azaltmıştır. Akım değerinin artması ile yüzeyde oluşan kraterler de daha geniş olmuştur.



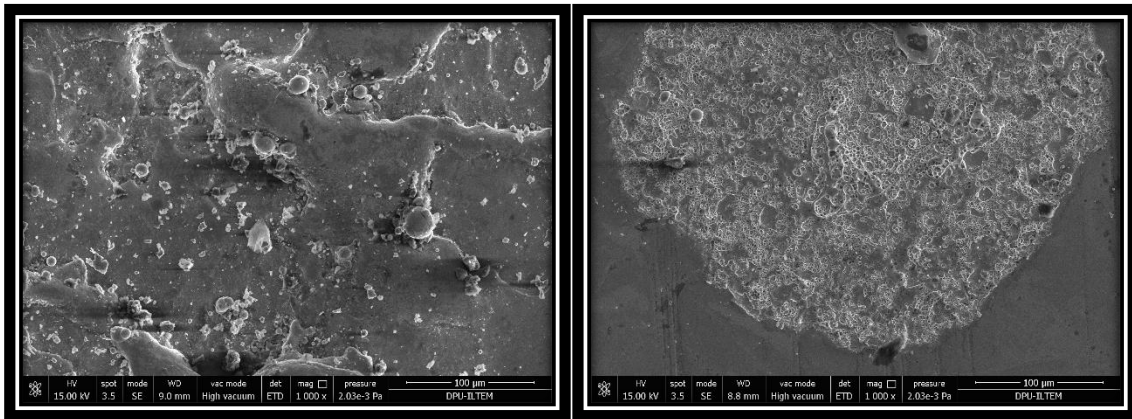
Şekil 7.13. 2'nolu numune; Akım:6A $T_{on}:50 \mu s$ Vurum Bekleme süresi $T_{off}:6 \mu s$, $\dot{M}_H:34,9$ (gr/dak), $E_{AH}:1,29$ (gr/dak), $R_a:0.010$ (μm)



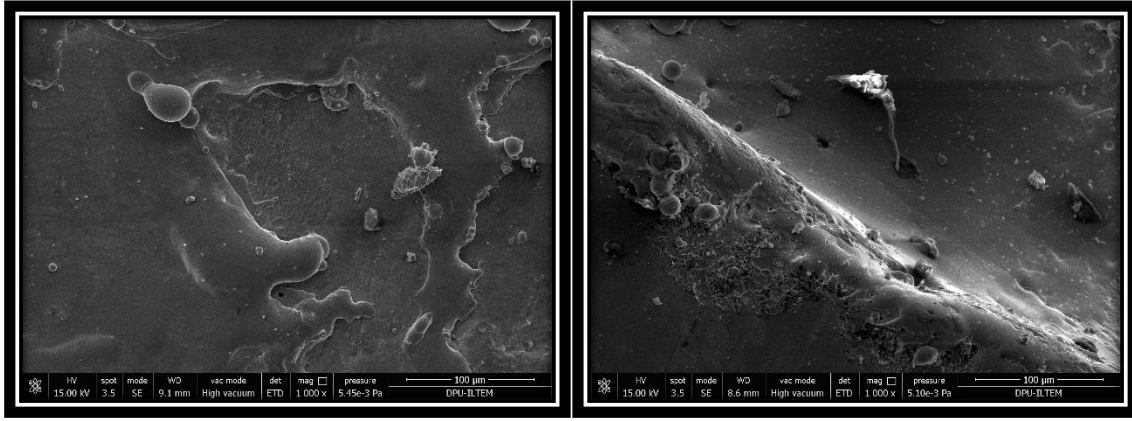
Şekil 7.14. 5'nolu numune; Akım:6A T_{on} :100 μs T_{off} :24 μs $\dot{I}H$:36.5(gr/dak),
EAH:0,67(gr/dak), R_a :0.012(μm)



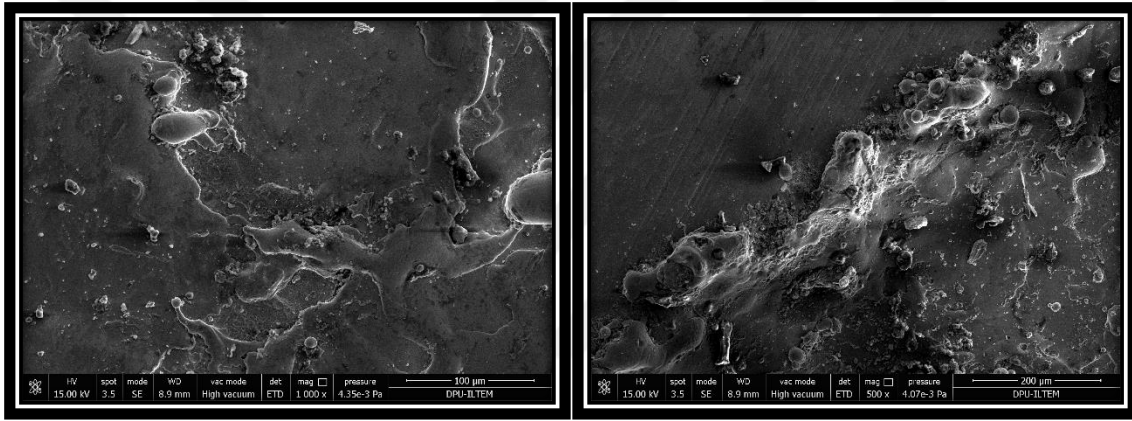
Şekil 7.15. 12'nolu numune; Akım:12A, T_{on} :50 μs , T_{off} :6 μs , $\dot{I}H$:82,2(gr/dak),
EAH:9,26(gr/dak), R_a :0.019(μm)



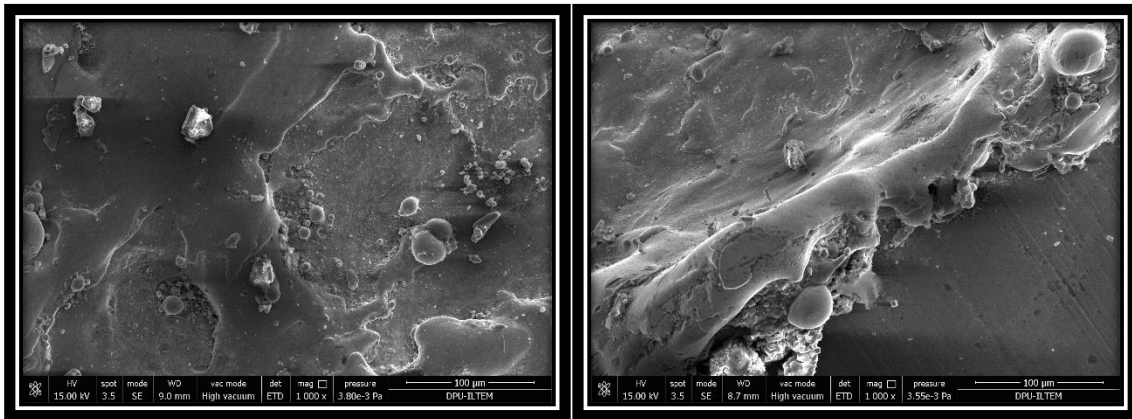
Şekil 7.16. 15'nolu numune; Akım:12A, T_{on} :100 μs , T_{off} :24 μs , $\dot{I}H$:139,4(gr/dak),
EAH:7.08(gr/dak), R_a :0.037 (μm)



Şekil 7.17. 16'nolu numune; Akım:12A, T_{on} :200 μs , T_{off} :48 μs , İİH:273(gr/dak), EAH:27.07(gr/dak), R_a :0.052 (μm)



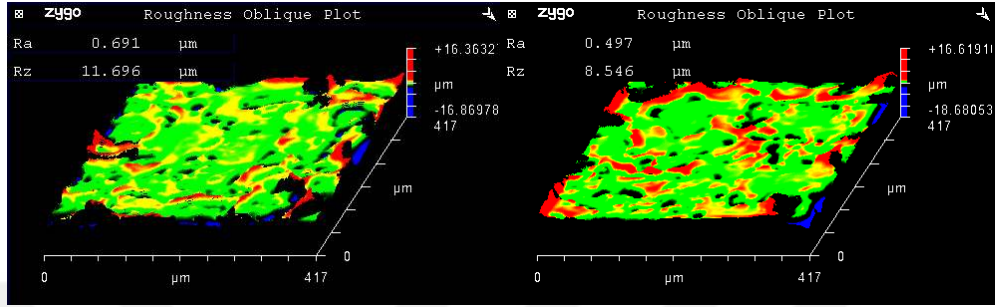
Şekil 7.18. 20'nolu numune; Akım:24A, T_{on} :50 μs , T_{off} :6 μs , İİH:230(gr/dak), EAH:20(gr/dak), R_a :0.227 (μm)



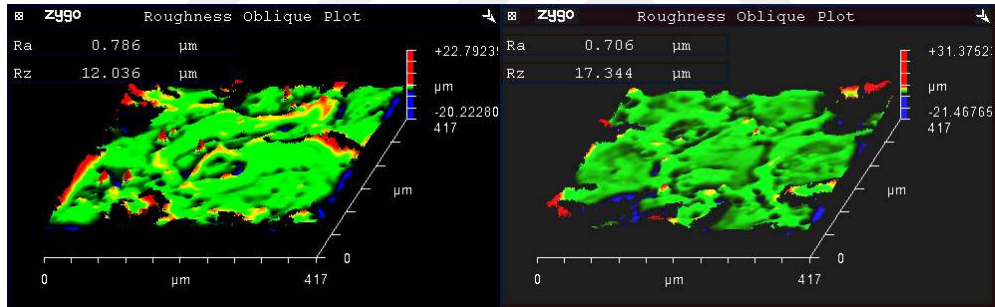
Şekil 7.19. 23'nolu numune; Akım:24A, T_{on} :100 μs , T_{off} :24 μs , İİH:247,2(gr/dak), EAH:50(gr/dak), R_a :0.36 (μm)

7.5. Bor Alaşımli Çeliğin Malzeme Yüzeylerinin Yüzey Topografya İncelemesi

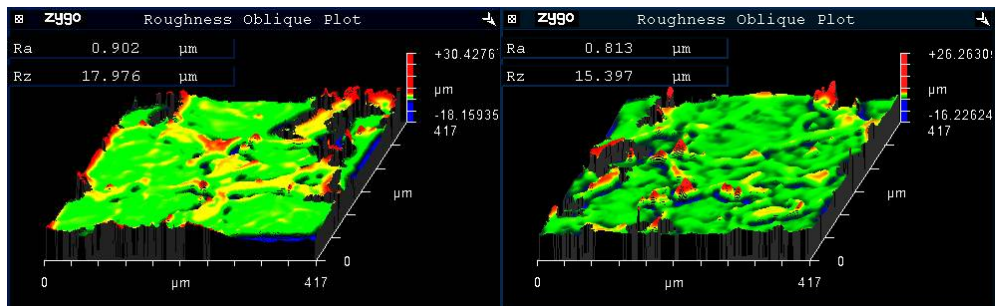
Yüzey topografya analizleri farklı parametre için görüntülenmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 7.20- Şekil 7.25. verilmiştir. Daha önce ölçülen yüzey pürüzlülük değeri ile sonuçlar uyumlu görünmektedir.



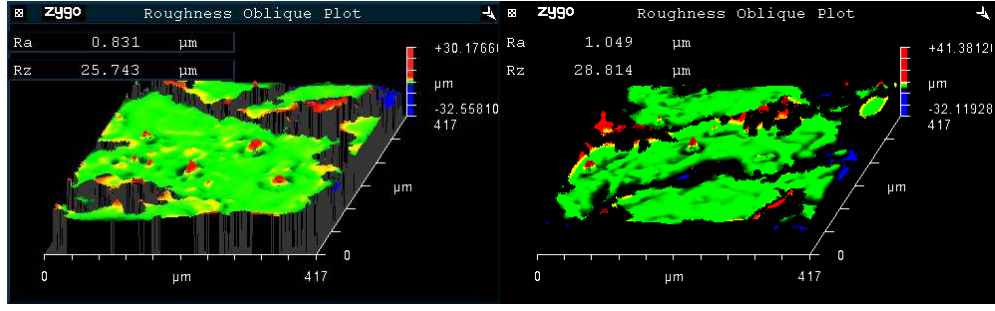
Şekil 7.20. 2'nolu numune yüzey topografya görüntüsü; Akım:6A T_{on} :50 μ s T_{off} :6 μ s İİH:34,9(gr/dak), EAH:1,29(gr/dak), R_a :0.010(μ m)



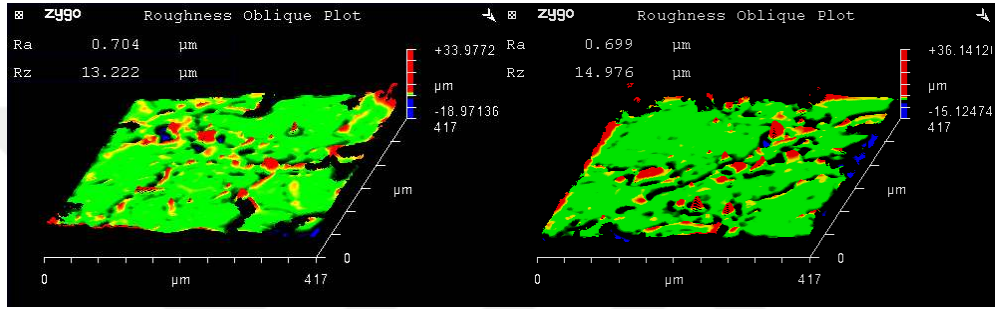
Şekil 7.21. 5'nolu numune yüzey topografya görüntüsü; Akım:6A , T_{on} :100 μ s, T_{off} :24 μ s İİH:36.5(gr/dak), EAH:0,67(gr/dak), R_a :0.012(μ m)



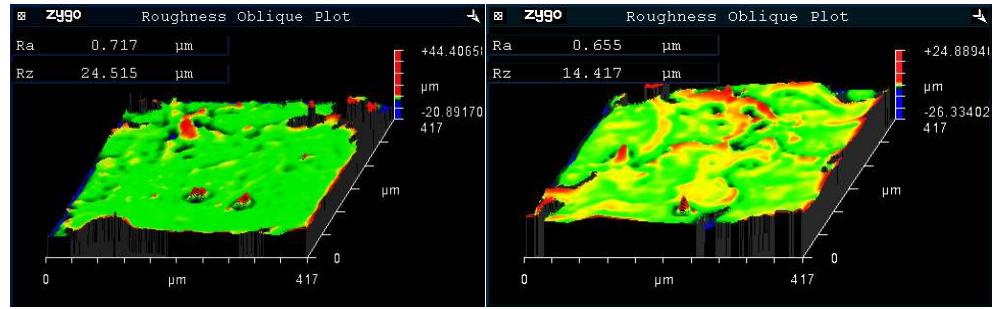
Şekil 7.22. 12'nolu numune topografya görüntüsü; Akım:12A, T_{on} :50 μ s, T_{off} :6 μ s, İİH:82,2(gr/dak), EAH:9,26(gr/dak), R_a :0.019(μ m)



Şekil 7.23. 15'nolu numune topografya görüntüsü; Akım:12A, T_{on} :100 μs , T_{off} :24 μs
 $\dot{I}H$:139,4(gr/dak), EAH:7.08(gr/dak), R_a :0.037 (μm)



Şekil 7.24. 20'nolu numune yüzey topografya görüntüsü; Akım:24A, T_{on} :50 μs
 T_{off} :6 μs $\dot{I}H$:230(gr/dak), EAH:20(gr/dak), R_a :0.227 (μm)



Şekil 7.25. 23'nolu numune yüzey topografya görüntüsü; Akım:24A, T_{on} :100 μs ,
 T_{off} :24 μs , $\dot{I}H$:247,2(gr/dak), EAH:50(gr/dak), R_a :0.36 (μm)

BÖLÜM 8

DENEY SONUÇLARININ İSTATİKSEL ANALİZİ VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

8.1. 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[24, 25]

Genellikle bir ürüne etki eden çok sayıda değişken olduğundan bu değişkenlerin uygun değer 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.) olacaktır ve bu da problemi daha da zorlaştıracaktır. Taguchi metodu ise, üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışmaktadır[25, 26].

İşleme performansının çıktılarını (İİH, EAH, İş parçası yüzey pürüzlülüğü) optimize etmek için kullanılan işleme parametrelerinin en uygun 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 [27].

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

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

Bu çalışmada işleme parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresi), işleme performansının çıktılarına (İİH, EAH, İş parçası yüzey pürüzlülükleri) 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 (L_{27}) 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, iş parçası işleme hızı için en büyük en iyi kalite karakteristiğine göre hesap yapılırken, elektrot aşınma hızı, İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü, elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri için ise en küçük en iyi kalite karakteristiğine göre hesap yapılmıştır. Performans çıktıları Çizelge 8.1.'de verilmiştir.

Çizelge 8.1. İşleme Performansının Çıktıları İçin Kullanılan Taguchi (L_{27}) Ortogonal Dizisi Sinyal/gürültü (dp) değerleri

Akım, I, (Amper)	Ark üresi, μs	Vurum bekleme süresi, μs	İş Parçası İşleme Hızı	Elektrot Aşınma Hızı	Yüzey pürüzlülüğü	SNRA1	MEAN1	SNRA2	MEAN2	SNRA3	MEAN3
6	50	6	0,054320	2,58665	0,0110	-25,3009	0,054320	-8,2548	2,58665	39,1721	0,0110
6	50	24	0,034990	1,29592	0,0100	-29,1211	0,034990	-2,2516	1,29592	40,0000	0,0100
6	50	48	0,042765	0,97194	0,0120	-27,3781	0,042765	0,2472	0,97194	38,4164	0,0120
6	100	6	0,046028	0,52604	0,0110	-26,7395	0,046028	5,5796	0,52604	39,1721	0,0110
6	100	24	0,036570	0,67723	0,0120	-28,7374	0,036570	3,3853	0,67723	38,4164	0,0120
6	100	48	0,049886	0,71266	0,0110	-26,0404	0,049886	2,9424	0,71266	39,1721	0,0110
6	200	6	0,035059	0,53937	0,0110	-29,1039	0,035059	5,3622	0,53937	39,1721	0,0110
6	200	24	0,101580	0,94056	0,0260	-19,8638	0,101580	0,5323	0,94056	31,7005	0,0260
6	200	48	0,042001	0,18462	0,0110	-27,5347	0,042001	14,6744	0,18462	39,1721	0,0110
12	50	6	0,035205	0,00415	0,0450	-29,0680	0,035205	47,6340	0,00415	26,9357	0,0450
12	50	24	0,229319	0,00129	0,0120	-12,7912	0,229319	57,8159	0,00129	38,4164	0,0120
12	50	48	0,082252	0,00927	0,0190	-21,6971	0,082252	40,6604	0,00927	34,4249	0,0190
12	100	6	0,096339	0,00275	0,0280	-20,3239	0,096339	51,2053	0,00275	31,0568	0,0280
12	100	24	0,153770	0,00248	0,0290	-16,2626	0,153770	52,1104	0,00248	30,7520	0,0290
12	100	48	0,139414	0,00709	0,0370	-17,1139	0,139414	42,9885	0,00709	28,6360	0,0370
12	200	6	0,273014	0,02708	0,0520	-11,2763	0,273014	31,3484	0,02708	25,6799	0,0520
12	200	24	0,184641	0,00033	0,0290	-14,6735	0,184641	69,7144	0,00033	30,7520	0,0290
12	200	48	0,152699	0,01776	0,0340	-16,3233	0,152699	35,0133	0,01776	29,3704	0,0340
24	50	6	0,283333	0,02917	0,0280	-10,9540	0,283333	30,7023	0,02917	31,0568	0,0280
24	50	24	0,230000	0,02000	0,2270	-12,7654	0,230000	33,9794	0,02000	12,8795	0,2270
24	50	48	0,180131	0,07642	0,1198	-14,8882	0,180131	22,3359	0,07642	18,4309	0,1198
24	100	6	0,328571	0,04286	0,0290	-9,6674	0,328571	27,3595	0,04286	30,7520	0,0290
24	100	24	0,308823	0,04706	0,0270	-10,2058	0,308823	26,5472	0,04706	31,3727	0,0270
24	100	48	0,247222	0,05000	0,0360	-12,1383	0,247222	26,0206	0,05000	28,8739	0,0360
24	200	6	0,400000	0,00937	0,2900	-7,9588	0,400000	40,5606	0,00937	10,7520	0,2900
24	200	24	0,283333	0,02917	0,0320	-10,9540	0,283333	30,7023	0,02917	29,8970	0,0320
24	200	48	0,230000	0,02000	0,0370	-12,7654	0,230000	33,9794	0,02000	28,6360	0,0370

Çizelge 8.2. Kullanılan faktör (değişken) ve seviyeleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Boşalım Akım (Amper)	6	12	24
Vurum Süresi (T_{on})	50	100	200
Vurum bek.süresi (T_{off})	6	24	48

8.1.1. Sinyal/Gürültü (db) Grafikleri

Taguchi yöntemine dayanarak (L_{27}) 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.

8.1.2. İş parçası İşleme Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

İş parçası işleme hızı için sinyal/gürültü (s/n) oranları en büyük en iyi eşitliğine (Eşitlik 4.12) yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere göre İş parçası işleme hızı için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 8.1’de ki gibi çizilmiştir.

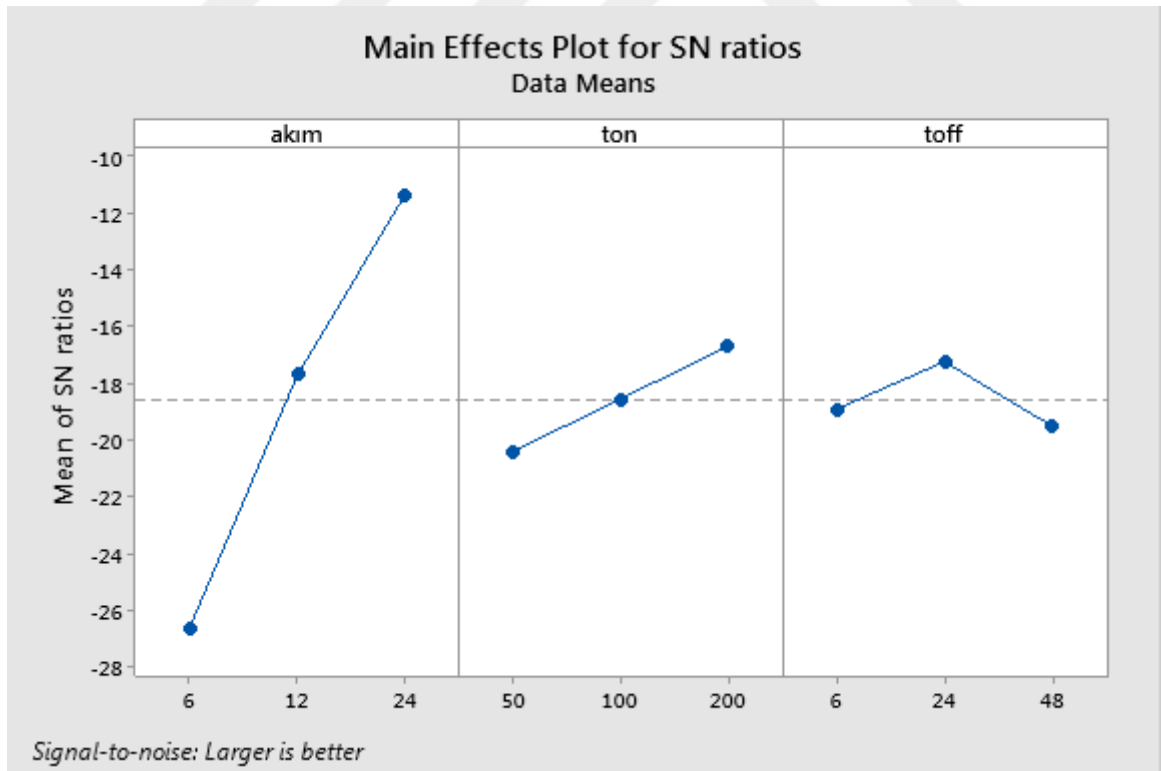
Taguchi Analysis: İHH versus akım; Vurum süresi (T_{on}); T_{off}

Response Table for Signal to Noise Ratios Larger is better

Level	Akım	Vurum süresi (T_{on})	T_{off}
1	-26,65	-20,44	-18,93
2	-17,73	-18,58	-17,26
3	-11,37	-16,72	-19,54
Delta	15,28	3,72	2,28
Rank	1	2	3



Şekil 8.1. İİH için S/N oranı ortalamaları grafiği



Şekil 8.2. İş parçası işleme hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği

8.1.3. Elektrot Aşınma Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

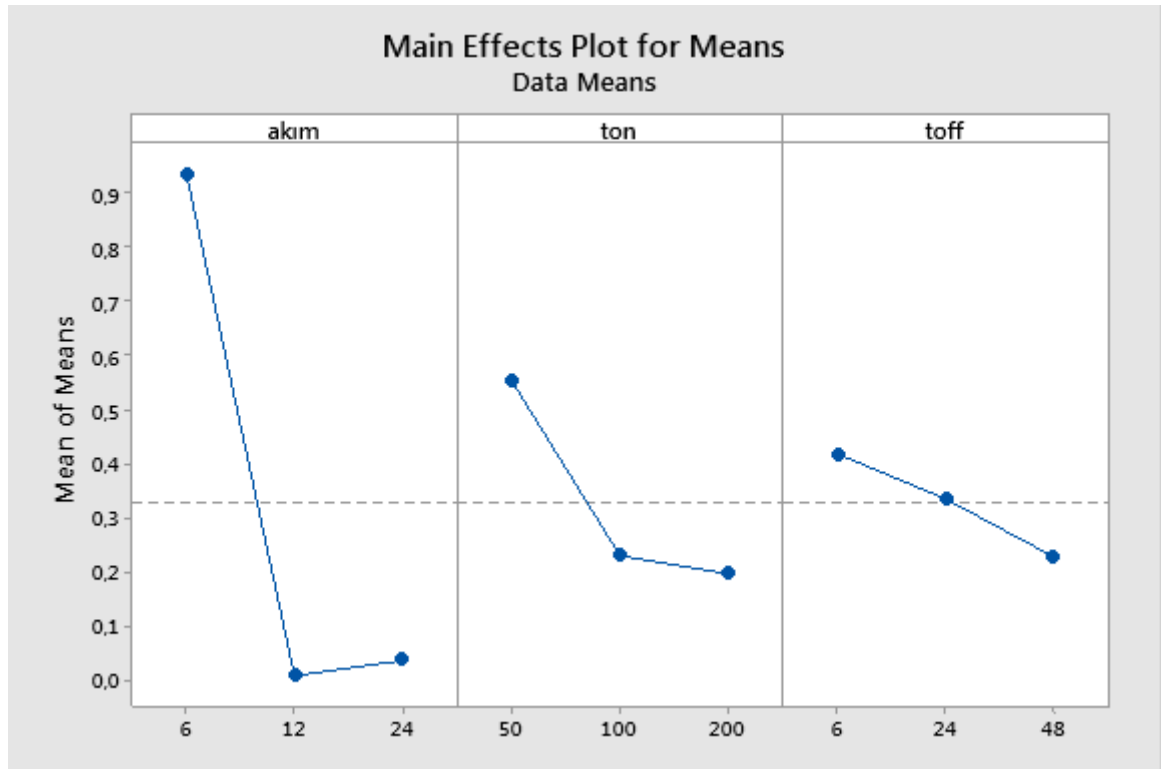
Elektrot aşınma hızı için sinyal/gürültü (s/n) oranları en küçük en iyi eşitliği (Eşitlik 4.13) yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere göre elektrot aşınma hızı için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 8.3’de ki gibi çizilmiştir.

Taguchi Analysis: EAH versus akım; Vurum süresi (T_{on}); T_{off}

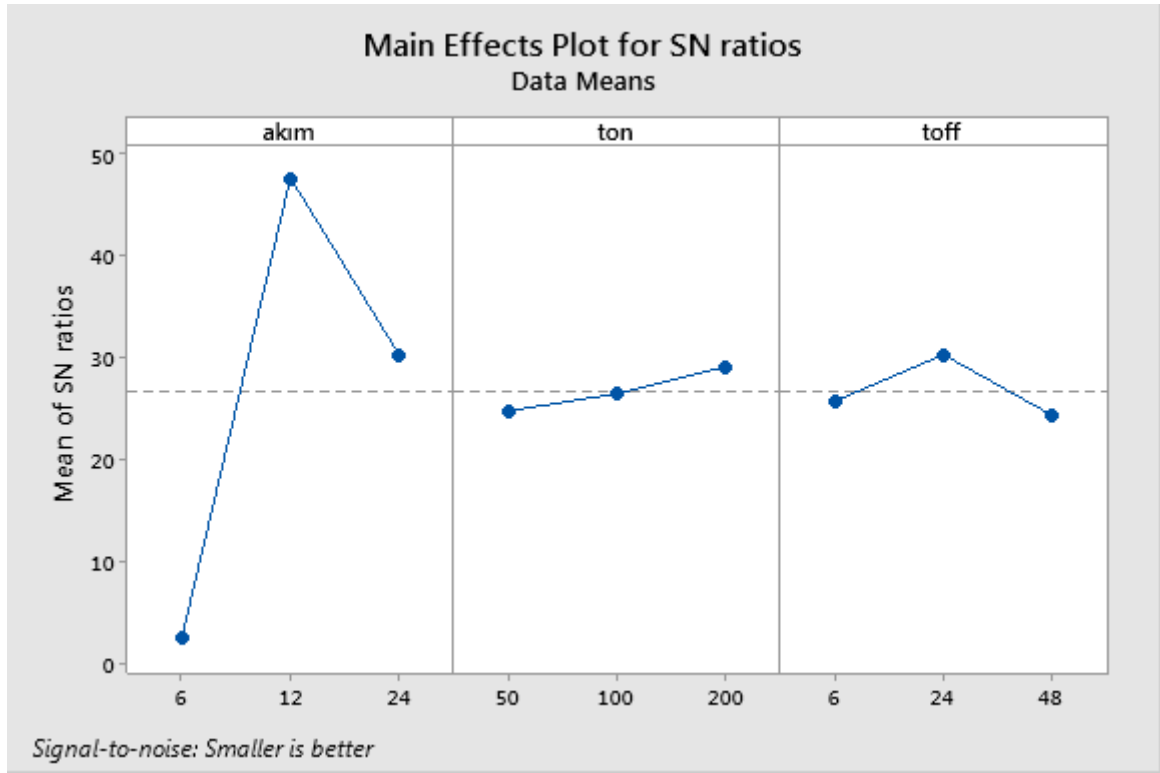
Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	Akım	Vurum süresi (T_{on})	T_{off}
1	2,469	24,763	25,722
2	47,610	26,460	30,282
3	30,243	29,099	24,318
Delta	45,142	4,335	5,964
Rank	1	3	2



Şekil 8.3. Elektrot aşınma hızı için oranı ortalamaları grafiği



Şekil 8.4. Elektrot aşınma hızı için sinyal/gürültü(db) grafiği

Taguchi Analysis: Yüzey Pürüzlülüğü versus akım; Vurum süresi (T_{on}); T_{off}

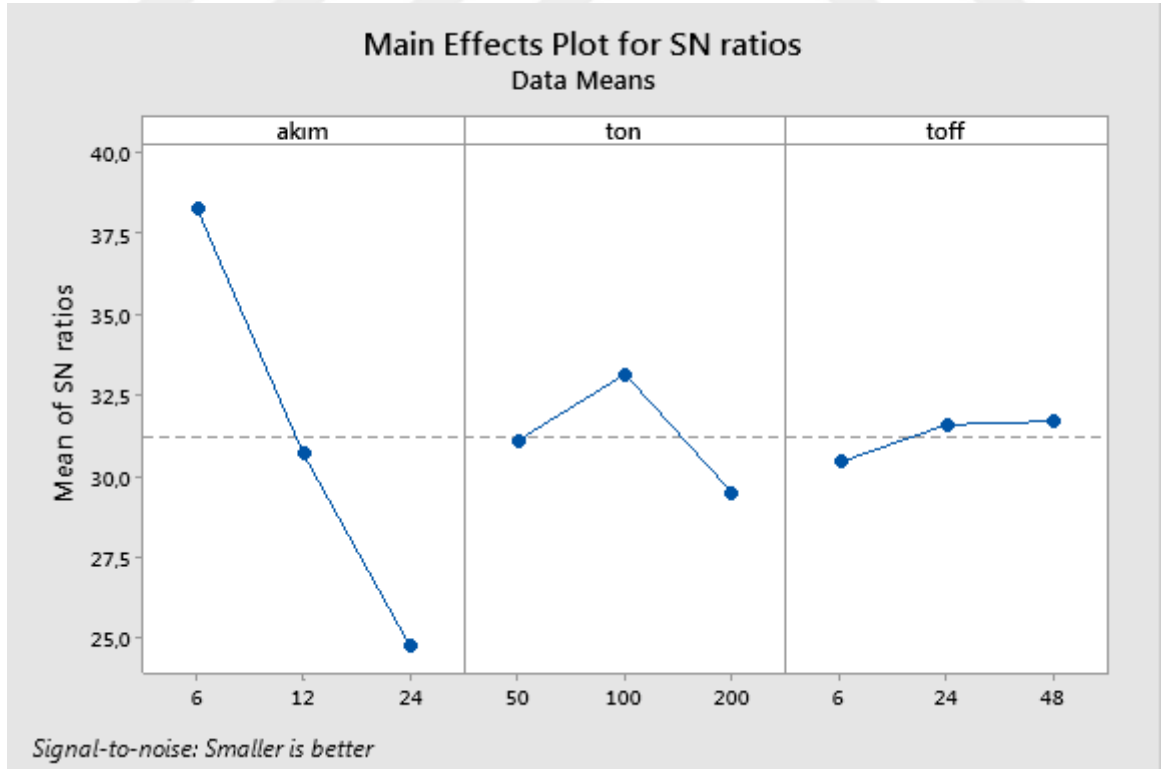
Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	Akım	Vurum süresi (T_{on})	T_{off}
1	38,27	31,08	30,42
2	30,67	33,13	31,58
3	24,74	29,46	31,68
Delta	13,53	3,67	1,26
Rank	1	2	3



Şekil 8.5. İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü hızı için oranı ortalamaları grafiği



Şekil 8.6. İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü hızı için sinyal/gürültü (db) grafiği

A=Akım	B=T _{off}	C= T _{on}
A1=6A	B1=50	C1=6
A2=12A	B2=100	C2=24
A3=24A	B3=200	C3=48

A2B1C2 kombinasyonu bizim için İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü için optimal kombinasyondur. A2B1C2 kombinasyonu (boşalım akımı 12 A, vurum süresi 50 μ s, vurum bekleme süresi 24 μ s) işleme şartına karşılık gelmektedir, bu işleme şartında yapılan deney sonucuna bakılarak, bu kombinasyonun İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü için en düşük işleme kombinasyonu olduğu gözlenmiştir. Grafiklerle yardımıyla İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü için etki oluşturan işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre, boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresidir.

8.2. 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 iyiye, 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 [31]. Bu çalışmada Minitab programı kullanılarak varyans analiz yöntemi (ANOVA) uygulanmıştır ve işleme parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi) işleme performansının çıktıları (İİH, EAH, İş parçası yüzey pürüzlülüğü) üzerine etkileri incelenmiştir.

8.2.1. İş parçası İşleme Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları

ANOVA analizi İş parçası 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.

Çizelge 8.3. İş parçası işleme Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Source (Faktörler)	DF (Serbestlik derecesi)	Adj SS (Kareler toplamı)	Adj μs (Kareler Ortalaması)	F-Value (F değeri)	P-Value (P değeri)
Akım	2	0,23414	0,117072	34,94	0,000
T _{on}	2	0,01568	0,007838	0,63	0,541
T _{off}	2	0,01134	0,005668	0,45	0,644
Hata	72	0,68251	0,028437		
Toplam	80	0,94367			

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).

$$SST = SSA + SSB + SSC + SSD \dots\dots\dots\text{Eşitlik 4.12}$$

Bu eşitlikteki; SSA boşalım akımının kareler toplamı, SSB vurum süresinin kareler toplamı, SSC vurum bekleme süresinin kareler toplamı, SSD ise hata değerinin kareler toplamıdır.

$$SST = 0,23414 + 0,01568 + 0,01134 + 0,68251 = 0,94367$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = \left(\frac{SSA}{SST} \right) \times 100 = (0,23414/0,94367) \times 100 = \%24,8$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{SSB}{SST} \right) \times 100 = (0,01568/0,94367) \times 100 = \%1,67$$

$$\text{Vurum bek. sür. yüzde katkısı} = \left(\frac{SSC}{SST} \right) \times 100 = (0,01134/0,94367) \times 100 = \% 1.2$$

İş parçası işleme hızına etkileyen işlem parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre, vurum bekleme süresi, vurum süresi, boşalım akımı ve elektrot çapıdır. Elektrot çapının İş parçası işleme hızına etkisinin çok küçük olduğu görülmüştür.

8.2.2. Elektrot Aşınma Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları

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.

Çizelge 8.4. Elektrot Aşınma Hızı İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Source (Faktörler)	DF (Serbestlik derecesi)	Adj SS (Kareler toplamı)	Adj μs (Kareler Ortalaması)	F-Value (F değeri)	P-Value (P değeri)
Akım	2	5,029	2,5146	15,61	0,000
T _{on}	2	0,7061	0,3531	1,03	0,371
T _{off}	2	0,1647	0,08237	0,23	0,799
Hata	72	20,786	0,86608		
Toplam	80	26,6858			

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

$$SST = 5,029 + 0,7061 + 0,1647 + 20,786 = 26,6858$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = \left(\frac{SSA}{SST} \right) \times 100 = (5,029/26,6858) \times 100 = \%18,8$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{SSB}{SST} \right) \times 100 = (0,7061/26,6858) \times 100 = \%2,6$$

$$\text{Vurum bek. sür. yüzde katkısı} = \left(\frac{SSC}{SST} \right) \times 100 = (0,1647/26,6858) \times 100 = \% 0$$

8.2.3. İş parçası Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Elektrot ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileyen işleme parametreleri büyükten küçüğe etki sırasına göre, boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi. Vurum bekleme süresi iş parçası ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkisinin çok küçük olduğu görülmüştür

Çizelge 8.5. İş parçası Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Source (Faktörler)	DF (Serbestlik derecesi)	Adj SS (Kareler toplamı)	Adj μs (Kareler Ortalaması)	F-Value (F değeri)	P-Value (P değeri)
Akım	2	0,03061	0,015307	4,50	0,022
T _{on}	2	0,006009	0,003005	0,68	0,517
T _{off}	2	0,001971	0,000986	0,21	0,808
Hata	72	0,298202	0,012425		
Toplam	80	0,336792			

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

$$SST = 0,03061 + 0,006009 + 0,001971 + 0,298202 = 0,336792$$

$$\text{Boşalım akımının yüzde katkısı} = \left(\frac{SSA}{SST} \right) \times 100 = (0,03061 / 0,336792) \times 100 = \%9$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{SSB}{SST} \right) \times 100 = (0,006009 / 0,336792) \times 100 = \%1,78$$

$$\text{Vurum bek. sür. yüzde katkısı} = \left(\frac{SSC}{SST} \right) \times 100 = (0,001971 / 0,336792) \times 100 = \% 0.5$$

SONUÇ

Bu çalışmada bor alaşımlı çeliğin EEİ ile işlenmesi sırasında işleme parametrelerinin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi), işleme performanslarının çıktıları (iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), iş parçası yüzey pürüzlülükleri) üzerine etkileri incelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), iş parçası yüzey pürüzlülüğünün boşalım akımının artmasıyla birlikte artış gösterdiği, İİH, iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerlerinin vurum süresinin artmasıyla birlikte artış gösterdiği gözlenmiştir. En düşük İİH 6 A akımında ve 50 μs T_{on} süresinde yaklaşık 0,03498996 gr/dak en yüksek İİH ise 24 A akımında ve 200 μs T_{on} süresinde yaklaşık 0,4157895 gr/dak olarak hesaplanmıştır.

EAH ise genel olarak boşalım akımının 12 A ve 24 A olduğu deney şartlarında vurum süresinin artmasıyla birlikte azalırken, boşalım akımının 12 A ve vurum bekleme süresinin (6, 48 μs) olduğu deney şartlarında ise vurum süresinin artmasıyla artış göstermiştir. En düşük EAH 12 A akımında ve 200 μs T_{on} süresinde yaklaşık 0,000326 gr/dak en yüksek EAH ise 6 A akımında ve 50 μs T_{on} süresinde yaklaşık 2,586653 gr/dak olarak hesaplanmıştır. Vurum süresinin elektrot yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin az olduğu görülmüştür. İİH, EAH değerlerinin vurum bekleme süresi arttıkça azaldığı gözlenmiştir, vurum bekleme süresinin İş parçası yüzey pürüzlülükleri değerleri üzerine etkisinin az olduğu görülmüştür. En yüksek R_a değeri 0,1198 $T_{on}=50\mu s$ Akım=24 A değerinde, en düşük R_a ise 0,011 olarak $T_{on}=200\mu s$ değerinde ölçülmüştür

Elde edilen deneysel veriler kullanılarak Taguchi Deneysel tasarımı uygulanmıştır, (L_{27}) ortogonal dizileri kullanılarak sinyal/gürültü (s/n) oranları hesaplanmış ve sonuçlar optimize edilmiştir. İş parçası işleme hızı için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu ($I=12A$, $T_{on}=100\mu s$, $T_{off}=6\mu s$), elektrot aşınma hızı için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu ($I=24A$, $T_{on}=100\mu s$, $T_{off}=6\mu s$), iş parçası yüzey pürüzlülüğü için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonu (boşalım akımı 12 A, vurum süresi 50 μs , vurum bekleme süresi 24 μs),

Ayrıca ANOVA Analizi uygulanarak işleme parametrelerin (boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi) işleme performansının çıktıları (İİH, EAH, iş parçası yüzey pürüzlülüğü) üzerine etki yüzdeleri hesaplanmıştır. İş parçası işleme hızına etki eden parametreler büyük etkiden küçüğe doğru sırasıyla; boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresidir. Elektrot aşınma hızına etki eden parametreler büyük etkiden küçüğe doğru sırasıyla; boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresidir. Vurum süresinin elektrot aşınma hızına etkisinin çok az olduğu görülmüştür. İş parçası ortalama yüzey pürüzlülük değerine etki eden parametreler büyük etkiden küçüğe doğru sırasıyla; boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresidir. Vurum bekleme süresinin iş parçası ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkisinin çok küçük olduğu görülmüştür.



KAYNAKLAR

1. Benedict, G.F., Nontraditional manufacturing processes. Vol. 19. 1987: CRC press.
2. Özerkan, H., Elektro erozyon ile işlemede toz karışımli dielektrik sıvının işleme performansına etkisinin deneysel incelenmesi. 2003, Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-63.
3. Çoğun, C. and A. Erden, Elektro erozyon ile işleme (EDM) performansının bilgisayarlı denetiminin gerçekleştirilmesi. 2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 1986: p. 105-112.
4. Pandey, P.C. and H. Shan, Modern machining processes. 1980: Tata McGraw-Hill Education.
5. Chow, H.-M., et al., Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electro-discharge machining. Journal of Materials Processing Technology, 2000. 101(1-3): p. 95-103.
6. ÇOĞUN, C., B. KOCABAŞ, and A. ÖZGEDİK, Elektro Erozyon ile İşlemede (EEİ) İşparçası Yüzey Pürüzlülük Profilinin Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2004. 19(1).
7. Lee, S. and X. Li, Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide. Journal of materials processing Technology, 2001. 115(3): p. 344-358.
8. Hourmand, M., et al., Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg 2 Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR–RSM approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. 77(5-8): p. 831-838.
9. Ming, Q.Y. and L.Y. He, Powder-suspension dielectric fluid for EDM. Journal of materials processing technology, 1995. 52(1): p. 44-54.
10. UNO, Y., et al., Surface integrity in EDM of aluminum bronze with nickel powder mixed fluid. Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers, 1998. 32(70): p. 24-31.
11. Wang, Z., et al., Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. Journal of Materials Processing Technology, 2002. 129(1-3): p. 139-142.

12. Chen, Y. and S. Mahdavian, Parametric study into erosion wear in a computer numerical controlled electro-discharge machining process. *Wear*, 1999. 236(1-2): p. 350-354.
13. Sharif, S., et al., Experimental study of electrical discharge machine (die sinking) on stainless steel 316L using design of experiment. *Procedia Manufacturing*, 2015. 2: p. 147-152.
14. Marafona, J. and C. Wykes, A new method of optimising material removal rate using EDM with copper–tungsten electrodes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000. 40(2): p. 153-164.
15. Gopalakannan, S. and T. Senthilvelan, Effect of electrode materials on electric discharge machining of 316 L and 17-4 PH stainless steels. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2012. 11(07): p. 685.
16. Lim, H., et al., A study on the machining of high-aspect ratio micro-structures using micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. 140(1-3): p. 318-325.
17. ANIL, D., Elektro erozyon ile işlemede stereolitografi tekniği yardımıyla hızlı elektrot üretimi, in *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. 2006. p. 21-36.
18. Özdemir, M., V. Yilmaz, and H. Dilipak, AISI 1040 Çeliğinin Elektro Erozyon İle İşleme Yöntemiyle Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Temel Performans Çıktıları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 3(1): p. 417-426.
19. Abbas, N.M., D.G. Solomon, and M.F. Bahari, A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of machine tools and Manufacture*, 2007. 47(7-8): p. 1214-1228.
20. Chen, Y. and S. Mahdivian, Analysis of electro-discharge machining process and its comparison with experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000. 104(1-2): p. 150-157.
21. Yunus, S.S.M., Effects of Flushing on Electro-discharge Machined Surface. 2008, UMP.
22. Erden, A. and D. Temel. Investigation on the use of water as a dielectric liquid in EDM. in *Proceedings of the Twenty-second International Machine Tool Design and Research Conference*. 1982. Springer.

23. Lin, Y.-C. and H.-S. Lee, Machining characteristics of magnetic force-assisted EDM. International journal of machine tools and manufacture, 2008. 48(11): p. 1179-1186.
24. Taylan, D., Taguchi deney tasarımı uygulaması. 2009, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
25. CANIYILMAZ, E. and F. KUTAY, Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2003. 18(3).
26. Şirvancı, M., Kalite için deney tasarımı" Taguchi yaklaşımı". 1997: Literatür.
27. Lin, Y.-C., et al., Optimization of machining parameters in magnetic force assisted EDM based on Taguchi method. Journal of materials processing technology, 2009. 209(7): p. 3374-3383.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	İbrahim Baki Şahin
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Yıldız Teknik Üniversitesi
Fakülte	Makine Fakültesi
Bölümü	Makine Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2018